

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКО-
ЛОГИЯ»**

№ 1

Новосибирск
СГУГиТ
2026

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН, профессор, научный руководитель
АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального
сырья» (АО «СНИИГГиМС»), научный руководитель Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
М. И. Энов

Доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН,
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск
В. Н. Глинских

Кандидат технических наук, директор Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск
А. П. Хмелинин

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН,
заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
Б. Л. Никитенко

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
Л. М. Буриштейн

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXII Международный научный конгресс,
18–22 мая 2026 г., Новосибирск : сборник материалов в 9 т. Т. 2: Междуна-
родная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления
и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных иско-
паемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2026. № 1. –
292 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2026-2-1

В сборнике опубликованы материалы XXII Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

М. М. Буслов¹✉, Ю. А. Бишаев¹, А. В. Травин¹, С. Ф. Голицина¹

Тектоническая эволюция Сибирского кратона и складчатого обрамления в мезозой и ее влияние на формирование Западно-Сибирского бассейна

¹Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: buslov@igm.nsc.ru

Аннотация. В статье на основе результатов термохронологического анализа пород Сибирского кратона и его южного и северо-восточного складчатого обрамления, поднятий и горных сооружений западного и южного обрамления Западно-Сибирского бассейна и U-Pb датирования детритовых цирконов его осадочного выполнения предложена методическая основа для палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций Северной Евразии в мезозое. Показана взаимосвязь формирования Западно-Сибирского бассейна с тектонической эволюцией Сибирского кратона и его складчатого обрамления.

Ключевые слова: Сибирский кратон, Монголо-Охотский и Верхоянский коллизионные орогенные пояса, Западно-Сибирский бассейн, тектонотермальный анализ, U-Pb датирование детритовых цирконов

M. M. Buslov¹✉, Yu. A. Bishaev¹, A. V. Travin¹, S. F. Golitsina¹

Tectonic evolution of the Siberian craton and its folded framework in the mesozoic and its influence on the formation of the West Siberian sedimentary basin

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
¹Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: buslov@igm.nsc.ru

Abstract. This article, based on the results of thermochronological analysis of rocks from the Siberian Craton and its southern and northeastern folded margins, uplifts and mountain structures in the western and southern margins of the West Siberian Basin, and U-Pb dating of detrital zircons from its sedimentary fill, proposes a methodological framework for paleogeographic and paleogeodynamic reconstructions of Northern Eurasia in the Mesozoic. The relationship between the formation of the West Siberian sedimentary basin and the tectonic evolution of the Siberian Craton and its folded margins is demonstrated.

Keywords: Siberian Craton, Mongol-Okhotsk and Verkhoyansk collisional orogenic belts, West Siberian Basin, teconothermal analysis, U-Pb dating of detrital zircons

Введение

Юго-восточная окраина Евразии образовались в мезозое в результате проявления процессов субдукции, приведших к формированию активных континентальных окраин, аккреций островных дуг и коллизий континентальных блоков. Монголо-Охотский (МООП) (рис.1) коллизионные орогенные пояса являются

ярким примером мезозойского континентального роста Евразии по обрамлению Сибирского кратона [1-4].

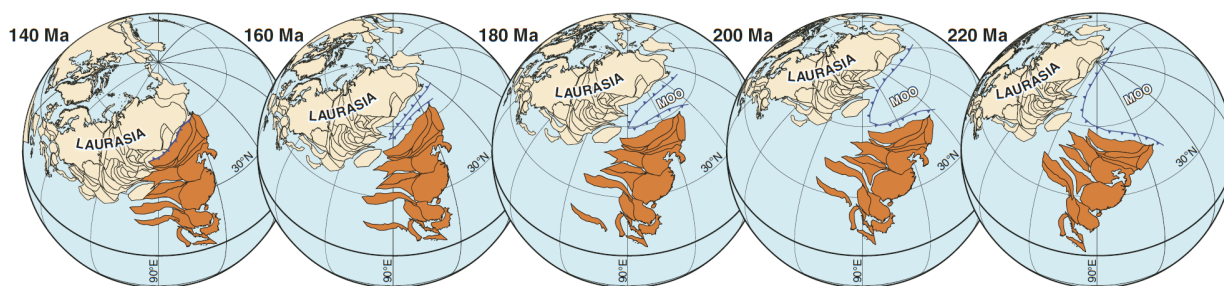


Рис. 1. Палеогеодинамические реконструкции коллизии Северо-Китайского континента и Евразии [4].

Цель настоящей статьи: на основе результатов термохронологического анализа пород Сибирского кратона и его южного и северо-восточного складчатого обрамления, поднятий и горных сооружений западного и южного обрамления Западно-Сибирского бассейна и U-Pb датирования детритовых цирконов его осадочного выполнения создать методическую основу для палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций Северной Евразии и показать взаимосвязи формирования Западно-Сибирского бассейна с тектонической эволюцией Сибирского кратона и его складчатого обрамления в мезозой.

Методы и материалы

Для решения проблем палеогеографической и палеогеодинамической эволюции осадочных бассейнов и орогенов в мировой практике используются U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения и термохронологический анализ горных поднятий [5, и ссылки в ней]. Путем корреляции геохронологических, стратиграфических и литологических данных по осадочным бассейнам с данными термохронологического анализа пород их горного обрамления (питающих провинций) можно уверенно выявлять пути рассеивания осадочного материала, определять области их сноса и объемы осадочного материала (коллекторов), поступающего в бассейн седиментации в различные промежутки времени. Полученные распределения возрастов детритовых цирконов сравниваются с возрастами пород горных обрамлений из предполагаемых питающих провинций. Корреляция данных трекового датирования горообразования с данными сравнительного анализа геохронологии цирконов осадочных бассейнов и их горного обрамления позволяют создать методическую основу построения качественных палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций в эволюции осадочных бассейнов и орогенов.

В определение возраста и интенсивности роста горных поднятий широко используется термохронологический анализ, который реконструируется термическую историю геологического объекта на результатах мультиминерального

датирования [6]. Изотопные системы в различных минералах характеризуются разными значениями температуры закрытия. Температуры закрытия U-Pb системы в цирконе около 900°C, закрытия K/Ar изотопной системы в амфиболе находится около 550°C, в мусковите в диапазоне 340-360°C, в биотите в диапазоне 330-350°C, полевых шпатах в диапазоне 240-220°C. Таким образом, Ar/Ar датировки по перечисленным минералам будут фиксировать подъем исследуемой породы с глубин от 10-15 км до 7-8 км. Эффективная температура закрытия трековой системы апатита оценена как 110-120 °C. Метод трекового датирования апатита (AFT) применяется для реконструкции термической истории пород верхних частей континентальной коры (3-5 км) за период до нескольких сотен миллионов лет. Термическая история пород просчитывается компьютерной программой с построением графиков, отображающих тренд изменения температурного режима породы во времени (t-T). Принимая за основу градиент изменения температур с глубиной (25-30°/км), по полученному t-T-тренду можно оценить мощность и скорость денудации. Пологое поведение линии t-T-тренда интерпретируется как период тектонической стабилизации в регионе с формированием пенеплена. Значения наклона линии указывают на скорость и интенсивность денудации, что может рассматриваться как степень тектонической активизации в регионе, выраженной в росте горных поднятий [7].

Результаты

Датирование пород различных регионов северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса методом трекового анализа апатитов (AFT) свидетельствуют [8-11 и др.] о крупных мезозойских поднятиях рельефа в поздней юре-мелу (~160-70 млн. лет). Эти поднятия возникли как результат проявления обширного МООП (рис.2), сформированного при закрытии одноименного океанического бассейна и последующей коллизии Северо-Китайского континента (Амурского супертеррейна) с Сибирским кратоном. Восточное звено орогена (Прибайкалье, Забайкалье, Восточная Монголия и Северный Китай), расположенное в зоне фронтального столкновения Северо-Китайского континента с Сибирским кратоном, претерпело преимущественно складчато-надвиговые деформации. На южных окраинах кратона были сформированы Байкало-Патомская и др. складчато-надвиговые структуры, а в Западном Забайкалье – высокогорная область [12,13], коллизионные граниты и комплексы разрушения орогена: метаморфические ядра и молассы [14,15]. В западном звене, на обширной территории Казахстана, Северного Китая, Монголии, Алтае-Саянской области в результате проявления сдвигово-надвиговых деформаций была образована внутриконтинентальная низкогорная область.

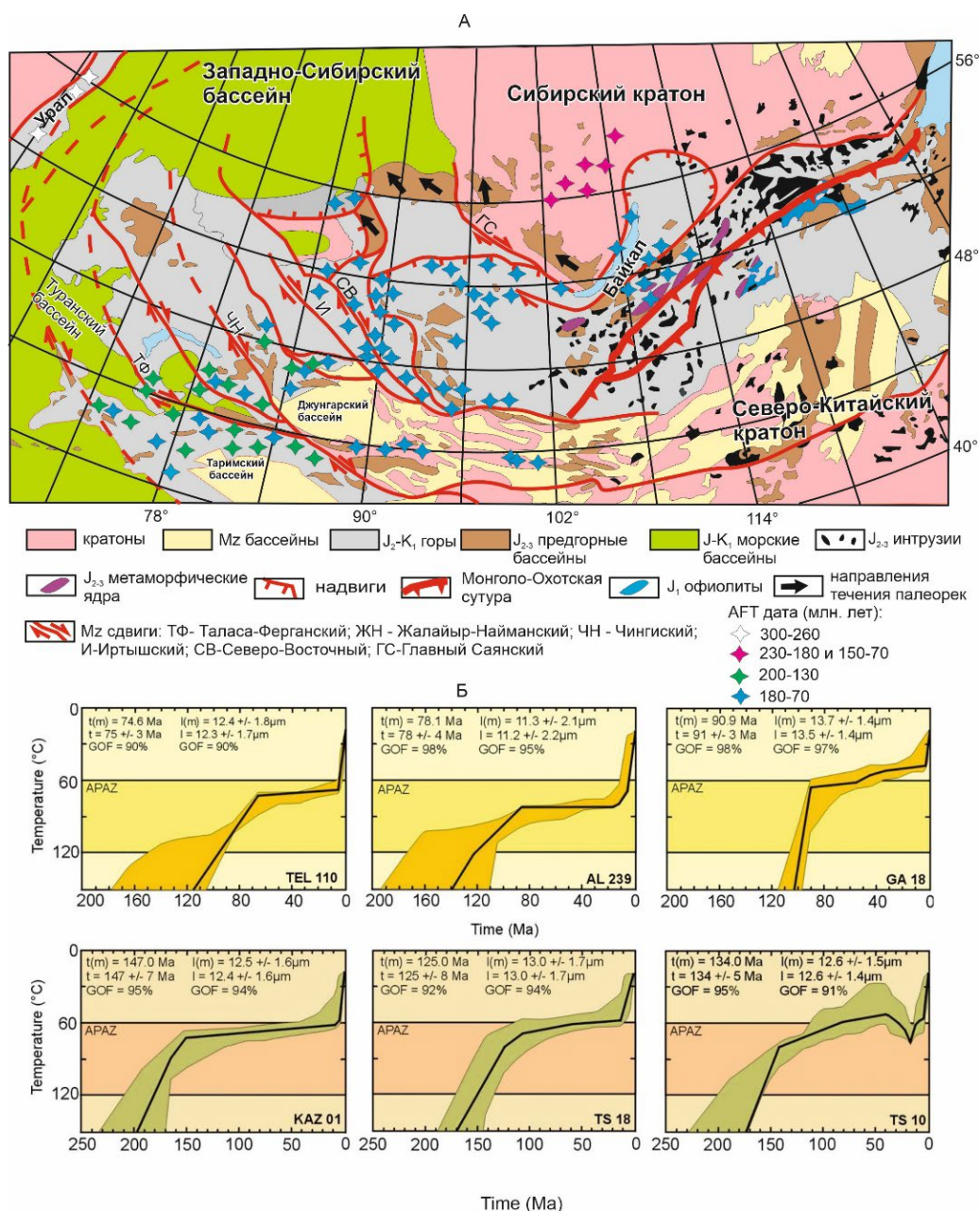


Рис. 2. Мезозойская тектоно-палеогеографическая схема Центральной Азии (А) и результаты трекового датирования апатита Алтая (верхний ряд) и Тянь-Шаня (нижний ряд).

На основе термохронологических исследований, основанных на U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и трековом методах датирования, для позднепалеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита (АВБ) реконструирована тектонотермическая эволюция Забайкалья [12,13]. Последовательное закрытие изотопных систем от циркона, амфибола до биотита свидетельствует о быстром охлаждении пород АВБ сразу после кристаллизации и об эпохе интенсивной денудации пород мощностью до 7-4 км, связанной с обширной позднепалеозойской орогенцией на территории южной Сибири. После эпохи тектонической стабилизации, характеризующейся постепенным закрытием изотопной системы биотита в ранней перми – средней юре (295-170 млн

лет), происходит закрытие изотопной системы полевого шпата в средней юре – раннем мелу (170-140 млн лет). Этот интервал совпадает с началом формирования Монголо-Охотского орогена и характеризуется денудацией около 3 км мощности. Далее, в палеогене-миоцене (60-5 млн лет), на территории Забайкалья происходила медленная денудация, за которой наступил период относительно резкого охлаждения пород в течение последних 5 млн лет и денудацией около 3-2 км мощности, связанной с реактивацией территории Забайкалья в результате дальнего тектонического воздействия Индо-Евразийской коллизии. Высоту горного сооружения Забайкалья в средней юре – раннем мелу можно оценить в 8-6 км, учитывая, что современный рельеф достигает отметок 3-2 км, а при росте горных систем одновременно происходит их разрушение.

Процессы денудации МООП, особенно его восточного звена, привели к образованию обломочного материала, который речными системами [16,17] выносился через транзитные зоны (современные Иркутский, Тувинский, Канско-Ачинский и Кузнецкий прогибы) в шельфовую область Северной Евразии в том числе крупнейший в мире Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн. U-Pb датирование детритовых цирконов указанных бассейнов хорошо коррелируется с возрастами магматических пород, слагающих огромные по размерам гранитойдные массивы Забайкалья и Северной Монголии (Байкало-Витимский, Хангайский и Хэнтэйский), суммарной площадью выходов свыше 300 000 км². Датировки имеют ярко выраженные возрастны пики на 300, 259 и 250 млн лет, что характерно для возрастов гранитойдных массивов Западного Забайкалья и Северной Монголии. Также проявлен пик на 468-482 млн лет, что может свидетельствовать о сносе материала в результате разрушения раннепалеозойских гранитойдов северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса. Древние пики возрастов цирконов в 1800 и 2300-2600 млн лет указывают, что снос в бассейны происходил также с Сибирского кратона. Близкие пики возрастов детритовых цирконов, с увеличением доли докембрийских возрастов детритовых цирконов, характерны для меловых осадков Хатангского прогиба и Карского моря, наиболее удаленных от орогенных поясов.

В результате мезозойских коллизий Северо-Китайского континента с Сибирским кратоном, последний претерпел поднятие и мощную денудацию до 2-4 км, которая выявляется по данным AFT. В работе [18] представлены результаты AFT из керна скважин, вскрывших кровлю кристаллического фундамента Сибирской платформы в Непско-Ботуобинской антеклизе. Полученные трековые возрасты образуют два мезозойских кластера: 1) поздний триас–ранняя юра (231–179 млн лет) и 2) конец поздней юры– ранний мел (150–121 млн лет). Позднетриасово–раннеюрский кластер совпадает с большей частью трековых возрастов, полученных по Гулинскому плутону северной части кратона [19]. Эти датировки маркируют региональный этап воздымания и эрозии на площади всего Сибирского кратона, который проявился синхронно с деформациями на Таймыре [20]. Позднеюрско-раннемеловые трековые возрасты могут отражать заключительный этап коллизии в МООП.

Обсуждение

В раннем мезозое (среднем триасе-юре) океаническая плита Палео-Тетис, включающая докембрийские тектонические блоки, погружалась под Северную Евразию с юга, что привело к формированию кемерийского орогена [3]. Считается, что столкновение Гондванских континентальных блоков с Евразией вызвало реактивацию разломов и поднятие Тянь-Шаня и частично Восточного Казахстана, расположенных вблизи зоны столкновения. Вероятно, что эти территории могли быть источником сноса для триас-раннеюрских отложений, расположенных в основании разреза Западно-Сибирского бассейна. По мнению [1,2,4 и мн. другие] в позднем мезозое (средней юре-раннем мелу) Евразия претерпела интенсивную тектоническую реактивацию, связанную с закрытием Монголо-Охотского океанического бассейна и последующей коллизией с Северо-Китайским кратоном (рис.3).

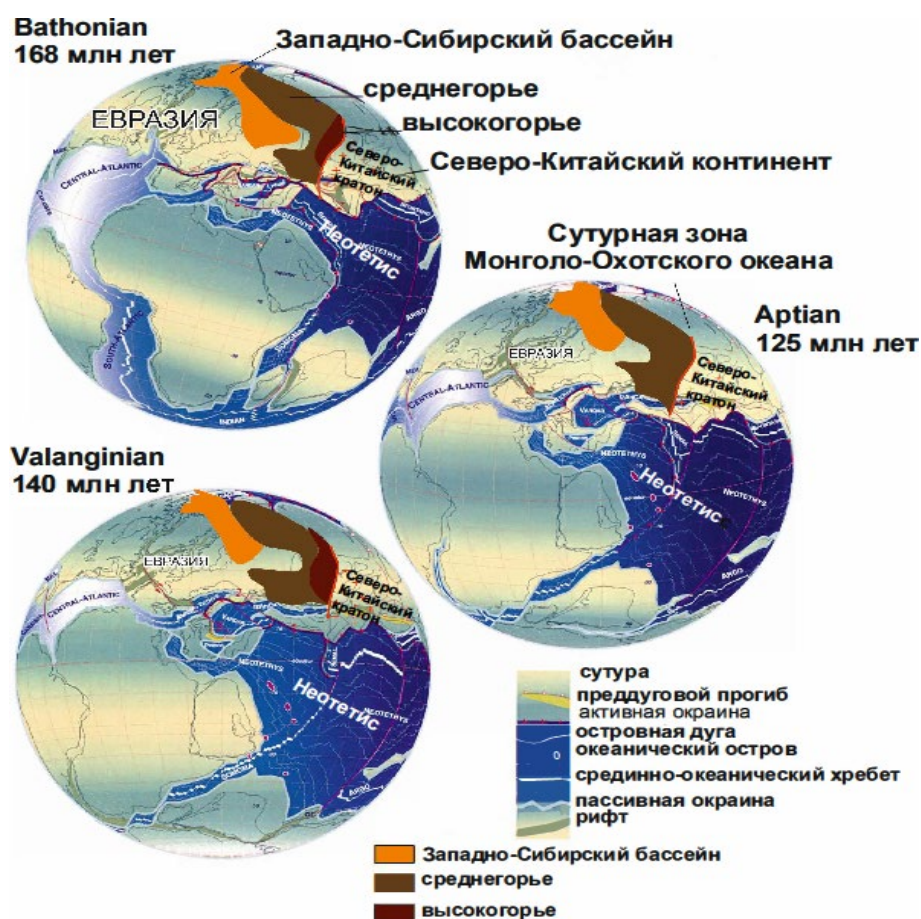


Рис. 3. Палеогеографическая реконструкция Северной Евразии в мезозое.

В результате был сформирован позднемезозойский коллизионный Монголо-Охотский пояс, который протягивается на расстояние свыше 3000 км от Центральной Монголии до Охотского моря. Денудация орогена привела к образованию обломочного материала, который речными системами выносился через транзитные зоны (современные Кузнецкий, Канско-Ачинский и Иркутский

[14,16,17,21]) в шельфовую область Арктического океана, в том числе крупнейший в мире Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн (рис.2).

На обобщениях геолого-геофизических данных показано [22], что при заполнении глубоководного палеобассейна Западной Сибири обломочный материал поступал в основном с Сибирского кратона, Алтае-Саянской складчатой области, в меньшей степени с Урала, Таймыра и Новой Земли. Отмечено, что в раннем мелу (140-125 млн. лет) происходило неравномерно заполнение глубоководного бассейна лавинной седиментацией с формированием клиноформ. Эта неравномерность отображена в асимметрии строения разреза. В восточной части бассейна клиноформы значительно более отчетливо фиксируются по сравнению с западной частью вблизи Урала.

На основе термохронологических данных нами выявлено, что в поздней юре-раннем мелу максимальное горообразование происходило в юго-восточном обрамлении Западно-Сибирского бассейна в Восточной Монголии и Забайкалье. Здесь мощность денудации оценивается до 5-3 км, а высота гор до 8-6 км, что соизмеримо с Гималаями [12,13]. Несомненно, что наличие столь крупного горного сооружения вблизи Западно-Сибирского бассейна явилось основной причиной формирования лавинной седиментации в его юго-восточной и восточной частях, которая происходила за счет катастрофического сползания дельтовых осадков, формирующихся мощной палеоречной системой, сохранившейся в транзитных бассейнах (Иркутском, Канско-Ачинском и Кузнецком).

Заключение

Таким образом, в средней юре-раннем мелу в результате формирования Монголо-Охотского коллизионного орогенов (МООП) по южному обрамлению Сибирского кратона произошли складчато-надвиговые деформации его литосферы и крупные сводовые поднятия внутри, а также общее поднятие. Интенсивное разрушение пород коллизионного орогенов и пород Сибирского кратона, включающего пермско-триасовые траппы, привело к формированию крупнейшего в мире Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна с приуроченностью клиноформ, как результата лавинной седиментации, к его юго-восточной и восточной частям. Формирование клиноформ происходило за счет катастрофического сползания дельтовых осадков, формирующихся мощной палеоречной системой, сохранившейся в транзитных бассейнах (Иркутском, Канско-Ачинском и Кузнецком).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Zorin Yu.A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia//Tectonophysics. 1999.Vol.306.33-56. DOI: 10.1016/S0040-1951(99)00042-6.
- 2.Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г. и др. Модель формирования

- орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. 7–41.
3. Golonka, J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic // Tectonophysics. 2004. V. 381. 235–273. DOI:10.1016/j.tecto.2002.06.004.
4. Van der Voo, R., van Hinsbergen, D.J.J., Domeier, M., et al. Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean: A paleomagnetic and seismological-tomographic analysis, in Anderson, T.H., Didenko, A.N., Johnson, C.L., Khanchuk, A.I., and MacDonald, J.H., Jr., eds., Late Jurassic Margin of Laurasia—A Record of Faulting Accommodating Plate Rotation: Geological Society of America. 2018. Special Paper 513. 589–606. DOI: 10.1130/2015.2513(19).
5. Sharman G.R., Samuel A. J. Sediment unmixing using detrital geochronology // Earth and Planetary Science Letters. 2017. Vol. 477. 183–194. DOI:org/10.1016/j.epsl.2017.07.044.
6. Травин А.В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // Геология и геофизика. 2016. № 57 (3). 553–574.
7. Ketcham, R.A. Forward and inverse modelling of low-temperature thermochronometry data. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2005. Vol. 58. 275–314. DOI:10.2138/rmg.2005.58.11.
8. Буслов М.М., Кох Д.А., Де Граве И. Мезозойско-кайнозойская тектоника и геодинамика Алтая, Тянь-Шаня и северного Казахстана по результатам трекового датирования апатитов // Геология и геофизика. 2008. № 49 (9). 862–870.
9. De Grave, J., De Pelsmaeker, E., Zhimulev, F.I., Glorie, S., Buslov, M.M., Van den haute, P. Meso-Cenozoic building of the northern Central Asian Orogenic Belt: thermotectonic history of the Tuva region // Tectonophysics. 2014. Vol. 621. 44–59. DOI:10.1016/j.tecto.2014.01.039.
10. Glorie, S., De Grave, J., Zhimulev, F.I., Buslov, M.M. et al. Structural control on Meso-Cenozoic tectonic reactivation and denudation in the Siberian Altai: insights from multi-method thermochronometry // Tectonophysics. 2012. Vol. 544–545. 75–92. DOI:10.1016/j.tecto.2012.03.035.
11. Jolivet, M., Ritz, J.-F., Vassallo, R., Larroque, C., Braucher, R., Todt, M., Chauvet, A., Sue, C., Arnaud, N., et al. Mongolian summits: an uplifted, flat, old but still preserved erosion surface // Geology. 2007. Vol. 35. 871–874. DOI:10.1130/G23758A.1.
12. Травин А.В., Буслов М.М., Бишаев Ю.А., Цыганков А.А., Михеев Е.И. Тектонотермическая эволюция Забайкалья в позднем палеозое-кайнозое: термохронология Ангаро-Витимского гранитоидного батолита // Геология и геофизика. 2023. Т. 64 (9). 1303–1317.
13. Buslov M. M., Kulikova A. V., Sklyarov E. V., Travin A. V. Mesozoic Tectonothermal Evolution of the Zagan Metamorphic Core Complex in Western Transbaikalia: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and FTA Dating // Lithosphere. 2024. lithosphere_2023_306. DOI: 10.2113/2024/lithosphere_2023_306.
14. Буслов М.М., Бишаев Ю.А., Травин А.В. Взаимосвязи формирования Западно-Сибирского бассейна и горного обрамления в мезозое: U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения и термохронология порднаний // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2025. Т. 2. № 2. С. 164–170. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-2-2-164-170.
15. Donskaya, V., Windley, B.F., Mazukabzov, A.M., Kröner, A., Sklyarov, E.V., Gladkochub, D.P., Ponomarchuk, V.A., Badarch, G., Reichow, M.K., Hegner, E. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia // Journal of the Geological Society. 2008. Vol. 165. 405–421. DOI: 10.1144/0016-76492006-162.
16. Davies C., Allen M., Buslov M., Safonova I. Deposition in the Kuznetsk Basin, Siberia: insights into the Permian-Triassic transition and the Mesozoic evolution of Central Asia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2010. V. 295. 307–322. doi:10.1016/j.palaeo.2010.06.008.
17. Le Heron D.P., Buslov M.M., Davies C., Richards K., Safonova I.Yu. Evolution of Mesozoic fluvial systems along the SE flank of the West Siberian Basin, Russia // Sedimentary Geology. 2008, V. 208. 45–60. DOI:10.1016/j.sedgeo.2008.05.001.
18. Багдасарян Т.Э., Гайдук А.В., Хубанов В.Б., Латышев А.В., Веселовский Р.В. Первые результаты трекового датирования апатита с применением LA-ICP-MS из кровли фундамента Сибирской платформы (Непско-Ботубинская антеклиза) // Доклады Российской академии

наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 2. 39–43.

19. Мышенкова М.С., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В., Захаров В.С., Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В. Термальная история Гулинского плутона (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11 (1). 75–87.

20. Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., et al. Late Paleozoic – Mesozoic tectonic evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey-Khatanga Depression // Journal of Geodynamics. 2018. V. 119. P. 221–241.

21. Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Михеева Е.А., и др. Источник сноса и палеогеографические условия формирования юрских континентальных отложений на юге Сибирской платформы (по SM-ND- и U-Pb данным) // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 6. 688–692.

22. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Никитенко Б.Л., Попова Н.И., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Западно-Сибирского бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5-6. 745–776.

© М. М. Буслов, Ю. А. Бишаев, А. В. Травин, С. Ф. Голицина, 2026

Т. В. Власова¹, К. И. Канакова^{1,2}✉

Сейсмогеологическая модель и нефтегазоносность Крапивинского месторождения

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская федерация
e-mail: kanakovaki@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Основной целью работы является построение детальной сейсмогеологической модели и обоснование прогноза нефтегазоносности Крапивинского месторождения на основе комплексного анализа материалов сейсморазведки и данных глубокого бурения в пределах исследуемой территории. В ходе выполнения работы проведена корреляция реперных сейсмических горизонтов, осуществлена межскважинная корреляция, выполнена сеймостратиграфическая привязка, а также построен ряд структурных карт и карт изопакит. Установлено, что месторождение характеризуется сложным геологическим строением, в пределах которого выделяется ряд обособленных залежей с различными гипсометрическими отметками водонефтяного контакта (ВНК). Данное «скачкообразное» поведение уровня ВНК объясняется влиянием верхнеюрских (раннемеловых?) разрывных нарушений, выполняющих роль экранов для отдельных залежей. В рамках исследования построена блоковая модель для продуктивных песчаных пластов Ю₁¹⁻² и Ю₁³⁻⁴, на основе которой выделены продуктивные и перспективные блоки.

Ключевые слова: разрывные нарушения, сейсмическая интерпретация, атрибутивные срезы, блоковая модель

T. V. Vlasova¹, K. I. Kanakova^{1,2}✉

Seismogeological model and petroleum potential of the Krapivinskoye Field

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kanakovaki@ipgg.sbras.ru

Abstract. The primary objective of this work is to construct a detailed seismogeological model and to substantiate the petroleum potential forecast for the Krapivinskoye Field based on an integrated analysis of seismic survey materials and deep drilling data within the study area. In the course of this work, a correlation of reference seismic horizons was performed, interwell correlation was carried out, seismostratigraphic tying was conducted, and a series of structural maps and isopach maps were constructed. The field is established to be characterized by a complex geological setting, within which a number of isolated hydrocarbon pools with varying hypsometric elevations of the water-oil contact (WOC) are identified. This “stepwise” behavior of the WOC level is explained by the influence of Upper Jurassic (Early Cretaceous?) fault zones that act as seals for individual pools. Within the framework of this study, a block model was constructed for the productive sandstone reservoirs Y₁¹⁻² and Y₁³⁻⁴, and based on this model, productive and prospective blocks were identified.

Keywords: faults, seismic interpretation, attribute slices, block model

Введение

В юго-восточных районах Западной Сибири наблюдается тенденция к сокращению количества неоткрытых объектов с относительно простым геологическим строением. Данная территория характеризуется большим объемом фактического материала, высокой степенью геолого-геофизической изученности и развитой транспортно-логистической структурой. В связи с этим актуальны не только поиски и разведка новых месторождений, но и доразведка с детализацией сложно построенных залежей на уже разрабатываемых месторождениях. В том числе на Крапивинском, где по имеющимся данным присутствуют обособленные залежи с разными гипсометрическими отметками ВНК.

Методы и материалы

Крапивинское месторождение в административном отношении расположено на северо-востоке Томской области (Каргасокский район) и востоке Омской области (Тарский район). В соответствии с нефтегазогеологическим районированием Западно-Сибирской платформы, рассматриваемое месторождение относится к Каймысовской нефтегазоносной области и Каймысовскому нефтегазоносному району. Месторождение приурочено к группе локальных поднятий, осложняющих Крапивинско-Моисеевское куполовидное поднятие, которое, в свою очередь, расположено к югу от Каймысовского свода [1]. В работе использованы следующие фактические материалы: густая сеть сейсмических профилей общей протяженностью 2214,8 км, сейсмический куб площадью 425,6 км², а также данные глубокого бурения по 61 скважине. Структурные построения и интерпретация материалов геофизических исследований скважин (ГИС) выполнялись в программном обеспечении Аркаим.

На первом этапе интерпретации сейсмических данных выполнен выбор и корреляция отражающих горизонтов Πa^+ , Πa^- , III и IV, соответствующих наиболее интенсивным сейсмическим отражениям и являющихся границами сейсмогеологических мегакомплексов. Горизонт Πa^+ соответствует подошве угольного пласта U_1^2 васюганской свиты, горизонт Πa^- – подошве баженовской свиты (кровле юрского сейсмогеологического мегакомплекса), горизонт III – кошайской пачке киялинской свиты (кровле берриас-аптского сейсмогеологического мегакомплекса), горизонт IV – подошве кузнецовской свиты (кровле альб-туронского сейсмогеологического мегакомплекса). После построения сеточных моделей карт изохрон и карт средних скоростей получены структурные карты по подошве угольного пласта U_1^2 , подошве баженовской, кошайской и кузнецовской свит, а также структурные карты по подошве верхневасюганской подсвиты, кровле пласта U_1^1 , кровле васюганской и георгиевской свит. Набор структурных карт для разреза верхнеюрских отложений строился с применением алгоритма на основе многомерных RBF-сплайнов [2]. Данная технология позволяет строить непротиворечивые структурные модели для набора пластов малой мощности, исключив пересечение их кровли и подошвы.

По данным геофизических исследований скважин (ГИС) в разрезе верхне-васюганской подсвиты выделены кровля и подошва васюганской свиты, кровля нижневасюганской подсвиты, кровля георгиевской свиты, а также угольные пласты $У_1^1$ и $У_1^2$, подугольная, межугольная и надугольная пачки, песчаные пласты $Ю_1^{1-2}$ и $Ю_1^{3-4}$, карбонатизированные песчаники и алевролиты. Сейсмостратиграфическая привязка выполнена по скважинам 202, 205, 206. В результате установлено, что отражающий горизонт $Па^+$ соответствует подошве угольного пласта $У_1^2$ васюганской свиты, отражающий горизонт $Па^-$ – подошве баженовской свиты. Итоговый коэффициент корреляции составил 0,7.

Выделение разрывных нарушений осуществлялось на основе анализа срезов когерентности волнового поля, а также визуальной интерпретации временных сейсмических разрезов. На срезе когерентности волнового поля (рис 1) разломы соответствуют областям с наименьшей когерентностью волнового поля. На временных разрезах разрывные нарушения фиксируются по зонам смещения осей синфазности и затухания сейсмических колебаний на локальных субвертикальных участках.

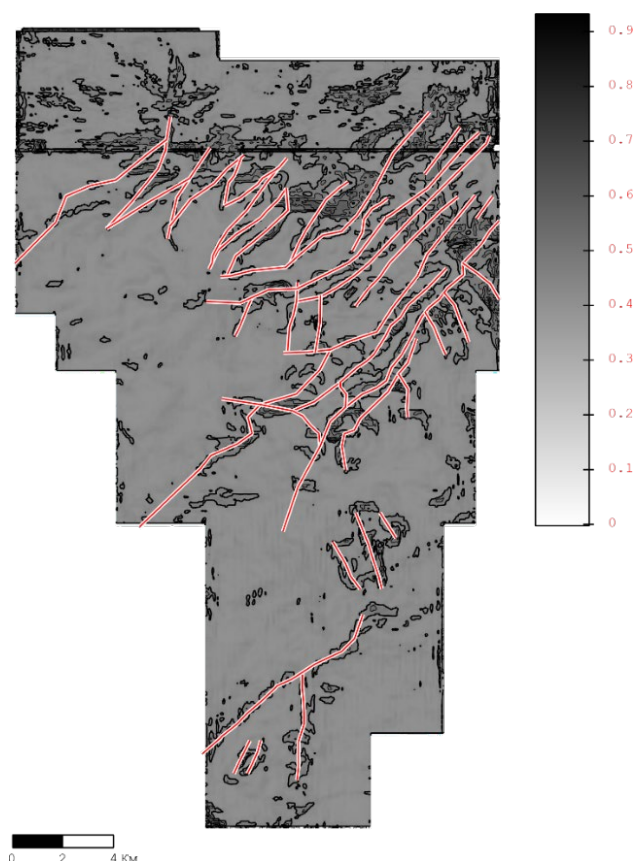


Рис. 1. Срез когерентности волнового поля по горизонту $Па^a$

Результаты

В пределах Крапивинско-Моисеевского куполовидного поднятия выделены Крапивинская и Западно-Крапивинская структуры. Анализ карт изопакит титон-баремского и титон-туронского мегакомплексов показал, что указанные

структуры испытывали устойчивый рост начиная с верхнеюрского времени, окончательно обособившись от Моисеевской структуры в постуронское время, когда и сформировались структурные ловушки.

На всей исследуемой территории зафиксированы дизъюнктивные дислокации северо-восточного простирания, параллельные осям пликтивных нарушений. Установлено, что разломы имеют верхнеюрский (раннемеловой?) возраст и к моменту генерации углеводородов баженовской свитой, вероятно, были уже «залечены», что исключает их роль в качестве миграционных каналов, однако позволяет рассматривать их в качестве тектонических экранов для залежей [3,4]. Данное предположение подтверждается выявленными различиями в гипсометрических отметках водонефтяного контакта: на севере для пласта Ю₁³⁻⁴ ВНК фиксируется на отметке 2625 м, на юго-востоке – 2575 м, что свидетельствует о наличии нескольких обособленных залежей, экранируемых разрывными нарушениями. В связи с этим сделан вывод о двойном контроле залежей – структурным фактором и дизъюнктивными дислокациями, на основании чего для продуктивных песчаных пластов Ю₁³⁻⁴ и Ю₁¹⁻² построена блоковая модель.

Пласты Ю₁³⁻⁴ и Ю₁¹⁻² характеризуются наибольшими эффективными толщинами на склоновых частях поднятий. С учетом анализа эффективных толщин и результатов бурения разведочных скважин наиболее перспективными признаны пласты Ю₁³⁻⁴.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал "ГЕО", 2002. – 261 с.
2. Лапковский В.В., Канакова К.И., Пономарев М.С. Оценка погрешностей различных методов структурного моделирования слоистых толщ // Геология и геофизика, DOI: 10.15372/GiG2026126, EDN: VJPAHV <https://elibrary.ru/item.asp?id=89151701>
3. Конторович В. А. Мезозойско-кайнозойская тектоника и нефтегазоносность Западной Сибири // Геология и геофизика. — 2009. — Т. 50, № 4. — С. 461–474.
4. Конторович В.А., Соловьев М.В., Калинина Л.М., Калинин А.Ю. Роль мезозойско-кайнозойской тектоники в формировании залежей углеводородов в южных частях Каймысовского свода и Нюроольской мегаплатины // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 8. С. 1075–1091

© Т. В. Власова, К. И. Канакова, 2026

*Т. В. Гонта*¹✉

Первые находки древнейших эндопсаммонных остракод песчанистого мелководья в ордовике Сибирской платформы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gontatv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В прибрежно-мелководных песчаниках киренско-кудринского горизонта (сандбийский ярус, ордовик) на р. Мойеро (Сибирская платформа) установлен моновидовой комплекс остракод. На основе анализа тафономических, палеоэкологических, палеогеографических и морфометрических характеристик обоснован автохтонный характер захоронения сообщества. Установлено, что изученные остракоды вели зарывающийся образ жизни и относятся к эндопсаммонным формам, что представляет собой древнейшую известную находку инфаунных остракод.

Ключевые слова: зарывающиеся остракоды, эндопсаммон, палеоэкология, тафономия

*T. V. Gonta*¹✉

Earliest record of endopsammic infaunal ostracods from ordovician sandy shallow-marine deposits of the Siberian platform

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gontatv@ipgg.sbras.ru

Abstract. A monospecific ostracod assemblage has been recovered from nearshore shallow-marine sandy deposits of the Kirensko–Kudrinian Regional Stage (Sandbian Stage, Upper Ordovician) exposed along the Moyero River, Siberian Platform. Taphonomic, paleoecological, paleogeographic, and morphometric evidence indicates an autochthonous origin of the assemblage. The studied ostracods are interpreted as burrowing endopsammic forms, representing the earliest documented occurrence of infaunal ostracods.

Keywords: infaunal ostracods, endopsammon, paleoecology, taphonomy

Введение

Первые находки остракод на Сибирской платформе датируются второй половиной кимайского горизонта (дапинский ярус). Остракодовые сообщества этого времени отличались низким таксономическим разнообразием и не высокой плотностью популяций. Начиная с муктэйского горизонта (дарривильский ярус), соответствующего началу волгинской трансгрессии, отмечается значительный рост биоразнообразия остракод. В волгинское время (дарривильский ярус), однотипные сообщества остракод были распространены во всех структурно-фациальных районах Сибирской платформы, а также смежных складчатых областях (Таймыр, Верхояно-Чукотская складчатая область, Новосибирские острова), представлявших различные части сибирского палеобассейна, отличающиеся по

ряду физико-географических обстановок [1, 2]. В регрессивные фазы развития бассейна, в результате возникновения барьеров, препятствующих свободному расселению бентосных групп организмов, происходила дифференциация остракод по латерали и формирование в различных частях палеобассейна эндемичных сообществ.

Для реконструкции палеоэкологических и палеобиогеографических обстановок Сибирского палеобассейна А.В. Каныгиным была предложена палеоэкологическая типизация ордовикских остракод [3]. На основании фациальной приуроченности, структуры сообществ, положения в биоценозе и адаптивной морфологии остракод из ордовикских палеобассейнов Сибири и Северного Казахстана было выделено пять основных экологических типов, соответствующих обстановкам от литорали и сублиторали, до более глубоководных частей палеобассейна [3]. Особую роль среди сообществ ордовикских остракод этого времени, занимали представители, населяющие наиболее мелководные участки моря (прибрежно-мелководный экологический тип) [3]. Как крайний характер проявления остракод этого экологического типа, не имея фактического материала, прямо указывающего на развитие зарывающихся форм, А.В. Каныгин предполагал, что начиная с середины среднего ордовика среди остракод появились первые представители инфауны [3, 4]. Однако, до последнего времени достоверных находок ордовикских остракод, подтверждающих предположение, выдвинутое А.В. Каныгиным не было.

Целью данной работы является описание первых находок инфаунных остракод, которые, по-видимому, представляют собой древнейших известных представителей этой экологической группы.

Методы и материалы

Коллекция остракод получена из песчаников, накопление которых происходило в обстановках прибрежного мелководья, предположительно отвечающих береговым подводным валам. Остракоды в слое распределены не равномерно и встречаются в виде небольших локализованных скоплений с высокой концентрацией раковин хорошей сохранности. Вдоль слоя было отобрано несколько образцов на разном расстоянии друг от друга, в одном из них был установлен моновидовой комплекс остракод. Раковины в захоронении не образовывали так называемые «ракушняковые мостовые», а рассеяны в породе образца равномерно.

Извлечение остракод из породы проводилась методом сплавления с тиосульфатом натрия. Популяционный анализ проводился согласно рекомендациям [5, 6, 7, 8]. При анализе учитывались соотношения раковин взрослых форм и личиночных стадий (A/J); соотношение целых раковин и разрозненных створок (C/V); соотношение самцов и самок.

Раковины остракод изучались на биноклях Zeiss Stemi 2000 и Zeiss Discovery V 12. Изображения и анализ элементного состава раковин остракод проводились в ЦКП «Коллекция ГЕОХРОН» Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск) на сканирующем

электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss EVO 10, оснащенным системой энерго-дисперсионного микроанализа (EDS-детектор) Oxford Xplore 30.

Результаты

Всего в изученном образце было установлено свыше 2000 экземпляров остракод, принадлежащих одному виду. В подавляющем большинстве материал представлен целыми раковинами очень хорошей сохранности (рис. 1). Анализ соотношения С/V показал значения $\sim 1:8$, в пользу целых раковин, при этом соотношение самцов и самок оказалось примерно 1:1 с незначительным перевесом с сторону самок (из 100 случайно отобранных экземпляров взрослых форм 56, принадлежали самкам).



Рис. 1. Коллекция остракод из песчаников киренско-кудринского горизонта (сандбийский ярус) р. Мойеро

Любые работы, связанные с палеоэкологическими исследованиями, направленных на реконструкцию палеопопуляций, начинаются с тафономических наблюдений и определения сформировался ли тафоценоз на месте обитания организмов (In situ) или скелетные остатки были подвергнуты посмертному переносу. Важным

инструментом для определения характера захоронения ископаемых остракод является выделение стадий онтогенетического развития сообщества [6, 8, 9].

Надежной характеристикой возрастной структуры популяции остракод служат морфометрические характеристики раковин, в частности отношение длины раковины к высоте [6, 10]. Как правило, подобные наблюдения, в связи с дискретностью размеров раковин на разных личиночных стадиях, по локализации значений на диаграмме, позволяют выявить этапы онтогенетического развития остракод. Всего, для анализа соотношения A/J было проведено более 1500 наблюдений. Классический подход к выделению возрастных стадий, путем нанесения точек на график отношения длины раковины к высоте, не дал достоверных результатов, полученные значения представлены в виде поля сплошного распределения точек, расположенных в узком диапазоне (рис. 2А). Поэтому в структуру данных, кроме длины и высоты раковины был внесен еще один параметр - частота повторов значений, и на этой основе построена пузырьковая диаграмма (рис. 2Б). Диаграмма четко иллюстрирует наличие 4 стадий развития в изученном сообществе остракод.

Другим важным индикатором жизненного цикла, смертности и последующего посмертного переноса является соотношение раковин взрослых форм и личиночных стадий (A/J) [8]. Для каждой возрастной стадии было посчитано количество экземпляров остракод и на этой основе построена диаграмма размерно-частотного распределения раковин в популяции (рис. 2В).

В унифицированном виде морфометрические данные приведены в таблице 1, в которой для каждой возрастной стадии развития приведены количество экземпляров, диапазоны изменения длины и высоты раковины и их средневзвешенные значения и на этой основе посчитаны «коэффициенты роста» (осредненные значения изменения длины и высоты раковины остракод в межличиночные периоды их развития).

Таблица 1. Сводная таблица количественных и морфометрических характеристик раковин остракод: (l – длина, h – высота раковин, μl и μh – осредненные значения длины и высоты раковины, Δl и Δh – осредненные значения изменения длины и высоты)

Стадия развития	Количество экземпляров	l , мм	h , мм	μl , мм	μh , мм	Δl мм	Δh , мм
A3	321	0,3-0,45	0,18-0,4	0,39	0,29	0,15	0.11
A2	570	0,475-0,6	0,3-0,5	0,54	0,4		
A1	449	0,625-0,8	0,4-0,65	0,7	0,53	0,16	0.13
B	192	0,85-0,925	0,575-0,675	0,89	0,63	0,19	0.1

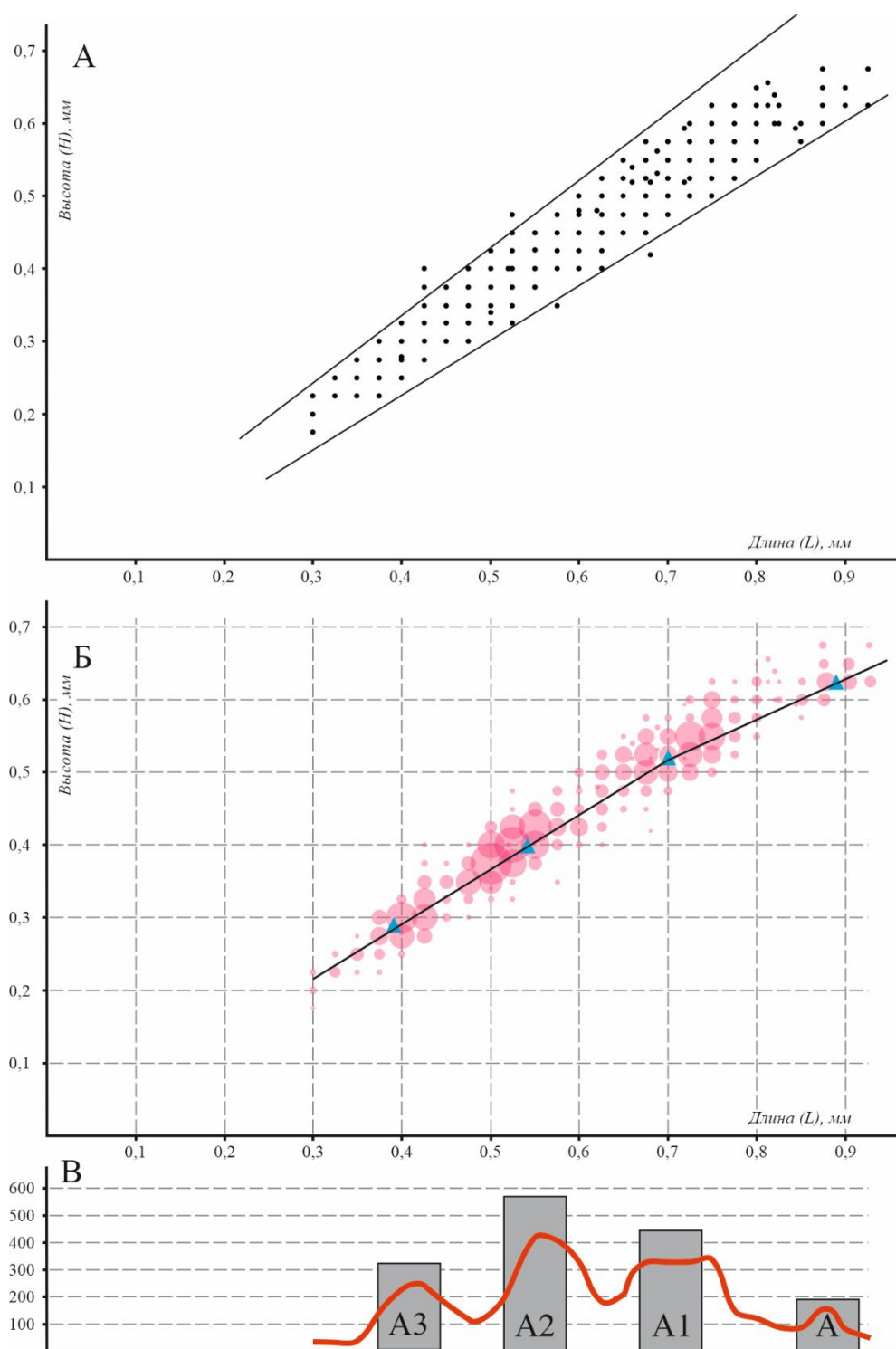


Рис. 2. Морфометрические характеристики изученного комплекса остракод:
 А – соотношение длины раковины (l , мм) к высоте (h , мм); В - пузырьковая диаграмма соотношения длины раковины к высоте, треугольниками показаны средние значения длины и высоты раковины для онтогенетических стадий развития, линией показан тренд увеличения раковин остракод от личиночных стадий к взрослым формам; С – размерно-частотное распределение раковин остракод для различных стадий развития (А - взрослые формы; А1-А3 личинки) красной линией показана кривая фактического распределения раковин остракод с шагом 0,025 мм.

Раковины остракод, обитающих в экстремально мелководных условиях с активным водообменом, после линьки или отмирания животного подвержены замещению или химическому (вызванному распреснением прибрежных вод материковым стоком и относительно более высоким содержанием кислорода) или механическому (в результате абразии кварцевыми зернами) разрушению. Уникальность рассматриваемого местонахождения определяется раннедиагенетической фосфатизацией раковин остракод. Ранее в данной части разреза реки Мойеро была зафиксирована область активного фосфатонакопления [11]. Это событие связано с тем, что на рубеже среднего и верхнего ордовика на эту часть Сибирской платформы оказывал существенное влияние апвеллинг на фоне глобальных (изменение циркуляции вод мирового океана) и региональных (фациальные особенности) благоприятных условий накопления фосфоритов. На рисунке 3 показаны результаты анализа элементного состава раковин остракод.

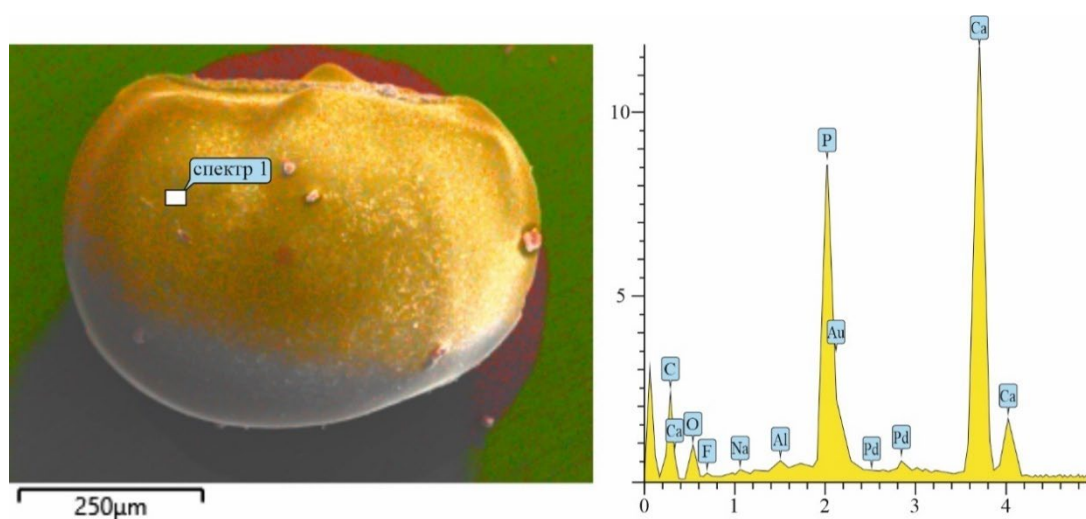


Рис. 3. Элементный состав раковины изученных остракод

Обсуждение

Лучшим индикатором для интерпретации гидродинамических обстановок (высокой или низкой энергии) в местах обитания остракод и условий формирования захоронений является соотношений A/J и идентификация различных онтогенетических стадий в сообществах [6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17;]. Ассоциации, в которых одновременно присутствуют взрослые и молодые особи, считаются танатоценозами, формирование которых происходило на месте обитания животного (In-situ), с незначительным или полным отсутствием переноса. Для более надежной интерпретаций палеообстановок, также необходимо учитывать количественные показатели на каждой из стадий. Максимальная высокая смертность в популяциях фиксируется среди молодежи, постепенно снижаясь к более взрослым формам. Таким образом, кривая размерно-частотного распределения популяции, захороненной на месте жизни, будет смещена влево, так как в выборках будут преобладать экземпляры, находящиеся на ранних стадиях индивидуального развития [8].

На графике отношения длины раковины к высоте (рис. ...) четко выделяется 4 стадии развития – взрослая (А) и 3 личиночные (А1 – А3). На гистограмме размерно-частотного распределения раковин (рис. ...) показано, что наибольшее количество экземпляров приходится на вторую (от взрослых форм) стадию развития (А2) и постепенно снижается в сторону «зрелых» форм, что соответствует теоретическим и фактическим «кривым выживания» популяции. Такая кривая распределения отвечает низкоэнергетическому автохтонному танатоценозу с некоторой потерей ранних возрастных стадий из-за растворения [8, 18]. Вероятно, вторичная фосфатизация была достаточной для сохранения раковин в хорошем состоянии, но недостаточно быстрой для сохранения мягких тканей животного и более тонких ювенильных раковин остракод.

Другой важной особенностью ордовикских остракод является отсутствие замочного аппарата. Прочность смыкания створок у них не значительна и обусловлена, главным образом, воздействием замыкательных мускулов на створки раковины. На рисунке 4 показано отсутствие замочного аппарата у установленного вида остракод. Недавние исследования тафономии остракод [19] показали, что дисартикуляция раковин происходит даже в низкоэнергетической среде из-за естественной смерти и линьки, а не только в результате их переноса. Таким образом наличие в образце большого количества целых раковин, многократно превышающих по количеству отдельные створки исключает развитие биоценоза и его последующего захоронения на поверхности дна бассейна.

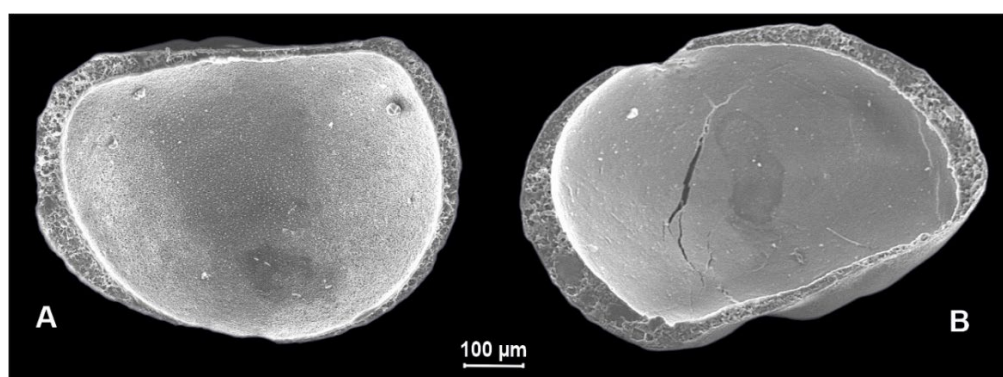


Рис. 4. Изображение раковин изученных остракод с внутренней стороны:
А – левая створка; В – правая створка

Такое соотношение целых раковин и разрозненных створок, по мнению многих исследователей [например: 6, 7, 8, 12, 13, 14] может указывать на быстрое захоронение, которое предотвращает расчленение створок. Однако, литологические данные указывают на отсутствие темпеститов.

Таким образом, популяционный анализ, а также ряд тафономических и палео-экологических особенностей остракод, такие как: моновидовой состав комплекса; отсутствие признаков переноса и сортировки; наличие большого количества целых раковин, встречающихся совместно с разрозненными створками; равномерное распределение раковин внутри породы, без образования ракушняковых мостовых;

смещение кривой размерно-частотного распределения раковин влево, указывают на прижизненное захоронение сообщества остракод. Принимая во внимание гидродинамические обстановки у поверхности дна бассейна с активными волновыми движениями водных масс и отсутствие штормовых отложений, с уверенностью можно утверждать, что развитие биоценоза и последующее формирование тафоценоза происходило не на поверхности осадка, а в его толще, что, в свою очередь, обеспечивало защиту раковин от внешнего механического воздействия. Из чего следует вывод о том, что рассматриваемая популяция представлена формами зарывающихся остракод (инфауна). Ian Boomer [8] также предполагал, что раковины остракод, обитающих в толще осадка могут сохраняться целыми при условии их захоронения в месте обитания.

Boaden [20] для классификации жизненного пространства современной мейобентосной фауны выделял три экологические группы: эпи-, эндо- и мезопсаммон. К первой группе он относит представителей, обитающих на поверхности осадка. Две другие группы в совокупности составляют представителей инфауны: эндопсаммонные – роющие организмы, раздвигающие или заглатывающие частицы грунта при движении; к представителям мезопсаммонной фауны относятся узкоспециализированные группы организмов, приспособленные к жизни в капиллярных пространствах между частицами песка – интерстициальная фауна. Анализ соотношения размеров раковин, превышающих размеры зерен песчаника, в котором они обнаружены, по этой классификации указывает на принадлежность установленных остракод к эндопсаммонной экологической группе.

Заключение

Впервые в ордовикских отложениях Сибирской платформы установлены зарывающиеся остракоды. Их принадлежность к этой экологической группе обоснована тафономическими, палеоэкологическими и популяционными особенностями сообщества. По классификации Боадена [20] установленные остракоды относятся к эндопсаммонной экологической группе. На сегодняшний день, данную находку можно рассматривать как древнейшую находку зарывающихся представителей остракод.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания № FWZZ-2026-0042, утвержденной Минобрнауки России и госзаданий РАН по программе фундаментальных научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каныгин А.В., Гонта Т.В., Тимохин А.В. Происхождение палеозойских террейнов Северо-Восточной Азии: геологические доказательства раскола перикратонной окраины Сибирского палеоконтинента и миграции ее фрагментов // Геология и геофизика – том 61 – № 11 – С. 1459-1475 – 2020
2. Каныгин А.В., Гонта Т.В., Тимохин А.В. Пространственное положение Сибирской платформы и кратонных террейнов ее складчатого обрамления в палеозое по палеонтологическим и геологическим данным // Геология и геофизика – том 61 – № 4 – С. 447-467 – 2020

3. Каныгин А.В. Экологические типы ордовикских остракод // Среда и жизнь в геологическом прошлом. Палеоэкологические проблемы. Наука, Новосибирск, 1974, с. 87-100
4. Каныгин А.В. Основные этапы экологической эволюции остракод. в кн. Практическое руководство по микрофауне СССР. Т. 4. Остракоды палеозоя. М-во геологии СССР, Всесоюз. научно-иссл. геол. ин-т. - Л.: Недра, 1990. с. 180-182.
5. Whatley R.C. The application of Ostracoda to palaeoenvironmental análisis \ R.F. Maddocks (Ed.), Applications of Ostracoda, University of Houston (1983), pp. 51-77
6. Whatley R.C. Population structure of ostracods: some general principles for the recognition of palaeoenvironments \ P. De Deckker, J.P. Colin, J.P. Peypouquet (Eds.), Ostracoda in the Earth Sciences, Elsevier, Amsterdam (1988), pp. 245-256
7. Wakefield M.I. Ostracod biostratigraphy at lagoonal shorelines: examples from the great estuarine group, middle Jurassic, Scotland \ Proc. Geol. Assoc., 106 (1995), pp. 211-218
8. Boomer I., Horne D.J., Slipper I.J. The use of Ostracods in paleoenvironmental studies, or what can you do with an ostracods shells // Paleontol. Soc. Pap., 9 (2003), pp. 153-180
9. Brouwers E. M. Sediment transport detected from the analysis of ostracod population structure: An example from the Alaskan continental shelf // Ostracoda in the Earth Sciences / P. De Deckker, J.-P. Colin, J.-P. Peypouquet (eds.). – Amsterdam : Elsevier, 1988. – P. 231–244.
10. Cooper C. L. Moulting stages of the Pennsylvanian ostracode *Ectodemites plummeri* // Journal of Paleontology. 1945. Vol. 19, No. 4. P. 368–375. DOI: 10.2307/1299047.
11. Лыков Н.А., Ростовцева Ю.В., Закирьянов И.Г., Тимохин А.В., Дронов А.В., Гонта Т.В., Постникова О.В. Известковые цианобактерии в биогермах и пеллециподовых банках конца среднего ордовика разреза реки Мойеро (север Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 2025. – 66. – № 11. – С.1434-1446
12. Palacios-Fest M.R., Cohen A.S., Anadón P. Use of Ostracods as Paleoenvironmental tools in the interpretations of ancient lacustrine records \ Rev. Esp. Palaontol., 9 (2) (1994), pp. 145-164
13. Arias C. Procesos de transporte en las asociaciones de Ostrácodos del Jurásico Inferior de la cordillera Ibérica, España // Rev. Esp. Palaontol., 14 (1) (1999), pp. 1-11
14. De Decker P. Ostracod palaeoecology \ The Ostracoda: Applications in Quaternary Research Geophysical Monograph (2002), p. 131
15. Coimbra J.C., Badaraco Costa K., Fauth G. Paleoenvironmental significance of allochthonous vs. autochthonous late quaternary ostracodes from Imaruí lagoon and D'una river, southern Brazil \ Rev. Bras. Palaontol., 9 (3) (2006), pp. 295-302
16. Palacios-Fest M., Holliday V. Paleoeology of a ciénaga at the mockingbird gap site, Chupadera Draw, New Mexico \ Quat. Res., 1 (2017), p. 15 DOI: 10.1017/qua.2017.82
17. Palacios-Fest M. R., Duke D., Young D. C., Kirk J. D., Oviatt C. G. A Paleo-Lake and wetland paleoecology associated with human use of the distal Old River Bed Delta at the Pleistocene-Holocene transition in the Bonneville Basin, Utah, USA // Quaternary Research. 2021. Vol. 106. P. 75–93. DOI: 10.1017/qua.2021.64.
18. Захаров В.А. Значение полевых литолого-палеонтологических наблюдений для исследований по систематике // Среда и жизнь в геологическом прошлом. Палеоэкологические проблемы. Наука, Новосибирск, 1974, с. 8-15
19. Silva dos Santos K., Feijó Ramos M. I. Taphonomic analysis on Neogene ostracods from Solimões formation, Borehole 1AS-5-AM, Brazil: A tool to the paleoenvironmental reconstitution // Journal of South American Earth Sciences. 2023. Vol. 122. P. 104172. DOI: 10.1016/j.jsames.2022.104172.
20. Boaden P. 1962. Grasing in the interstitial habitat: a review. British Ecological Society Symposium. 4:299–303.

© Т. В. Гонта, 2026

Д. С. Горяйнов^{1,2✉}, И. В. Вараксина¹, И. Г. Закирьянов¹

Фациальная интерпретация отложений парфеновского продуктивного горизонта Ангаро-Ленского месторождения

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: d.goryajnov@g.nsu.ru

Аннотация. Статья посвящена фациальной интерпретации отложений парфеновского продуктивного горизонта венда в пределах Ангаро-Ленского газоконденсатного месторождения (Ангаро-Ленская ступень). Актуальность работы обусловлена существенной неоднородностью данного горизонта, выявленной в ходе предыдущих геолого-геофизических исследований, что затрудняет прогнозирование распределения коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами. Целью работы является реконструкция обстановок осадконакопления и установление закономерностей геологического строения продуктивной толщи для локализации перспективных зон местонахождений углеводородов. Методологической основой послужил комплексный литолого-фациальный анализ, включавший макроскопическое описание керна, петрографическое изучение 250 шлифов и гранулометрический анализ 200 проб. В результате проведенного анализа в разрезе горизонта выделено 10 литофаций, объединенных в 7 литофациальных ассоциаций. Установлено, что формирование отложений происходило в обстановках дельтового комплекса, испытывавших активное влияние приливно-отливных процессов. Наилучшими коллекторскими свойствами характеризуются русловые фации, тогда как баровые фации отличаются более низкими показателями. Выявленные закономерности строения продуктивной толщи свидетельствуют о сложном, фациально-изменчивом характере распределения коллекторов, что необходимо учитывать при планировании дальнейших геологоразведочных работ.

Ключевые слова: парфеновский горизонт, литофациальный анализ, Ангаро-Ленское месторождение, дельтовые обстановки, коллекторские свойства

D. S. Goryaynov^{1,2✉}, I. V. Varaksina¹, I. G. Zakiryaynov¹

Facies interpretation of the parfenovo producing horizon of the Angaro-Lenskoye field

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: d.goryajnov@g.nsu.ru

Abstract. The article focuses on the facies interpretation of deposits from the Parfenovsky productive horizon of the Vendian within the Angaro-Lenskoye gas condensate field (Angaro-Lenskoye step). The substantial heterogeneity of this horizon, identified during previous geological and geophysical investigations, drives the relevance of the study, as it complicates the prediction of reservoir distribution with high filtration-capacity properties. The aim of the study is to reconstruct the depositional environments and establish the patterns of geological structure of the productive sequence in order to localize prospective zones. The methodological basis consisted of an integrated lithological-facies analysis, including macroscopic core description, petrographic study of 250 thin sections, and grain-

size analysis of 200 samples. As a result of the analysis, 10 lithofacies were identified in the section of the horizon. They were grouped into seven lithofacies associations. It was established that the formation of the deposits occurred under deltaic complex conditions subject to the active influence of tidal processes. Channel facies exhibit the best reservoir properties, whereas bar facies demonstrate considerably poorer characteristics. The identified patterns of productive sequence structure indicate a complex, facies-variable character of reservoir distribution, which must be taken into account when planning further geological and exploration works.

Keywords: Parfenovo producing horizon, lithofacies analysis, Angaro-Lenskoye field, deltaic settings, reservoir properties

Введение

В настоящее время активно формируются новые центры газодобычи и единая система транспортировки газа. Это связано как с государственной программой газификации Российской Федерации, в которой уделяется особое внимание восточным регионам, так и развитию канала экспорта российского газа в страны Азиатско-Тихоокеанского региона (магистральный трубопровод Сила Сибири). Основные перспективы газоносности на юге Сибирской платформы связаны с Ангаро-Ленской ступенью (АЛС), в пределах которой открыта серия крупных месторождений: Ковыктинское, Братское, Атовское, Левобережное и Ангаро-Ленское. В соответствии с нефтегазогеологическим районированием район исследования приурочен к Ангаро-Ленской нефтегазоносной области в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Согласно результатам поисково-разведочных работ, значительная часть углеводородных ресурсов в рассматриваемом регионе приурочена к вендскому терригенному нефтегазоносному комплексу, главным образом, к парфеновскому продуктивному горизонту [1, 2]. Проведенные на территории АЛС геолого-геофизические исследования выявили существенную неоднородность данного горизонта. В связи с этим становится весьма актуальным детальное литологическое изучение верхневендских терригенных коллекторов, которое позволит более обоснованно прогнозировать распределение фильтрационно-емкостных свойств в разрезе и по площади [3, 4]. Применение литофациального анализа открывает возможности для реконструкции обстановок осадконакопления песчаных тел и локализации перспективных зон в разрезе. В связи с этим целью данной работы является изучение фациальной изменчивости для продуктивной толщи верхнего венда в пределах Ангаро-Ленского месторождения.

Методы и материалы

Основой для литолого-фациального анализа послужил комплекс данных, полученных при изучении образцов парфеновского горизонта, вскрытых 6 скважинами Ангаро-Ленского месторождения (рис. 1) с суммарным выходом керна 280 м (мощностью от 32 м до 72 м). Были исследованы: каменный материал (макроскопический текстурно-структурный анализ), 250 шлифов (петрографическое изучение), гранулометрический анализ 200 проб (выполнен в ИНГГ СО РАН на лазерном анализаторе MICROTRAC 9370/3000 Series ASVR). Интерпретация минералогии-

ческих, структурных и текстурных признаков согласно стандартной методике литолого-фациального анализа [5, 6] позволила выделить литофации (ЛФ, рассматриваем как синоним «литогенетического типа» В. Т. Фролова) – осадочные единицы, однородные по комплексу литогенетических характеристик и отличающиеся от соседних. Анализ вертикальной и латеральной изменчивости дал возможность объединить парагенетически связанные ЛФ в литофациальные ассоциации (ЛФА), соответствующие определенным обстановкам седиментации [7].



Рис. 1. Местоположение изученных разрезов [8]

Результаты

В составе парфеновского горизонта терригенного венда Ангаро-Ленского месторождения были выделены 10 литофаций.

ЛФ1 представлена песчаниками массивными крупно-среднезернистыми гравелитистыми, плохо и среднесортированным.

ЛФ2 сложена песчаниками средне-мелкозернистыми с плохой и средней сортировкой и крупной однонаправленной косой слоистостью.

ЛФ3 выполнена песчаниками мелко- и среднезернистыми плохо- и среднесортированными, с четко выраженными сдвоенными глинистыми слойками. Фиксируются разнонаправленные косые серии, часто срезанные под пологим углом. Выше срезанных участков зачастую встречаются слойки песчаников, вмещающие интракласты аргиллитов. Такие текстурные особенности, вероятно, отражают влияние приливно-отливной деятельности.

ЛФ4 состоит из песчаников средне-мелкозернистых плохо- и среднесортированных массивных и косослоистых с интракластами аргиллитов.

ЛФ5 сложена песчаниками мелкозернистыми, преимущественно хорошо и среднесортированными, с флазерной, разнонаправленной косой, косоволнистой и линзовидной слоистостью за счет тонких, иногда сдвоенных, глинистых слоев.

ЛФ6 состоит из песчаников преимущественно мелкозернистых до мелко-среднезернистых хорошо и среднесортированных массивных или с нечеткой однонаправленной косой слоистостью.

ЛФ7 представлена песчаниками преимущественно мелкозернистыми до мелко-среднезернистых хорошо и среднесортированными с субгоризонтальной, разнонаправленной косой, волнистой, косо-волнистой срезанной слоистостью.

ЛФ8 сложена алевро-песчаниками и алевролитами массивными, субгоризонтально- и пологокосослоистыми.

ЛФ9 состоит из аргиллитов и алевролитов глинистых субгоризонтально- и линзовидно-волнистослоистых.

ЛФ10 представлена аргиллитами массивными.

Обсуждение

Вышеописанные литофации образуют 7 литофациальных ассоциаций.

ЛФА1 имеет толщину от 2 до 6 м и состоит в основном из чередования песчаников ЛФ1 и ЛФ2 и представляет собой русла с доминированием аллювиальных процессов. Выделяются циклиты с однонаправленной косой слоистостью (от 0.3 до 2.5 м) с уменьшением зернистости снизу вверх по разрезу, что указывает на постепенное снижение гидродинамики. Эрозионная граница в основании маркируется внутриформационными обломками аргиллитов и алевролитов ЛФ4. В кровле нередко встречаются маломощные прослои пойменных алевро-аргиллитов ЛФ9. Циклиты зачастую неполные, перекрываются песчаниками и алевропесчаниками с линзовидно-волнистой и разнонаправленной пологой косой слоистостью ЛФ5, что свидетельствует о переработке верхних частей приливно-отливными течениями.

ЛФА2, мощностью 3-7 м, представляет собой распределительные русла с активным влиянием приливно-отливных процессов. Главным образом она сформирована косослоистыми песчаниками ЛФ2, присутствуют и более мелкозернистые породы ЛФ3 и ЛФ5. Песчаники формируют циклы с трендом на уменьшение зернистости с эрозионными нижними границами и ЛФ4 в основании циклита, что указывает на их русловой генезис. От ЛФА1 отличается лучшей сортировкой и более мелкозернистым составом, а также активным влиянием приливно-отливных процессов.

ЛФА3 имеет толщину от 1 до 8 м и образована переслаиванием алевро-песчаников ЛФ8, алевролитов ЛФ9 и аргиллитов ЛФ10. Слоистость субгоризонтальная, пологоволнистая или пологонаклонная, реже массивная. Ассоциация находится в генетической связи с русловыми песчаниками ЛФА1 и образуется в поймах, междурусловых озерах и заливах.

ЛФА4, толщиной от 0.4 до 3.5 м, характеризует приливно-отливные равнины и представлена алевро-песчаниками, алевролитами и аргиллитами ЛФ8, ЛФ9, ЛФ10 с тонкими прослоями песчаников ЛФ5, ЛФ6, ЛФ7. Слоистость тонкая субгоризонтальная, пологоволнистая и волнисто-линзовидная. Широко развиты флазерная слоистость и сдвоенные глинистые слойки, являющиеся диагностическим признаком приливно-отливной гидродинамики.

ЛФА5 относится к проксимальной части дельтового фронта, представленной комплексом распределительных каналов и баров, активно переработанных приливно-отливными течениями. Совместно с ЛФА4 формирует мощный баровый комплекс, достигающий 48 м. Ассоциация представлена в основном мелкозернистыми и мелко-среднезернистыми косослоистыми и массивными песчаниками ЛФ6, ЛФ7. Для распределительных каналов наблюдается уменьшение размерности обломочного материала снизу вверх, а для баровых последовательностей характерна обратная картина на укрупнение зернистости вверх. В распределительных руслах иногда фиксируется эрозионная подошва, выше которой залегают массивные и косослойчатые песчаники ЛФ4. Сортировка песчаного материала распределительных каналов в основном средняя. Баровые песчаники в целом сортированы хорошо. Слоистость в основном косая однонаправленная или перекрестная, реже косоволнистая, косая срезанная и субгоризонтальная с повсеместным развитием приливно-отливных текстур.

ЛФА6, мощностью 10-25 м, соответствует дистальной части дельтового фронта (дистальные приливно-отливные бары). Состоит из неравномерного переслаивания мелкозернистых песчаников ЛФ6, ЛФ7 с алевро-песчаниками, алевролитами и аргиллитами ЛФ8, ЛФ9. В баровых циклах наблюдается неотчетливый тренд на увеличение зернистости от мелкозернистых песчаников к мелко- и средне-мелкозернистым. Текстура однонаправленная косая, реже субгоризонтальная и разнонаправленная. Мелкозернистый состав пород и слабо выраженные признаки приливно-отливной деятельности указывают на более низкие энергетические условия чем в ЛФА5.

ЛФА7 имеет мощность 5-7 м и сложена переслаиванием алевролитов и аргиллитов ЛФ8, ЛФ9, ЛФ10 с частыми прослоями алевро-песчаников и мелкозернистых песчаников ЛФ7. Иногда встречаются штормовые темпеститы в виде градационных прослоев с переходом от массивных мелко-среднезернистых песчаников ЛФ6 к алевро-песчаникам ЛФ8, алевролитам и аргиллитам ЛФ9.

Выделенные литофациальные ассоциации образуют закономерные сочетания или последовательности, которые формировались в различных фациальных зонах дельтовой равнины, фронта дельты и продельты. Наиболее высокие коллекторские свойства наблюдаются у песчаников фациальных ассоциаций, связанных с дельтовыми руслами (ЛФА1 и ЛФА2). Пористость в них меняется от 5 до 18 % от объема породы, преобладающие значения 8-10 %. Проницаемость варьирует от 0.1×10^{-3} до 102.0×10^{-3} мкм², преобладают значения около 1.0×10^{-3} мкм². Песчаники и алевро-песчаники баровых тел характеризуются более низким коллекторским потенциалом: пористость не превышает 6 %, в основном около 3 %; проницаемость 0.001×10^{-3} – 1.0×10^{-3} мкм².

Заключение

В результате проведенного литолого-фациального анализа кернового материала в разрезе парфеновского продуктивного горизонта венда на территории Ангаро-Ленского месторождения было выделено 10 литофаций, объединенных в 7 литофациальных ассоциаций. Установлено, что формирование отложений происходило в обстановках дельтового комплекса с активным влиянием приливно-отливных процессов. Выявленные закономерности вертикального и латерального строения продуктивной толщи свидетельствуют о сложном характере распределения коллекторов, контролируемом фациальной изменчивостью. Наилучшими фильтрационно-емкостными свойствами характеризуются русловые отложения (ЛФА1 и ЛФА2), тогда как в межрусловых, приливно-отливных и баровых обстановках формировались более гетерогенные и низкопроницаемые последовательности.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научной темы FWZZ-2026-0048 госзадания ИНГГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Иркутский бассейн / под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука [и др.]. – Новосибирск, 1995. – Вып. 8. – 60 с.
2. Дробот Д. И. Эпигенез нефтидов в рифей вендских и кембрийских отложениях юга Сибирской платформы / Д. И. Дробот, В. И. Городничев // Нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 63–73.
3. Скузоватов М. Ю. Применение комплекса геолого-геофизических данных при прогнозе газоносности вендского терригенного комплекса Ангаро-Ленской зоны газонакопления // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 6. – С. 26–33.
4. Горяйнов Д. С., Вараксина И. В., Закирьянов И. Г. Литологические факторы неоднородного распределения коллекторских свойств парфеновского газоносного горизонта венда Ангаро-Ленского месторождения (Иркутская область) // Гетерогенность в осадочных системах: материалы 14 Уральского литологического совещания (г. Екатеринбург, 14-18 октября 2024 г.). – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2024. – С. 30-32.
5. Фролов В. Т. Литология: учебное пособие. – Москва: Изд-во МГУ, 1995. – Кн. 3. – 352 с.
6. Selley R. C. Applied Sedimentology. – 2nd rev. ed. – San Diego: Elsevier Science Publishing Co Inc., 2000. – 523 p.
7. Facies Models; Response to Sea Level Change / ed. by R. G. Walker, N. P. James. – [s. l.]: Geological Association of Canada, 1992. – 409 p.
8. Новые открытия конденсатного газа на юге Сибирской платформы / А. Э. Конторович, С. А. Моисеев, В. А. Топешко, Ю. Г. Еремин // Российско-китайский нефтегазовый форум сотрудничества. – Пекин, 2007.

© Д. С. Горяйнов, И. В. Вараксина, И. Г. Закирьянов, 2026

Ф. Ф. Дульцев¹, В. А. Завалей², Н. Э. Медешова², К. О. Жинак², Б. Т. Тұрдалі³

Неравновесное состояние нуклидов радиевого ряда в природных водах южных районов Республики Казахстан

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²КазНИТУ имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

³ТОО «Viridi Navitas»

e-mail: DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрено равновесно-неравновесное состояние нуклидов радиоактивного ряда радия. Изучение активности нуклидов относительно материнского изотопа (^{238}U) позволило установить ряд закономерностей. В пределах южных районов Республики Казахстан отношение $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ варьируется в значительных пределах (от 0,004 до 133,6). Характерно, что при низких содержаниях урана (0,58 мг/л) активность изотопа ^{234}Th существенно преобладает, тогда как рост концентрации родительского изотопа сопровождается снижением удельной активности ^{234}Th и отношение становится менее единицы. Аналогичный тренд прослеживается для ^{230}Th , ^{210}Pb и ^{210}Po . В отличие от них, ^{226}Ra демонстрирует хаотичное распределение без явных зависимостей. Повсеместное пересыщение подземных вод ^{222}Rn до 5550 Бк/л является следствием интенсивной миграции данного газа из эманлирующего коллектора при распаде материнских нуклидов.

Ключевые слова: подземные воды, радиоактивный ряд радия, неравновесное состояние, южный Казахстан

F. F. Dultsev¹, V. A. Zavaley², N. A. Medeshova², K. O. Zhynak², B. T. Turdali³

Nonequilibrium state of the nuclides of radium decay series in the natural waters of southern regions of the Republic of Kazakhstan

¹Trofimuk Institute of Petroleum geology SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Satbaev University, Almaty, Kazakhstan

³TOO «Viridi Navitas»

e-mail: DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Abstract. The equilibrium - nonequilibrium state of nuclides of the radium decay series is considered. Investigation of the activity of nuclides with respect to the parent isotope (^{238}U) allowed us to establish a number of regularities. In the southern regions of the Republic of Kazakhstan, the $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratio varies within a broad range (from 0,004 to 133,6). It is characteristic that at low uranium content (0,58 mg/L) the activity of ^{234}Th isotope dominates significantly ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U} > 1$), while an increase in the concentration of the parent isotope is accompanied by a decrease in the specific activity of ^{234}Th , and the ratio becomes smaller than unity. A similar trend is observed for ^{230}Th , ^{210}Pb and ^{210}Po . Unlike for these isotopes, ^{226}Ra demonstrates chaotic distribution without any distinct trends. Widespread supersaturation of groundwaters with ^{222}Rn up to 5550 Bq/L is a consequence of intense migration of this gas from the emanating reservoir as a result of the decay of parent nuclides.

Keywords: groundwaters, radium decay series, nonequilibrium state, southern Kazakhstan

Введение

С геологической точки зрения территория исследования расположена на стыке горноскладчатой области, сложенной разновозрастными метаморфическим, магматическими и осадочными сильнодислоцированными породами, и платформенной областью с сильнодислоцированным фундаментом и достаточно мощным осадочным чехлом мезо-кайнозойского возраста. На юге территории, в высокогорных районах, нередко весной и летом отмечаются ливневые дожди, формирующие кратковременные паводки рек. В северном направлении годовое количество осадков снижается, не превышая 300-500 мм в предгорных районах, и до 100-200 мм в степных районах. Территория исследования характеризуется преобладанием сухого жаркого лета и резкими сезонными и суточными колебаниями температуры окружающего воздуха, и как следствие концентрированием химических элементов в природных водах. Такое геологическое строение и географо-климатические условия региона обуславливают выщелачивание радиоактивных элементов (главным образом уран) из магматических и метаморфических пород, их дальнейшую миграцию, перенос, рассеивание и концентрирование. В пределах южных районов Республики Казахстан открыто большое количество месторождений и проявлений урана, приуроченные как к палеозойскому складчатому основанию, так и к мезозой-кайнозойскому платформенному чехлу. Несмотря на слабую радиоактивность урана (примерно $1,68 \times 10^6$ Бк/г), его продукты полураспада (особенно радий-226 и радон-222) вносят существенный вклад в общий радиационный фон. Целью настоящей работы является обобщение имеющихся данных по геохимии подземных вод и распределении в них радиоактивных элементов радиевого ряда (*ряд нуклидов с массовым числом $4n+2$*) – одной из четырех природных цепочек последовательных радиоактивных превращений, начинающийся с долгоживущего нуклида ^{238}U и завершающийся стабильным изотопом ^{206}Pb (Таблица..., 1976). Особую значимость проблема радиоактивности природных вод приобретает в населенных пунктах, где используются воды нецентрализованного водоснабжения.

Методы и материалы

В основу исследования положены результаты ретроспективных (АО «Волковгеология») и собственных определений подземных водах, отобранных из родников и водозаборных скважин во время полевых работ 2023-2025 годов (рис. 1). Методика определения подробно описана в работах авторов (Novikov et al., 2021; Medeshova et al., 2024; и др.). Размер общей геохимической выборки по подземным водам южных районов Республики Казахстан представлен данными по 3630 пробам. Количество определений по отдельным радионуклидам распределилось следующим образом: уран-238 – 3532 замера; торий-234 – 203; торий-230 – 48; Радий-226 – 656; радон-222 – 776; свинец-210 – 223; полоний-210 – 47 замеров.

Результаты и обсуждение

На территории исследования выделяются четыре крупных гидрогеологических районов, приуроченные к палеозойским складчатым системам и платформенным структурам. (Гидрогеология..., 1970; Medeshova et al., 2025 и др.). Каждая из них

включает бассейны первого порядка, различающиеся тектоническим строением, условиями формирования и характером подземного стока. На востоке выделяется Енисей-Алтае-Саянский регион, приуроченный к системе новейших тектонических поднятий, в основании которых сочетаются крупные блоки герцинид, каледонид и байкалитид с наложенными разновозрастными впадинами, осадочный чехол которых выполнен породами от протерозойского до кайнозойского возраста.

Для Енисей-Саяно-Алтайского региона характерна наименьшая концентрация радионуклидов – активность радона не превышает 499,5 Бк/л при среднем показателе по всему региону 40,3 Бк/л. Предельные значения концентраций для ^{238}U (рис. 1) и ^{226}Ra не превышают 910 мкг/л и $2,1 \times 10^{-5}$ мкг/л. Значения ^{210}Pb и ^{210}Po установлены лишь в одной пробе и равняются 0,2 мкг/л. Нуклиды ^{230}Th и ^{234}Th в данном гидрогеологическом регионе не обнаружены.

На юге территории исследования расположен Жетысу Алатау-Тянь-Шаньский регион, приуроченный к одноименным палеозойским складчатым системам, включающий ряд межгорных впадин с мезо-кайнозойским заполнением. На территории Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньского региона экстремально высокие концентрации установлены для ^{238}U и ^{222}Rn . Максимальное значение урана достигает 16 мг/л (при среднем показателе 372,4 мкг/л). Радон характеризуется значениями до 5098,6 Бк/л (среднее значение – 230,7 Бк/л). Для остальных радионуклидов установлены следующие концентрации. Значения ^{226}Ra достигают 71×10^{-5} (среднее значение – 14×10^{-6}), содержание ^{210}Pb варьируется до 0,3 мкг/л (среднее – 0,15 мкг/л), для ^{210}Po максимальная концентрация достигает 0,21 мкг/л (среднее значение 0,06 мкг/л), для ^{230}Th и ^{234}Th концентрации доходят до 84×10^{-4} мкг/л (среднее значение 4×10^{-3} мкг/л и 3×10^{-9} мкг/л (при среднем значении $2,5 \times 10^{-10}$ мкг/л) соответственно.

Центрально-Казахстанский регион приурочен к Центрально-Казахстанской складчатой области, сложенной в основном каледонидами с подчиненными блоками герцинид. Складчатая область включает выступы древних докаледонских блоков. Максимальный уровень загрязнения радиоактивными элементами наблюдается на территории Скифско-Туранского и Центрально-Казахстанского регионов, где зафиксированы максимальные значения по ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{230}Th и ^{234}Th . Центрально-Казахстанский гидрогеологический регион характеризуется высокими значениями концентраций ^{230}Th и высокой активностью ^{222}Rn . Значения радона достигают 5550 Бк/л, что является наивысшим показателем в пределах южных районов Казахстана. Максимальная концентрация ^{230}Th равняется 22×10^{-3} мкг/л (среднее значение – 12×10^{-3} мкг/л). Для ^{238}U установлено значения до 8000 мкг/л при среднем показателе 107,5 мкг/л; для ^{226}Ra – 46×10^{-6} (среднее – 44×10^{-7}), для ^{210}Pb – до 5,7 мкг/л (среднее – 2,5 мкг/л); для ^{210}Po – 0,15 мкг/л (среднее – 0,1 мкг/л); для ^{234}Th – 62×10^{-10} (среднее – 13×10^{-10}).

На западе выделяется Скифско-Туранский регион, выделенный в периферийной части древней Восточно-Европейской платформы. В пределах Скифско-Туранского региона активность ^{222}Rn в отдельных точках возрастает до 5400 Бк/л (среднее значение – 123,7 Бк/л). По сравнению с другими гидрогеологическими регионами исследуемой территории, на данной площади фиксируются максимальные

значения ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{234}Th . ^{226}Ra доходит до значения 12×10^{-4} мкг/л (среднее значение 22×10^{-6} мкг/л), ^{210}Pb – 12,05 мкг/л (среднее значение 0,6 мкг/л), ^{210}Po – 8,3 мкг/л (среднее значение 0,68 мкг/л), ^{234}Th – 3,7 мкг/л (среднее значение – 1,6 мкг/л). Значения концентрации ^{230}Th не превышают 0,015 мкг/л, его среднее значение по региону – 45×10^{-4} мкг/л. Значения ^{238}U достигают 2600 мкг/л (среднее значение по региону – 45,9 мкг/л).

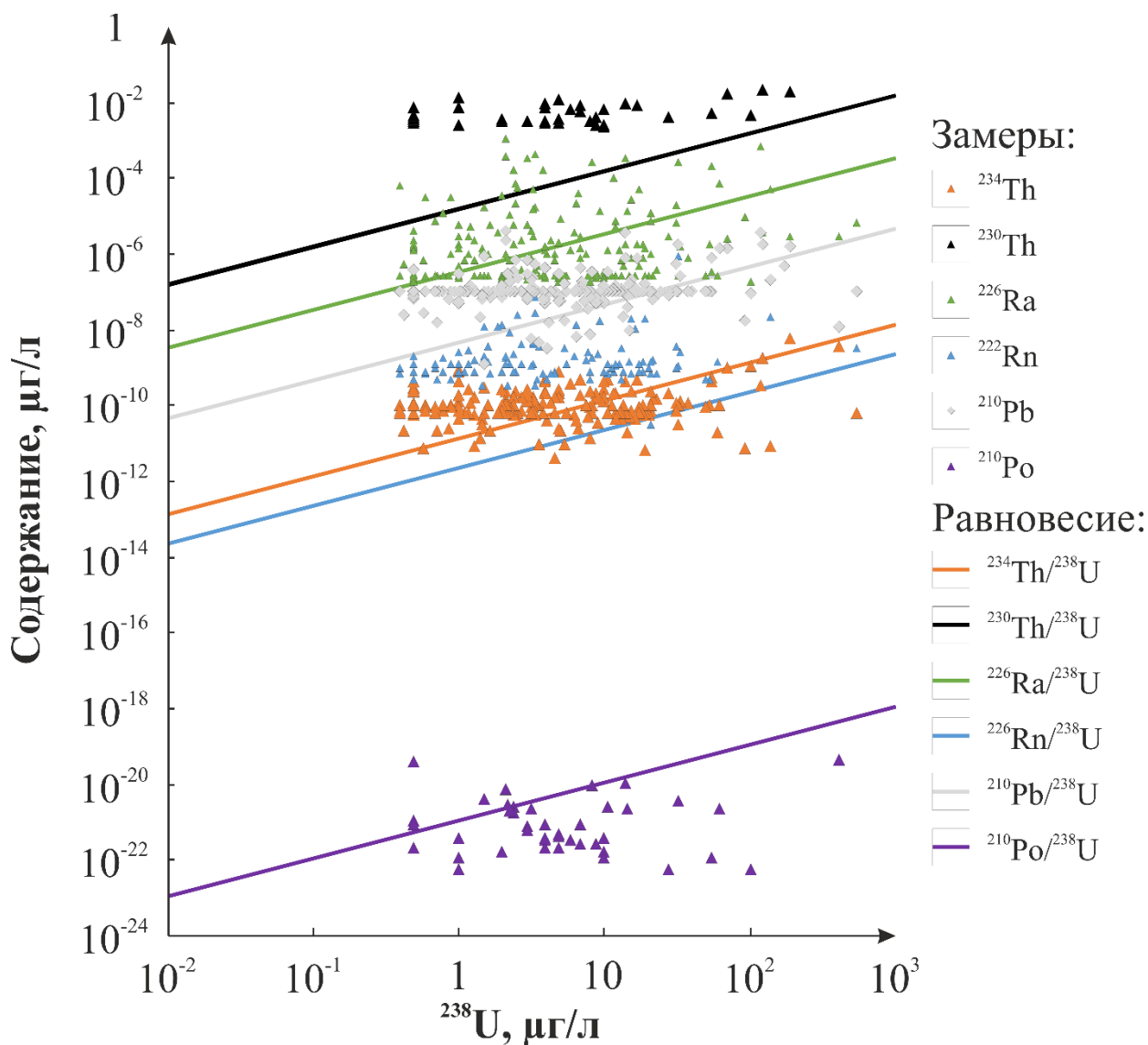


Рис. 1. Распределение содержаний дочерних изотопов по отношению к урану-238 в природных водах южных районов республики Казахстан.

Такие различия содержания обусловлены различной подвижностью радионуклидов одного ряда. Уран достаточно широко распространен в природе, его содержание в земной коре составляет 10^{-4} % масс., при этом основная часть содержится в изверженных породах. Уран обладает высокой активностью (Brown et al., 2012), реагирует практически со всеми химическими элементами (за исключением инертных газов) и образует соединения со степенями окисления +3, +4,

+5 и +6. В процессе распада ^{238}U образуется торий (^{234}U - ^{234}Th - ^{234}Pa (короткоживущий нуклид)- ^{230}Th), миграционная способность которого в сравнении с ураном значительно ниже. В кислых водах торий может образовывать соединения со степенью окисления +4, но при контакте с нейтральными водами осаждается и мигрирует преимущественно в виде коллоидных частиц или сорбированных на взвешных форм. При этом практически полностью (98,3–99,9%) и очень прочно сорбируется из растворов почвами, прочно связывается с оксидами железа и марганца, глинами, органическим веществом и др. (Moore, 1981; Рачкова и др., 2010). При нормальных условиях Th/U отношение в природных водах всегда меньше единицы. В природных водах южного Казахстана отношение ^{234}Th к ^{238}U меняется в широком диапазоне (рис. 1). При этом отмечается тенденция его уменьшения при росте содержаний ^{238}U , что обуславливается различными геохимическими обстановками. Во всех проанализированных объектах содержания ^{230}Th превышают равновесное, но также прослеживается тенденция приближения к равновесию с увеличением концентраций ^{238}U .

Следующим членом радиоактивного ряда является ^{226}Ra , содержащийся во всех урановых рудах. Равновесным состоянием в руде на 1 г ^{238}U принято считать $3,4 \times 10^{-7}$ г ^{226}Ra (Радиохимия ..., 1978). По своим химическим свойствам радий сходен с барием и другими щелочноземельными металлами. Он обладает значительно большей миграционной способностью чем уран и торий (Knauss et al., 1978), активно вымывается из руд и формирует вторичные минералы, изоморфно заменяя барий, кальций и др. В поверхностных условиях важным способом накопления является «биоаккумуляция» – замещение кальция в живых организмах. В природных водах южных районов республика Казахстан отношение ^{226}Ra к ^{238}U изменяется в широком диапазоне, зависимости не выявлены.

Вследствие радиоактивного распада ^{226}Ra образуется ^{222}Rn , единственный газообразный член ряда, являющийся типичным представителем подгруппы инертных газов. Радон содержится в природных водах в виде газа, а его растворимость определяется физическими параметрами среды (главным образом температурой). В радиевом ряду радон обладает наивысшей миграционной способностью, преодолевая значительные расстояния в проницаемых породах (например, в песчаниках) и в тектонически нарушенных зонах. На основе этих свойств основан метод радоновой съемки для оконтуривания рудных тел и разломов. В южных районах республики Казахстан практически во всех пробах природных вод отношение ^{222}Rn к ^{238}U закономерно превышает равновесное.

В результате распада радона образуется ^{218}Po , период полураспада которого составляет чуть более трех минут. Далее в цепочке радиоактивных превращений происходит быстрая последовательность α - и β -распадов до долгоживущего ^{210}Pb . Свинец достаточно широко распространен в природе, его содержание в земной коре составляет $1,6 \times 10^{-3}$ % масс., и он встречается как в осадочных, так и в магматических породах (Химия... 1982; Clulow et al., 1998). В содержащих уран и торий минералах свинец чаще всего имеет радиогенную природу и может быть вынесен кислыми дренажными водами. Сформировавшийся в растворе в ходе радиоактивного превращения радона свинец может находиться в растворенной

(в ионной форме, в виде неорганических и органических комплексов) и коллоидной формах, а также во взвешенном состоянии. Свинец относится к малоподвижным элементам, его миграция контролируется сорбцией, осаждением труднорастворимых фаз и комплексообразованием. В открытых гидрогеологических системах секулярное равновесие не достигается вследствие различных миграционных способностей отдельных членов ряда и значительной потери ^{222}Rn из системы (Asikainen..., 1981). В природных водах южного Казахстана отношение ^{210}Pb к ^{238}U меняется в широком диапазоне (рис. 1). При этом отмечается тенденция уменьшения этого отношения при росте содержаний ^{238}U . Далее в цепочке радиоактивных превращений, с вероятностью 99%, образуется ^{210}Bi , с периодом полураспада около пяти суток. Его содержание представляет значительную аналитическую сложность из-за короткого периода полураспада, ультранизких концентраций, химического сходства с другими металлами и многое другое (Еникеев, 1973; Запорожец и др., 1995). В пределах территории исследования определения не проводились. Висмут – один из наименее подвижных элементов в природных водах из-за интенсивного гидролиза, низкой растворимости соединений и высокой сорбции. В кислых дренажных водах он может находиться в формах Bi^{3+} , BiO^+ либо образовывать хлоридные комплексы. При переходе от кислых к нейтральным водам быстро осаждается в форме BiOОН или Bi(ОН)_3 . При контакте с сероводородными водами образует практически нерастворимый сульфид Bi_2S_3 , а также сорбируется на глинах и песках, содержащих железо и марганец. Дочерний нуклид ^{210}Po также имеет достаточно низкую миграционную способность. В водных средах его перенос осуществляется преимущественно в коллоидной форме или в составе взвешенных частиц. В природных водах республики Казахстан практически во всех водах отношение ^{210}Po к ^{238}U не превышает равновесное. Заканчивается радиевый ряд образованием стабильного изотопа ^{206}Pb , имеющего такие же химические свойства, как и ^{210}Pb . В замкнутой системе (например, минералы) количество накопленного ^{210}Pb прямо пропорционально времени и исходному содержанию родоначальника радиевого ряда – ^{238}U . В природных водах секулярное равновесие обычно не достигается.

Заключение

На территории исследования максимальный уровень загрязнения радиоактивными элементами наблюдается на территории Скифско-Туранского и Центрально-Казахстанского регионов, где зафиксированы максимальные значения всех нуклидов радиоактивного ряда радия. Несколько ниже концентрации всех членов радиактивного ряда зафиксированы в Центрально-Казахстанском и Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньском регионах. наименьшая активность радионуклидов радиевого ряда установлена в пределах Енисей-Саяно-Алтайского региона. Изучение активности нуклидов относительно материнского изотопа позволило установить ряд закономерностей. В гидрогеологических системах Южного Казахстана величина отношения $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ варьируется в значительных пределах. Характерно, что при низких содержаниях урана активность изотопов тория существенно преобладает ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U} > 1$), тогда как рост концентрации родительского изотопа сопровождается снижением удельной

активности ^{234}Th и отношение становится менее единицы. Аналогичный тренд прослеживается для ^{230}Th , ^{210}Pb и ^{210}Po . В отличие от них, ^{226}Ra демонстрирует хаотичное распределение без явных зависимостей. Повсеместное перенасыщение подземных вод ^{222}Rn является следствием интенсивной миграции данного газа из эманулирующего коллектора при распаде материнских нуклидов.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан грант ИРН АР26195333 «Минеральные воды Жетысу-Алатау-Балхашского бассейна: изотопно-геохимические особенности, механизмы формирования и бальнеологическая ценность» (№ 2025–2027ГФ/398 от 06.10.2025 г).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидрогеология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан. – М.: Недра, 1970.
2. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. – Рипол Классик, 1976.
3. Гидрогеология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан. – М.: Недра, 1970.
4. Medeshova, N. A., Novikov, D. A., Zhinak, K. O., Makyzhanova, A. T., Zapparov, M. R., Orynbeke, A. M., Dultsev, F. F. Uranium in the groundwaters of the Republic of Kazakhstan. Groundwater for Sustainable Development, 2025, Vol. 31, Article 101527.
5. Brown M.A., Paulenova A., Gelis A.V. Aqueous Complexation of Thorium(IV), Uranium(IV), Neptunium(IV), Plutonium(III/IV), and Cerium(III/IV) with DTPA // Inorganic Chemistry. 2012. V. 51. PP. 7741–7748
6. Moore, W. S. The thorium isotope content of ocean water. Earth and Planetary Science Letters, 1981, Vol. 53, No. 3, pp. 419–426.
7. Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение, 2010. № 6. С. 698
8. Несмеянов Ан. Н. Радиохимия. — 2-е изд., перераб.- М.: Химия, 1978. —560 с.
9. Knauss, K.G., Ku, T.L. and Moore, W.S. (1978). Radium and Thorium Isotopes in Surface Waters of East Pacific and Coastal Southern-California. Earth and Planetary Science Letters 39(2): 235-249.
10. Ред. Бокрис Дж. О. М.Химия окружающей среды: пер. с англ. 1982. 672 с.
11. Clulow F.V., Davé N.K., Lim T.P., Avadhanula R. Radionuclides (lead-210, polonium-210, thorium-230, and-232) and thorium and uranium in water, sediments, and fish from lakes near the city of Elliot Lake, Ontario, Canada // Environmental Pollution. 1998. V. 99. PP. 199–213.
12. Asikainen M. State of disequilibrium between ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra and ^{222}Rn in groundwater from bedrock //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1981. – Т. 45. – №. 2. – С. 201-206.
13. Еникеев Н. И. К миграции висмута в природных водах //Узбекский геологический журнал, 1973. № 2. - с. 23 - 26.
14. Запорожец О.А., Зинченко Н.М., Наджафова О.Ю., Сухан В.В. Твердофазный реагент для определения микроколичеств висмута (III) в воде // Химия и технология воды, 1995.- т.17.-N 6.-с.588 592.

© Ф. Ф. Дульцев, В. А. Завалей, Н. Э. Медешова, Қ. О. Жинақ, Б. Т. Тұрдалі, 2026

В. А. Казаненков¹✉

Ресурсный потенциал нефти группы пластов Ю₂-Ю₄ в Западно-Сибирской НГП

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: KazanenkovVA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе приведены результаты анализа структуры запасов нефти месторождений с залежами в верхнетюменской подсвите (батский резервуар, группа пластов Ю₂-Ю₄). Выполнена статистическая обработка данных по динамике прироста начальных извлекаемых запасов нефти в группе пластов Ю₂-Ю₄ с целью прогноза не выявленных ресурсов и их структуры. Исследования проводились на основе историко-статистического метода, заключающегося в построении кривой «начальные извлекаемые запасы-время» за период 1961-2024 гг. В результате получена зависимость, в соответствии с которой дан прогноз величины суммарных ресурсов нефти в предполагаемых к открытию новых залежах до 2050 г. Согласно выполненной оценке к 2050 г в верхнетюменской подсвите возможно прирастить порядка 1100 млн т извлекаемых запасов нефти. В большинстве новых залежей запасы не будут превышать 5 млн. т.

Ключевые слова: Западная Сибирь, верхнетюменская подсвита, пласты Ю₂-Ю₄, ресурсы нефти

V. A. Kazanenkov¹✉

Oil resource potential of the Yu₂-Yu₄ reservoir units in the West Siberian oil and gas provinces

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: KazanenkovVA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of the analysis of the structure of oil reserves associated with the Upper Tyumen subformation (Bathonian reservoir, Yu₂-Yu₄ reservoir units). Statistical processing of data on the dynamics of growth of initial recoverable oil reserves in the Yu₂-Yu₄ reservoirs was carried out in order to forecast undiscovered resources and their structure. The research was conducted on the basis of the historical-statistical method, which consists of constructing the «initial recoverable reserves-time» curve for the period 1961-2024. As a result, a dependence was obtained, according to which a forecast was given for the value of total oil resources in new accumulations expected to be discovered by 2050. According to the completed assessment, by 2050, it is possible to increase the recoverable oil reserves in the Upper Tyumen subformation by approximately 1100 million tons. In most new accumulations, reserves will not exceed 5 million tons.

Keywords: Western Siberia, Upper Tyumen Subformation, Yu₂-Yu₄ reservoir units, oil potential

Введение

Западно-Сибирская НГП в ближайшие десятилетия будет иметь первостепенное значение в обеспечении топливно-энергетического комплекса России. В то же время крупные залежи нефти, выявленные в нижнемеловых и верхне-

юрских отложениях в 60-70-х гг. прошлого века, на современном этапе освоения находятся в зрелой или завершающей стадиях разработки.

В связи со сложившейся ситуацией обеспечение дальнейшего восполнения ресурсной базы и поддержания уровней добычи нефти многими исследователями связывается с отложениями нижней и средней юры [1-4, 6, 7, 9-12 и др.]. В текущий период одним из основных региональных объектов поиска новых скоплений УВ в средней юре является батский резервуар с проницаемым комплексом, сложенным группой пластов Ю₂-Ю₄.

К настоящему времени в этом резервуаре на площади порядка 700 тыс. км² выявлено 1292 залежи нефти на 307 месторождениях. Их суммарные начальные извлекаемые запасы равны 3957,3 млн т. При этом в северных (Обь-Тазовское междуречье) и юго-восточных (Томская обл.) районах наряду с нефтяными выявлены нефтегазоконденсатные и газоконденсатные залежи.

Извлекаемые запасы месторождений в рассматриваемом объекте изменяются от <0,03 до > 500 млн т. Государственным балансом полезных ископаемых РФ минимальные запасы учтены на месторождении им. И.Н. Логачева (6 тыс. т), а максимальные на Красноленинском (535,23 млн т).

В большей части (~62 %) от общего количества месторождений запасы не превышают 5 млн. т. При этом в половине месторождений этой группы содержится от 1 до 5 млн т нефти. С увеличением объема запасов количество месторождений сокращается. Средними запасами от 5 до 30 млн. т характеризуется 90 месторождений (29 %). Наиболее крупные по запасам (более 30 млн. т) скопления нефти локализованы всего на 28 месторождениях (9 %), одно из которых является уникальным – Красноленинское. При этом в них содержится 64,2 % от общего объема запасов. Все они были открыты до 1993 г. прошлого века.

Сырьевая база нефти батского резервуара начала формироваться с 1961 г, когда в Шаимском НГР в кровле тюменской свиты были открыты первые очень мелкие по запасам залежи на Трехозерном и Мортимья-Тетеревском месторождениях. На современном этапе открытие новых залежей в группе пластов Ю₂-Ю₄ продолжается как в пределах старых месторождений (Тайлаковское, Приобское, Восточно-Сургутское, Омбинское и др.), так и на новых площадях, в том числе в районах с хорошо развитой инфраструктурой, что позволяет сокращать затраты на ввод их в разработку.

При текущей степени изученности геологоразведочными работами отложений верхней части средней юры принципиально важным является вопрос об их остаточном ресурсном потенциале нефти. В связи с этим целью настоящей работы является ретроспективный анализ формирования сырьевой базы и на основе его результатов выполнение оценки суммарных извлекаемых ресурсов нефти в группе пластов Ю₂-Ю₄ до 2050 г.

Методы и материалы

В исследованиях использовался один из историко-статистических методов, сущность которого заключается в установлении зависимости между динамикой увеличения накопленных извлекаемых запасов нефти во времени. Выбор этого

метода обусловлен тем, что он применим для оценки прогнозных и начальных суммарных ресурсов углеводородов объектов, характеризующихся достаточно длительной историей поиска и разведки [8]. То есть продолжительность этой истории должна быть обеспечена представительной статистической выборкой. Из этого следует, что к настоящему времени накопившаяся за более чем шестьдесят лет информация о запасах нефти и их приросте в батском резервуаре соответствует условиям использования выбранного метода количественной оценки. На рисунке 1 приведен график изменения кумулятивной суммы начальных извлекаемых запасов нефти во времени, построенный по фактическим данным.

Динамика изменения ресурсной базы нефти батского резервуара

В истории изучения нефтеносности тюменской свиты отчетливо выделяется два неравнозначных по продолжительности периода, которые существенно отличаются трендами прироста запасов. Эти отличия обусловлены стадийным изучением нефтегазоносности осадочного чехла от меловых комплексов к юрским в пределах отдельных территорий Западно-Сибирской НГП.

Первому периоду соответствуют 60-е гг. прошлого века (см. рис. 1). Он характеризуется спорадическим вниманием геологов к нефтеносности отложений средней юры.

К 1965 году увеличение запасов в верхнетюменской подсвите было обусловлено, главным образом, открытием первых скоплений нефти на Каменной, Пальяновской и Елизаровской площадях Красноленинского, а также на Тайлаковском и Новопортовском месторождениях. Во второй половине 60-х гг. прирост запасов существенно сократился. Главной причиной этому было целенаправленное смещение основных объемов глубокого бурения на разведку крупных залежей нефти в нижнемеловых отложениях, открытых к тому времени в центральных районах провинции и в первую очередь на Сургутском и Нижневартовском сводах. Именно этим обстоятельством объясняется ограничение начала аппроксимирующей кривой на графике 1970 г (см. рис. 1).

Второй период изучения перспектив нефтеносности тюменской свиты выделяется с начала 70-х гг. прошлого века по настоящее время. Он условно разделен на 3 этапа, каждый из которых характеризуется определенным трендом выявления ресурсов в отложениях батского яруса.

Первый этап охватывает отрезок времени с начала 70-х до начала 90-х гг. Его отличием является самый динамичный прирост запасов нефти (см. рис. 1), что было связано с резко нарастающим объемом глубокого бурения, завершением основного этапа разведки нижнемеловых залежей и началом

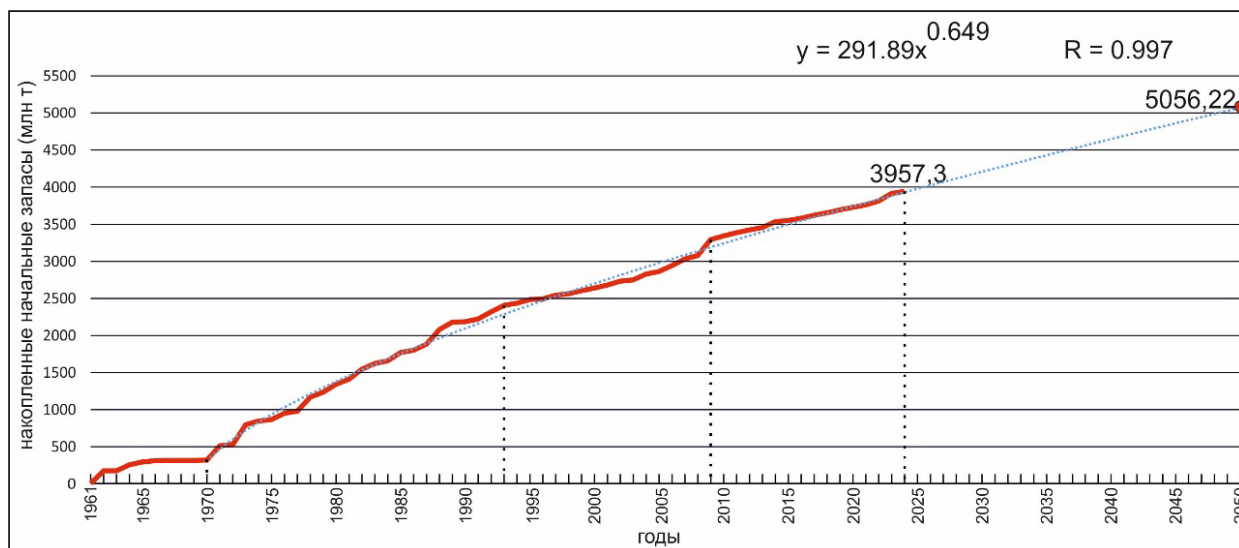


Рис. 1. Динамика увеличения накопленных извлекаемых запасов нефти в залежах верхнетюменской подсвиты во времени

системного изучения отложений средней юры с 70-х гг. в ХМАО, а позднее (с 80-х гг.) в северных районах провинции. Геологоразведочные работы выполнялись, главным образом, в пределах границ ранее открытых месторождений.

Именно на этом этапе была открыта основная часть известных в настоящее время крупных скоплений нефти в группе пластов Ю₂-Ю₄. Большинство из них приурочено к крупным положительным структурам (Сургутский свод, Верхнедемянский мегавал, Уренгойский вал).

Второй этап продолжался с 1993 г по 2008 г. В его начале отмечается существенное снижение эффективности поисков залежей нефти в верхнетюменской подсвите, что отражается на графике уменьшением наклона кривой, а затем его плавное увеличение (см. рис. 1). Замедление прироста запасов с 1993 г по 2003 г было вызвано значительным падением объемов глубокого бурения. Общеизвестно, что причиной этому стало сокращение финансирования геологоразведочных работ, связанное с глобальными процессами коренной реорганизации нефтегазового комплекса России.

Выход из стагнации и постепенное повышение интересов к нефтегазовому потенциалу тюменской свиты отмечается с 2004 г, чему в значительной степени способствовала разработка, а затем реализация крупными нефтяными компаниями программ целенаправленных поисков и разведки пропущенных залежей в средней юре в пределах традиционных территорий недропользования и вновь приобретаемых участков недр. Немаловажным фактом в последовательном наращивании к 2008 г запасов нефти стало начало масштабных поисков залежей в верхнетюменской подсвите на территории Уватского района Тюменской области.

С 2009 г произошла стабилизация ежегодных приростов запасов на фоне их минимальных колебаний (см. рис. 1). При этом наблюдаемый очень плавный устойчивый рост, обусловлен открытиями преимущественно мелких и очень

мелких скоплений нефти, что свидетельствует об неуклонном уменьшении размеров, подготавливаемых к глубокому бурению объектов.

В заключение выше приведенного исторического аспекта формирования ресурсной базы нефти батского резервуара надо отметить, что на протяжении всей истории изучения нефтеносности верхнетюменской подсвиты в Томской и Омской областях были открыты большей частью только мелкие по запасам нефтяные скопления, что не оказало существенного влияния на целостную картину динамики увеличения начальных извлекаемых запасов.

Оценка остаточных ресурсов нефти батского резервуара и их структура

Для количественной оценки не выявленных ресурсов нефти в группе пластов Ю₂-Ю₄ батского резервуара до 2050 г использовалась зависимость изменения кумулятивных начальных извлекаемых запасов в период 1970-2024 гг. (см. рис. 1). Из всех вариантов аппроксимации эта зависимость наиболее точно описывается уравнением $y = 291,89x^{0,649}$ с коэффициентом корреляции между параметрами равным 0,997, что соответствует сильной положительной связи. Выполненный на основе полученной зависимости прогноз дает основание заключить, что на территории Западно-Сибирской НГП к 2050 г в верхнетюменской подсвите возможно прирастить порядка 1100 млн т извлекаемых запасов нефти. Следует отметить, что оцениваемые ресурсы не являются локализованными, а отражают остаточный потенциал объекта в целом. Таким образом с учетом выявленных к настоящему времени запасов начальные извлекаемые ресурсы нефти батского резервуара суммарно оцениваются в 5056,22 млн т.

Представляет интерес сравнение полученного результата с ранее выполненной оценкой начальных извлекаемых ресурсов нефти в группе пластов Ю₂-Ю₄ методом внутренних геологических аналогий [4]. В цитируемой работе суммарные ресурсы нефти оценены в 4458 млн т, что на 500,7 млн т больше современных начальных извлекаемых запасов и на 598 млн т меньше полученной в настоящем исследовании оценки историко-статистическим методом.

Выше отмечалось, что на этапе 70-х – начала 90 гг. в группе пластов Ю₂-Ю₄ была открыта основная часть известных в настоящее время крупных скоплений нефти (Красноленинское, Федоровское, Тайлаковское, им. Малыка (ранее Усть-Тегусское, Восточно-Сургутское и др.). Это подтверждает установленную В.И. Шпильманом [13] (и получившую развитие в работах А.Э. Конторовича с соавторами) закономерность, которая заключается в открытии наиболее крупных скоплений УВ уже на начальных этапах поисковых работ (закон «геолого-разведочного фильтра»). Также выше указывалось, что на протяжении последних 15 лет наблюдается очень плавное ежегодное устойчивое увеличение начальных запасов. При этом за этот отрезок времени открывалось в среднем от 30 до 35 залежей в год.

В связи с этим возникает вопрос, какими величинами запасов будут характеризоваться новые залежи нефти в батском резервуаре?

На рисунке 2 приведен график распределения залежей по классам различной крупности извлекаемых запасов нефти, выявленных в группе пластов Ю₂-Ю₄ в 2010-2024 гг. Не трудно заметить, что в общей массе преобладают очень

мелкие и мелкие залежи. На их долю приходится 67 % запасов. Исходя из этого предполагается, что к 2050 г в тюменской свите будут открываться залежи преимущественно с запасами до 5 млн т. При этом открытие крупных скоплений нефти согласно полученным результатам прогноза маловероятно. По-видимому, новые залежи будут преимущественно связаны с все более мелкими ловушками, приуроченными к локальным поднятиям.

Основанием этому предположению являются результаты ранее целенаправленно выполненного анализа доминирующих типов ловушек. В батском резервуаре наиболее распространенными являются пластовые, сводовые залежи, большая часть которых литологически, тектонически, или литологически и тектонически экранирована. Это обусловлено хорошо отработанной в Западной Сибири методикой и технологией сейсморазведки картирования ловушек в пределах антиклинальных структур. Меньшее количество залежей выявлено в структурно-литологических, литологических и литолого-стратиграфических ловушках. К наименее распространенным относятся массивные залежи [5].

При этом надо отметить, что с усовершенствованием методики картирования сложно построенных неантиклинальных ловушек остаточный ресурсный потенциал нефти батского резервуара может быть увеличен.

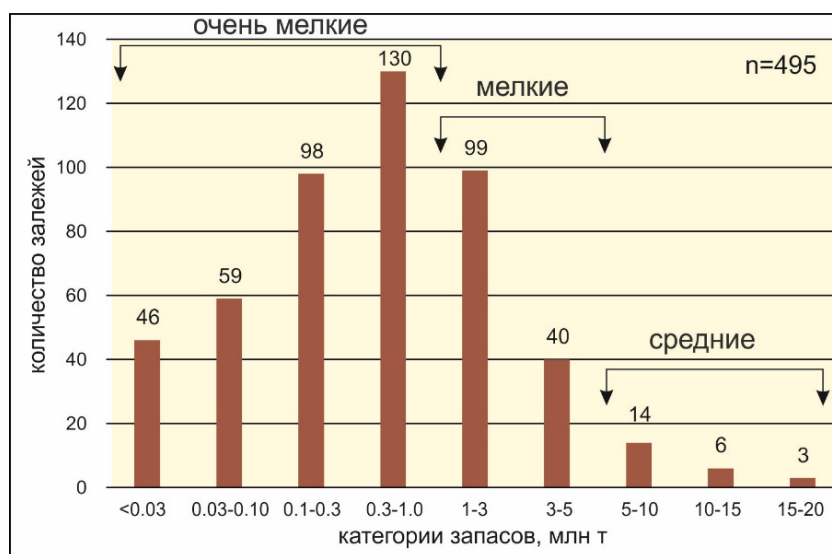


Рис. 2. Распределение залежей по категориям извлекаемых запасов нефти, выявленных в группе пластов Ю₂-Ю₄ в 2010-2024 гг.

Заключение

Сырьевая база нефти батского резервуара (группа пластов Ю₂-Ю₄) начала формироваться с 1961 г. К настоящему времени в этом резервуаре на площади порядка 700 тыс. км² выявлено 1292 залежи нефти на 307 месторождениях. Их суммарные начальные извлекаемые запасы равны 3957,3 млн т.

В истории изучения нефтеносности батского резервуара динамика увеличения ресурсной базы была обусловлена стадийным изучением нефтегазоносности осадочного чехла от меловых комплексов к юрским в пределах отдельных

территорий Западно-Сибирской НГП. Причем наиболее крупные скопления нефти открывались в первую очередь (закон «геологоразведочного фильтра»).

Согласно выполненной оценке на основе историко-статистического метода, заключающегося в построении кривой «начальные извлекаемые запасы-время» за период 1961-2024 гг., на территории Западно-Сибирской НГП в верхнетюменской подсвите до 2050 г возможно прирастить порядка 1100 млн т извлекаемых запасов нефти.

Согласно сложившейся в последние годы тенденции результатов поисковых и разведочных работ большая часть новых открываемых залежей в верхнетюменской подсвите будет содержать запасы нефти не более 5 млн т. Причем значительная часть этих залежей может быть открыта в пределах уже известных месторождений.

В перспективе снижение величины приращиваемых запасов нефти ежегодно открываемых залежей будет обусловлено ухудшающейся структурой остаточной ресурсной базы, напрямую связанной с вовлечением в поисковый процесс все меньших по размеру перспективных объектов, приуроченных к локальным структурам. При этом с усовершенствованием методики картирования сложно построенных неантиклинальных ловушек остаточный ресурсный потенциал нефти батского резервуара увеличится.

Задача дальнейших исследований заключается в выполнении вероятностной оценки остаточных ресурсов нефти в верхнетюменской подсвите и в обосновании распределения не выявленных скоплений по крупности.

Благодарности

Работа выполнена научных тем FWZZ-2026-0048 и FWZZ-2026-0045 Государственной программы ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасенков А.П., Скоробогатов В.А. Нефть Западной Сибири. Прошлое, настоящее, будущее // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2022. – № 2. – С. 12-26.
2. Ахмедсафин С.К., Рыбальченко В.В., Меркулов А.В. и др. Перспективы и технологии поисков и разведки залежей углеводородов в ачимовских и юрских отложениях Ямало-Ненецкого автономного округа // Геология нефти и газа. – 2016. – № 2. – С. 11-17.
3. Брехунцов А.М., Нестеров И.И. (мл.), Нечипорук Л.А Современное состояние и перспективы освоения ресурсов нефти и газа юрских горизонтов Западной Сибири в свете прогнозов академика И.М. Губкина // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3-4, с. 445-454.
4. Гулари Ф.Г., Девятов В.П., Демин В.И. и др. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней - средней юры Западно-Сибирской провинции. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 156 с.
5. Казаненков В.А. Закономерности размещения залежей углеводородов в пластах малышевского горизонта (средняя юра, Западная Сибирь) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 11с. – С. 56-63.
6. Конторович В.А., Бурштейн Л.М. Современное состояние и ресурсный потенциал Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Бурение и нефть. – 2025. – № 12. – С. 3-11.
7. Курчиков А.Р., Бородин В.Н. Характеристика геологического строения и нефтегазоносности юрского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири. – Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2015. – 140 с.

8. Методическое руководство по количественной и экономической оценке ресурсов нефти, газа и конденсата России. – М.: ВНИГНИ. – 2000. – 189 с.
9. Мкртчян О.М. Актуальные направления геологического изучения недр Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2018. – № 3. – С. 37–41.
10. Скоробогатов В.А. Юрский продуктивный комплекс Западной Сибири: прошлое, настоящее, будущее // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2017. – № 3 (31). – С. 36-58.
11. Судат Н.В. Прогноз нефтегазоносности в ХМАО-Югре – с создания НАЦ РН им. В.И. Шпильмана и до наших дней // Недропользование XXI век. – 2018. – № 4. – С. 76-87.
12. Сурков В.С., Смирнов Л.В., Гурари Ф.Г., Казаков А.М. Нижнесреднеюрские отложения самостоятельный нефтегазоносный комплекс Западно-Сибирской плиты // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 1993. – № 3. – С. 15-21.
13. Шпильман В.И. Количественный прогноз нефтегазоносности. – М.: Недра. – 1982. – 215 с.

© В. А. Казаненков, 2026

К. А. Канзычаков¹, К. И. Канакова^{1,2✉}, В. Д. Корчуганов¹, А. Ю. Калинин^{1,2}

Особенности строения тюменской свиты Пудинского мезоподнятия по результатам сейсмической интерпретации

¹Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kanakovaki@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе выявлены сейсмогеологические признаки палеорусловых и палеотектонических элементов, контролирующих строение и распределение песчаных тел тюменской свиты в пределах Пудинского мезоподнятия. На Останинском месторождении по данным амплитудной и спектральной декомпозиции выделены палеорусловые тела, подтвержденные результатами бурения и корреляцией разрезов. Установлено, что скважины, расположенные в пределах интерпретированных каналов, вскрывают единые песчаные тела пласта Ю₄, тогда как вне каналов разрез представлен преимущественно переслаиванием аргиллитов, алевролитов и маломощных песчаников. Для Рыбального месторождения выявлена пространственная связь зон увеличенных мощностей тюменской свиты с палеограбенами, выделяемыми по данным кластеризации волновых форм. Показано, что комплексное применение методов динамической интерпретации позволяет повысить достоверность прогноза песчаных тел и уточнить фациальную модель юрских терригенных отложений.

Ключевые слова: палеорусла, сейсмическая интерпретация, спектральная декомпозиция, RGB-смешивание

K. A. Kanzychakov¹, K. I. Kanakova^{1,2✉}, V. D. Korchuganov¹, A. Yu. Kalinin^{1,2}

Structural features and distribution of sand bodies in the tyumen formation within the Pudino mezouplift based on seismic interpretation data

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kanakovaki@ipgg.sbras.ru

Abstract. The aim of the study was to identify seismogeological indicators of paleochannel forms and paleotectonic elements controlling the architecture and distribution of sand bodies. To achieve this, an integrated set of seismic interpretation methods was applied, including amplitude and spectral decomposition, seismic attribute analysis, and waveform clustering. At the Ostaninskoye field, paleochannel bodies were identified and confirmed by well data, while at the Rybálnoye field, zones of increased Tyumen Formation thickness were found to be associated with paleograbens. The results can be used for predicting sand bodies, refining facies interpretation, and improving the reliability of geological modeling.

Keywords: paleochannels, seismic interpretation, spectral decomposition, RGB blending

Введение

Территория исследований расположена в Парабельском районе Томской области, примерно в 360 км от г. Томска.

Тюменская свита Западной Сибири характеризуются сложным литологическим строением, латеральной неоднородностью песчано-алевритовых тел и существенной изменчивостью коллекторских свойств, что затрудняет прогноз зон развития хороших коллекторов и построение геологической модели [1, 2]. Для месторождений Пудинского мезоподнятия особую актуальность имеет выявление палеорусловых форм и палеотектонических элементов, контролировавших условия осадконакопления и пространственное распределение песчаных тел. Дополнительный интерес к данной задаче обусловлен тем, что морфометрические и геометрические параметры древних русловых систем могут использоваться для более обоснованной определения мощности и строения песчаных тел тюменской свиты [3].

Целью работы является выявление сейсмогеологических признаков палеорусловых форм и палеотектонических элементов, контролирующих строение и распределение песчаных тел тюменской свиты в пределах Пудинского мезоподнятия.

Методы и материалы

В качестве исходной базы использованы материалы геолого-геофизического изучения района, произведена корреляция данных ГИС по скважинам, выполнены структурные построения по подошве баженовской свиты (ОГ П^а), по кровле доюрского фундамента (ОГ Ф₂), а также по кровле пласта Ю₆ (ОГ Г₂^а).

Для решения интерпретационных задач использовался комплекс программных решений, разработанных авторскими коллективами НГУ и ИНГГ СО РАН. Структурная интерпретация была выполнена в ПО W-SEIS (ИНГГ СО РАН), динамическая – в модулях сейсмофациально анализа и цветового смешивания ПО Аркаим, которое разрабатывается в НГУ. Так же ряд операций по картированию палеорусловых тел, выполнялся в модуле LithoQB (НГУ).

Для анализа внутреннего строения продуктивного интервала применялись методы амплитудной и частотной декомпозиции, включая RGB-срезы в окне У₂–У₆ для частот 17, 33 и 44 Гц, а также 10, 20 и 30 Гц, срезы RMS-амплитуд в целевых временных окнах, сверточное моделирование, анализ временных разрезов, срезов когерентности и кластеризацию по форме волнового поля. Использованный комплекс методов ориентирован на выявление литофациальной неоднородности и геометрии терригенных тел, что соответствует современным представлениям о строении аллювиальных отложений [1, 3].

Дополнительно интерпретация выполнялась в ПО LithoQB, в которой реализован метод спектральной декомпозиции CLSSA (Constrained Least-Squares Spectral Analysis) [4], основанный на решении обратной задачи поиска оптимального спектра в скользящем временном окне. За счет итерационной постановки метод обеспечивает более высокое временное и частотное разрешение по сравнению со стандартным оконным преобразованием Фурье. Это позволило уменьшить влияние помех от

контрастных отражений доюрского комплекса и более четко выделить палеорусловые тела. Для дальнейшего оконтуривания использовался нейросетевой инструмент интерактивного выделения геологических объектов, интегрированный в LithoQB (рис. 1).

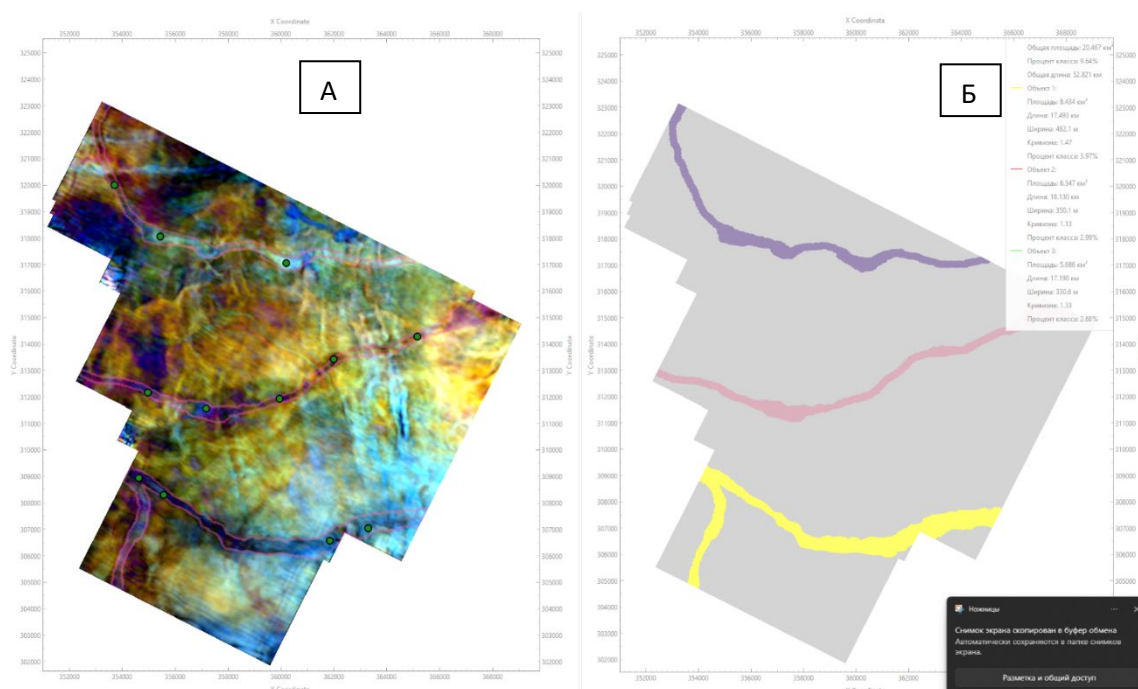


Рис. 1. Скриншот из ПО LithoQB.

А – результат смешивания трех срезов частот (25,35,45 гЦ),
Б – автоматически выделенные тела.

Результаты

На Останинском месторождении по данным амплитудной и спектральной декомпозиции выделена серия тел, интерпретируемых как объекты палеоруслового генезиса. Их геометрия прослеживается на амплитудных срезах с шагом 2 мс и подтверждается сопоставлением со скважинными данными. Положение интерпретированных контуров согласуется с литологическим строением разреза: в пределах одного из выделенных каналов 5 скважин вскрывают один и тот же пласт песчаника Ю₄. Напротив, ряд скважин, не попадающих в выделенные каналные формы, характеризуются преимущественно переслаиванием алевролитов и аргиллитов с маломощными песчаными прослоями. Подобное соотношение песчаных и глинисто-алевритовых разностей соответствует представлениям о седиментационной неоднородности терригенных коллекторов и закономерностям изменения их фильтрационно-емкостных свойств [1, 2].

Для Рыбального месторождения выполнен анализ палеоразрезов, выровненных по горизонту I₂, корреляционных схем юрских отложений по скважинам и кубов когерентности волнового поля. Показано, что применение методов спектральной и амплитудной декомпозиции в данном случае затруднено вследствие близости и высокой контрастности кровли доюрского комплекса. Вместе с тем

увеличение мощностей тюменской свиты пространственно соотносится с палеограбенами, а зона их развития может быть выделена с помощью кластеризации по форме волнового поля в интервале Y_2 – Y_6 .

Заключение

Комплексное применение методов амплитудной и спектральной декомпозиции, RMS-анализа, когерентности и кластеризации волнового поля позволяет выявлять палеорусловые и палеотектонические элементы в отложениях тюменской свиты. Для Останинского месторождения установлены сейсмогеологические признаки палеорусловых тел, подтверждаемые скважинными данными. Для Рыбального месторождения показана связь зон увеличенных мощностей тюменской свиты с палеограбенами. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозе песчаных тел, уточнении фациальной интерпретации и последующем построении геологической модели. Использование седиментологических представлений о строении терригенных тел [1], данных о петрографии и коллекторских свойствах песчано-алевритовых пород региона [2], а также морфометрических подходов к анализу палеорусел [3] повышает обоснованность интерпретации полученных результатов.

Благодарности

ПО LithoQB развивается при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUS-2025-0015)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барабошкин, Е. Ю. Практическая седиментология (терригенные коллекторы). Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 2007.
2. Бурлева О.В., Вакуленко Л.Г., Дульцева О.В., Ян П.А. / Петрография и коллекторские свойства алеврито-песчаных пород горизонта Ю1 (келловей - оксфорд) на юго-востоке Западной Сибири / Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири – № 1 (29) – С. 30-42 – 2017
3. Ольнева Т.В., Орешкова М.Ю., Буторин А.В., Егоров А.С. / Морфометрический подход к количественной оценке мощности отложений меандрирующих палеорусел тюменской свиты Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна / Георесурсы, 26(3), с. 143–150. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.15>
4. Puryear, C.I., Portniaguine, O.N., Cobos, C.M., Castagna, J.P. (2012). Constrained least-squares spectral analysis: Application to seismic data. Geophysics, 77(5), V143–V167.

© К. А. Канзычаков, К. И. Канакова, В. Д. Корчуганов, 2026

Л. Н. Константинова¹✉, С. А. Моисеев^{1,2}, Е. В. Бобкова¹, П. С. Лапин¹

Изучение закономерностей распределения емкостно-фильтрационных свойств пород в карбонатном комплексе венда и нижнего кембрия центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: konstantinova1n@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению закономерностей распределения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород в карбонатном комплексе венда и нижнего кембрия центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Актуальность исследования обусловлена высокими перспективами нефтегазоносности карбонатных резервуаров, которые до настоящего времени остаются недостаточно изученными по сравнению с терригенными комплексами. Цель работы – выявление зон развития улучшенных коллекторов на основе построения карт пористости для основных продуктивных горизонтов. Установлено, что повышенные ФЕС связаны с мелководными органогенными постройками, с образованием зон повышенной трещиноватости под влиянием траппового магматизма, с проявлением дизъюнктивной тектоники, а также с диагенетической пористостью цианобактериальных матов. Показана неоднородная информативность данных по разным горизонтам. Выводы могут быть использованы для прогноза зон нефтегазонакопления и планирования поисково-разведочных работ.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, пористость, венд, нижний кембрий, осинский горизонт, Лено-Тунгусская провинция

L. N. Konstantinova¹✉, S. A. Moiseev^{1,2}, E. V. Bobkova¹, P. S. Lapin¹

Study of the distribution patterns of reservoir properties of rocks in the Vendian and Lower Cambrian carbonate complex of the central and southern regions of the Lena-Tunguska petroleum province

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: konstantinova1n@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article is devoted to studying the distribution patterns of reservoir properties in rocks of the carbonate complex of the Vendian and Lower Cambrian in the central and southern areas of the Lena-Tunguska petroleum province. The relevance of the research stems from the high prospects for the petroleum potential of carbonate reservoirs, which to date remain insufficiently studied compared to terrigenous complexes. The aim of the work is to identify zones of enhanced reservoir development based on constructing porosity maps for the main productive horizons. It has been established that enhanced reservoir properties are associated with: shallow-water organogenic structures; development of high-fracture zones influenced by trap magmatism and tectonic activation; diagenetic porosity of cyanobacterial mats. Heterogeneous data informativeness across different horizons has

been demonstrated. The findings can be used for forecasting hydrocarbon accumulation zones and planning exploration activities.

Keywords: carbonate reservoirs, porosity, Vendian, Lower Cambrian, Osinsky Horizon, Lena-Tunguska province

Введение

В настоящее время на территории центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (ЛТ НГП) основные разрабатываемые запасы УВ связаны с терригенными и карбонатными отложениями венда. В последних выделяются ряд продуктивных горизонтов такие как осинский, усть-кутский (юряхский), преображенский. Геологическое строение, распространение, условия формирования коллекторов этих горизонтов рассматривались в разные годы широким кругом специалистов [1-6]. В ряде работ проведено литолого-фациальное районирование с целью изучения направленности вторичных преобразований порового пространства [7-9]. Все эти исследования рассматривают общую картину распределения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород и некоторые взаимосвязи их обуславливающими. Для выявления более точных закономерностей изучения распределения ФЕС пород в карбонатном комплексе венда центральных и южных районов ЛТ НГП необходимо построить карты пористости. Выполненные построения на изучаемой территории впервые позволили выявить основные закономерности распределения ФЕС для карбонатных горизонтов венда (юряхский, преображенский) и кембрия (осинский), что позволило спрогнозировать зоны развития коллекторов.

Методы и материалы

На территории Сибирской платформы карбонатные резервуары венда и нижнего кембрия приурочены к усольскому, даниловскому и частично тирскому региональным горизонтам. Для построения карт пористости использовались данные из дел скважин или отчетов, где было выполнено петрофизическое обоснование расчета коэффициента пористости на основе принятых керновых зависимостей и материалов ГИС, данные, полученные из отчетов по подсчету запасов нефти и газа на месторождениях Сибирской платформы. В качестве опорных и наиболее кондиционных точек для построения карт пористости рассматривались центры месторождений или отдельных блоков где пористость того или иного горизонта была обоснована по результатам подсчета запасов и принята экспертами ГКЗ РФ. Менее кондиционными представляются значения пористости, принятые по данным интерпретации ГИС взятых из дел скважин, поскольку эти значения определялись в разные годы, в различных организациях. По этим причинам полученные петрофизические зависимости могут значительно отличаться. Керновые данные определения пористости принимались только в тех случаях, когда данные пористости были представлены равномерно и в достаточном объеме (не менее одного определения на 1 метр пласта). Осинский горизонт выделен в объеме усольской свиты. Стратиграфическими аналогами горизонта являются билирская свита в Ботуобинско-Сюдджерской фациальной области (Непско-Ботуобинская НГО) и моктаконская свита в Бахтинской фациаль-

ной области (Южно-Тунгусская НГО) [10]. Даниловский горизонт подразделяется на верхнеданиловский, в объеме тэтэрской свиты (усть-кутский продуктивный горизонт (ПГ) и ее стратиграфического аналога юряхской свиты, где выделен юряхский ПГ); на среднеданиловский в объеме собинской свиты (аналог кудулахская свита) и нижнеданиловский который соответствует катангской свите (аналог успунская свита), в нижней части которой выделен преображенный ПГ. Методологической основой послужило обобщение данных по 909 скважинам, включая результаты интерпретации ГИС, керновые определения и материалы подсчета запасов. Впервые построены карты пористости для каждого горизонта, позволившие локализовать области с максимальными значениями (до 22,5 %).

Результаты

Максимальное значение пористости в осинском горизонте (22,5 %) было отмечено в скважине № 12 Куюмбинской площади на территории Байкитской НГО (рис. 1). В целом следует отметить, что наибольшие значения пористости наблюдаются на востоке Сибирской платформы. Это связано, вероятно, с условиями осадконакопления. Осинский горизонт на востоке формировался в зоне органогенных построек сине-зеленых водорослей ближе к поверхности воды, в то время как на западе в более глубоководных условиях [11-16].

Также на карте пористости осинского горизонта выделяется еще две зоны с повышенными значениями пористости: в районе Байкитской НГО и в центральной части Ангара-Ленской НГО. На территории Байкитской НГО, вероятно, это связано с крупной зоной накопления солей в осинское время с последующим их растворением за счет теплового воздействия силла и таким образом влиянием на структуру порового пространства, создавая дополнительные пустоты. В центральной части Ангара-Ленской НГО в осинское время выделяется зона повышенных мощностей, которая приурочена к осинской площади.

Максимальные значения пористости в усть-кутском горизонте (22,3 %) наблюдаются в скважине № 2 Вакунайской площади на территории Непско-Ботубинской НГО.

Повышенные значения пористости в верхнеданиловском региональном резервуаре (тэтэрская свита) отмечены на востоке исследуемого района, поскольку формирование свиты происходило в схожих условиях осадконакопления мелководной зоны эпиконтинентального бассейна [16] (рис. 2).

На карте пористости собинской свиты наблюдается иная картина, в сравнении с вышележащими горизонтами. Максимальные значения пористости отмечены в скважине № 12 Куюмбинской площади на территории Байкитской НГО (рис. 3), а также выявлены в северо-западной и северо-восточной частях исследуемой территории.

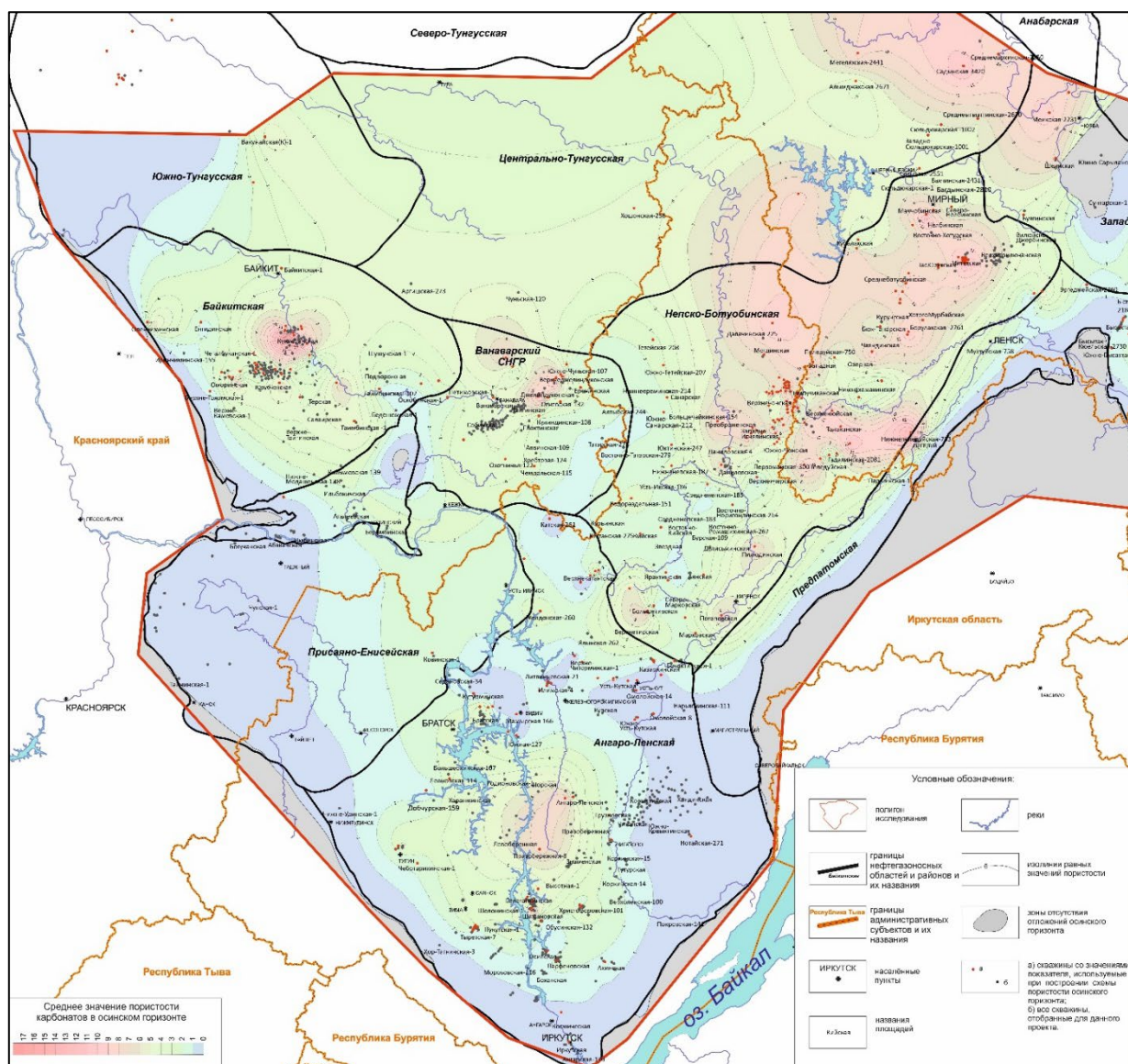


Рис. 1. Карта пористости осинского продуктивного горизонта усольской свиты

По всей видимости это обусловлено не столько геологическими факторами, сколько ограниченным количеством исходных данных. В частности, отмечается некондиционная петрофизическая информация по кудулахской свите в восточной части Сибирской платформы

Анализ пространственного распределения параметра на составленной карте пористости преображенского горизонта, залегающего в нижней части катангской свиты, позволяет выделить зону максимальных значений, локализованную в центральной части Непско-Ботубобинской нефтегазоносной области (НГО). Наивысший зафиксированный показатель пористости зарегистрирован в скважине № 20 на Вакунайской площади (рис. 4).

В катангское время морфология дна седиментационного бассейна характеризовалась относительно выровненным рельефом, что создавало благоприятные условия для развития сине-зеленых водорослей.

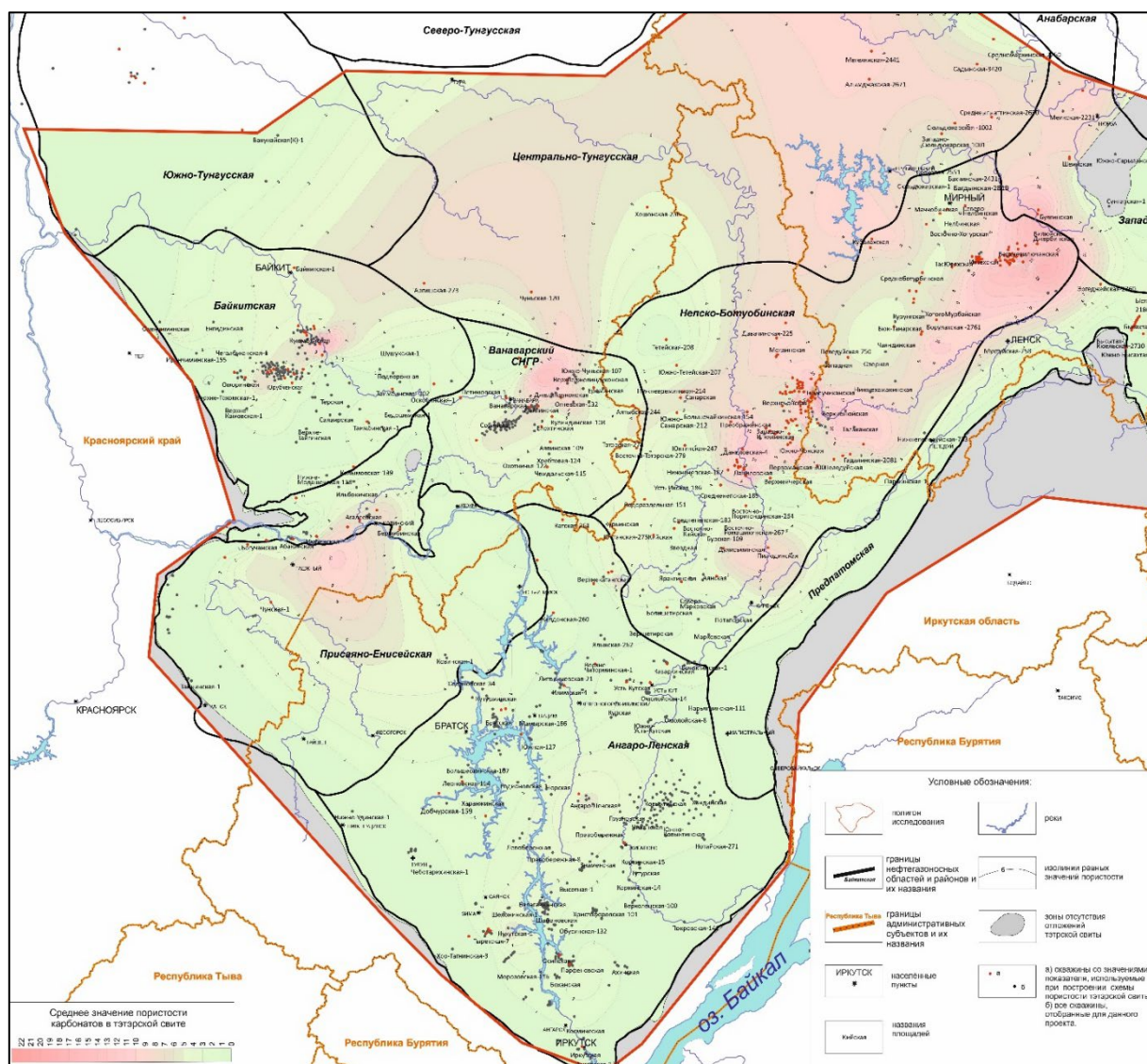


Рис. 2. Карта пористости усть-кутского (юряхского) продуктивного горизонта верхнеданиловского регионального горизонта

Эти биогенные постройки и постседиментационные преобразования предопределили формирование пород-коллекторов.

Преображенский горизонт распространен не на всей изучаемой территории. В западной части вдоль Енисейского кряжа, в это время формировались преимущественно терригенные отложения, поэтому глинисто-карбонатная катангская свита замещается на терригенную тохомскую, в которой в нижней части развит песчаный продуктивный пласт Б-VII на территории Байкитской антеклизы; в Ангарской зоне складок катангская свита имеет более полный разрез и в ее основании добавляются терригенные редколесная и мошакская свиты.

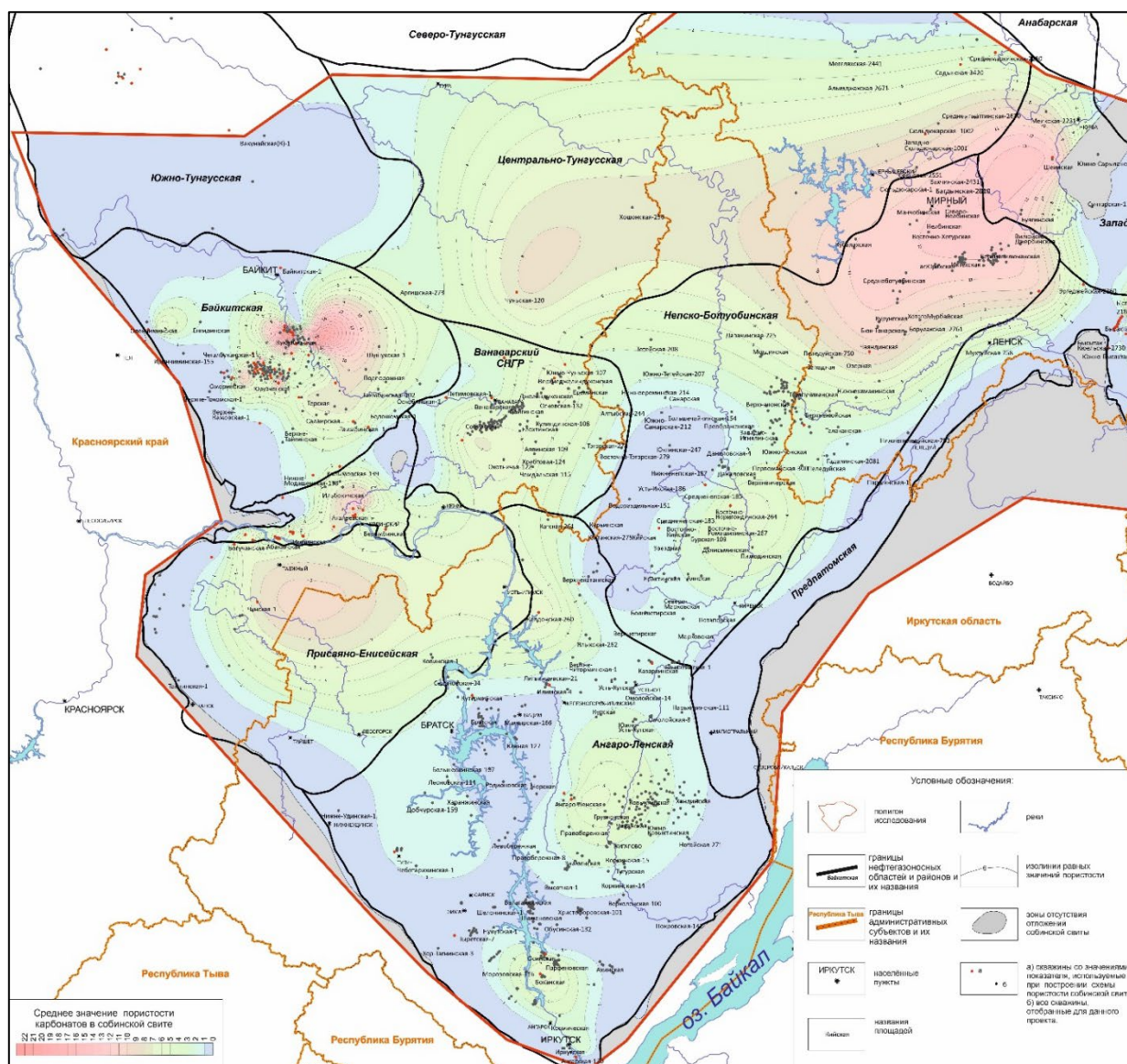


Рис. 3. Карта пористости отложений среднеданиловского регионального горизонта

На Куюмбинском палеоподнятии нижняя часть катангской свиты и ее терригенных аналогов не отлагалась, поэтому после длительного перерыва в осадконакоплении на рифейских породах залегает средняя часть свиты, в основании которой залегают тонкоплитчатые глинистые доломиты с высокой трещиноватостью.

Таким образом, на территориях Байкисткой, Присяжно-Енисейской НГО и Нижнеангарского СНГР высокие значения пористости не связаны с преобразенским горизонтом в отличие от Непско-Ботуобинской НГО и Ванаварского СНГР, расположенными в западной и центральной частях исследуемой территории.

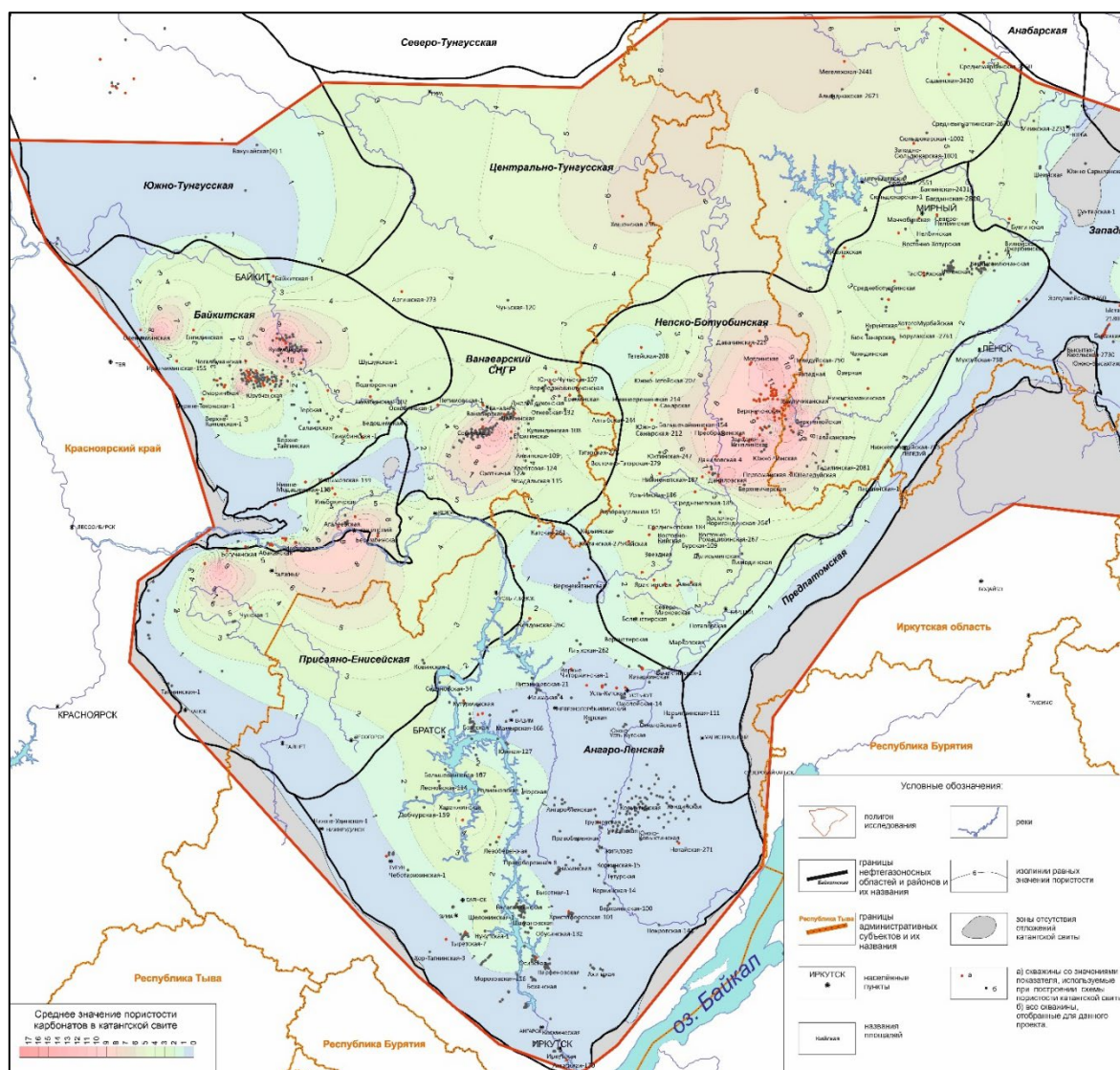


Рис. 4. Карта пористости отложений нижнеданиловского регионального горизонта

Обсуждение

Построенные карты пористости для карбонатных горизонтов венда и нижнего кембрия Лено-Тунгусской провинции впервые позволили пространственно обобщить разрозненные петрофизические данные и выявить основные зоны развития улучшенных коллекторов. Выделенные зоны повышенной пористости в целом соответствуют ранее известным критериям (рифогенные постройки, трещиноватость, влияние траппов), однако впервые представлены в виде количественных карт. Ограничением работы является неравномерная кондиционность данных (разные годы, организации, методы интерпретации ГИС), а также слабая обеспеченность керном для ряда горизонтов.

Заключение

В осинском горизонте максимальная пористость приурочена к востоку платформы (зона органогенных построек). В верхнеданиловском резервуаре повышен-

ные ФЕС (до 22,3 %) также тяготеют к восточным районам и связаны с мелководными условиями накопления карбонатов. Карта пористости среднеданиловского резервуара является предварительной из-за недостаточного количества данных по восточной части; для корректной интерпретации требуется доизучение петрофизических параметров кудулахской свиты. В преображенском горизонте – зона максимальной пористости локализована в центральной части Непско-Ботуобинской НГО и Ванаварского СНГР, которая связана с цианобактериальными постройками и диагенетической пористостью. На западе и северо-западе высокие значения обусловлены другими типами коллекторов (трещиноватость, терригенные прослои).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перспективы нефтегазоносности карбонатных пластов вендско-нижнекембрийских галогенно-карбонатных отложений и проблемы их освоения (центральные и южные районы Лено-Тунгусской НГП) / Г. Г. Шемин, С. А. Моисеев, А. Г. Вахромеев [и др.]; науч. редакторы В. А. Конторович, Д. П. Гладкочуб; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геол. и геофиз. им. А. А. Трофимука, Ин-т земной коры, ИНГЕОСЕРВИС. – Новосибирск: СО РАН, 2025. – 199 с.
2. Шемин Г.Г. Подсолевой карбонатный венд-нижнекембрийский комплекс Непско-Ботуобинской антеклизы - высокоперспективный объект подготовки запасов нефти // Малоизученные нефтегазоносные регионы и комплексы России (прогноз нефтегазоносности и перспективы освоения): Тезисы докладов научно-практической конференции, Москва, 27-29 ноября 2001 г. – ВНИГНИ – М. – С. 39-41 – 2001
3. Шемин Г.Г. Ереминско-Чонское скопление нефти в преображенском резервуаре – крупнейший объект по подготовке запасов и добыче углеводородного сырья в Восточной Сибири / Г.Г. Шемин; отв. ред.: М.И. Эпов, В.С. Старосельцев; Рос. акад. наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука; Министерство природ. ресурсов и экологии РФ, Сиб. науч.-исслед. ин-т геологии, геофизики и минерал. сырья. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. – 122 с.
4. Шемин Г.Г., Вахромеев А.Г., Смирнов О.А., Смирнов А.С., Моисеев С.А., Глазырин П.А., Деев Е.В. Строение, состав, оценка качества коллекторов и перспектив нефтегазоносности продуктивных карбонатных пластов венда и кембрия центральных и южных районов Сибирской платформы // Геология нефти и газа. – 2023. – № 6. – С. 41–65. DOI: 10.41748/0016-7894-2023-6-41-65.
5. Пономаренко А.С. Геология залежей карбонатных коллекторов Непско-Ботуобинской антеклизы // Вестник Евразийской науки, 2020 №6, <https://esj.today/PDF/16NZVN620.pdf> (доступ свободный).
6. Константинова Л.Н. Перспективы нефтегазоносности карбонатного комплекса венда на юго-западе Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений – № 12 – С. 4-13 – 2018
7. Бурова И.А. Карбонатные коллекторы вендско-нижнекембрийского нефтегазоносного комплекса Восточной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2010. - Т.5. - №2. - http://www.ngtp.ru/rub/4/23_2010.pdf
8. Маринов Р.В., Фомин А.М. Особенности литолого-фациального районирования вендских и кембрийских отложений на территории Среднеленской НГО // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21-22 мая 2025 г., Новосибирск: сборник

материалов в 8 т. Т. 2: Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 1 – С. 90-95 – 2025

9. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьева А.В., Пошибаев В.В., Коновальцева Е.С. Природные резервуары рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга сибирской платформы: особенности строения и закономерности размещения // Геология нефти и газа. – 2010. – № 6 – С. 54–64.

10. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия история развития) / Н.В. Мельников; Министерство природ. ресурсов РФ, СНИИГГиМС. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. – 148 с.

11. Постникова О.В., Китаева И.А., Репина М.О., Омельченко О.В. Влияние вторичных преобразований на формирование коллекторских свойств осинского горизонта Непско-Ботубинской антеклизы// территория НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 11. – С. 24–27.

12. Органогенные постройки осинского горизонта нижнего кембрия в Талакан-Верхне-чонской зоне нефтегазонакопления (Сибирская платформа) / Н.В. Мельников, В.С. Ситников, В.И. Васильев и др.//Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 8. – С. 856-864.

13. Литология и условия формирования резервуаров нефти и газа Сибирской платформы/Ред. Гурова Т.И., Чернова Л.С. – М.: Недра. – 1988. – 254 с.

14. Воробьев В.С., Вилесов А.П., Боброва О.В., Макаров И.Е. Строение и условия образования осинского горизонта в пределах Верхнечонского месторождения//Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – №12. – С. 4-13.

15. Модель осинского проницаемого горизонта (пласт Б1) на месторождениях Иркутской области / Губина Е.А., Тихонова К.А., Винокурова О.А, Лукьянов В.В. и др.//Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 2. – С.46-51

16. Китаева И.А., Кузнецов А.С. Характеристика структуры пустотного пространства и закономерности распределения пород-коллекторов осинского горизонта Непско-Ботубинской антеклизы//Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: тез. докл. IX Всерос. науч.-техн. конф., 30 янв. – 1 февр. 2012 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2012. – Ч. I, Секции 1–4. – С. 50–51

© Л. Н. Константинова, С. А. Моисеев, Е. В. Бобкова, П. С. Латин, 2026

С. Б. Коротков^{1✉}, Д. В. Изюмченко², С. В. Кожевников²

Глубокозалегающие зоны сосуществования поликомпонентных кристаллогидратов и маточной рапы в кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Иркутского амфитеатра Сибирской платформы

¹ООО «Газпром инвест», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: skorotkov@mail.ru

Аннотация. В кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Иркутского амфитеатра Сибирской платформы на глубинах от 1850 до 2400 м впервые зафиксировано, предположительно, стабильное сосуществование кристаллогидратов в интервалах каменной соли и маточной рапы в поровом пространстве доломитов. На основе данных кавернометрии, ГИС и керна выявлены контактирующие зоны «пласт-рассол». Выявленный феномен позволит развить новые идеи в существующие представления о генезисе соленосных формаций и оптимизировать комплекс геофизических и геохимических методов разведки.

Ключевые слова: кристаллогидраты, маточная рапа, литий, Сибирская платформа

S. B. Korotkov^{1✉}, D. V. Izumchenko², S. V. Kozhevnikov²

Deep-Seated zones of coexisting multicomponent crystalline hydrates and mother brines in the cambrian halogen-carbonate complex of the Irkutsk amphitheater of the Siberian platform

¹Gazprom Invest LLC, St. Petersburg, Russian Federation

²Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: skorotkov@mail.ru

Abstract. This paper presents the results of the discovery of deep-seated zones (intervals of 1850–2400 m) within the section of the Cambrian halogen-carbonate complex of the Irkutsk Amphitheater of the Siberian Platform, where presumably stable coexistence of crystalline hydrates in rock salt intervals and mother brines in the pore space of dolomites has been documented. Based on caliper logging data, wireline logging, and core analysis, contact "formation-brine" zones have been identified. The observed phenomenon provides a basis for establishing exploration criteria and developing a set of geophysical and geochemical exploration methods.

Keywords: crystalline hydrates, brine, lithium, Siberian Platform

Введение

Глубокозалегающие поликомпонентные крепкие рассолы кембрийского галогенно-карбонатного комплекса юга Сибирской платформы представляют собой уникальный тип трудноизвлекаемого гидроминерального сырья, содержащего повышенные концентрации лития, брома, калия, магния и других ценных химических компонентов – ТРИЗ ГМС [1]. В отличие от углеводородного сырья, где глубокими считаются месторождения на глубинах более 4500 м, в случае

промышленных вод к глубокозалегающим можно отнести месторождения на глубинах более 1000 м, добыча которых осуществляется из скважин, построенных с применением тяжелых (неавтомобильных) буровых установок. С момента получения в 1950-х годах фонтанных притоков предельно насыщенных хлоридных кальций-магниевых рассолов с минерализацией до 650 г/л и выше, данная территория рассматривается как перспективная гидроминеральная провинция [2, 3]. В исследовательских институтах СО РАН с 70-х г. разрабатывались методы и технологии поисков, добычи и переработки «жидкой руды», превосходящей по своим кондициям схожее сырье «литиевого треугольника» Латинской Америки [4, 5]. Вместе с тем, для нефтегазовых компаний эти воды, характеризующиеся локальными АВПД, представляли угрозу, проявляясь в виде катастрофических рапопроявлений при бурении скважин на венд-рифейские залежи углеводородного сырья. Аварии приводили к серьезным геолого-технологическим осложнениям, а иногда к гибели скважин. К счастью, человеческих жертв зафиксировано не было, но убытки достигали сотен миллионов рублей. Прикладная НИР по поиску технологий прогноза зон рапопроявлений на Ковыктинском и Астраханском ГКМ для предупреждения аварий, выполненная С.Б. Коротковым в 2016-2017 гг., показала, что достоверных геофизических или геотехнологических методов прогноза не существует [6]. Последующие неудачные попытки применения электроразведки при строительстве сети эксплуатационных скважин подтвердили данный вывод.

В разрезе нижнего кембрия Иркутского амфитеатра выделяется галогенно-карбонатная формация, включающая чередование пластов каменной соли и строматолитовых доломитов, являющихся частью уникального солеродного мегабассейна [7], северная часть которого, вероятно, распространяется на континентальный шельф арктических морей РФ [8]. Рапопроявления фиксировались во всех галогенных свитах – ангарской, литвинцевской, бельской и усольской, в интервалах глубин 1700–2400 м. Однако остаются две геологические загадки, препятствующие подбору и адаптации геофизических поисковых методов. Первая – нет окончательного понимания, из каких пластов фонтанируют мощные притоки рапы с начальным пластовым давлением, двукратно превосходящим среднее по региону. Согласно первой гипотезе, «маточная рапа» заполняет порово-трещиноватое пространство доломитов и при их вскрытии буровым инструментом устремляется в ствол скважины [9]. Согласно второй гипотезе, в разрезе присутствуют пропластки кристаллогидратов, буровой инструмент проходит эти пласты (буровой раствор на углеводородной основе или с высоким содержанием соли) и, вскрывая нижележащие доломиты, инициирует перетоки натриевых рассолов, нарушая гидрохимическое равновесие и вызывает скоростное растворение не-натриевых кристаллогидратов, их разогрев и увеличение объема [10]. Так как в этот момент буровой инструмент находится на глубине залегания доломита, а при проходке выше осложнений не зафиксировано, у буровиков создается впечатление, что приток получен из зоны забоя. Тот факт, что вся нижняя часть скважины еще не оборудована обсадными колоннами и не зацементирована, во внимание не принимается. Вторая геологическая загадка – с учетом

интервала глубин рапопроявлений, на которых каменная соль приобретает свойство гель-текучести (геомеханические свойства кристаллогидратов не исследованы), нет понимания их фазового состояния в пласте. С 2024 г. начаты теоретические расчеты фазовых переходов, но экспериментального подтверждения пока не получено [11, 12].

В данной работе предложена новая (третья) модель, объединяющая первые две гипотезы. В результате выполненного анализа технических показателей бурения, интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) и керна, сделано заключение о возможном формировании зон стабильного сосуществования кристаллогидратов и маточной рапы в глубокозалегающих интервалах кембрийского галогенно-карбонатного комплекса. Разработаны критерии их прогнозирования на основе комплекса геофизических и геохимических методов.

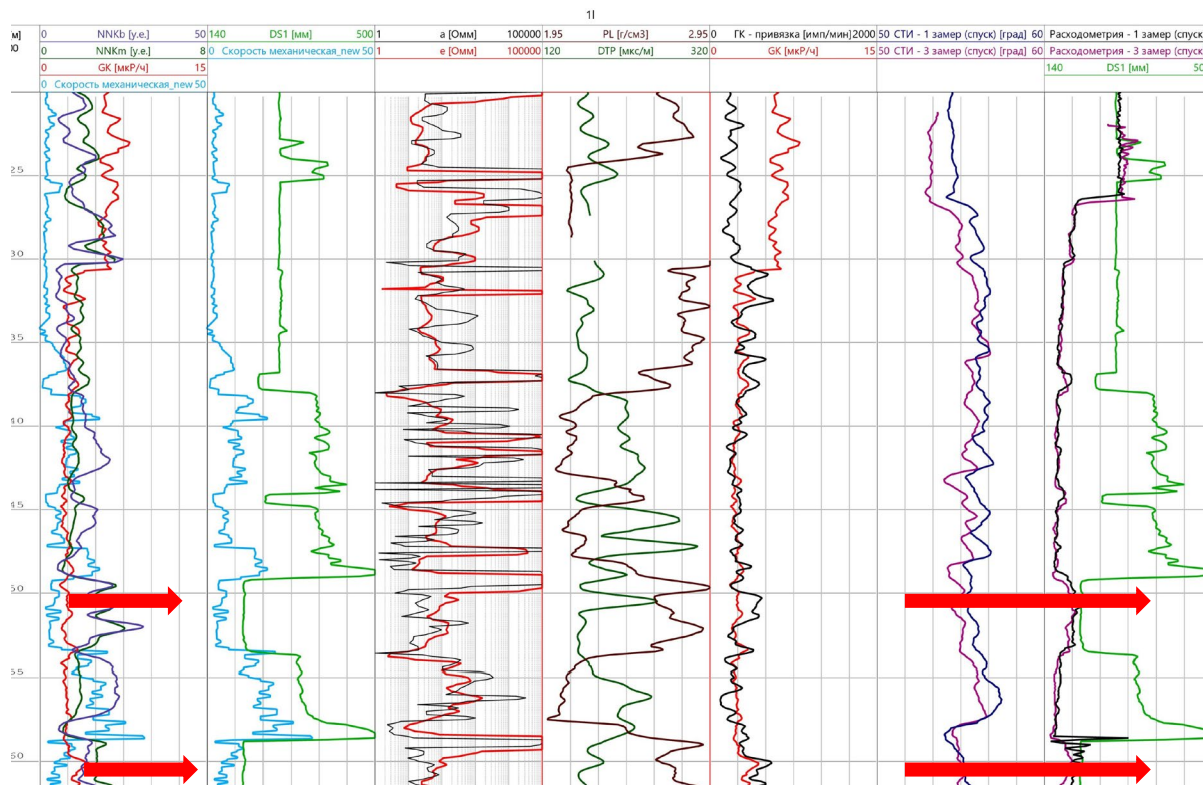
Методы и материалы

Первоначально аномальные зоны размыва солей были случайно замечены С.Б. Коротковым в декабре 2023 г. по данным профилометрии (АКС-ПФ-6-80) одной из новых разведочных скважин Ковыктинского выступа, техническим заказчиком бурения которой выступало ООО «Газпром инвест» в 2022 г.. В ходе совместного анализа газопроявлений природного водорода в интервалах пачек каменной соли, выявленных С.В. Кожевниковым по данным станции ГТИ «Разрез-2» в ходе бурения разведочных скважин, показались странными «языки» на кривой зонда в краевых зонах пластов каменной соли (рис. 1, зеленая кривая). Судя по показаниям, измерительный щуп профилометра «провалился», т.е. не достал стенки скважины. Было сделано предположение о наличии локализованных каверн размыва высотой 1-3 м. Позднее С.В. Кожевниковым и Н.М. Орловым были проанализированы данные ГИС, но только ВИКИЗ «реагировал» на данные аномальные участки, а интерпретационные расчеты определили латеральную глубину размыва в 2-4 м. Механические параметры бурения (скорость проходки и др.) подтвердили предположение о наличии ослабленных зон (рис. 1, голубая кривая). В ходе работ 2024 г. по отбору керна специалистами ООО «Газпром недра» отмечался малый вынос материалы из этих интервалов и наличие следов галопелитовых отложений в пробоотборниках (окончательные результаты исследований еще не опубликованы).

Результаты

На рис. 2 показан керн в карбонатной пачке. В нижней части, приконтактной к галогенной пачке, хорошо видны трещины с измененным цветом ареала насыщения пористого пространства, в течении некоторого времени содержавшие «маточную рапу». Напротив, центральный интервал пачки (верхняя колонка) достаточно однородный, плотный, без трещин и каверн, следов гидротермальной проработки не наблюдается. На рис. 3 показан керн в галогенной пачке. Верхняя колонка (центральная зона пачки) достаточно однородна, массивна, монохромна. По мере приближения к приконтактной зоне с доломитами наблюдается повышенная трещиноватость, полицветность и раздробленность образцов. Самая нижняя колонка

характеризуется максимальной раздробленностью, вынос керна составил от 30 до 70 %, минералогический и химический состав «исчезнувшего» материала неизвестен.



Кривые (слева – направо): скорость проходки (голубая), ННК (сиреневая и темно-зеленая), ГК (красная), скорость проходки (голубая), профилиметрия (зеленая), высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ – черная и красная), литоплотностной каротаж (вишневая)ГК (красная) и привязка ГК по керну (черная); термоанемометр (фиолетовая, темно-синяя), расходометрия (фиолетовая, черная), профилиметрия (зеленая).

Рис. 1. Данные ГИС, профилиметрия (зеленая кривая), и тех. параметров бурения (голубая). Стрелки (красным) указывают на предполагаемые зоны залегания пластов кристаллогидратов. Шкала глубин обезличена (шаг 5 м), глубина составляет более 1000 м.



Рис. 2. Керн в интервале строматолитовых доломитов в ненасыщенном среднем интервале (вверху) и насыщенном приконтактном интервале (снизу).



Рис. 3. Керн в интервале каменной соли (вверху) и зонах предположительного нахождения кристаллогидратов и неполного выноса керна (внизу).

На рис. 4 показано сопоставление кавернометрии и керна. Четко коррелируются «языки» профилометрии и интервалы неполного выноса и раздробленности керна. Отметим, что по всем галогенным пластам отмечается небольшой размыв, вызванный, вероятно, захватом буровым раствором вышележащей пластовой воды натриевого состава минерализацией 150-200 г/л.

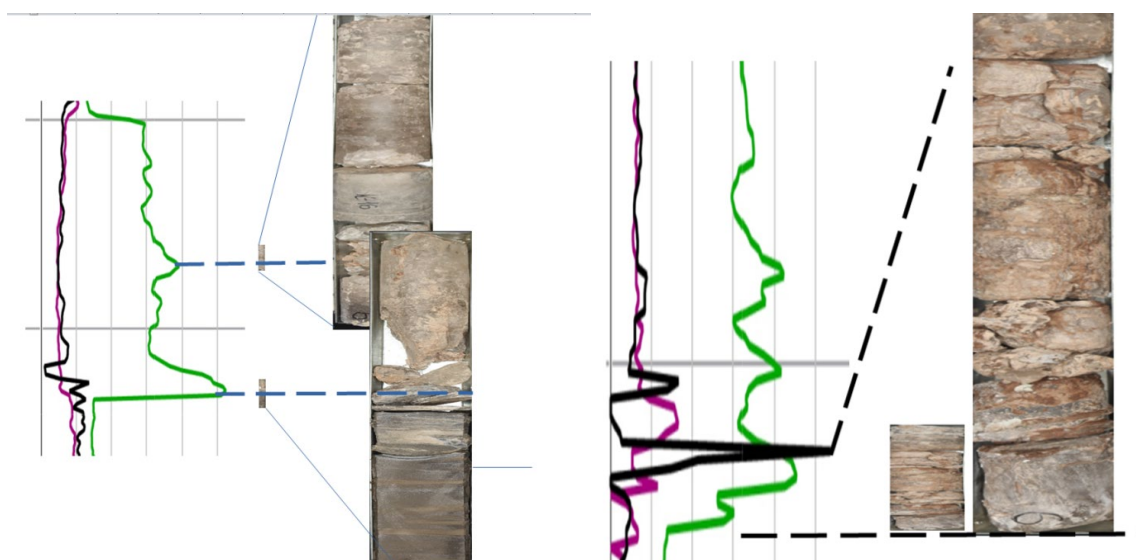


Рис. 4. Увязка по глубине данных кавенометрии и керна в верхнем (слева) и нижнем (справа) интервале усольской свиты.

В результате проведенных исследований в интервалах глубин 1850–2400 м выделены два типа геологических зон:

Тип I (галогенные интервалы с кристаллогидратами). В пластах каменной соли, в приконтактной к карбонатам интервалам, мощностью от 1 до 3 м существуют пропластки поликомпонентных кристаллогидратов, представленных, вероятно, тахгидритом ($\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), бишофитом ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), антарктицитом ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и карналлитом ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Точный состав пока не известен, т.к. подъем керна затруднителен и требует специализированного оборудования.

Тип II (карбонатные интервалы с маточной рапой). В доломитах строматолитового типа, характеризующихся каверново-трещинной пустотностью, в приконтактной к галогенному интервалу, сформированы локализованные по латерали и вертикали залежи маточной рапы хлоридного кальциевого типа с минерализацией 550–700 кг/м³.

Обсуждение

Выявленный феномен сосуществования кристаллогидратов и маточной рапы в глубокозалегающих интервалах галогенно-карбонатного юга Сибирской платформы имеет важное теоретическое и практическое значение. Полученные результаты не опровергают существовавшие ранее представления об исключительной локализации либо рапы в доломитах, либо кристаллогидратов в солях, а подтверждают правильность обеих гипотез и объединяют их в новой парадигме. Наличие твердых пластов кристаллогидратов бишофитового типа, по информации Д.В. Изюмченко, неоднократно подтверждалось в ходе разведочного и эксплуатационного бурения на Астраханском ГКМ в интервалах пермских солей. В пределах Ковыктинского выступа глубокозалегающие пласты кристаллогидратов ранее не выявлялись. Полученные результаты позволяют сформировать комплекс рабочих

поисково-разведочных методов картирования пластов кристаллогидратов по данным профилометрии, ГИС, керну и техническим параметрам бурения, т.е. по разведочным и эксплуатационным скважинам. К сожалению, определить ареал распространения до бурения, по геофизическим или геохимическим данным пока не представляется возможным. Это связано с тем, что отсутствует общепринятая гипотеза генезиса зон повышенной концентрации ценных химических компонентов и высокой минерализации, хотя попытки предпринимались [13]. Необходимо искать не рассол с минерализацией 600 г/л внутри рассола с минерализацией 200 г/л, в километровом галогенно-карбонатном слоистом разрезе на глубине 2000 м, чем безуспешно занимаются геофизики-электроразведчики, а рудно-гидрохимическую первопричину [14]. Если в качестве рабочей гипотезы принять предположение Н.Н. Крука о коре выветривания пегматитового субвертикального тела сподуменового типа или предположение С.Б. Короткова о палеотрубке взрыва, то результативными может оказаться комплекс наземной высокоточной магниторазведки, пассивной сейсморазведки и геохимической съемки по тяжелым элементам и по газам. Если же принять предположение А.В. Кирюхина о палеокольдере палеовулкана, по аналогии с кольдерой вулкана Узон (Камчатка), где А.В. Сергеевой выявлены повышенные концентрации лития в глинах, то эффективной будет комплексная геохимическая и гидрогеологическая съемка. По мнению авторов, важную дополнительную информацию может дать детальная геологическая съемка, от которой в нефтегазовой геологии отказались еще в 60е годы XX в.

Заключение

В результате проведенных исследований в интервалах глубин 1450–2200 м кембрийского галогенно-карбонатного комплекса Иркутского амфитеатра по косвенным данным – ГИС, техническим параметрам бурения, анализу керна и интервалов неполного выноса керна авторами сформулирована новая гипотеза о существовании зон стабильного сосуществования поликомпонентных кристаллогидратов в галогенных толщах и «маточной» поликомпонентной рапы в порово-трещиноватом пространстве доломитов.

Предложен комплекс методов для картирования зоны распространения пластов кристаллогидратов по данным бурения, исследований и испытания разведочных и эксплуатационных скважин: профилометрия, ВИКИЗ, скорость проходки, расходометрия. Полученные результаты расширяют теоретические представления о галогенезе и открывают новые перспективы освоения гидроминерального сырья Сибирской платформы.

Развитие прикладных дистанционных поисковых технологий будет возможно после уточнения механизмов формирования высокопродуктивных зон, в связи с чем, авторы возлагают большие надежды на научные школы ИНГГ, ИЗК и ИГМ СО РАН.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность ученым Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука и ИГМ им. В.С. Соболева СО

РАН (г. Новосибирск), ИЗК СО РАН (г. Иркутск), ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург), ИЗК ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), ИПНГ РАН (г. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова и СПбГУ, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром недра» за многолетнее сотрудничество и ценные советы и консультации. Особая признательность академику А.Э. Конторовичу, академику М.И. Эпову, академику Н.П. Похиленко чл.-корр. В.Н. Глинских, чл. корр. В.И. Богоявленскому, чл.-корр. Л.М. Бурштейну, чл.-корр. Н.Н. Круку, чл.-корр. А.П. Немудрому, д.г.-м.н. А.Г. Вахромееву, д.г.-м.н., А.В. Кирюхину, д.г.-м.н. С.В. Алексею, д.г.-м.н. А.В. Ступаковой, д.г.-м.н. Г.А. Беленицкой, к.г.-м.н. С.А. Бушмину, к.г.-м.н. С.А. Моисееву, к.г.-м.н. М.А. Фомину, к.г.-м.н. О.В. Якубович, к.г.-м.н. А.В. Сергеевой, к.г.-м.н. А.В. Корзун, к.г.-м.н. Н.Г. Паршиковой, к.г.-м.н. Я.В. Бельтикову, к.г.-м.н. А.А. Сусловой, к.г.-м.н. Р.С. Сауткину, к.х.н. Р.В. Горохову, к.г.-м.н. А.В. Чугунову, М.А. Мисюре, Н.М. Орлову за ценные консультации и обсуждение результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт ГРП и стратегия освоения ТРИЗ поликомпонентных редкометальных промышленных рассолов юга Сибирской платформы на соли лития и другие полезные ископаемые / А. Г. Вахромеев, С. В. Алексеев, Д. П. Гладкочуб [и др.] // Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича, Новосибирск, 29 января – 01 2024 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. – С. 38-41
2. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангара-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука. 1966. 322 с.
3. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
4. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения / А. Д. Рябцев, Н. П. Коцупало, А. Г. Вахромеев, М. Ф. Комин // Рациональное освоение недр. – 2013. – № 1. – С. 44-51.
5. Алексеев С.В. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация // С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев // Иркутск: Изд-во ООО "Географ". 2014. 162 с.
6. Коротков, С. Б. Галогенные флюидоупоры Ковыктинского кластера газодобычи Иркутской области / С. Б. Коротков, А. А. Франчук, Е. В. Семенова // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 3(31). – С. 298-307
7. Беленицкая, Г. А. Соленосные осадочные бассейны: Литолого-фациальный, геодинамический и минерагенический анализ / Г. А. Беленицкая; Министерство природных ресурсов РФ, Российская академия наук (РАН), Все-российский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). – Санкт-Петербург : Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2000. – 72 с. – (Осадочные бассейны России). – ISBN 5-93761-008-3
8. Прогноз ареала распространения соленосных толщ шельфа арктических морей России на основе геологических и океанографических данных / С. Б. Коротков, С. М. Карнаухов, А. В. Ступакова [и др.] // Новые идеи в геологии нефти и газа: Сборник научных трудов, Москва, 23–24 мая 2019 года / Ответственный редактор А.В. Ступакова. – Москва: Издательство "Перо", 2019. – С. 237-241

9. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 248 с.
10. Особенности освоения гидроминерального сырья в районах газодобычи Иркутской области / В. Н. Федоров, С. Б. Коротков, А. Г. Вахромеев [и др.] // Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа : Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича, Новосибирск, 29 января – 01 2024 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. – С. 240-242.
11. Мисюра, М. А. Численная термодинамическая модель флюидной системы $H_2O-LiCl-CaCl_2$ для интервала температур от -77 до $+50^{\circ}C$ / М. А. Мисюра, С. А. Бушмин, Е. В. Савва // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 525, № 1. – С. 91-100. – DOI 10.7868/S3034506525110106.
12. Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы / А. В. Сергеева, А. В. Кирюхин, А. Г. Вахромеев [и др.] // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276-2. – С. 89-106
13. Беленицкая, Г. А. Об участии природных солей в щелочном магматизме. Статья 1. Природные соляно-щелочные ассоциации / Г. А. Беленицкая // Литосфера. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 153-176.
14. Коротков, С. Б. Особенности геологической интерпретации результатов сейсморазведки на венд-кембрийские и рифейские отложения Восточной Сибири / С. Б. Коротков // Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами: Материалы научно-практической конференции, Красноярск, 22–25 октября 2024 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2025. – С. 59-67

© С. Б. Коротков, Д. В. Изюмченко, С. В. Кожевников, 2026

Е. В. Лыкова¹✉, Н. В. Сенников¹

Граница нижнего и среднего ордовика в терригенной последовательности Салаира

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: lykovaev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Не смотря на проводимые исследования, направленные на уточнение границ ярусных подразделений, остается до конца не ясным положение нижней границы дапинского яруса в граптолитовой зональной шкале. На территории Салаира переходные слои нижнего и среднего ордовика представлены в разрезах иловатской свиты. В статье приведены современные палеонтологические и стратиграфические данные по двум терригенно-карбонатным ключевым разрезам Гурьевско-Ельцовского структурно-фациального блока южной части Салаира. Иловатская свита, изученная в этих разрезах, впервые охарактеризована зональными граптолитовыми видами-индексами флоско-дапинского стратиграфического уровня. В результате изучения граптолитов из алевролитов иловатской свиты удалось проследить непрерывные переходные слои флоского и дапинского ярусов нижнего и среднего ордовика, а также уточнить зональные подразделения для ордовикской зональной граптолитовой шкалы Салаира.

Ключевые слова: граптолиты, иловатская свита, ордовик, Салаир

E. V. Lykova¹✉, N. V. Sennikov¹

Lower–Middle Ordovician boundary in the terrigenous sequence of the Salair

¹The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS),
Novosibirsk, Russian federation
e-mail: lykovaev@ipgg.sbras.ru

Abstract. Despite ongoing research aimed at clarifying the boundaries of stage units, the position of the lower boundary of the Dapingian stage in the graptolite zonation scale remains unclear. In the Salair region, the transitional layers of the Lower and Middle Ordovician are represented in sections of the Ilovat Formation. This paper presents modern paleontological and stratigraphic data for two key terrigenous-carbonate sections of the Gurievsk-Eltsovsk structural-facies block in the southern part of Salair. The Ilovaty Formation, studied in these sections, is characterized for the first time by zonal graptolite index species of the Floian-Dapingian stratigraphic level. By studying graptolites from the Ilovaty Formation siltstones, it was possible to trace continuous transitional layers of the Floian and Dapingian stages of the Lower and Middle Ordovician, as well as to refine the zonal subdivisions of the Ordovician graptolite zonation scale of Salair.

Keywords: graptolites, Ilovaty Formation, ordovician, Salair

Салаирский кряж – древний горный массив, являющийся северо-западной окраиной Алтае-Саянской складчатой области. Он представляет собой возвышенность, вытянутую с северо-запада на юго-восток и отделяет Кузнецкую котловину от Западно-Сибирской равнины (рис. 1). Изучению геологической истории развития Салаира на сегодняшний день уделяется много внимания [1]. Ордовикские отложения Салаира в современном представлении разделены разрывными нарушениями на несколько блоков (или структурно-фациальных зон) - Медведский, Восточно-Бердский, Краснянский, Гурьевский и Ельцовский, в каждом из которых ордовикские отложения вскрываются в виде обнажений и карьеров. В Ельцовском блоке известны ельцовская, иловатская, карастунская, веберовская, оселкинская свиты, охарактеризованные богатыми фаунистическими остатками, такими как трилобиты, брахиоподы, остракоды, кораллы, а также конодонты и граптолиты [2]. Первые упоминания об ордовикских граптолитах на Салаире появились в 1925 году, когда К.В. Радугин обнаружил их вблизи г. Гурьевска на г. Орлиной [3]. С этого момента начинается активное изучение ордовикских граптолитов Салаира и если ранее граптолитовый материал позволял определить возраст вмещающих пород только до отдела, то позднее появляются первые попытки наметить зональные граптолитовые уровни для этого региона. На сегодняшний день граптолитовая зональная шкала Салаира значительно более уточнена и детализирована.

Не смотря на проводимые исследования, направленные на уточнение границ ярусных подразделений, остается до конца не ясным положение нижней границы дапинского яруса в международной граптолитовой зональной шкале.

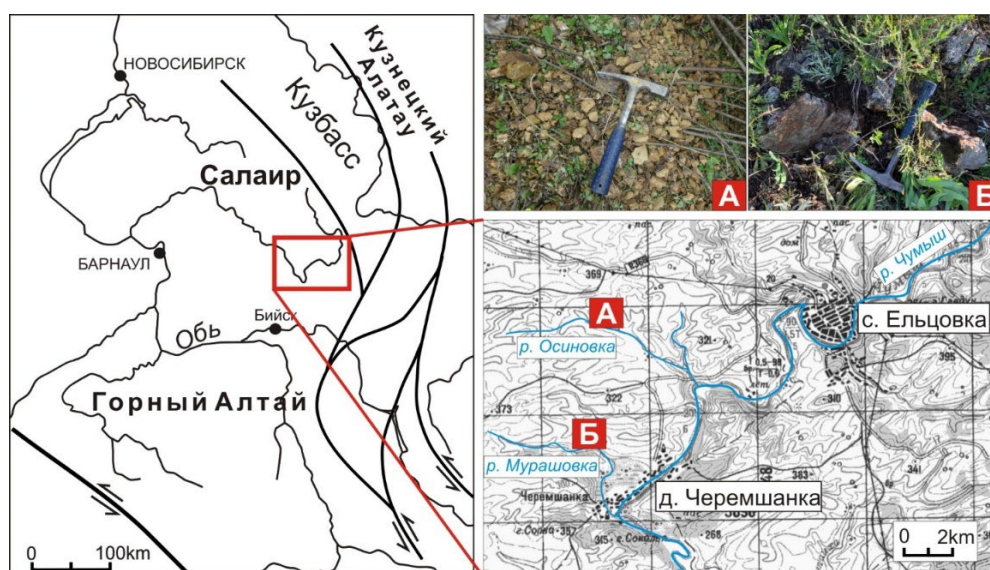


Рис. 1. Местонахождение изученных разрезов по рекам Осиновка и Мурашовка в южной части Салаира.

Граница нижнего и среднего ордовика в МСШ установлена в 2005 году в Китае в разрезе Хуанхуачан (Huanghuachang), где был предложен лимитотип среднего отдела ордовика, получившего наименование дапинский по названию близ расположенной деревни [4, 5]. Однако, граница яруса проведена по появлению конодонто-

вого вида *Baltinoidus triangularis* (Lindström). Следовательно, для зональной граптолитовой шкалы вопрос положения границы между флоским и дапинским ярусами остается открытым, так как факт соответствия конодонтовых границ граптолитовым границам требует дополнительного исследования [2]. Это можно проследить и на примере зональных граптолитовых шкал Балтики, Австралии, Северной Америки, где подошва дапинского яруса не сопоставляется ни с одной из границ различных граптолитовых зон – то есть занимает «не определенное», «внутризональное» стратиграфическое положение [6]. На территории Горного Алтая в зональной граптолитовой шкале подошва дапинского яруса условно проводится в верхней части зоны *elongatus/broggeri*.

С целью разобраться в вопросе положения границы нижнего и среднего ордовика в зональной граптолитовой шкале были рассмотрены биостратиграфические данные по иловатской свите, которые интересны тем, что характеризуют переход от флоского к дапинскому ярусу. Свита выделена А.Б. Гинцингером в 1964 году в северо-восточной части Салаира (Гурьевский блок) [7]. Для изучения иловатской свиты, а также зональной стратиграфии салаирского региона одним из ключевых является район близ д. Черемшанка, расположенный в Ельцовском блоке (рис. 1). Там авторами настоящего сообщения были изучены два разреза, в которых вскрывается иловатская свита. Примечательно, что на территории Салаира прежде не было встречено переходных слоев от флоского к дапинскому ярусу (от нижнего ордовика к среднему), которые были бы охарактеризованы граптолитовой фауной.

Первый из изученных разрезов располагается вдоль р. Осиновка (правый приток р. Чумыш выше с. Черемшанки) и представлен преимущественно терригенными породами с редкими маломощными прослоями глинистых известняков [8]. В его средней части обнаружены многочисленные среднеордовикские трилобиты, а также редкие брахиоподы. Кроме того, из второго слоя линзовидных известняков были выделены конодонты, ассоциация которых, как оказалось при изучении, представлена космополитными видами, характерными для тепловодной океанической Австрало-Азиатской биогеографической провинции [9]. Помимо упомянутых групп фаун в данном разрезе в первой пачке светло-желтых песчаников также была собрана многочисленная коллекция граптолитов очень хорошей сохранности (рис. 2). Анализируя полученную фаунистическую характеристику разреза по р. Осиновка, удалось установить зональные уровни *maximo-divergens* (верхняя подзона зоны *gibberulus*) и *caduceus imitatus* (нижняя подзона зоны *hirundo*), характеризующие дапинский ярус.

Второй разрез, расположенный южнее первого, вдоль р. Мурашовка (левый приток р. Каменки у с. Черемшанки), характеризует значительную часть иловатской свиты (рис. 2). Там вскрываются преимущественно алевролитоглинистые слои с редкими мелко-зернистыми песчаниками в низах разреза и небольшим прослоем светло-серого брекчированного известняка в третьей пачке. Из фауны в слоях разреза встречены редкие брахиоподы и довольно представительные граптолиты, которые позволяют установить в разрезе зональный уровень *elongatus-broggeri*, стратиграфически самый верхний для флоского яруса, по наличию

вида-индекса *Expansograptus broggeri* (Monsen). Выше по разрезу встречен зональный вид-индекс для выше следующей зоны deflexus - *Corymbograptus* cf. *deflexus* (Elles et Wood) (рис. 2, 3), но, к сожалению степень сохранности позволяет определить его только в открытой номенклатуре, следовательно, нижняя граница зоны deflexus проведена относительно условно.

Ввиду вышесказанного, разрез по р. Мурашовка позволяет нам утверждать, что в нем вскрываются переходные слои от флоского к дапинскому ярусу. Следовательно, этот разрез стратиграфически надстраивает снизу вышеописанный разрез по р. Осиновка и представляет нашему вниманию нижнюю часть иловатской свиты и переходные слои нижнего-среднего ордовика.

Полученные при изучении проанализированных салаирских разрезов биостратиграфические данные по граптолитам, не позволяют окончательно решить вопрос положения нижней границы дапинского яруса на Салаире. Одним из вариантов его решения является целенаправленный поиск известняков в разрезе Мурашовка с целью опробования их на конодонты и дальнейшей детализацией биостратиграфического расчленения по конодонтам рассматриваемого разреза.

Ордовикская				Средний		Ярус		Свита		Зона		Пачка		Мощность, в метрах		Литология		Граптолиты		Брахиподы	
Нижний				Флосский		Иловатская		broggeri		deflexus		6		>30		Алевролиты глинистые, тёмно-серые. В верхней части пачки цвет пород становится зелено-вато-табачно-серым, а размер обломков увеличивается и породы переходят в алевро-песчаники.					
										5		50		Алевролиты глинистые, полосчатые (1-3 см за счет изменения цвета) серого и темно-серого цвета.							
										4		25		Задернованный интервал. В высыпках встречаются черные глинистые алевролиты.							
										3		100		Алевролиты глинистые, темно-стально-серые. Во второй трети пачки имеется прослой (мощность 0,5 м) светло-серого брекчированного глинистого известняка с брахиоподами.		Acrograptus ex gr. affinis (Nicholson) ■ Expansograptus suecicus (Tullberg) ■ Tetragraptus sp. ■ Expansograptus taimyrensis Obut et Sobolevskaya ■ Expansograptus extensus (Hall) ■ Expansograptus suecicus robustus (Monsen) ■ Expansograptus broggeri (Monsen) ■ Acrograptus nicholsoni (Lapworth) ■ Didymograptus sp. ■ Pendeograptus sp. ■ Pseudisograptus manubriatus (Hall) ■ Temnograptus sp. ■ Dichograptus sp. ■ Corymbograptus cf. deflexus (Elles et Wood) ■ Expansograptus sp. ■					
										2		~1		Песчаники мелко-среднезернистые, грязно-желтые.							
										1		≥1		Гравелиты, мелко-гравийные, плохо сортированные, грязно-желтые.							
Trondorthis parvus Sev. sp. n. ■																					
Беззаконные ■																					

Рис. 2. Распространение граптолитов в разрезе по р. Мурашовка в южной части Салаира.

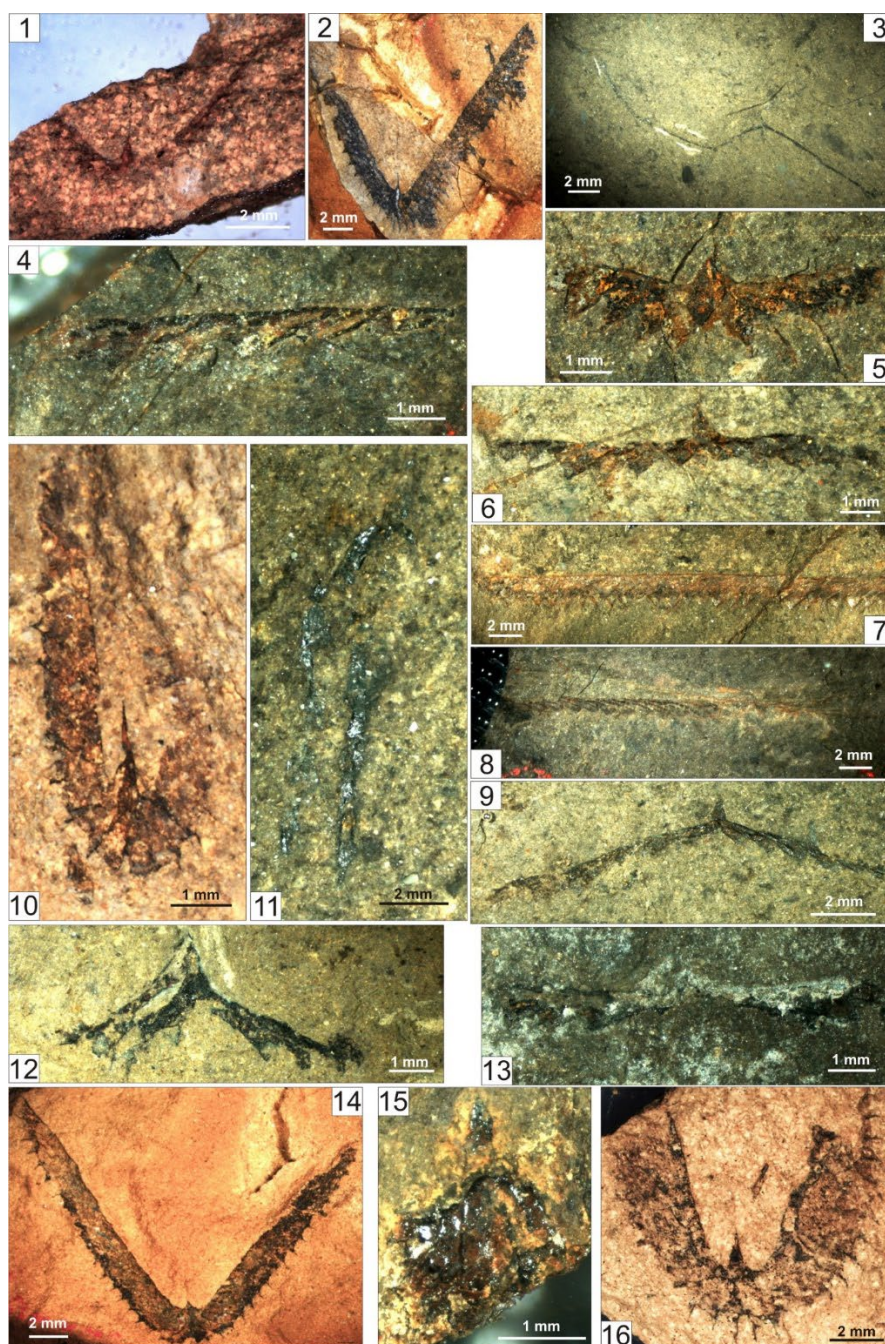


Рис. 3. Флоско-дапинские граптолиты иловатской свиты южного Салаира.

1. *Isograptus rigidus* Maletz, 2, 14 *Isograptus gibberulus* (Nocholson), 3. *Paratemnograptus* sp., 4, 8 *Expansograptus broggeri* (Monsen), 5. *Ex. suecicus* (Tullberg), 6, 13. *Ex. taimyrensis* Obut et Sobolevskaya, 7. *Ex. extensus* (Hall), 9. *Acrograptus nicholsoni* (Lapworth), 10. *Isograptus forcipiformis tenuis* Sennikov, 11. *Pendeograptus* sp., 12. *Corymbograptus* cf. *deflexus* (Elles et Wood), 15. *Pseudisograptus manubriatus* (Hall), 16. *Isograptus maximo-divergens* (Harris).

Экземпляры 1, 2, 10, 14, 16 обнаружены в отложениях по р. Осиновка.

Экземпляры 3-9, 11-13, 15 обнаружены в разрезе по р. Мурашовка.

Исследования проводились в рамках базового проекта НИР FWZZ-2026-0033.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сенников Н.В., Лыкова Е.В., Обут О.Т., Токарев В.Н., Тимохин А.В., Щербаненко Т.А., Закирьянов И.Г. Биостратиграфия и проявление вулканизма в ордовике Салаира. Геология и геофизика – том 66 – № 3 – 2025. С. 277-302.
2. Сенников Н.В., Обут О.Т., Изох Н.Г., Киприянова Т.П., Лыкова Е.В., Толмачева Т.Ю., Хабибулина Р.А. Региональная стратиграфическая схема ордовикских отложений западной части Алтае-Саянской складчатой области (новая версия). Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири – № 7с – 2018. С. 15-53.
3. Обут А.М., Сенников Н.В. Видовые комплексы граптолитов в ордовике Салаира. Издание: Новое в стратиграфии и палеонтологии нижнего палеозоя Средней Сибири: Сб. науч. Трудов: Новосибирск, 1978. С. 127-130.
4. Wang Xiaofeng, Stouge S., Erdtmann B.-D. et al. proposed GSSP for the base of the Middle Ordovician Series: the Huanghuachang section, Yichang, China // Episodes. 2005. Vol. 28, N 2. P. 105-117.
5. Сенников Н.В., Толмачева Т.Ю. Хроностратиграфическое положение границ нового Международного ярусного стандарта ордовика. Бюллетень МОИП. Отдел геологический – том 88 – № 1 – 2013. С. 27-40.
6. Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G., Ogg G.M. (2020). The Geologic Time Scale. Elsevier, v. 2. 2020 P. 563–1357.
7. Стратиграфический словарь СССР. Кембрий, ордовик, силур, девон. Л.: Изд-во Недра. 1975. 622 с.
8. Лыкова Е.В., Сенников Н.В. Таксономическое разнообразие граптолитов в флоскодапинских терригенных отложениях южной части Салаирского кряжа. Палеонтологическому обществу России – 110 лет. Итоги и перспективы. Материалы LXXII сессии Палеонтологического общества при РАН – Картфабрика Института Карпинского – СПб. 2026. С. 109-111.
9. Обут О.Т., Сенников Н.В., Печериченко Д.А. Первые находки конодонтов в иловатской свите среднего ордовика Салаира. Палеонтология и стратиграфия: современное состояние и пути развития: Материалы LXVIII сессии Палеонтологического общества при РАН, посвященной 100-летию со дня рождения Александра Ивановича Жамойды – Изд-во ВСЕГЕИ – СПб. 2022. С. 99-101.

© Е. В. Лыкова, Н. В. Сенников, 2026

*Р. В. Маринов*¹✉

Особенности геологического строения западного склона Алданской антеклизы и зоны сочленения с Березовской впадиной по результатам интерпретации современных сейсмических материалов в связи с оценкой нефтегазоносности венд-кембрийских отложений

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: marinovrv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. С 2000-х гг. в юго-западной части Якутии проводятся сейсморазведочные работы за счет федерального бюджета. На основании интерпретации этих материалов и структурных построений были уточнен характер границ Березовской свиты и отмечены различия в перспективах нефтегазоносности Алданской антеклизы и Березовской впадины. На территории Алданской антеклизы перспективами обладают в основном тектонически экранированные ловушки в отложениях терригенного и карбонатного комплекса венда, в Березовской впадине перспективы связаны с антеклинальными ловушками в галогенно-карбонатных отложениях кембрия.

Ключевые слова: нефтегазоносность, Восточная Сибирь, Березовская впадина, Алданская антеклиза

*R. V. Marinov*¹✉

Structural features of the western slope of the Aldan antecline and the junction zone with the Berezovskaya trench based on the results of interpretation of modern seismic materials in connection with the assessment of the oil and gas potential of the Vendian-Cambrian deposits

¹The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: marinovrv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Since the 2000s, seismic surveys have been carried out in the southwestern part of Yakutia at the expense of the federal budget. Based on the interpretation of these materials and structural constructions, the nature of the boundaries of the Berezovskaya formation was clarified, and differences in the oil and gas potential of the Aldan antecline and the Berezovskaya Depression were noted. On the territory of the Aldan antecline, prospects are mainly tectonically shielded traps in the deposits of the terrigenous and carbonate Vendian complex; in the Berezovskaya depression, prospects are associated with anteclineal traps in the halogen-carbonate deposits of the Cambrian.

Keywords: oil and gas bearing, East Siberia, Beryozovskaya depression, Aldan antecline

Введение

Алданская антеклиза и Березовская впадина обладают высокими перспективами нефтегазоносности. Район исследования расположен в юго-восточной части Республики Саха (Якутия), в Среднеленской и восточной части Предпатовской нефтегазоносных областей. В этом районе геологоразведочные работы проводятся, начиная с 1930-х гг. В 1937 г. В.М. Сеньюковым в скважине Ченкиямская 1, был получен первый приток нефти на Сибирской платформе. Среднеленская НГО была впервые выделена в 2022 г. А.Э. Конторовичем, С.А. Моисеевым и А.М. Фоминым в западной части Алданской антеклизы [Конторович и др., 2024]. На территории исследования открыто 3 газоконденсатных месторождения – Бысахтахское, Мухтинское и Кэдэргинское в отложениях венда и кембрия.

Методы и материалы

В районе изучения начали активно проводится сейсморазведочные работы МОГТ-2D с 2000 гг. за счет Федерального бюджета на Синской, Чаро-Токкинской, Мархачанской, Средне-Ленской, Лено-Алданской, Наманинской площадях. Общая площадь сеймополигонов составляет 15000 км². Также сейсморазведочные работы проводили недропользователи – на Мухтинском, Бирюкском лицензионных участках. В программе Desmana, разработанной в ИНГГ СО РАН был создан интерпретационный сейсмический проект, выполнена интерпретация и корреляция отражающих горизонтов. Для привязки опорных горизонтов на сейсмических разрезах использовались акустический каротаж скважин и годографы ВСП, которая проводилось в скважинах на площадях Джаджанская, Верхнесинская, Усть-Бирюкская, Кэдэргинская и др.

Результаты

В геологическом строении Березовской впадины и Алданской антеклизы наблюдается некоторое различие.

На Алданской антеклизе в районе исследования осадочный чехол сложен породами венда, и кембрия. В северной части их перекрывают породы среднего палеозоя, триаса, и юры, их общая толщина достигает 2500 м.

На этой территории прослеживаются следующие отражающие горизонты: ТП – подошва мезозоя, РС – подошва пермских и каменноугольных отложений, ДК – кровля кембрия, К – кровля чарской свиты, К1т – кровля толбачанской свиты, II – кровля билирской свиты, KB – кровля сералахской свиты, Ф – кровля фундамента. В южной части породы кембрия выходят на поверхность, а толщина осадочного чехла составляет 500 м. На Алданской антеклизе, особенно на бортах по результатам интерпретации отражающих горизонтов выделяется большое число разломов. Многочисленные разломы в основном северо-восточного направления развиты в отложениях венда и кембрия. По кинематике это сбросы и взбросы, они разбивают отложения на отдельные блоки. В отношении перспектив нефтегазоносности здесь можно ожидать тектонически экранированные ловушки. При движении в южном направлении, толщина отложений венда и

кембрия постепенно уменьшается, на Мархачанской и Средне-Ленской сейсмо-площадях выделяются только отражающие горизонты Ф, КВ и II. Вышележащие ОГ не прослеживаются. В целом, антеклиза плавно погружается в северо-западном направлении, за исключением Наманинского и Мухтинского поднятий, антеклинальных структур почти нет (рис. 1).

В Березовской впадине осадочный чехол представлен породами от венда до девона мощность которого достигает 5,5 км. Строение впадины резко асимметричное. Осевая часть впадины смещена на запад, расположена рядом с Уринским антеклинорием (рис. 2). Ширина восточного борта впадины 140 км, он равномерно погружается, ширина западного борта - 20 км, остальная часть резко ограничена разломом амплитудой 4 км. Во впадине уверенно прослеживаются отражающие горизонты: ДК – кровля кембрия, К – кровля чарской свиты, К1т – кровля толбачанской свиты, II – кровля билирской свиты, КВ – кровля сералахской свиты, Ф – кровля фундамента.

На Уринском антеклинории сейсмический рисунок хаотичный, никаких ОГ не прослеживается. В отличие от Алданской антеклизы, в Березовской впадине разломы распространены реже. Комплексы пород рифея и терригенного венда, карбонатного венда и нижней части галогенно-карбонатного комплекса кембрия равномерно утолщаются от склона Алданской антеклизы к наиболее погруженной части впадины.

В этой части разреза антиклинальные структуры практически отсутствуют, за исключением выступа фундамента в 10 км восточнее Инныхской скважины - Дельгейская локальная структура - она выделяется на всех вышележащих горизонтах (рис.2) [Вотьяков, 2012].

Выше по разрезу залегают соленасыщенные толбачанская и чарская свиты. Чарская свита имеет выдержанную толщину на большей части впадины, при приближении к Алданской антеклизе в районе Олекминска толщина резко сокращается в два раза. Поверхности чарской и толбачанской свит сильно выполаживаются, и, кроме того, у них выделяется множество антиклинальных структур (рис.2).

Наиболее перспективными в плане нефтегазоносности могут быть галогенно-карбонатные отложения кембрия – юрегинская, толбачанская, чарская и метегерская свиты. Прослой солей в их составе служат хорошими флюидоурами, межсолевые пласты карбонатных пород, служат коллекторами, как на Мухтинском месторождении, где выделяются пласты чарской свиты – Чр 1-5, и толбачанской свиты Тб 1,2 [Мельников и др., 2023]. И есть антиклинальные структуры, которые могут служить ловушками углеводородов.

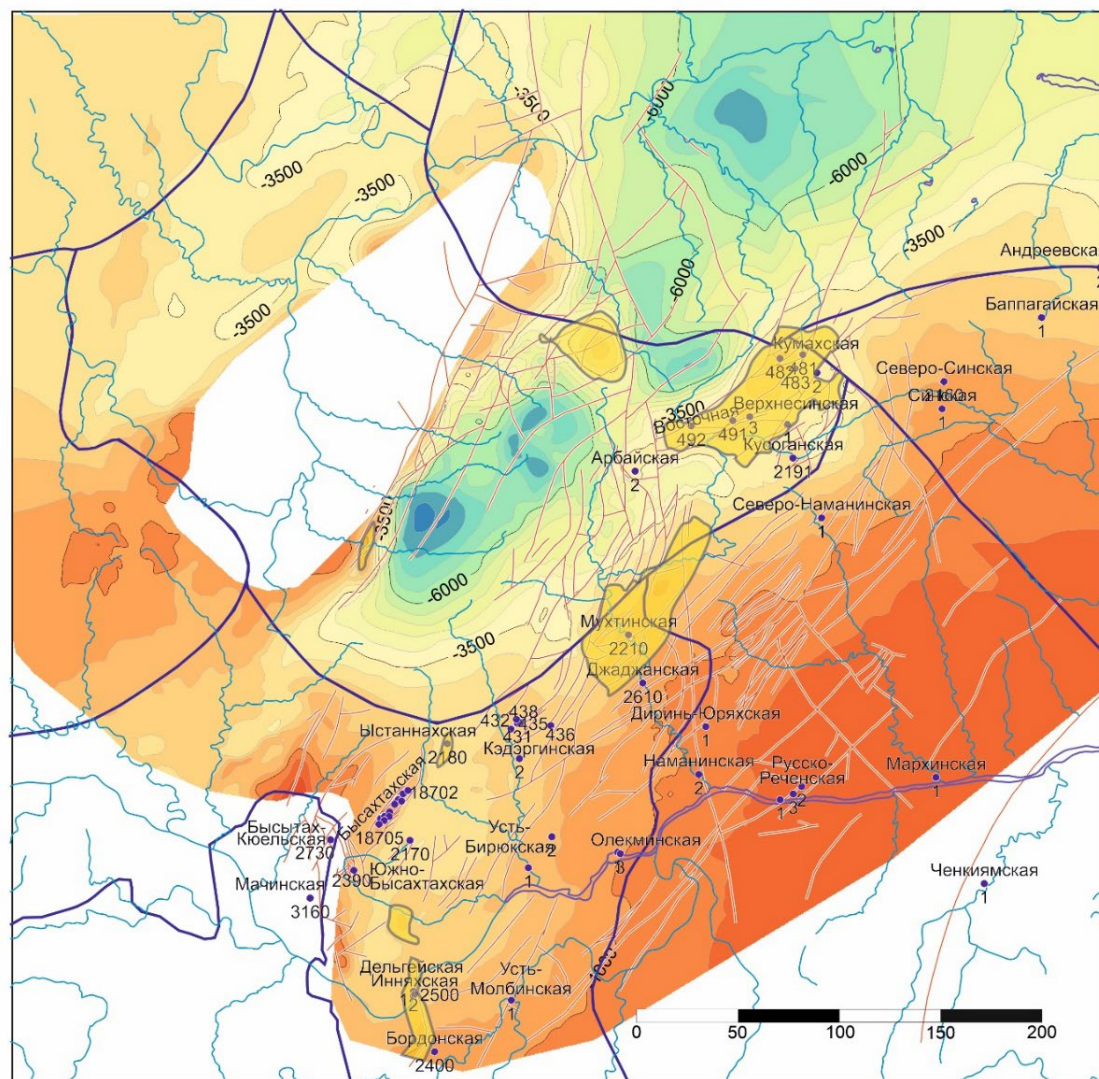


Рис. 1. Структурная карта по кровле билирской свиты.

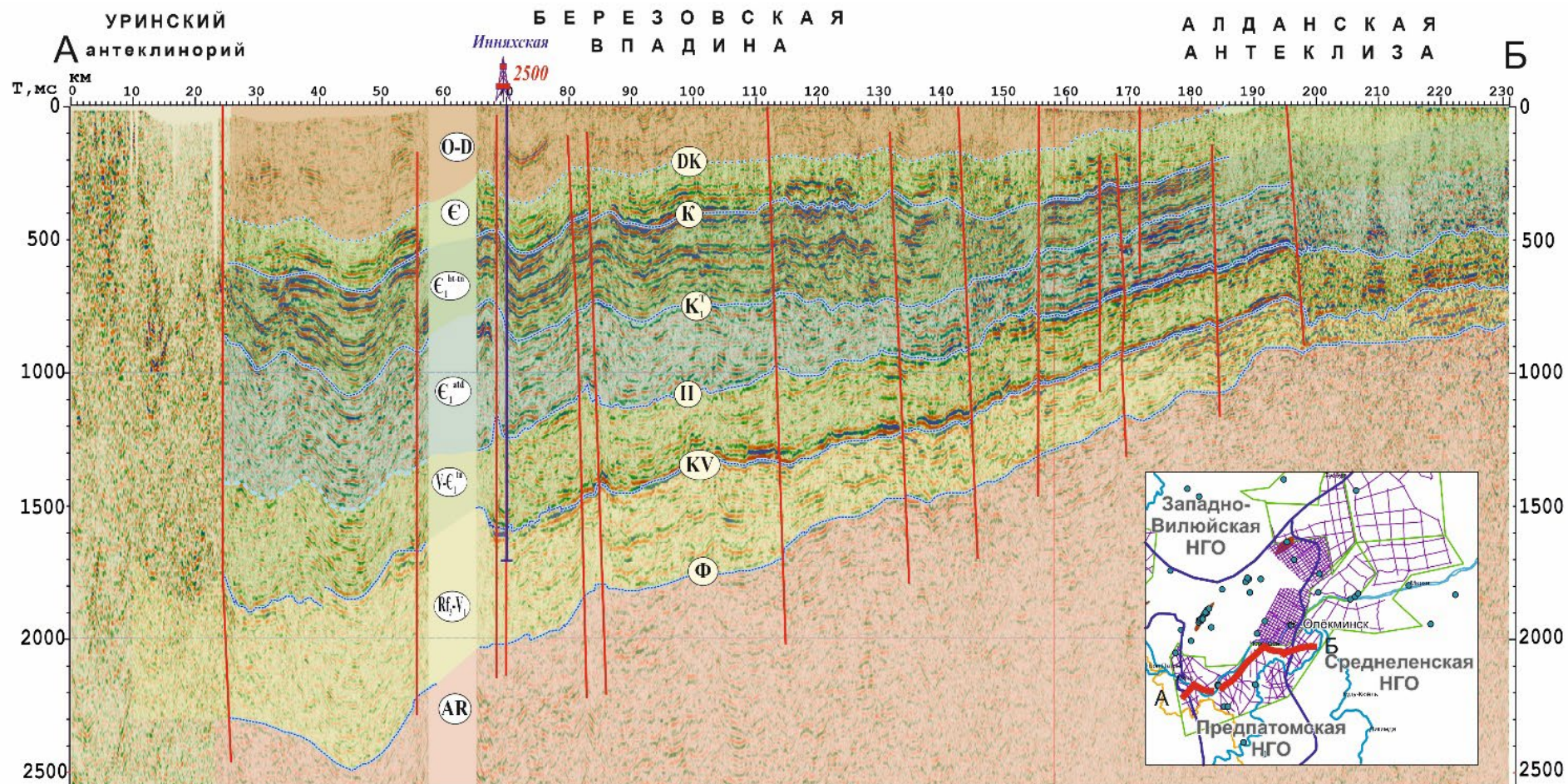


Рис. 2 Композитный сейсмопрофиль через Березовскую впадину

Заключение

Перспективы нефтегазоносности западной части Алданской антеклизы в основном связаны с тектонически экранированными залежами блокового строения в отложениях терригенного комплекса венда, карбонатного комплекса венда и галогенно-карбонатных отложениях кембрия. Перспективы нефтегазоносности в Березовской впадине в основном будут связаны в анлеклинальными ловушками в и галогенно-карбонатных отложениях кембрия.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вотяков Р.В. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Березовской впадины (Восточная часть Предпатомской нефтегазоносной области) // Геология нефти и газа. – 2013. – № 2. – С. 15–21
2. Мельников П.Н., Погодаев А.В., Матвеев А.И., Пороскун В.И., Царев В.В., Соболева Е.Н. Открытие нового нефтегазоносного района на северо-западном склоне Алданской антеклизы Сибирской платформы // Геология нефти и газа. – 2023. – № 2. – С. 5–16
3. Конторович А.Э., Моисеев С.А., Сафронов П.И., Бурштейн Л.М., Гордеева А.О., Губин И.А., Константинова Л.Н., Конторович В.А., Кузнецова Е.Н., Парфенова Т.М., Фомин А.М. Нефтегазогеологическое районирование Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича (г. Новосибирск, Россия, 29 января - 1 февраля 2024 г.) – СО РАН – Новосибирск – С. 108-110 – 2024
4. Дьяконова В.А., Оболкин А.П., Сяндюков Р.Ш., и др. Комплексные геофизические работы на Мархачанском объекте (сейсморазведка, гравимагнитка, электроразведка). Олекминский, Верхневилуйский, Горный районы (улусы) Республики Саха (Якутия). Госконтракт № 04/11. Мархачанская с/п 3/2011-2013. // ФГБУ "Росгеолфонд", 17128583
5. Дьяконова В.А., Оболкин А.П., Сяндюков Р.Ш., и др. Отчет о результатах сейсморазведочных работ на Средне-Ленской площади (Средне-Ленская с.п. № 7/2008-2010 гг.). Гос.контракт № 09/08. // ФГБУ "Росгеолфонд", 17138919

© Р.В. Маринов, 2026

Д. А. Новиков¹✉

Роль водорастворенного органического вещества в загрязнении подземных вод питьевого водоснабжения населения (на примере восточных районов Новосибирской области)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Приводятся данные по распределению растворенных органических веществ в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения в пределах южных районов Западной Сибири. Установлено, что в изученных подземных водах содержание общего органического углерода ($C_{орг}$), который присутствует в подземных водах в виде органических соединений в растворенном и нерастворенном состоянии, составляют от 0,06 до 87,6 мг/дм³. Его максимальные концентрации (>50 мг/дм³) зафиксированы в подземных водах девонско-каменноугольного возраста. В 57 % изученных проб содержания $C_{орг}$ превышает предельно допустимые концентрации в 2 раза и более.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество, гидрогеохимия, загрязнение, питьевые подземные воды, Новосибирская область, юг Западной Сибири

D. A. Novikov¹✉

Role of water-soluble organic matter in polluting groundwater intended for drinking water supply to the population (for eastern districts of the Novosibirsk Region)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The data on the distribution of dissolved organic substances in the groundwaters for household and drinking purposes within the southern regions of Western Siberia are presented. The content of total organic carbon, which is present in groundwaters in the dissolved and non-dissolved states, was determined to vary from 0,06 to 87,6 mg/dm³. Its maximal concentrations (>50 mg/dm³) were detected in the groundwaters of the Devonian-Carboniferous age. In 57 % of the studied samples, total organic carbon content exceeds the maximum permissible concentrations by a factor of 2 and more.

Keywords: dissolved organic matter, hydrogeochemistry, pollution, drinking groundwaters, the Novosibirsk Region, the southern regions of Western Siberia

Введение

Высокие концентрации растворенных органических веществ (РОВ) в источниках питьевой воды представляют собой серьезную проблему для водоподготовки, что требует совершенствования технологий очистки. В первую очередь они оказывают влияние на органолептические свойства подземных вод (цвет,

запах и вкус), делая их непригодными в питьевых целях. Увеличение РОВ в водах неглубоко залегающих водоносных горизонтов связано с климатическими (потепление, экстремальные погодные явления) и неклиматическими (антропогенная деятельность, увеличение концентрации CO_2 в атмосфере) факторами, однако наиболее часто с климатическими. Традиционные методы очистки воды находятся на пределе своих возможностей по удалению высокого содержания РОВ, гидрофильных соединений и новых загрязняющих веществ, таких как фармацевтические препараты и т. д. [1].

О важности изучения РОВ еще в 1930-е гг. указывал В. И. Вернадский: «Органические вещества минеральных вод в буквальном смысле *terra incognita*. Несмотря на их малые количества значение их – бальнеологическое – может быть огромно. Оно должно быть огромно и в геохимическом эффекте» [2]. Согласно В. М. Швецу [3], среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в различных типах подземных вод варьирует в очень широком диапазоне. Так, максимально оно (до 800 мг/дм^3) – в водах нефтегазовых месторождений), а минимально (до 25 мг/дм^3) – в грунтовых водах аридных областей. Среди последних работ, связанных с изучением водорастворенного РОВ (ВРОВ) в различных геохимических типах природных вод Сибири, следует упомянуть исследования [4, 5, 6, 7].

При оценке качества подземных вод хозяйственно-питьевого назначения обычно необходимо знать, сколько органических веществ содержится в этих водах. Общее их количество оценивается концентрацией $C_{\text{орг}}$, а приблизительно – значением перманганатной окисляемости (ПО), основанной на окислении органических веществ, присутствующих в воде, перманганатом калия KMnO_4 в сернокислой среде [8]. Согласно действующим в Российской Федерации нормативным документам предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевых вод для $C_{\text{орг}}$ составляют 5 мг/дм^3 , для ПО – 5 мг О/дм^3 [9]. Процессы водоподготовки (хлорирование, озонирование и т. д.) могут приводить к образованию в водах, обогащенных РОВ, потенциально вредных побочных продуктов, представляющих огромную опасность для здоровья человека из-за их мутагенной, канцерогенной и репродуктивной токсичности [10, 11]. В связи с этим цель настоящего исследования – изучение распределения РОВ в питьевых подземных водах восточных районов Новосибирской области, что продолжает наши работы по этому региону [12-15].

Методы и материалы

Во время экспедиционных работ 2019–2025 гг. и последующих аналитических исследований в лабораториях ИНГГ СО РАН и ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ получен уникальный фактический материал по химическому составу 794 проб подземных вод, в разной степени обогащенных РОВ, отобранных в контрастных гидрогеологических условиях гранитоидных массивов, зон контактов и разновозрастных осадочных комплексов в южных районах Западной Сибири. Исследуемая территория в гидрогеологическом плане находится на стыке Иртыш-Обского артезианского бассейна (АБ) и Кузнецкой гидрогеологической складчатой области (ГСО), граница между которыми условно проводится по долине р. Обь.

Результаты и обсуждение

Все содержащиеся в подземных водах органические вещества в той или иной степени участвуют в био- и геохимических процессах. М. Е. Альтовский отметил среди них гидролиз клетчатки и гумуса, поликонденсацию гуминовых и других органических кислот, каталитическую гидрогенизацию аминокислот, декарбоксилирование карбоновых кислот и др. [16]. В последние годы ужесточились требования к оценке безопасности питьевых вод, что связано с прогрессирующим их загрязнением, в том числе высокотоксичными органическими компонентами. В настоящее время, согласно данным ВОЗ, в промышленности используется около 500 тыс. органических соединений, из которых более 40 тыс. являются вредными для здоровья человека и 12 тыс. – токсичными [17]. Изучаемые воды были разделены на восемь групп в соответствии с возрастом водовмещающих отложений (табл. 1).

Таблица. 1. Распределение РОВ в подземных водах юга Западной Сибири

Возраст во- довмещаю- щих отложе- ний		М*, мг/дм³	рН	Еh, мВ	С _{общ}	С _{орг} ,	С _{неорг}	ПО, мгО/дм³
					мг/дм³			
Є–О		93,4–925 555(45)	7–8,4 7,5(45)	–141–(+304) 109,5(45)	23,2–77 61,5(16)	1,2–12,5 5,2(45)	15,9–66,1 52,3(16)	0,08–3,1 0,9(45)
D–C		171–1492 627(407)	6,7–8,7 7,5(407)	–150,4–(+306) 108,3(394)	14,7–153 80,2(147)	0,06–87,6 7,2(407)	12–113 66,35(147)	0,08–5,9 0,9(406)
J		1326	8,41	246,2	202	10,2	191	5,1
Р		471–761 612(3)	7,5–8,1 7,7(3)	83–177,5 126(3)	н/д	2–2,42 2,3(3)	н/д	0,26–1,0 0,65(3)
N		472–2905 1242(88)	7,3–8,9 7,7(88)	–173–(+270) 23,6(79)	н/д	1,8–46,2 9,4(88)	н/д	0,5–32,0 5(88)
Инtrузии	D	198–694 472(3)	7,2–8 7,5(3)	178–227 202,35(2)	21,9–49,9 38,9(3)	0,53–6,4 3,34(3)	21,4–43,6 35,6(3)	0,16–3,5 1,31(3)
	C	552–596 574(2)	7,07–7,3 7,2(2)	237,6–313 275,3(2)	69,9–81 75,5(2)	9,9–15,7 12,8(2)	60–65,5 62,7(2)	0,08–0,82 0,45(2)
	P–T	105–1339 706(46)	6,2–8,33 7,6(46)	–148–(+289) 109(46)	68,4–114 89(16)	0,79–25,6 8,3(46)	58,3–92 73(16)	0,08–4,8 1,2(46)

Примечания: В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее, в скобках – количество определений. М* – общая минерализация подземных вод; н/д – нет данных.

В изученных подземных водах содержание С_{общ} изменяется от 14,7 до 202 мг/дм³ и максимальна в водах юрских отложений, С_{неорг} – от 12–191 мг/дм³. С_{орг} присутствует в подземных водах в виде органических соединений в растворенном и нерастворенном состоянии, его концентрация 0,06–87,6 мг/дм³, максимальная (>50 мг/дм³) зафиксирована в подземных водах девонско-каменноугольного возраста. Анализ рассчитанных кумулятивных кривых для концентраций С_{орг} и ПО показал, что лишь в 15 % изученных проб содержания С_{орг} не превышают ПДК, а в 57 % проб превышают ПДК в 2 раза и более. Резко отличается картина по перманганатной окисляемости: меньшая часть исследованных проб

(41,5 %) превышает ПДК, однако в отдельных пробах – в 5 раз и более. Латеральная зональность в распределении РОВ носит весьма сложный характер (рис. 1а).

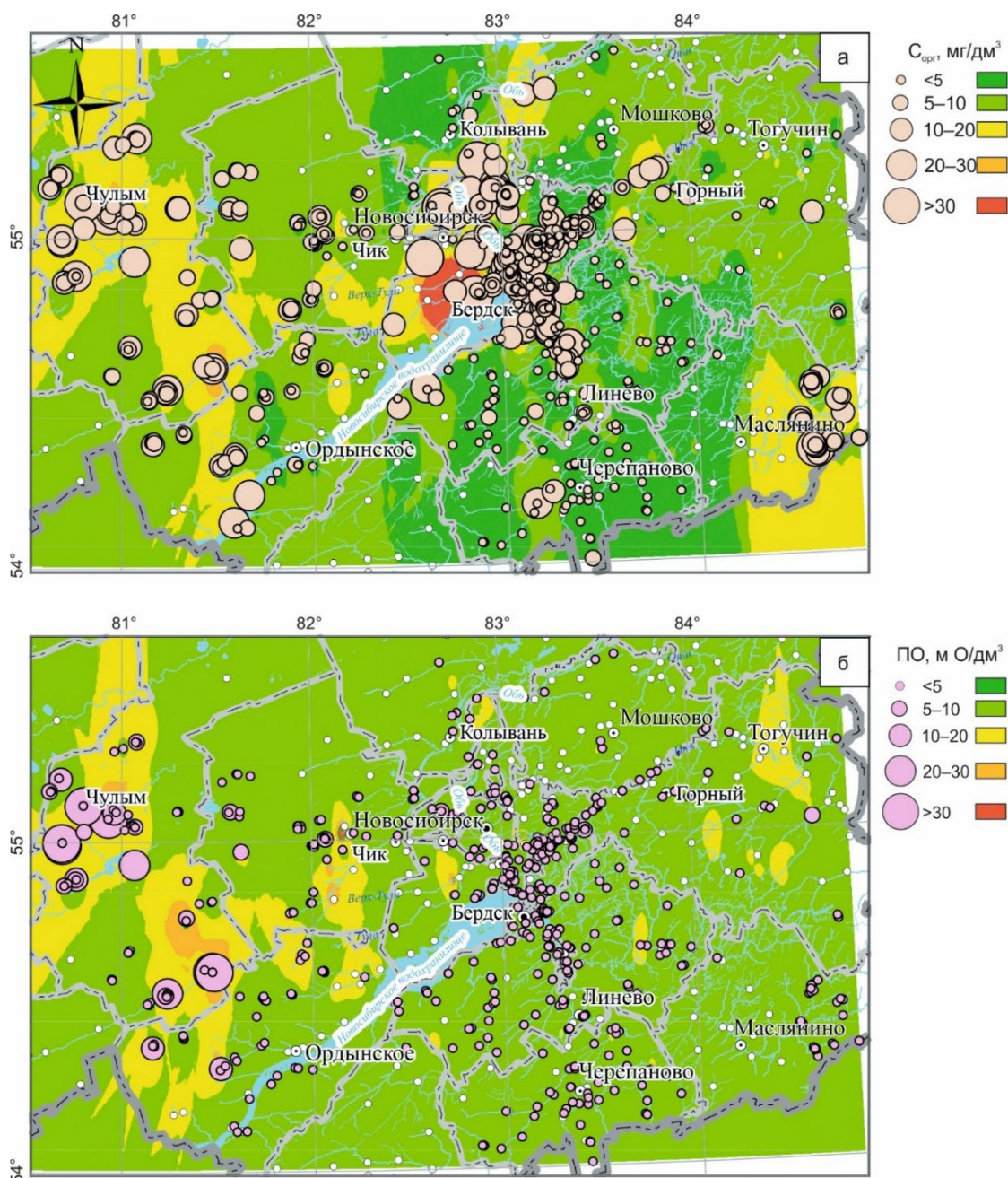


Рис. 1. Распределение РОВ (а) и ПО (б) в подземных водах южных районов Западной Сибири.

Максимальный уровень загрязнения $C_{орг}$ в пределах исследуемой территории наблюдается на территории Новосибирска и Новосибирского района (см. рис. 1, а). Здесь зафиксированы наиболее значительные превышения ПДК. Так, в пос. Междуречье концентрация $C_{орг}$ достигает $87,6 \text{ мг/дм}^3$, что почти в 18 раз выше установленной нормы. Превышения ПДК носят повсеместный характер во всех районах города, наиболее высокие ($C_{орг} > 30 \text{ мг/дм}^3$) выявлены в селах

Алексеевка, Ленинское, Криводановка, Новолуговое, поселках Междуречье, Красный Яр, СНТ «Звездное» и д/о «Хуторок». Второе место по степени загрязнения органическим веществом занимает Чулымский район: зафиксированная максимальная концентрация $C_{орг} = 46,2 \text{ мг/дм}^3$. Анализ проб показал, что нормативные значения установлены лишь в трех пробах из 65, что свидетельствует о повсеместном загрязнении территории.

Наибольшие превышения предельно допустимой концентрации по ПО зафиксированы в Чулымском районе (см. рис. 1, б). Максимальные значения достигают 32 мг О/дм^3 , что в 6 раз превышает установленную норму (населенные пункты: пос. Чулым и с. Золотая Грива). Второй по загрязненности район – Ордынский, здесь максимальное значение доходит до 14 мг О/дм^3 , в двух населенных пунктах – в пос. Пролетарский и с. Филиппово, в остальных пробах значения ПО не превышают 5 мг О/дм^3 , что соответствует установленным нормам.

Заключение

На территории исследования распространены преимущественно пресные, реже слабосоленоватые воды с минерализацией от 95 до 2905 мг/дм^3 . Как правило (в 60 % случаев) они имеют гидрокарбонатный кальциевый состав, значительно меньше – гидрокарбонатный кальциево-натриевый (13 % проб) и гидрокарбонатный натриево-кальциевый (7 % проб).

В изученных подземных водах содержание $C_{общ}$ изменяется от 14,7 до 202 мг/дм^3 , наибольшие концентрации отмечены в водах юрских отложений. Концентрации $C_{неорг}$ варьируют в интервале $12\text{--}191 \text{ мг/дм}^3$; $C_{орг}$, который присутствует в подземных водах в виде органических соединений в растворенном и нерастворенном состоянии, – $0,06\text{--}87,6 \text{ мг/дм}^3$, максимальные ($>50 \text{ мг/дм}^3$) зафиксированы в подземных водах девонско-каменноугольного возраста. Значение ПО варьирует в широком диапазоне – от 0,08 до $32,0 \text{ мг О/дм}^3$.

Латеральная зональность в распределении РОВ носит весьма сложный характер. Максимальный уровень загрязнения по $C_{орг}$ наблюдается на территории Новосибирска, высокий – в Маслянинском, Ордынском, Искитимском и Коченевском районах, а наибольшие превышения ПДК по показателю перманганатной окисляемости зафиксированы в Чулымском районе Новосибирской области.

Природа установленных гидрогеохимических аномалий (по $C_{орг}$ и ПО) требует дополнительных исследований состава органических веществ. Актуальность этих работ многократно возрастает в связи с ужесточением в последние годы требований к оценке безопасности питьевых вод, что связано с их прогрессирующим загрязнением, в том числе высокотоксичными органическими компонентами.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 25-17-20024 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области (№ 30-2025-000896).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ramanathan T., Sathasivan A. Dissolved organic carbon concentration changes in surface drinking water sources, treatment challenges and potential solutions // *Journal of Water Process Engineering*. – 2025. – V. 76. – 108188.
2. Вернадский В. И. История природных вод: Избр. соч. Т. 4, кн. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 651 с.
3. Швец В. М. Органические вещества подземных вод. – М.: Недра, 1973. – 191 с.
4. Лепокурова О. Е., Трифонов Н. С., Домрочева Е. В. Миграционные формы основных ионов в подземных водах угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // *Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89.
5. Бернатонис П. В., Копылова Ю. Г., Бернатонис В. К. и др. Органические вещества в водах сапропелевых озер Томской области // *Вестн. ТГУ*. – 2011. – № 348. – С. 161–164.
6. Потурай В. А., Компаниченко В. Н., Редин А. А. Органическое вещество в термальных водах Белокурихи // *Геология и геофизика*. – 2025. – Т. 66. – № 9. – С. 1177–1194.
7. Украинцев А. В., Плюснин А. М., Чернявский М. К. Формирование газового, элементного состава и растворенных органических веществ в железистых минеральных водах западного Забайкалья // *Геохимия*. – 2024. – Т. 69. – № 6. – С. 562–576.
8. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021.
10. Beane F. L. E., Cantor K. P., Baris D. et al. Bladder cancer and water disinfection by-product exposures through multiple routes: a population-based case-control study (New England, USA) // *Environ. Health Perspect.* – 2017. – V. 125. – N. 6. – 067010.
11. Richardson S. D. *Encyclopedia of Environmental Health* / Ed. by J. O. Nriagu. – Burlington: Elsevier, 2011. – P. 110–136.
12. Novikov D. A., Dultsev F. F., Sukhorukova A. F., Maksimova A. A., Chernykh A. V., Derkachyov A. S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – V. 15. – 8 p.
13. Novikov D. A., Dultsev F. F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T. V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // *Environmental Earth Sciences*. – 2021. – V. 80. – No. 216.
14. Novikov D. A., Kopylova Yu. G., Pyryaev A. N., Maksimova A. A., Derkachev A. S., Sukhorukova A. F., Dultsev F. F., Chernykh A. V., Khvashchevskaya A. A., Kalinkin P. N., Petrozhitsky A. V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – V. 20. – 100886.
15. Novikov D. A., Dultsev F. F., Maksimova A. A., Derkachyov A. S., Chernykh A. V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia // *Geochemistry*. – 2023. – V. 83. – N. 4. – 126016.
16. Альтовский М. Е. Гидрогеологические показатели нефтегазоносности. – М.: Недра, 1967. – 121 с.
17. Антипин М. А., Безденежных Н. А., Чугунова Н. А. Актуальные проблемы аналитической гидрогеохимии на современном этапе // *Разведка и охрана недр*. – 2009. – № 9. – С. 64–68.

© Д. А. Новиков, 2026

Д. А. Новиков^{1,2✉}, Н. А. Медешова², К. О. Жинақ²

Радиоактивность подземных вод юго-восточных районов Казахстана

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²КазННТУ имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан.
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрены факторы, определяющие формирование радионуклидного состава подземных вод на территории юго-востока Республики Казахстан. Установлено, что первостепенное значение среди них имеют геолого-тектонические особенности гидрогеологических структур и характер залегания водопроницаемых пород. Показан широкий диапазон изменения содержания урана — от $4,8 \cdot 10^{-6}$ до 78 мг/дм^3 . Максимальные концентрации (до 10 мг/дм^3 и выше) зафиксированы в кислых подземных водах зон окисления урановых месторождений. В околонейтральных водах рудоносных пород содержание урана варьируется от 0,1 до 10 мг/дм^3 , а за пределами месторождений снижается до $n \cdot 10^{-1} \text{ мг/дм}^3$. При благоприятных гидрогеохимических условиях накопление урана возможно не только в рудных районах, но и вне их.

Ключевые слова: уран, подземные воды, Казахстан

D. A. Novikov^{1,2✉}, N. A. Medeshova², K. O. Zhynak²

Radioactivity of groundwater in southeastern regions of Kazakhstan

¹Trofimuk Institute of Petroleum geology SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Satbaev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The factors determining the formation of the radionuclide composition of groundwater in the southeastern part of the Republic of Kazakhstan are considered. It is established that the geological and tectonic features of hydrogeological structures and the nature of the occurrence of permeable rocks are of primary importance among them. A wide range of uranium concentrations is shown, from $4.8 \cdot 10^{-6}$ to 78 mg/dm^3 . Maximum concentrations (up to 10 mg/dm^3 and higher) are recorded in acidic groundwater of the oxidation zones of uranium deposits. In near-neutral waters of ore-bearing rocks, the uranium content varies from 0.1 to 10 mg/dm^3 , and outside the deposits it decreases to $n \cdot 10^{-1} \text{ mg/dm}^3$. Under favorable hydrogeochemical conditions, uranium accumulation is possible not only in ore districts but also outside them.

Keywords: uranium, groundwater, Kazakhstan

Во многих регионах мира радиохимия подземных вод изучена очень слабо. Между тем, глубокое понимание их изотопно-геохимической специфики и учет всей совокупности радиохимических параметров являются обязательным условием для определения качества питьевого водоснабжения. В современной науке неоспорим высокий интерес к процессам миграции и концентрирования нуклидов в различных

геохимических обстановках. В частности, дискуссионными остаются вопросы перераспределения элементов в гидрогеологических системах. Особое внимание уделяется эволюционному развитию системы «вода–порода» и ее рудогенерирующему потенциалу. Поскольку минералы и рассеянное органическое вещество выступают основными источниками растворенных компонентов, для установления их влияния на состав вод используют широкий спектр методов исследований.

Стоит отметить, что в отношении гидрогеологических регионов юго-востока Республики Казахстан (рис. 1) аналогичные изыскания ранее практически не проводились. В связи с этим представленные материалы являются первым опытом систематизации накопленного массива данных о геохимических свойствах подземных вод и концентрации в них урана.

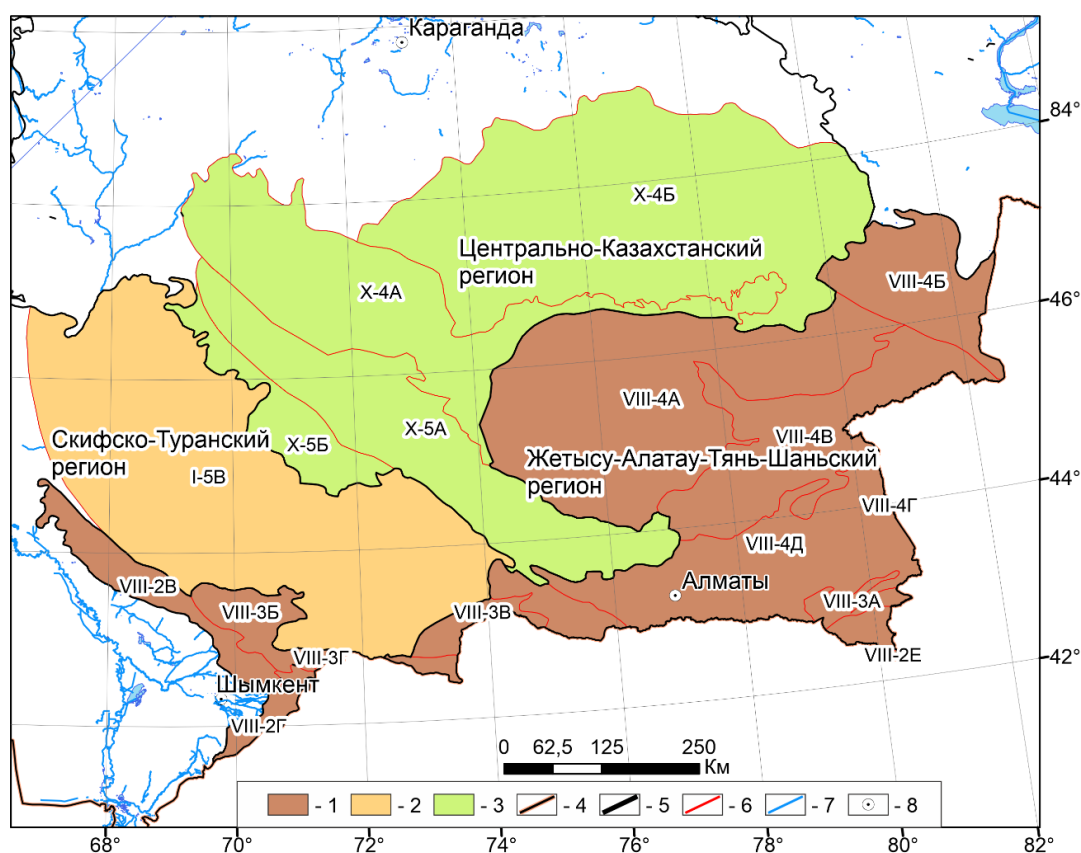


Рис. 1. Гидрогеологическое районирование юго-востока Казахстана.

- 1 – Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский регион, 2 – Скифско-Туранский регион,
3 – Центрально-Казахстанский регион, 4 – граница Республики Казахстан,
5 – границы гидрогеологических регионов, 6 – границы бассейнов, 7 – гидрография,
8 – населенные пункты

Республика Казахстан располагает значительными запасами урана. Его месторождения встречаются как в палеозойском складчатом фундаменте, так и в мезозойско-кайнозойском платформенном чехле (рис. 2). Наибольший интерес с точки зрения промышленной добычи представляют эпигенетические место-

рождения пластово-инфильтрационного типа, формирующиеся в зонах регионального пластового окисления в отложениях мелового и палеогенового возраста. По всему разрезу платформенного чехла – от триасовых до четвертичных отложений – широко распространены многочисленные экзодиагенетические урановые проявления, связанные с грунтово-инфильтрационными процессами. Они приурочены к континентальным палеодолиненным, пойменным и аллювиальным отложениям, при этом их запасы, как правило, не превышают уровня мелких месторождений [1-2].

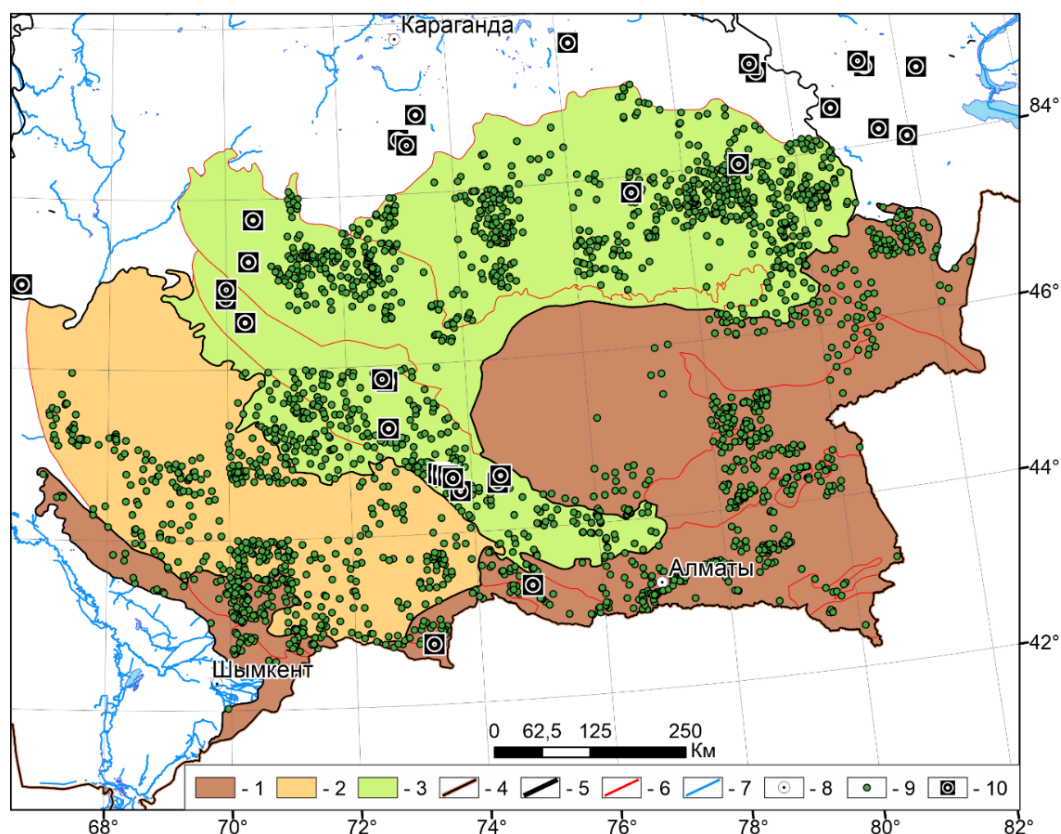


Рис. 2. Распределение месторождений урана и точек опробования по гидрогеологическим структурам Казахстана.

- 1 – Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский регион, 2 – Скифско-Туранский регион, 3 – Центрально-Казахстанский регион, 4 – граница Республики Казахстан, 5 – границы гидрогеологических регионов, 6 – границы бассейнов, 7 – гидрография, 8 – населенные пункты, 9 – точки опробования, 10 – месторождения урана

Методы и материалы

Выполнено обобщение многолетних гидрогеохимических исследований, проводимых на территории Республики Казахстан с 50-ых годов прошлого века. Результаты гидрогеохимического опробования сведены в единую базу данных, представленную более 2400 записями (пробами). По территории исследований

также использовались материалы, по пробам, отобранным при проведении полевых работ в 2024-2025 гг. и ранее [3].

Непосредственно в полевых условиях замерялись: температура, pH, Eh, концентрация растворенного O₂. Для этих целей применялись переносные приборы Hanna HI9125, АКПМ-1-02Л, а также кондуктометр Seven2Go (Mettler Toledo) для оценки минерализации. Чтобы исключить влияние взвешенных частиц, пробы подвергались вакуумной фильтрации через мембраны 0.45 мкм сразу после отбора. Основной аналитический этап выполнялся на базе ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ. Ионный состав (основные катионы и анионы) изучался хроматографическим методом, в то время как микроэлементный профиль, включая уран, изучался с помощью ICP-MS. Дозиметрический контроль осуществлялся прибором «Дрозд», а концентрация радона оперативно измерялась комплексом «Альфа-рад плюс» в день полевых работ.

Результаты и обсуждение

Формирование и распространение подземных вод определяется множеством причин, однако ключевая роль отводится геолого-тектоническому строению гидрогеологических структур, а также условиям залегания водопроницаемых пород, которые служат природными резервуарами для накопления подземных вод с разным химическим составом. Между гидрогеохимической обстановкой и структурно-тектоническими особенностями выявлена тесная взаимосвязь, что указывает на влияние последних на формирование как макро-, так и микрокомпонентного состава вод. К числу наиболее значимых характеристик относятся также типы гидрогеологических разрезов, отражающие специфику соответствующих структур. На изучаемой территории выделяют две системы бассейнов с напорными и безнапорными водами [4]: области (платформы) с преобладанием порово-пластовых вод (Скифско-Туранская-I), а также области с преобладанием трещинных, трещинно-жильных и трещинно-карстовых вод, к которым относятся межгорные и внутригорные впадины, современные и древние речные долины с поровыми и порово-пластовыми водами (Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньская-VIII, Центрально-Казахстанская-X) [5]. Внутри этих регионов выделяются бассейны первого порядка (см. рис. 1).

Скифско-Туранский регион – I

Рассматриваемый регион представляет собой систему бассейнов пластовых и блоково-пластовых вод, охватывающую эпипалеозойскую плиту, располагающуюся в периферийной части древней Восточно-Европейской платформы. Области распространения пластовых вод приурочены к крупным отрицательным структурам фундамента. В границах Туранской плиты насчитывается пять бассейнов первого порядка с безнапорными и напорными водами. Подземные воды Скифско-Туранского региона имеют преимущественно Cl-SO₄ Na состав (рис. 3) с величиной общей минерализации, варьирующей от 0,041 до 183 г/дм³.

Жетысу-Алатау - Тянь-Шаньский регион – VIII

В пределах рассматриваемой территории развиты системы бассейнов, содержащие воды пластового и трещинно-карстового типа. Формирование этих

структур связано с палеозойскими складчатыми комплексами, были преобразованы в систему крупных впадин в мезозойское и кайнозойское время. Из четырех выделяемых здесь бассейнов первого порядка три расположены на казахстанской территории: это Жетысу-Алатау-Балкашский, Северо-Тянь-Шаньский и Центрально-Тянь-Шаньский.

Воды Северо-Тянь-Шаньского бассейна по составу HCO_3Ca и SO_4Na с величиной общей минерализации от пресных до 15 г/дм³ (рис. 3). В восточной части бассейна установлены пресные (0,15 – 0,97 г/дм³) и солоноватые (1,3 – 7,5 г/дм³) воды, в западной встречаются соленые с величиной общей минерализации до 15 г/дм³ SO_4Na состава.

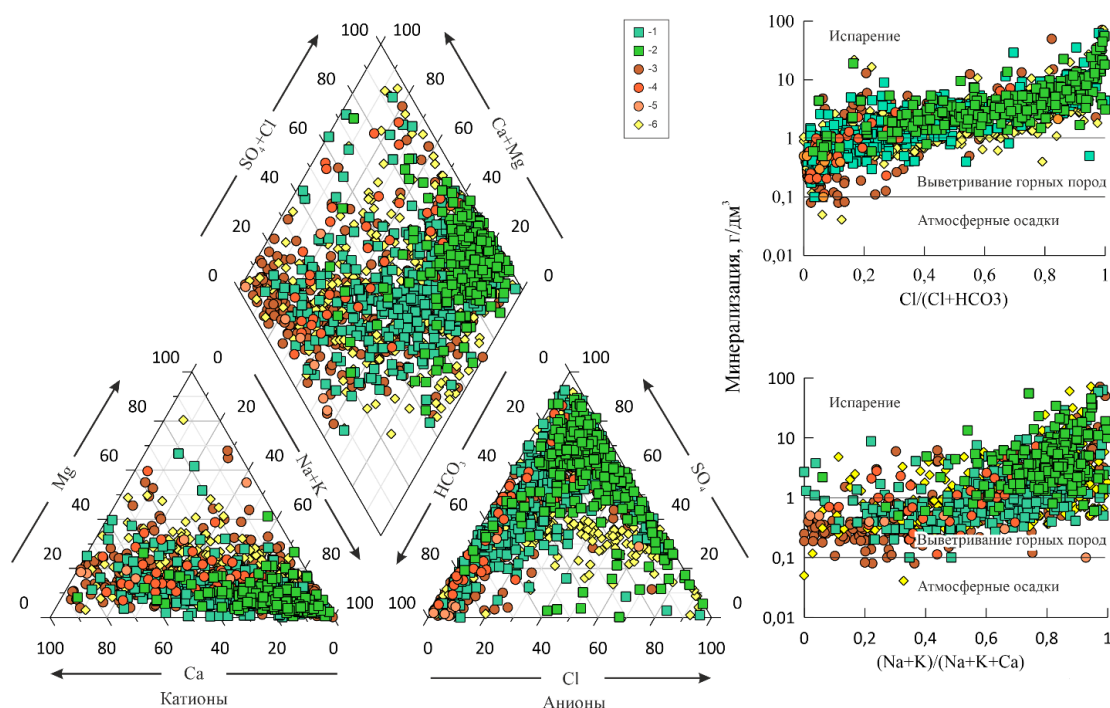


Рис. 3. Диаграмма Пайпера подземных вод юго-восточного Казахстана.

Регионы и бассейны: Центрально-Казахстанский: 1 – Прибалкашский, 2 – Шу-Илейский, Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский: 3 – Жетысу-Алатау-Балкашский, 4- Северо-Тянь-Шаньский, 5 – Центрально-Тянь-Шаньский, Скифско-Туранский: 6 – Приарало-Торгай-Шу-Сарысуский

Центрально-Казахстанский регион – X

Регион приурочен к Центрально-Казахстанской складчатой области, сложенной в основном каледонидами с подчиненными блоками герцинид. Для обнаженных интрузивных массивов характерно формирование пресных гидрокарбонатных кальциевых подземных вод. Подземные воды Центрально-Казахстанского региона в основном имеют $\text{Cl-SO}_4\text{Na}$ и Cl Na состав величиной общей минерализации от пресных до 113 г/дм³.

Распределение урана в подземных водах

Согласно полученным нами результатам, Распределение урана в подземных водах основных гидрогеологических регионов Казахстана весьма неоднородно и варьирует по основным бассейнам в очень широких пределах (табл. 1). Наиболее высокие содержания урана в подземных водах установлены в пределах (мкг/дм³): Приарало-Торгай-Шу-Сарысуский (до 6500), Жетысу-Алатау-Балкашский (до 50000), Прибалкашский (до 78000), Шу-Илейский (до 8000). Наибольшие значения зафиксированы в кислых подземных водах, формирующихся в зонах окисления урановых рудных тел (например, на месторождениях Мирный, Кызылсай, Шорлы, Джусандалинское и др.). В слабощелочных и нейтральных водах, циркулирующих в ураноносных породах, содержание урана обычно находится в интервале 0,1–10 мг/дм³. За границами рудных полей этот показатель падает до величин порядка $n \cdot 10^{-1}$ мг/дм³. Следует особо отметить, что повышенные концентрации урана могут возникать не только в водах, непосредственно связанных с его месторождениями.

Таблица 1. Распределение урана в подземных водах гидрогеологических регионов Казахстана

Бассейн	Минерализация, г/дм ³	Доминирующий хим. тип	Распределение, мг/дм ³
Скифско-Туранский			
Приарало-Торгай-Шу-Сарысуский	0,1-71,9 4,1 (549)	Cl Na SO ₄ Na	0-6500 49 (605)
Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский			
Жетысу-Алатау-Балкашский	0-71,3 1,6 (515)	HCO ₃ Ca	0-50000 183 (553)
Северо-Тянь-Шаньский	0,1-15,1 1,4 (132)	HCO ₃ Ca SO ₄ Na	1-1200 75 (205)
Центрально-Тянь-Шаньский	0,1-2,1 1 (17)	HCO ₃ Ca	1-480 48 (38)
Центрально-Казахстанский регион			
Прибалкашский	0-62,8 2,6 (573)	SO ₄ -HCO ₃ Na SO ₄ Na HCO ₃ -SO ₄ Na	0-78000 232 (861)
Шу-Илейский	0-113,2 6,2 (308)	SO ₄ Na SO ₄ -Cl Na	0-8000 264 (354)

Заключение

В настоящей работе выполнено первое обобщение данных по ураноносности подземных вод юго-восточных районов Казахстана. Максимальные концентрации которого связаны с его месторождениями. Радионуклидный состав и распрост-

ранение подземных вод определяются множеством факторов, среди которых ключевую роль играют геолого-тектоническое строение гидрогеологических структур и условия залегания водопроницаемых пород. Концентрация урана в подземных водах юго-восточных районов Казахстана варьируется в широких пределах – от $4,8 \cdot 10^{-6}$ до 78 мг/дм^3 . Самые высокие значения (до 10 мг/дм^3 и более) характерны для кислых вод в зонах окисления урановых руд (месторождения Мирный, Кызылсай, Шорлы, Джусандалинское и др.). В околонейтальных водах рудоносных толщ содержание урана составляет $0,1\text{--}10 \text{ мг/дм}^3$, а за пределами месторождений снижается до $n \cdot 10^{-1} \text{ мг/дм}^3$. Кроме того, установлено, что при подходящих гидрогеохимических условиях накопление урана возможно и на удалении от рудных залежей.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан грант № AP22685193 «Природа радиоактивности подземных вод в Алматинской области» (№ 73/ЖҒБ24-26 от 20.06.2024).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жолтаев Г.Ж., Жуков Н.М., Антоненко А.А. Атлас закономерностей размещения месторождений твердых полезных ископаемых Республики Казахстан. – Алматы: ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева», 2023. – 265 с.
2. Петров Н.Н., Языков В.Г., Аубакиров Х.Б., Плеханов В.Н., Вершков А.Ф., Лухтин В.Ф. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные). Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
3. Медешова Н.А., Новиков Д.А., Ауелхан Е.С., Антоненко А.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Орынбек А.М., Минискул Ш.Д., Черных А.В., Хвощевская А.А. Уран в подземных водах Северного Казахстана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 10. – С. 203-215.
4. Атлас гидрогеологических карт Республики Казахстан. – Алматы: ТОО «А-Три-Принт», 2022. – 85 с.
5. Смоляр В.А., Буров Б.В., Веселов В.В., Махмутов Т.Т., Касымбетов Д. Водные ресурсы Казахстана (поверхностные и подземные воды, современное состояние). – Алматы: Гылым, 2002. – 596 с.

© Д. А. Новиков, Н. А. Медешова, Қ. О. Жинақ 2026

Д. А. Новиков¹✉

Водород в составе газов Арктического сектора Западной Сибири

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены данные по изучению газового состава залежей углеводородов в юрских и меловых отложениях Арктического сектора Западной Сибири. Приведены особенности распределения газовых компонентов и установлены основные закономерности их зональности в пределах юрско-меловых нефтегазоносных комплексов. Особое внимание уделено распределению водорода: выявлена тенденция к увеличению его концентрации с глубиной, хотя общая картина распределения остается неоднозначной. Зафиксированные в ряде случаев аномальные значения (свыше 0,5 об. %) указывают на необходимость критической оценки достоверности этих аналитических результатов.

Ключевые слова: геохимия газов, водород, фазовый состав, зональность, Арктика, Западная Сибирь

D. A. Novikov¹✉

Hydrogen in the gases the Arctic sector of West Siberia

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The data obtained in the studies of gas composition of hydrocarbon pools in the Jurassic and Cretaceous sediments in the Arctic sector of West Siberia are presented. The features of gas components distribution are described, and the major regularities of their zoning within the boundaries of the Jurassic - Cretaceous oil and gas bearing complexes are established. Special attention is paid to hydrogen distribution: a trend to an increase in hydrogen concentration with depth is revealed, though the general distribution pattern remains ambiguous. Anomalous values (above 0.5 vol%) detected in some cases point to the necessity of critical evaluation of the entire array of analytical data.

Keywords: geochemistry of gases, hydrogen, phase composition, zoning, the Arctic, West Siberia

Введение

В природе четырьмя основными источниками водорода являются гидролиз, деградация органического вещества, разложение таких веществ, как метан и аммиак, и глубокая дегазация мантии. Понимание происхождения, миграции и накопления природного водорода имеет большое значение для его коммерческой эксплуатации и использования. Генезис свободного водорода остается актуальным полем для научных дискуссий. Необходимо признать, что к 2026 году ключевые аспекты его происхождения, оценки мировых запасов и перспектив промышленного освоения изучены недостаточно.

Существующие концепции формирования водорода в литосфере разделяются на два основных направления [1-3]. Первое связывает его появление с физико-химическими и радиохимическими процессами в магматических очагах [4]. Второе направление рассматривает механизмы генерации газа непосредственно в осадочной толще. При нагревании осадочных пород происходит выделение различных газов, в том числе и водорода, причем максимальное количество водорода фиксируется при нагревании метаморфизованных осадочных пород. К группе образования свободного водорода в породах осадочного чехла относится также теория микробиального источника водорода. В ней описан процесс образования водорода водородгенерирующими бактериями в артезианских бассейнах зон формирования месторождений урана осадочно-генетического типа [5]. По мнению В.И. Молчанова: «Приведенные теории образования свободного водорода демонстрируют многообразие природных механизмов генерации свободного водорода в земной коре. На данный момент нет критериев, которые могли бы позволить объективно оценить долю водорода, образовавшегося тем или иным путем, а также определить преобладающий процесс его генерации» [6].

Несмотря на то, что наличие природного водорода было обнаружено при бурении скважин более века назад во Франции и Австралии [7], первые разведочные работы были проведены гораздо позже. Крупномасштабные проекты были реализованы компанией Hydroma в Мали в 2008 году в регионе Буракебугу, спустя 20 лет после случайного открытия месторождения [8]. Сегодня небольшие компании сосредоточены на разведке водорода, например, в США, где NH2E провела глубокое бурение в Небраске в 2019 году, или Desert Mountain Energy, которая объявила в феврале 2022 года об открытии месторождения природного водорода в Аризоне. В Австралии компания Santos, после бурения нескольких разведочных скважин, объявила в 2021 году о завершении первой скважины по добыче природного водорода в бассейне Амадеус. В Европе компании также развивают этот вид деятельности, такие как Hupat в Швейцарии, 45–8 Energy и Engie во Франции или Helios в Испании [9] и т.д.

В связи с этим цель настоящего исследования – изучить распределение водорода в нефтегазоносных отложениях Арктического сектора Западно Сибири в свободном состоянии.

Методы и материалы

Водород обладает уникальной миграционной способностью и высокой реакционной активностью. По сути – это полноценный геохимический индикатор, который может рассказать нам о степени зрелости органического вещества, о надежности флюидоупоров и даже о современных путях миграции углеводородов в геологическом разрезе. Он реагирует на малейшие изменения в системе «вода-порода-газ-органическое вещество».

Одним из ключевых моментов анализа ретроспективных данных по газовому составу залежей УВ выступает оценка их достоверности, другими словами разбраковка и оценка качества. Широко известно, что в пределах нефтегазоносных отложений при бурении скважин, соляно-кислотных обработках и т.д. при

коррозии насосно-компрессорных труб идут процессы образования техногенного водорода, высокие концентрации которого могут без должной проверки интерпретироваться как геохимические аномалии. Наиболее полно механизмы образования таких «артефактов» рассмотрены в работах [11-20].

База данных, послужившая основой для настоящего исследования представлена материалами по более 2200 залежам свободного газа, более 600 газовых шапок нефтяных залежей и более 2200 нефтяным залежам (попутным газам). Наибольший объем информации приходится на неокомские отложения. Генетический анализ имеющихся данных по составу газов был выполнен традиционными методами, путем анализа общепринятых геохимических коэффициентов: $\Sigma \text{УВ}/\text{N}_2$ – коэффициент обогащенности углеводородами, $\text{CH}_4/\Sigma \text{TУ}$ – коэффициент сухости, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ – коэффициент этанизации и соотношение изомеров бутана $i\text{-C}_4\text{H}_{10}/n\text{-C}_4\text{H}_{10}$; и отношений: H_2/He , H_2/CH_4 , $\text{H}_2/\Sigma \text{TУ}$, H_2/N_2 , N_2/Ar , O_2/N_2 . Формула состава газов приведена в виде последовательности индивидуальных газовых компонентов – от наибольшей концентрации к наименьшей, об. %.

Результаты и обсуждение

На основе статистического анализа состава свободных и растворенных газов были выявлены особенности распределения углеводородных и неуглеводородных газов для залежей различного типа. Почти повсеместно в составе газа доминируют метан (90–99 об. %, рис. 1). Присутствие пропана, бутана и более тяжелых гомологов типично для нефтяных и газоконденсатных залежей. В компонентном составе отсутствует сероводород, а содержание азота обычно не превышает 3 об. %, за исключением отдельных месторождений (Салмановское, Нейтинское и др.), где его доля возрастает до 7–15 об. %. Средние концентрации CO_2 составляют около 0,6 об. %, а инертных газов (He, Ar) – сотые доли процента. Распределение водорода (H_2) носит довольно сложный характер с его средними концентрациями, достигающими до 0,54 об. % в растворенных газах нефтяных залежей ниже-среднеюрского нефтегазоносного комплекса. Ключевым отличительным признаком газов разных типов залежей является концентрация тяжелых углеводородов (C_2H_6 +высшие), которая коррелирует с выходом стабильного конденсата. Далее представлена информация о геохимических особенностях газов в зависимости от фазового состояния залежей.

Компонентный состав газовых залежей подчиняется убывающему ряду, в котором после метана и азота следуют этан и диоксид углерода ($\text{C}_1 > \text{N}_2 > \text{C}_2 > \text{CO}_2 > \text{C}_3 > \text{H}_2 > i\text{-C}_4 > n\text{-C}_4 > \text{Ar} > i\text{-C}_5 > \text{He} > n\text{-C}_5 > i\text{-C}_6 > n\text{-C}_6$). Концентрация метана в среднем составляет 94,6–96,6 об. %, тогда как значения суммы его гомологов (от пропана до гексана) варьируются от следовых количеств до долей процента. Среди неуглеводородных газов превалирует азот (до 2,35 об. %) и углекислый газ (до об. 0,73 %). Средние содержания водорода составляют от 0,03 до 0,18 об. %, достигая максимума в верхнеюрских отложениях. Параметры обогащенности газа ($\Sigma \text{TУ}$) достигают 5 об. %, при этом коэффициенты этанизации ($K_3 = 100 \cdot \text{C}_2/(\text{C}_3 + \text{C}_4)$) и жирности ($K_{\text{ж}} = \text{C}_{2+\text{высшие}}/\text{C}_1$) демонстрируют широкую вариативность, доходя до 3000 и 5,5 соответственно. Показательно, что макси-

мальные содержания тяжелых углеводородов приурочены к неокимским горизонтам, в то время как верхнеюрские залежи ими обеднены.

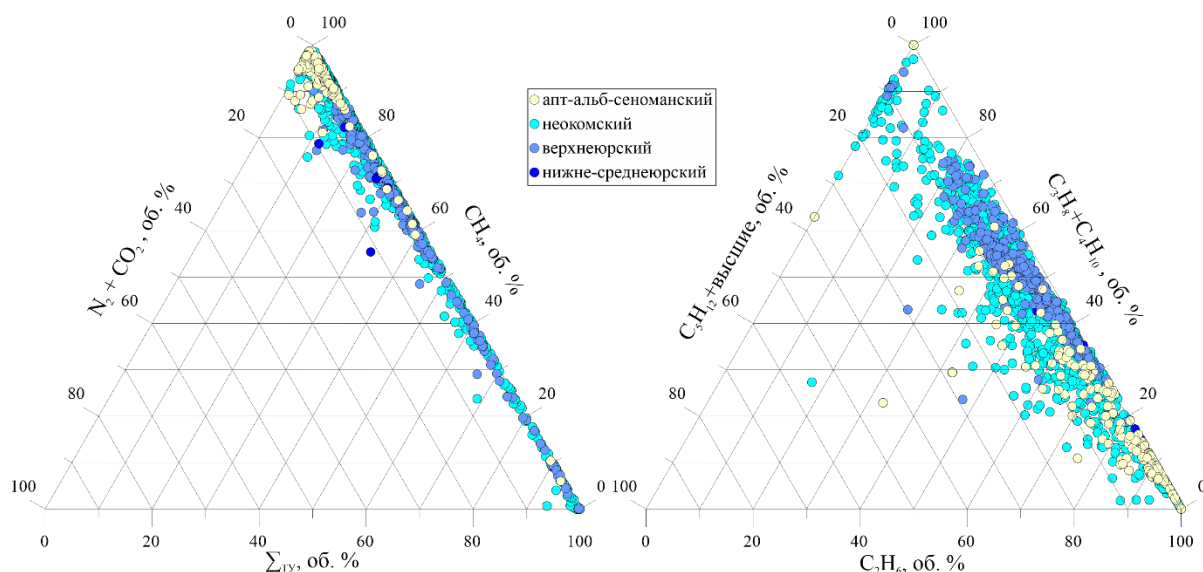


Рис. 1. Диаграммы общего состава газов и состава тяжелой углеводородной фракции свободных газов залежей Арктического сектора Западной Сибири.

Состав газоконденсатных залежей характеризуется рядом $C_1 > C_2 > C_3 > N_2 > CO_2 > n-C_4 > i-C_4 > i-C_5 > n-C_5 > H_2 > i-C_6 > Ar > n-C_6 > He$ и заметным ростом доли ТУ по сравнению с чисто газовыми объектами. Содержание метана здесь снижается до 85,3–90,4 об. %, в то время как концентрация этана и пропана возрастает до 6,89 % и 3,13 % соответственно. Средние содержания водорода составляют от 0,02 до 0,19 об. %, достигая максимума в нижне-среднеюрских отложениях. Суммарная доля гомологов метана (ΣTU) достигает 15 об. %, а коэффициент жирности ($K_{ж}$) варьируется в пределах 5,4–18,2. Примечательно, что профиль среднего состава таких залежей остается относительно стабильным по всему юрско-меловому разрезу.

Для нефтегазоконденсатных систем характерна еще большая концентрация тяжелых УВ, при которой метан составляет лишь 72,8–77,2 об. %, а доля этана и пропана возрастает до 13,53 об. % и 7,67 об. % соответственно. Средние содержания водорода изменяются от следовых до 0,18 об. % в нижне-среднеюрских отложениях. Иерархический ряд компонентов выглядит как $C_1 > C_2 > C_3 > n-C_4 > i-C_4 > N_2 > CO_2 > i-C_5 > n-C_5 > i-C_6 > H_2 > n-C_6 > Ar > He$. Суммарное содержание гомологов метана (ΣTU) в таких объектах и газовых шапках достигает 30 об. %, что отражается на коэффициенте жирности ($K_{ж}$), значения которого доходят до 45,9. В региональном плане отмечается, что залежи апт-альб-сеноманского комплекса характеризуются наименьшими содержаниями гомологов метана по сравнению с более глубокими горизонтами.

Растворенные газы нефтяных залежей выделяются предельно высокой концентрацией гомологов метана, что отражается в ряду распределения: $C_1 > C_2$

$> C_3 > i-C_4 > n-C_4 > N_2 > H_2 > i-C_5 > n-C_5 > CO_2 > i-C_6 > n-C_6 > Ar > He$. Доля метана здесь минимальна и колеблется от 39,3 до 60,1 об. %, в то время как суммарное содержание тяжелых углеводородов ($\Sigma TУ$) достигает аномальных 95 об. %. Средние содержания водорода составляют от 0,02 до 0,54 об. %, достигая максимума в нижне-среднеюрских отложениях. Коэффициент жирности ($K_{ж}$) в таких условиях может доходить до 600, а минимальные значения $K_{ж}$ (от 5) также закономерно указывают на значительную роль ТУ. Наиболее «тяжелый» газовый профиль характерен для неокомских нефтяных залежей. Примером могут служить данные по Восточно-Таркосалинскому месторождению (пласт БП₁₆), где $\Sigma TУ$ превышает 30–40 об. %.

Заключение

При сопоставимых долях углеводородных газов и стабильном преобладании метана во всех нефтегазоносных комплексах, основные расхождения фиксируются в концентрациях тяжелых углеводородов. Пик содержания гомологов метана приходится на неокомские отложения, тогда как верхнеюрские залежи характеризуются их минимумом. Сравнительный анализ показал, что газы апт-альб-сеноманского комплекса существенно обеднены относительно неокомского: по этану и пропану – более чем в 2 раза, по изомерам бутана и пентана – в 1,5–1,9 раза, а по гексану разрыв достигает более 4 раз. Кроме того, верхние горизонты (апт-альб-сеноман) также отличаются минимальными значениями содержания водорода и инертных газов (He, Ar) на фоне подстилающих нефтегазоносных комплексов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-67-00019, <https://rscf.ru/project/26-67-00019/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Etiope G., Ellisc G. S., Ardakani O. H., Boreham C. J., Klitzke P., Martín-Monge A., Reis H. L. S., Templeton A. S., Kim H. S., Gaucher E., Sissmann O. Understanding the resource potential of natural hydrogen on Earth: Scientific gaps, uncertainties and recommendations // *Earth-Science Reviews*. – 2026. – V. 275. – 105413. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2026.105413>
2. Zeng L., Sander R., Salimzadeh S., Lupton N., Musa M. Natural Hydrogen: Generation Mechanisms, Occurrence, Challenges and Future Prospects // *Gas Science and Engineering*. – 2026. – 205928. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2026.205928>
3. Liu M., Warner T., Zhao Y., Xia Z., Zhang D., Zhan P., Frohman R., Creason G., Seol Y. Geologic hydrogen: From natural occurrences to anthropogenic generation – A review of fundamentals, potential, challenges and prospects // *Earth-Science Reviews*. – 2026. – V. 274. – 105338. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105338>
4. Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли // Министерство геологии СССР. АН СССР. Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. – Москва: Недра, 1975. – 101 с.
5. Левшунова С. П. Водород и его биохимическая роль в образовании углеводородных газов в осадочных породах земной коры // Автореферат дис. ... доктора геолого-минералогических наук: 04.00.03. – Москва, 1994. – 42 с.

6. Молчанов В. И. Генерация водорода в литогенезе. – Новосибирск: Наука, 1981. – 142 с.
7. Ward L. K. Inflammable gasses occluded in the Pre-Paleozoic rocks of South Australia // Transactions and proceedings of the Royal Society of South Australia. – 1933. – V. 57. – P. 42–47.
8. Prinzhofer A., Tahara Cissé C. S., Diallo A. B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali) // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43. – No. 42. – P. 19315–19326.
9. Rigollet C., Prinzhofer A. Natural Hydrogen: A New Source of Carbon-Free and Renewable Energy That Can Compete With Hydrocarbons // First Break. – 2025. – V. 3. – No. 10. – P. 78–84.
10. Pengg A. Drilling-induced hydrogen: A challenge for natural hydrogen exploration / A. Pengg, D. Misch, G. Tari, R. F. Sachsenhofer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – V. 149. – 150091. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.150091.
11. Bjornstad B. N. Generation of Hydrogen Gas as a Result of Drilling Within the Saturated Zone / B. N. Bjornstad, J. P. McKinley, T. O. Stevens [et al.] // Ground Water Monitoring & Remediation. – 1994. – V. 14. – No. 4. – P. 140–147. DOI: 10.1111/j.1745-6592.1994.tb00492.x.
12. Davies K., Josse R., Frery E., Esteban L., Keshavarz A., Iglauer S. Distinguishing drilling-induced artifacts from naturally occurring hydrogen in soil gas surveys: Insights from sub-circular depressions // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – V. 109. – P. 1230–1240. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.094>
13. El-Meligi A. A., Ismail N. Hydrogen evolution reaction of low carbon steel electrode in hydrochloric acid as a source for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – V. 34. – Is. 1. – P. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.026>
14. He H., Li Q., Tang J., Liu P., Zheng H., Zhao F., Guan W., Guo E., Xi C. Study of hydrogen generation from heavy oil gasification based on ramped temperature oxidation experiments // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – V. 48. – Is. 6. – P. 2161–2170. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.095>
15. Askaria M., Aliofkhazraei M., Afroukhtehb S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 71. – No. 2019. – 102971. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102971>
16. Ogunlakin N. O., Toor I. U., Sorour A. A., Djukic M. B. A critical review of hydrogen-induced cracking (HIC) of API 5L pipeline steel grades in the oil and gas industry // International Journal of Hydrogen Energy. – 2026. – V. 198. – 152669. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152669>
17. Plennevaux C., Kittel J., Frégonèse M., Normand B., Ropital F., Grosjean F., Cassagne T. Contribution of CO₂ on hydrogen evolution and hydrogen permeation in low alloy steels exposed to H₂S environment // Electrochemistry Communications. – 2013. – V. 26. – P. 17–20. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2012.10.010>
18. Маркин А. Н., Низамов Р. Э., Суховерхов С. В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 288 с.
19. Булатов А. И., Качмар Ю. Д., Булатов А. И., Макаренко П. П., Яремийчук Р. Т. Освоение скважин: Справочное пособие. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 473 с.
20. Янин Е. П. Коррозия как источник загрязнения окружающей среды – М.: НП «АРСО», 2020. – 112 с.

© Д. А. Новиков, 2026

Е. Б. Пещевицкая¹✉, Б. Л. Никитенко¹

**Предварительные данные по микрофауне и палиноморфам
в разрезе средней юры и нижнего мела по скв. Штормовая 125
(Западная Сибирь, Гыданский п-ов)**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: PeschevickayaEB@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В скв. Штормовая 125 установлены биостратоны по фораминиферам, остракодам, диноцистам, спорам и пыльце в верхней части вымской, в малышевской и верхней части ахской свит. Изученные стратиграфические интервалы определены как нижний байос, верхи байоса-бат и средняя часть готерива соответственно.

Ключевые слова: микрофауна, палиноморфы, средняя юра, нижний мел, Сибирь

E. B. Pestchevitskaya¹✉, B. L. Nikitenko¹

**Preliminary data on microfauna and palynomorphs from the middle
jurassic and lower cretaceous of the shtormovaya 125 borehole
(Western Siberia, Gydan peninsula)**

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: PeschevickayaEB@ipgg.sbras.ru

Abstract. In the Shtormovaya 125 borehole, biostratigraphic units were established based on foraminifers, ostracods, dinocysts, spores and pollen in the upper part of Vymskaya, in the Malyshevskaya, and upper part of the Akhsкая formations. The studied stratigraphic intervals are defined as Lower Bajocian, uppermost Bajocian - Bathonian and middle Hauterivian, respectively.

Keywords: microfauna, palynomorphs, Middle Jurassic, Lower Cretaceous, Siberia

Введение

В разрезе по скв. Штормовая 125, расположенной на севере Гыданского п-ва, микропалеонтологическим и палинологическим методами исследованы осадки вымской и малышевской свит средней юры и верхней части ахской свиты неокома. Биостратиграфические шкалы юры и мела по микрофоссилиям имеют особое значение для Сибирского региона, так как отложения этого интервала, содержащие промышленные залежи углеводородов, перекрыты мощным чехлом кайнозойских пород, и могут изучаться только по керн

у скважин. Микрофауна и палиноморфы обычно хорошо представлены в керновом материале, часто они обильны и таксономически разнообразны. Это позволяет использовать комплексный подход при обосновании каждого биостратона, опираясь на целый ряд ключевых таксонов, что повышает надежность биостратиграфического расчленения.

Материал и методы

Материалом для исследования послужили образцы из малышевской (16 обр.) и верхних частей вымской (5 обр.), ахской свит (9 обр.). При лабораторной подготовке образцов для микропалеонтологического и палинологического анализов использовались стандартные методики [1, 5]. Подсчет микрофауны проводился на навеску породы 200 гр. Для определения процентного соотношения палиноморф наземного и морского генезиса в каждом образце насчитывалось минимум 200 зерен. Затем в группах наземных и морских палиноморф количество экземпляров также досчитывалось до 200 и содержание таксонов в них определялось отдельно. При плохой насыщенности образцов палиноморфами водного генезиса процентное соотношение отдельных таксонов не высчитывалось, но при биостратиграфическом анализе учитывался общий таксономический состав.

Результаты

Из вымской свиты определен комплекс фораминифер, характерный для зоны *Ammodiscus arangastachiensis* JF18 (табл. 1). Зона является реперным уровнем и хорошо прослеживается в низах нижнего байоса на севере Сибири (Ямал, Гыданский п-ов, Усть-Енисейский р-н, Анабаро-Ленская обл., Приверхоянье, Виллойский бас.) и Баренцевском шельфе [1]. В разрезах Восточной Сибири интервал распространения зоны охарактеризован находками аммонитов и двустворок.

Таблица 1. Состав комплексов микрофауны в скважине Штормовая 125

Интервал	Комплекс микрофауны	Зоны, стратиграфический объем
Верхняя часть вымской свиты	Фораминиферы: <i>Ammodiscus arangastachiensis</i> (многочисленные), <i>Trochammina</i> cf. <i>praesquamata</i> , <i>Hyperammina jurassica</i> , <i>Globulina oolitica</i> , <i>Dentalina</i> ex. gr. <i>terquemi</i>	Фораминиферовая зона <i>Ammodiscus arangastachiensis</i> JF18. Низы нижнего байоса
Малышевская свита	Фораминиферы: <i>Globulina praecircumphlua</i> , <i>G. oolithica</i> , <i>Lenticulina</i> sp., <i>L. incurvare</i> , <i>Astacolus protracta</i> , <i>A. limata</i> , <i>Ammodiscus arangastachiensis</i> , <i>Trochammina</i> cf. <i>jakovlevae</i> , <i>Dentalina</i> cf. <i>intorta</i> , <i>Recurvoides anabarensis</i> , <i>Planularia</i> sp. cf. (ex. gr. <i>mesezhnikovi</i>), <i>Saccammina compacta</i>	Фораминиферовая зона <i>Globulina praecircumphlua</i> JF24. Верхи верхнего байоса – основание верхнего бата
Низы малышевской свиты	Остракоды: <i>Camptocythere</i> (<i>Anabarocythere</i>) <i>arangastachiensis</i>	Остракодовая зона <i>Camptocythere arangastachiensis</i> JO13. Верхи нижнего – верхний байос
Верхняя часть малышевской свиты	Остракоды: <i>Camptocythere</i> (<i>Camptocythere</i>) <i>scrobiculataformis</i> , <i>C. cf. scrobiculataformis</i> , <i>C. cf. solida</i>	Остракодовая зона <i>Camptocythere scrobiculataformis</i> JO14. Верхи байоса – нижняя и средняя части бата

На Земле Франца Иосифа для этого интервала характерны обедненные комплексы фораминифер [1 там же]. В нижней части малышевской свиты установлены

зоны JF24 по фораминиферам и JO13 по остракодам (табл. 1). Область их перекрытия соответствует стратиграфически узкому интервалу в самых верхах байоса, что определяет детальность расчленения этой части разреза в скв. Штурмовая 125. Зоны являются региональными корреляционными реперами на севере Западной и Восточной Сибири [1]. Остракодовая зона также прослежена в Печорской синеклизе [1 там же]. Выше по разрезу совместно с фораминиферовой зоной JF24 прослежена зона по остракодам JO14 (табл. 1), установленная по разрезам севера Восточной Сибири и на Печорской плите, где ее стратиграфический объем подтверждается находками макрофауны. На Гыданском п-ве эта зона установлена впервые. В готеривской части разреза микрофауна не обнаружена.

По спорам и пыльце в юрской части разреза в скв. Штурмовая 125 хорошо опознаются региональные палинозоны, которые были установлены на севере Восточной Сибири в Хатангской впадине в естественных обнажениях, датированы по разным группам фауны, и затем прослежены в различных областях на территории Западной Сибири по материалам многочисленных скважин [3, 6]. В вымской свите по присутствию зонального вида *Neoraistrickia rotundiformis* установлена палинозона 9, для которой также характерно обилие и разнообразие спор циатейных/диптерисовых папоротников (табл. 2).

Таблица 2. Состав комплексов спор и пыльцы в скважине Штурмовая 125

Интервал	Комплекс спор и пыльцы	Палинозоны/ слои с палино- флорой, стра- тиграфиче- ский объем
Верхняя часть вым- ской свиты	СПОРЫ (37-41%): Много- <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaeli</i>) – 14-18% Незначительно- <i>Stereisporites</i> spp. (<i>seebergensis</i>, <i>psilatus</i>, <i>compactus</i>, <i>infra-granulatus</i>) – 2-2,5%, <i>Biretisporites</i> spp., <i>Lycopodiumsporites</i> spp. (<i>ausraclavati-dites</i>, <i>subrotundus</i>, <i>rotundus</i>, <i>angulosum</i>) – 1,5-5%, <i>Neoraistrickia</i> spp. (<i>trun-cata</i>, <i>rotundiformis</i>, <i>taylorii</i>) – 0,5-3%; <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>obso-letirimosus</i>, <i>densiornamentatus</i>, <i>longirimosus</i>, <i>crassirimosus</i>, <i>echinata</i>, <i>nicanica</i>) – 3-4,5%, <i>Leiotriletes</i> spp. – 1,5-2%, <i>Eboraciasporites</i> spp. (<i>granulosa</i>, <i>sibirica</i>) – 2-6% Постоянно- <i>Lygodiumsporites subsimplex</i> Присутствуют- <i>Duplexisporites problematicus</i>, <i>Dictyophyllidites harrisii</i>, <i>Tri-partina variabilis</i>, <i>Concavisporites junctum</i>, <i>Auritulinasporites deltaformis</i>, <i>Marattisporites scabratus</i>, <i>Lophotriletes</i> spp. ПЫЛЬЦА (59-63%): Обилие- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 28-36% Значительно- <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>variabiliformis</i>, <i>magnifica</i>, <i>rotundiformis</i>, <i>grandis</i>, <i>accepta</i>) – 12-18% Незначительно- <i>Podocarpidites</i> spp. (<i>tricoccae</i>, <i>decora</i>, <i>unicus</i>) – 1,5-3%, <i>Ginkgocycadophytus</i> spp. – 2-2,5%, <i>Cycadopites</i> spp. – 3-4%, Постоянно- <i>Alisporites</i> spp., <i>Protoconiferus funarius</i>, <i>Protopinus subluteus</i>, <i>Piceites</i> spp. (<i>asiaticus</i>, <i>latens</i>), <i>Protopicea vilujensis</i>, <i>Piceapollenites</i> spp. (<i>mesophytica</i>), <i>Pinuspollenites</i> spp., Присутствуют- <i>Chasmatosporites</i> sp., <i>Vitreisporites pallidus</i>, <i>Paleopicea glae-saria</i>, <i>Sciadopityspollenites macroverrucosus</i>, <i>Classopollis</i> spp., <i>Psophosphaera</i> spp., <i>Callialasporites</i> spp.	Палинозона 9 <i>Neoraistrickia rotundiformis</i>, <i>Lycopodiumsporites in-tortivallus</i>, <i>Dicksonia densa</i>, <i>Pinus divul-gata</i> Слои с <i>Cy-athidites minor</i>, <i>C. coniopteroides</i>, <i>Os-mundacidites</i>, <i>Lycopodiumsporites</i> spp., <i>Leiotriletes adianti-formis</i> 9a Низы нижнего байоса

Продолжение табл. 2

Интервал	Комплекс спор и пыльцы	Палинозоны/ слои с палино- флорой, стра- тиграфиче- ский объем
Самые верхи вым- ской свиты	СПОРЫ (24-56%): Много- <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaelii</i>) – 7-29,5% Значительно- <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>obsoletirimosus</i>, <i>densiornamentata</i>, <i>longirimosus</i>, <i>crassirimosus</i>, <i>diversispinulatus</i>) – 2-17% Незначительно- <i>Stereisporites</i> spp. (<i>seebergensis</i>, <i>psilatus</i>, <i>compactus</i>, <i>infra-granulatus</i>) – 0,5-3,5%, <i>Leiotriletes</i> spp. – 1-6%, <i>Eboraciasporites</i> spp. (<i>granulosa</i>, <i>sibirica</i>) – 1-4% Постоянно- <i>Lycopodiumsporites</i> spp. (<i>ausraclavatidites</i>, <i>nodosus</i>, <i>intortivallus</i>, <i>subrotundus</i>, <i>rotundus</i>, <i>angulosum</i>), <i>Neoraistrickia</i> spp. (<i>truncata</i>, <i>rotundiformis</i>, <i>taylorii</i>, <i>bacculifera</i>, <i>longibaculata</i>), <i>Biretisporites</i> spp., <i>Dictyophyllidites</i> spp., <i>D. equiexinus</i>, <i>Microlepidites</i> <i>crassirimosus</i>, <i>Lygodiumsporites</i> <i>subsimplex</i> Присутствуют- <i>Camptotriletes</i> <i>cerebiformis</i>, <i>Leptolepidites</i> <i>verrucatus</i>, <i>Duplexisporites</i> <i>problematicus</i>, <i>Tripartina</i> <i>variabilis</i>, <i>Concavisporites</i> <i>junctum</i>, <i>Lakshnavitriletes</i> spp., <i>Marattisporites</i> <i>scabratus</i>, <i>Pilasporites</i> <i>marcidus</i>, <i>Microreticulatisporites</i> <i>diatretus</i> ПЫЛЬЦА (44-76%): Обилие- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 28-45% Много- <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>variabiliformis</i>, <i>magnifica</i>, <i>rotundiformis</i>, <i>grandis</i>, <i>accepta</i>) – 8-21% Незначительно- <i>Ginkgocycadophytus</i> spp. – 0,5-3,5%, <i>Cycadopites</i> spp. – 1,3-4%, <i>Podocarpidites</i> spp. (<i>tricolpae</i>, <i>macrophyllaeformis</i>) – 0,5-3% Постоянно- <i>Alisporites</i> spp. (<i>grandis</i>, <i>pergrandis</i>), <i>Protoconiferus</i> <i>funarius</i>, <i>Protopinus</i> <i>subluteus</i>, <i>Piceites</i> spp. (<i>asiaticus</i>, <i>latens</i>, <i>podocarpoides</i>), <i>Piceapollenites</i> spp. (<i>mesophytica</i>, <i>exilioides</i>), Присутствуют- <i>Quadraeculina</i> <i>limbata</i>, <i>Protopicea</i> <i>vilujensis</i>, <i>Pinuspollenites</i> <i>divulgatus</i>, <i>Sciadopityspollenites</i> <i>macroverrucosus</i>, <i>Psophosphaera</i> spp., <i>Eucommiidites</i> spp.	Палинозона 9 Слои с <i>Cyathidites</i> <i>australis</i>, <i>Microlepidites</i> <i>crassirimosus</i>, <i>Hemitelia</i> <i>parva</i>, <i>Neoraistrickia</i> <i>truncata</i>, <i>Neoraistrickia</i> spp., <i>Podocarpidites</i> <i>rousei</i>, <i>Monolites</i> <i>couperi</i> 9b Средняя часть нижнего байоса
Низы ма- лышевской свиты	СПОРЫ (76%): Обилие- <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaelii</i>) – 35,5% Много- <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>densiornamentata</i>, <i>tuberculata</i>, <i>bulbosa</i>, <i>echinata</i>) – 22,5%, Значительно- <i>Leiotriletes</i> spp. – 6%, <i>Eboraciasporites</i> <i>granulosa</i> – 7,5% Присутствуют- <i>Lycopodiumsporites</i> sp., <i>Neoraistrickia</i> (<i>Selaginella</i>) <i>media</i>, <i>Camptotriletes</i> <i>cerebiformis</i>, <i>Baculatisporites</i> spp., <i>Biretisporites</i> <i>potoniae</i>, <i>Concavisporites</i> <i>junctum</i>, <i>Eboraciasporites</i> spp., <i>Lygodium</i> <i>subsimplex</i>, <i>Marattisporites</i> <i>scabratus</i>, <i>Couperisporites</i> <i>jurassicus</i> ПЫЛЬЦА (24%): Много- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 14,5% Незначительно- <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>variabiliformis</i>, <i>magnifica</i>, <i>grandis</i>) – 4,5%, <i>Cycadopites</i> spp. – 1,5%, Присутствуют- <i>Piceapollenites</i> <i>mesophytica</i>, <i>Podocarpidites</i> spp., <i>Sciadopityspollenites</i> spp., <i>Ginkgocycadophytus</i> spp., <i>Callialasporites</i> <i>dampieri</i>	Палинозона 9 Слои с <i>Neoraistrickia</i> spp., <i>Lycopodiumsporites</i> spp., <i>Osmundacidites</i> spp., <i>Stereisporites</i>, <i>Cyathidites</i> <i>minor</i>, <i>Alisporites</i> <i>bisaccus</i> 9c Верхняя часть нижнего байоса – верхний байос без самых верхов

Продолжение табл. 2

Интервал	Комплекс спор и пыльцы	Палинозоны/ слои с палино- флорой, стра- тиграфиче- ский объем
Средняя часть ма- лышевской свиты	СПОРЫ (44-64%): Значительно- <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>tuberculata</i>, <i>obsoletirimos</i>, <i>densiornamentata</i>, <i>longirimos</i>, <i>magna</i>, <i>diversispinulata</i>) – 8-9%, <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaelii</i>) – 4-9% Незначительно- <i>Stereisporites</i> spp. (<i>psilatus</i>, <i>granulatus</i>), <i>Lycopodiumsporites</i> spp. (<i>ausraclavatidites</i>, <i>nodosus</i>, <i>eminulus</i>) – 0,5-3%, <i>Neoraistrickia</i> spp. (<i>truncata</i>, <i>suratensis</i>, <i>taylorii</i>, <i>bacculifera</i>, <i>longibaculata</i>, <i>media</i>) – 1-2,5%, <i>Leiotriletes</i> spp. – 0,5-4%, <i>Biretisporites</i> spp. – 0,5-3,5%, <i>Concavisporites</i> (<i>junctum</i>, <i>juriensis</i>) – 0,5-2%, <i>Eboraciasporites</i> spp. (<i>granulosa</i>, <i>torosa</i>) – 1-4% Постоянно- <i>Camptotriletes cerebiformis</i>, <i>Dicksonia densa</i>, <i>Lygodiumsporites subsimplex</i>, <i>Marattisporites scabratus</i>, <i>Alsophyla chetaensis</i> Присутствуют- <i>Duplexisporites anogrammensis</i>, <i>Densoisporites</i> spp., <i>Hymenozonotriletes bicycla</i>, <i>Baculatisporites comaumensis</i>, <i>Dictyophyllidites</i> (<i>crenatus</i>), <i>Tripartina variabilis</i>, <i>Lakhtnavitriletes</i> spp. (<i>machrarensis</i>), <i>Gleicheniidites</i> spp., <i>Laevigatosporites</i> sp. (<i>Monolites couperi</i>), <i>Verrucosisporites</i> spp., <i>Pilasporites marcidus</i>, <i>Kraeuselisporites</i> spp. ПЫЛЬЦА (36-56%): Много- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 17-25% Значительно- <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>variabiliformis</i>, <i>magnifica</i>, <i>grandis</i>) – 7-14,5%, <i>Cusadopites</i> spp. (<i>dilucidus</i>, <i>medius</i>, <i>nitidus</i>, <i>percarinatus</i>) – 2-9% Незначительно- <i>Piceapollenites</i> spp. (<i>mesophytica</i>, <i>exilioides</i>) – 1-3%, <i>Ginkgocusadophytus</i> spp. – 3-7% Постоянно- <i>Podocarpidites tricocca</i> Присутствуют- <i>Protoconiferus funarius</i>, <i>Quadraeculina limbata</i>, <i>Piceites asiaticus</i>, <i>Protopicea</i> spp., <i>Pinuspollenites</i> spp., <i>Sciadopityspollenites mesozoicus</i>, <i>Perinopollenites elatoides</i>	Палинозона 10 – <i>Lophotriletes torosus</i>, <i>Gleicheniidites</i>, <i>Quadraeculina limbata</i>, <i>Sciadopityspollenites macroverrucosus</i> Слои с <i>Cyathidites</i> spp., <i>Piceapollenites</i> spp., <i>Gleicheniidites</i>, <i>Quadraeculina limbata</i>, <i>Sciadopityspollenites macroverrucosus</i>, <i>Marattisporites scabratus</i>, <i>Clasopollis 10a</i> Самые верхи байоса – нижняя часть бата

Продолжение табл. 2

Интервал	Комплекс спор и пыльцы	Палинозоны/ слои с палино- флорой, стра- тиграфиче- ский объем
Верхняя часть ма- лышевской свиты	СПОРЫ (40-62%): Обилие- <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaelii</i>) – 21-42% Значительно- <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>tuberculata</i>, <i>bulbosa</i>, <i>obsoletir- mosa</i>, <i>densiornamentata</i>, <i>longirimosa</i>, <i>crassirimosa</i>, <i>magna</i>, <i>diversispinulata</i>, <i>ni- canica</i>, <i>magna</i>, <i>speciosa</i>, <i>rotunda</i>) – 4-16,5%, <i>Leiotriletes</i> spp. (<i>perpusila</i>, <i>con- vexus</i>) – 1-8%, Незначительно- <i>Lycopodiumsporites</i> spp. (<i>ausraclavatidites</i>, <i>nodosus</i>, <i>eminu- lus</i>, <i>intortivallus</i>, <i>rotundum</i>, <i>subrotundus</i>, <i>marginatus</i>) – 1-3%, <i>Neoraistrickia</i> spp. (<i>truncata</i>, <i>taylorii</i>, <i>bacculifera</i>, <i>longibaculata</i>, <i>media</i>, <i>trigona</i>, <i>cepu- liniformis</i>) – 0,5-4%, <i>Tripartina variabilis</i> – 1-3%, <i>Eboraciasporites</i> spp. (<i>granu- losa</i>, <i>torosa</i>, <i>sibirica</i>, <i>rudis</i>) – 1-5%, <i>Marattisporites scabratus</i> 1-4% Постоянно- <i>Stereisporites</i> spp. (<i>psilatus</i>, <i>granulatus</i>, <i>antiquasporites</i>), <i>Bi- retisporites</i> spp. (<i>potoniae</i>, <i>eneabbaensis</i>), <i>Leiotriletes palescens</i> Присутствуют- <i>Campotriletes cerebreformis</i>, <i>Leptolepidites verrucatus</i>, <i>Du- plexisporites anogrammensis</i>, <i>Densoisporites</i> spp., <i>Hymenozonotriletes bicycla</i>, <i>Baculatisporites comaumensis</i>, <i>Dictyophyllidites</i> spp. (<i>crenatus</i>, <i>harrisii</i>, <i>morto- nii</i>), <i>Concavisporites junctum</i>, <i>Obtusisporis</i> spp. (<i>convexus</i>, <i>canadesis</i>), <i>Dick- sonia densa</i>, <i>Lakhnatriletes</i> spp. (<i>machrarensis</i>, <i>bansaensis</i>), <i>Gleicheniidites</i> <i>senonicus</i>, <i>Lygodiumsporites subsimplex</i>, <i>Contignisporites</i> spp. (<i>coocksoniae</i>, <i>burgeri</i>), <i>Kluckisporites</i> spp., <i>Alsophylla chetaensi</i>, <i>Verrucosisporites</i> spp., <i>Auri- tulinasporites intrastratus</i>, <i>Apiculatisporites serratus</i>, <i>Acanthotriletes varispi- nosus</i>, <i>Laevigatosporites</i> spp., <i>Pilasporites marcidus</i> ПЫЛЬЦА (38-60%): Много- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 14,5-27% Значительно- <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>variabiliformis</i>, <i>magnifica</i>, <i>grandis</i>, <i>rotundi- formis</i>, <i>accepta</i>) – 7-16%, <i>Ginkgocycadophytus</i> spp. – 3-10% Незначительно- <i>Pinuspollenites</i> spp. (<i>divulgatus</i>, <i>elongatus</i>, <i>tricompositus</i>, <i>vul- garis</i>, <i>aequalis</i>) – 1-3%, <i>Podocarpidites</i> spp. (<i>tricoccae</i>, <i>multesimus</i>, <i>major</i>, <i>dec- ora</i>, <i>cretaceous</i>, <i>permagnata</i>, <i>paula</i>, <i>flacciformis</i>) – 0,5-3%, <i>Piceapollenites</i> spp. (<i>mesophytica</i>, <i>exilioides</i>, <i>gigantissima</i>, <i>complanatiformis</i>, <i>singulare</i>) – 1-7,5%, <i>Cycadopites</i> spp. (<i>dilucidus</i>, <i>medius</i>, <i>nitidus</i>, <i>percarinatus</i>, <i>labrosus</i>) – 0,5-8% Постоянно- <i>Callialasporites</i> spp. (<i>dampiery</i>, <i>turbatus</i>, <i>microvellatus</i>), <i>Perino- pollenites elatiodes</i> Присутствуют- <i>Alisporites</i> spp. (<i>grandis</i>, <i>similis</i>), <i>Protoconiferus funarius</i>, <i>Pro- topinus</i> spp. (<i>subluteus</i>, <i>latebrosa</i>), <i>Quadraeculina limbata</i>, <i>Piceites</i> spp. (<i>podo- carpoides</i>, <i>asiaticus</i>, <i>latens</i>), <i>Protopicea vilujensis</i>, <i>Phyllocladidites</i> spp., <i>Sci- adopityspollenites</i> spp. (<i>macroverrucosus</i>, <i>mesozoicus</i>), <i>Psophosphaera</i> spp., <i>Classopollis</i> spp.	Палинозона 10 Слои с <i>Perotri- lites zonatoi- des</i>, <i>Leiotriletes pallascens</i>, <i>Os- mundacidites</i> spp., <i>Perino- pollenites elato- ides</i> 10b Верхняя часть бата

Окончание табл. 2

Интервал	Комплекс спор и пыльцы	Палинозоны/ слои с палино- флорой, стра- тиграфиче- ский объем
Верхняя часть ах- ской свиты	СПОРЫ (38-63%): Много- <i>Osmundacidites</i> spp. (<i>jurassicus</i>, <i>wellmanii</i>, <i>densiornamentata</i>, <i>nicanica</i>, <i>magna</i>, <i>speciosa</i>) – 10-17,5%, <i>Cyathidites</i> spp. (<i>punctatus</i>, <i>australis</i>, <i>minor</i>, <i>rafaelii</i>) – 13-30,5% Значительно- <i>Leiotriletes</i> spp. (<i>palescens</i>, <i>perpusila</i>, <i>gleicheniaeformis</i>) – 3,5-11,5%, Незначительно- <i>Stereisporites</i> spp. (<i>psilatus</i>, <i>granulatus</i>, <i>congregatus</i>, <i>antiquasporites</i>) – 1-4%, <i>Eboraciasporites</i> spp. (<i>granulosa</i>, <i>torosa</i>, <i>rudis</i>) – 1-5%, <i>Trilobosporites</i> spp. (<i>gibberulum</i>, <i>valanjinensis</i>, <i>asper</i>, <i>cotidianum</i>, <i>splendidum</i>, <i>mirabilis</i>, <i>multituberculatus</i>, <i>apigranulosus</i>, <i>bernissartensis</i>, <i>variverrucatus</i>) – 1-5%, <i>Cicatricosisporites</i> spp. (<i>australiensis</i>, <i>dorogensis</i>, <i>sibiricus</i>, <i>minuteastriatus</i>, <i>multistriatus</i>, <i>tersus</i>, <i>mediostriatus</i>, <i>pseudoauriferus</i>, <i>exilioides</i>, <i>stoveri</i>, <i>phyl-litidiformis</i>, <i>minor</i>, <i>aralicus</i>) – 1-5,5% Постоянно- <i>Biretisporites</i> spp. (<i>potoniae</i>, <i>eneabbaensis</i>, <i>spectabilis</i>), <i>Tripartina variabilis</i>, <i>Gleicheniidites</i> spp. (<i>senonicus</i>, <i>laetus</i>, <i>umbonatus</i>), <i>Pilosisorites</i> spp. (<i>trichopapillosus</i>, <i>echinatus</i>, <i>spinosus</i>, <i>calvum</i>, <i>crassiangulatus</i>) Присутствуют- <i>Foraminisporis</i> spp. (<i>wonthaggiensis</i>, <i>tribulosus</i>, <i>asymmetri-cus</i>, <i>dailyi</i>), <i>Cooksonites variabilis</i>, <i>Aequitriradites</i> spp. (<i>spinulosus</i>, <i>verrucosus</i>), <i>Rouseisporites</i> spp. (<i>incertus</i>, <i>laevigatus</i>), <i>Lycopodiumsporites</i> spp. (<i>eminulus</i>, <i>marginatus</i>), <i>Neoraistrickia truncata</i>, <i>Fovesporites</i> spp., <i>Sestrosporites</i> spp., <i>Undulatisporites pflugii</i>, <i>Leptolepidites verrucatus</i>, <i>Selaginella</i> spp. (<i>granata</i>, <i>acule-ata</i>, <i>obscura</i>), <i>Densoisporites</i> spp. (<i>velatus</i>, <i>microrugulatus</i>), <i>Baculatisporites co-maumensis</i>, <i>Dictyophyllidites mortonii</i>, <i>Concavisporites junctum</i>, <i>Lakhnavitriteles</i> spp., <i>Lygodiumsporites subsimplex</i>, <i>Appendicisporiotes</i> spp. (<i>sil-vestris</i>), <i>Contignisporites</i> spp. (<i>coocksoniae</i>, <i>burgeri</i>), <i>Kluckisporites pseudore-ticulatus</i>, <i>Marattisporites scabratus</i>, <i>Laevigatosporites ovatus</i>, <i>Staplinisporites</i> spp., <i>Acanthotriletes varispinosus</i> ПЫЛЬЦА (37-62%): Много- <i>Disaccites</i> gen. sp. indet. – 8-38% Значительно- <i>Ginkgocycadophytus</i> spp. – 10-15% Незначительно- <i>Alisporites</i> spp. (<i>similis</i>, <i>grandis</i>) – 1-2%, <i>Pseudopicea</i> spp. (<i>magnifica</i>, <i>grandis</i>) – 3-8%, <i>Piceapollenites</i> spp. (<i>mesophytica</i>, <i>exilioides</i>, <i>gi-gantissima</i>, <i>complanatiformis</i>, <i>omoriciformis</i>) – 1-4%, <i>Pinuspollenites</i> spp. (<i>vul-garis</i>, <i>aralicus</i>) – 1-3%, <i>Podocarpidites</i> spp. (<i>tricoccae</i>, <i>unicus</i>, <i>multesimus</i>, <i>ma-jor</i>, <i>proximus</i>) – 0,5-2%, <i>Cycadopites</i> spp. (<i>dilucidus</i>, <i>medius</i>) – 1-3% Постоянно- <i>Taxodiaceapollenites</i> spp., <i>Gnetaceapollenites</i> spp. (<i>oblongatus</i>, <i>jucundus</i>, <i>sibiricus</i>, <i>marcovae</i>) Присутствуют- <i>Vitreisporites pallidus</i>, <i>Protoconiferus funarius</i>, <i>Piceites latens</i>, <i>Classopollis</i> spp., <i>Araucariacidites</i> spp., <i>Perinopollenites elatiodes</i>, <i>Psophos-phaera</i> spp., <i>Callialasporites dampieri</i>	Слои с <i>Pilosisorites</i> KSP 5b Средняя часть готерива

Подзона 9b выделяется по увеличению разнообразия рода *Neoraistrickia*, появлению *Pinuspollenites divulgatus* и теплолюбивых форм среди диптерисовых папоротников (*Dictyophyllidites equiexinus*, *Microlepidites crassirimosus*). В нижней части мальшевской свиты прослеживается подзона 9с, для которой характерно значительное обеднение состава палинокомплекса и исчезновение теплолюбивых форм. Выше по

разрезу по появлению *Eboracia torosa* и первых глейхениевых хорошо опознается палинозона 10. В верхней части малышевской свиты в подзоне 10b появляются *Gleicheniidites senonicus*, *Leiotriletes palescens*, *Contignisporites* (*coocksoniae*, *burgeri*), увеличивается количество *Marattisporites scabratus* 1-4%. Обильный и разнообразный комплекс спор и пыльцы определен из верхней части ахской свиты. Здесь разнообразны ребристые и бугорчатые споры схизейных папоротников (*Trilobosporites*, *Cicatricosisporites*), постоянно присутствуют щиповатые формы (*Pilosisporites*), что является отличительной чертой слоев с KSP 5b средней части готерива [4] (табл. 2).

Впервые на севере Сибири изучены диноцисты из байоса и нижней части бата. Количество их невелико, и комплексы установить не удалось (табл. 3). Однако присутствие ключевых таксонов позволяет проводить межрегиональные корреляции и определять стратиграфический диапазон установленных биостратонов по диноцистам. В верхней части вымской свиты обнаружены таксоны, многие из которых в Западной Европе и Канаде встречаются в тоаре и аалене [8, 11].

Таблица 3. Состав комплексов микрофитопланктона в скважине Штормовая 125

Интервал	Комплекс микрофитопланктона	Слои с диноцистами, стратиграфический объем
Верхняя часть вымской свиты	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 93-97,5% : 2,5-7% Диноцисты- <i>Carpathodinium</i> sp., <i>Pareodinia</i> spp., <i>Meiourogoniaulax</i> spp., <i>Meiourogoniaulax valensii</i> , <i>Escharisphaeridia rudis</i> , <i>Dissiliodinium</i> spp., <i>Dissiliodinium globulus</i> , <i>Valensiella ovulum</i> , <i>Mendicodinium scabratum</i> , <i>Dodekovia pseudochytroeides</i> , <i>Nannoceratopsis</i> sp., <i>Fromea</i> sp. Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp., <i>Pterospermella</i> sp., <i>Tasmanites</i> sp. Камеры микрофораминифер	Слои с <i>Carpathodinium</i> , <i>Dodekovia pseudochytroeides</i> JSD1 Нижний байос
Низы малышевской свиты	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 87,5-97% : 3-22,5% Диноцисты- <i>Evansia evittii</i> , <i>Leberidocysta</i> sp., <i>Meiourogoniaulax deflandrei</i> , <i>Durotrigia aspera</i> , <i>Dissiliodinium</i> spp., <i>Dissiliodinium globulus</i> , <i>Mendicodinium scabratum</i> Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp., <i>Tasmanites</i> sp., <i>Cymatiosphaera</i> sp. Зигнемовые- <i>Ovoidites</i> sp. Ботриоккоккусовые- <i>Botryococcus</i> spp. Камеры микрофораминифер	Слои с <i>Meiourogoniaulax deflandrei</i> , <i>Durotrigia aspera</i> JSD2 Верхи байоса - нижняя часть бата
Средняя часть малышевской свиты	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 78,5-84% : 16-21,5% Диноцисты- <i>Pareodinia</i> spp., <i>Evansia evittii</i> , <i>Aldorfia aldorfensis</i> , <i>Korystocysta gochtii</i> , <i>Leberidocysta</i> spp., <i>Meiourogoniaulax deflandrei</i> , <i>Scrinioidinium</i> sp., <i>Escharisphaeridia</i> spp. (<i>rudis</i> , <i>pocockii</i> , <i>psilata</i> , <i>granulata</i>), <i>Pilosidinium</i> spp., <i>Chytroeisphaeridia cerastes</i> , <i>Chytroeisphaeridia gochtii</i> , <i>Dissiliodinium globulus</i> , <i>Chlamydophorella ectotubulata</i> , <i>Mendicodinium</i> spp., <i>Mendicodinium scabratum</i> , <i>Nannoceratopsis pellucida</i> , <i>Stephanelytron</i> spp., <i>Stephanelytron ceto</i> , <i>Fromea</i> spp. (<i>cylindrica</i> , <i>tornatilis</i>) Акритархи- <i>Micrhystridium</i> sp., <i>Veryhahium</i> sp., <i>Lophosphaeridia</i> sp. Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp., <i>Cymatiosphaera conopa</i> , <i>Cymatiosphaera</i> spp., <i>Tasmanites</i> sp. Ботриоккоккусовые- <i>Botryococcus</i> spp.	Слои с <i>Chlamydophorella ectotubulata</i> , <i>Chytroeisphaeridia gochtii</i> JSD3 Средняя часть бата

Продолжение табл. 3

Интервал	Комплекс микрофитопланктона	Слои с диноцистами, стратиграфический объем
Верхняя часть малышевской свиты	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 80-89% : 11-20% Диноцисты Много- <i>Nannoceratopsis</i> spp. (<i>pellucida</i>) – 2-42,5% Значительно- <i>Stephanelytron</i> spp. (<i>ceto</i>, <i>scarburghense</i>) – 1,5-5%, группа <i>Escharisphaeridia</i> – 7-12%: <i>Escharisphaeridia</i> spp. (<i>rudis</i>, <i>pocockii</i>, <i>psilata</i>, <i>mantellii</i>, <i>granulata</i>), <i>Barbatacysta pelionensis</i>, <i>Barbatacysta baculata</i>, <i>Batiacaspheera</i> spp. (<i>macbethia</i>, <i>laevigata</i>), <i>Kallosphaeridium</i> spp. – 3,5-4,5% Постоянно- <i>Pareodinia</i> spp. (<i>alaskensis</i>, <i>asperata</i>), <i>Scriniodinium</i> spp., <i>Scriniodinium galeritum</i>, <i>Chytroeisphaeridia</i> spp. (<i>cerastes</i>, <i>chytroides</i>, <i>hyalina</i>), <i>Chlamydophorella</i> spp. (<i>ectotabulata</i>), <i>Valensiella</i> spp. (<i>ovulum</i>, <i>dictydia</i>) Присутствуют- <i>Evansia barentsensis</i>, <i>Gonyaulacysta jurassica</i>, <i>Tubotuberella</i> spp., <i>Cribroperidinium</i> sp., <i>Apteodinium</i> spp., <i>Leberidocysta</i> spp., <i>Meiourogonyaulax</i> spp., <i>Durotrigia aspera</i>, <i>Wanaea acollaris</i>, <i>Sirminiodinium grossii</i>, <i>Pilosidinium capitatum</i>, <i>Pilosidinium echinatum</i>, <i>Sentusidinium villersense</i>, <i>Dissiliodinium globulus</i>, <i>Jansonia jurassica</i>, <i>Mendicodinium</i> spp. (<i>groenlandicum</i>, <i>scabratum</i>), <i>Fusiformacysta</i> spp., <i>Valvaeodinium</i> spp. (<i>spinosum</i>), <i>Fromea fragilis</i>, <i>Wallodinium</i> spp. (<i>krutzschii</i>, <i>luna</i>) Акритархи- <i>Micrhysstridium</i> spp. (<i>fragile</i>, <i>stellatum</i>), <i>Veryhahium</i> spp. (<i>downie</i>, <i>formosum</i>), <i>Lophosphaeridia</i> sp. Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp. – 4,5-24% Камеры микрофораминифер – 8-20%	Зона <i>Sirminiodinium grossii</i> JD4 Верхняя часть бата – низы келловоя
Верхняя часть ахской свиты (нижний изученный интервал)	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 51-77% : 23-49% Диноцисты Много- проксиматные формы плохой сохранности – 9-21,5%, <i>Circulodinium</i> spp. (<i>distinctum</i>, <i>compta</i>, <i>colliveri</i>) – 6,5-26% Значительно- <i>Escharisphaeridia</i> spp. (<i>pocockii</i>, <i>psilata</i>, <i>granulata</i>) – 1,5-6% до 15%, <i>Muderongia</i> spp. (<i>crucis</i>, <i>brevispinosa</i>, <i>endovata</i>, <i>tomaszovensis</i>) – 3-9% Незначительно- <i>Canningia americana</i> – 1-3% Постоянно- <i>Batioladinium varigranulosum</i> Присутствуют- <i>Horologinella anabareisis</i>, <i>Aprobolocysta</i> spp., <i>Aprobolocysta galeata</i>, <i>Tubotuberella</i> sp., <i>Cribroperidinium</i> spp., <i>Apteodinium</i> spp. (<i>granulatum</i>, aff. <i>bacculiatum</i>, <i>spinosum</i>), <i>Leberidocysta</i> sp., <i>Meiourogonyaulax stoveri</i>, <i>Scriniodinium campanula</i>, <i>Oligosphaeridium</i> sp., <i>Oligosphaeridium complex</i>, <i>Pilosidinium</i> spp., <i>Sentusidinium villersense</i>, <i>Barbatacysta pilosa</i>, <i>Chytrichosphaeridia chytroides</i>, <i>Hystrichodinium solare</i>, <i>Tenua hystrich</i>, <i>Impletosphaeridium</i> spp. (<i>polytrichum</i>, <i>polyacanthum</i>), <i>Chlamydophorella nyei</i>, <i>Gardodinium trabeculosum</i>, <i>Cassiculosphaeridia</i> spp. (<i>reticulata</i>, <i>magna</i>), <i>Mendicodinium granulatum</i>, <i>Wallodinium krutzschii</i> Акритархи- <i>Solisphaeridium stimulierum</i> – 1-9%, <i>Micrhysstridium</i> sp. Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp. – 18-46%, <i>Pterospermella</i> spp. – 1-2,5%, <i>Cymatiosphaera</i> spp. Зигнемовые- <i>Schizosporis</i> spp. Камеры микрофораминифер – 5-14% Неясное систематическое положение- <i>Sangarella lenaensis</i>	Слои с <i>Hystrichodinium solare</i>, <i>Muderongia</i> spp. KD 5 (верхняя часть) Низы готерива (верхняя часть)

Окончание табл. 3

Интервал	Комплекс микрофитопланктона	Слои с диноцистами, стратиграфический объем
Верхняя часть ахской свиты (верхний изученный интервал)	Палиноморфы наземного генезиса : морского – 65-66% : 34-35% Диноцисты Много- <i>Circulodinium</i> spp. (<i>distinctum</i>, <i>compta</i>) – 2-20% Незначительно- проксиматные формы плохой сохранности – 2-4%–1-3%, <i>Escharisphaeridia</i> spp. (<i>psilata</i>, <i>granulata</i>) – 4%, <i>Muderongia</i> spp. (<i>crucis</i>, <i>australis</i>, <i>staurola</i>, <i>testudinaria</i>, <i>endovata</i>) – 2-4%, <i>Microdinium opacum</i> – 4% Постоянно- <i>Gardodinium trabeculosum</i> Присутствуют- <i>Horologinella anabareisis</i>, <i>Batioladinium varigranulosum</i>, <i>Aprobolocysta</i> spp., <i>Aprobolocysta galeata</i>, <i>Spiniferites ramosus</i>, <i>Cribroperidinium</i> spp. (<i>orthoceras</i>, <i>granuligerum</i>), <i>Apteodinium</i> sp., <i>Scriniodinium</i> (<i>campanula</i>, <i>pharo</i>), <i>Sirminiodinium grossii</i>, <i>Oligosphaeridium</i> sp., <i>Surculosphaeridium</i> sp., <i>Tenua hystrix</i>, <i>Canningia americana</i>, <i>Vesperopsis fragilis</i>, <i>Chlamydophorella</i> sp., <i>Cassiculosphaeridia</i> sp., <i>Fromea fragilis</i> Акритархи- <i>Solisphaeridium stimulierum</i> – 1-10%, <i>Veryhahium downie</i>, <i>Leiofusa</i> sp. Празиофиты- <i>Leiosphaeridia</i> spp. – 40-58,5%, <i>Pterospermella</i> spp. – 1-2%, Зигнемовые- <i>Ovoidites</i> sp. Камеры микрофораминифер – 6% Неясное систематическое положение- <i>Sangarella lenaensis</i>	Слои с <i>Aprobolocysta neista</i>, <i>Vesperopsis fragilis</i> KD 5b Средняя часть го-терива

Важно отметить присутствие *Carpathodinium* sp. Появление первых представителей этого рода отмечается на севере Западной Европы с основания байоса (а-зона discites) [11]. В комплексе также определен вид *Dodekovia pseudochytroideis*, наиболее молодые находки которого зафиксированы в верхней части нижнего байоса в Баренцевоморском регионе [13], что определяет верхнюю границу установленного биостратона (слои с *Carpathodinium*, *Dodekovia pseudochytroideis* JSD1) (табл. 3). В нижней части малышевской свиты установлены слои с JSD2. В комплексе появляется *Meiourgoniaula deflandrei*. Наиболее древние находки этого вида зафиксированы в середине байоса в Германии и Канаде [8, 12]. В верхней части слоев с JSD2 появляется вид *Durotrigia aspera*, который характерен для бата североморского региона [7]. Следует отметить, что нижняя граница слоев JSD2 не определена, так как данных по диноцистам верхнего байоса нет. Возможно, нижняя граница этого биостратона в сибирском регионе будет в дальнейшем скорректирована. В средней части малышевской свиты в слоях с JSD3 появляются *Chlamydophorella ectotabulata* и *Chytroisphaeridia gochti*, что также прослежено в средней части бата в Гренландии (а-зона izhmae) и Болгарии соответственно [9, 10]. В сибирском комплексе присутствует *Stephanelytron ceto*. Наиболее древние находки вида обнаружены в верхней части бата на севере Восточной Сибири в бассейне р. Анабар [2]. В верхней части малышевской свиты по появлению вид-индекса опознается баренцевоморская зона *Sirminiodinium grossi*, которая также прослежена в верхней части бата в бассейне р. Анабар [2 там же]. В этой части малышевской свиты диноцисты достаточно обильны, определен разнообразный альгологический комплекс, в котором доминируют *Nannoceratopsis pellucida* и *Escharisphaeridia* spp. (табл. 3).

В ахской свите диноцисты многочисленны и разнообразны. В нижней части изученного интервала хорошо опознаются слои с KD 5 нижней части готерива. Ранее они были установлены в нижнем готериве в разрезе Нордвик в слоях, датированных фауной, и прослежены затем в Западной Сибири в Широтном Приобье и на Гыданском п-ве [4, 5]. Важными чертами являются разнообразие рода *Muderongia* и присутствие вида *Hystriochodinium solare*. В верхней части изученного интервала по появлению вида *Vesperopsis fragilis* опознаются слои KD 5b средней части готерива, установленные на Гыданском п-ве [4]. Разнообразие рода *Muderongia* сохраняется, постоянным компонентом комплекса становится *Gardodinium trabeculosum*.

Заключение

На основе анализа систематического состава комплексов микрофауны в разрезе скв. Штормовая 125 в верхней части вымской свиты и в малышевской свите установлены зоны с фораминиферами нижнего байоса и бата, которые являются важными биостратиграфическими и корреляционными реперами. Они хорошо прослеживаются на севере Восточной и Западной Сибири, а также на Печорской плите и Баренцевоморском шельфе. По спорам и пыльце в этом интервале, а также в верхней части ахской свиты установлены палинозоны и слои с палинофлорой, которые имеют региональное значение. Стратиграфический интервал изученного интервала ахской свиты определяется как средняя часть готерива. Возраст отложений на всех уровнях подтверждается данными по диноцистам. Альгологические комплексы содержат стратиграфически важные виды, которые позволяют проводить корреляцию с Западной Европой, Баренцевоморским регионом и Канадой. Следует отметить, что данные по диноцистам для байоса и нижней части бата на севере Сибири получены впервые.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2026-0042).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитенко Б.Л. Стратиграфия, палеобиогеография и биофаии юры Сибири по микрофауне (фораминиферы и остракоды). – Новосибирск, из-во «Параллель», 2009. – 690 с.
2. Никитенко Б.Л., Девятков В.П., Пещевская Е.Б., Попов А.Ю., Фурсенко Е.А., Хафаева С.Н. Стратиграфия, литология и геохимия прибрежных и мелководно-морских разрезов верхов средней юры - низов мела р. Анабар (Арктическая Сибирь) // Геол. Геофиз., 2022. – Т. 63. – № 5. – с. 673-708.
3. Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н., Князев В.Г., Меледина С.В., Дзюба О.С., Лебедева Н.К., Пещевская Е.Б., Глинских Л.А., Горячева А.А., Хафаева С.Н. Стратиграфия юры и мела Анабарского района (Арктическая Сибирь, побережье моря Лаптевых) и Бореальный зональный стандарт // Геол. геофиз., 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1047-1082.
4. Пещевская Е.Б. Палинологические последовательности готерива-альба на территории Гыданского района (север Западной Сибири) // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии, материалы Девятого Всероссийского совещания. – Белгород, ПОЛИТЕРРА, 2018. – 218-221.
5. Пещевская Е.Б. Диноцисты и палиностратиграфия нижнего мела Сибири. – Новосибирск, из-во «Гео», 2010. – 230 с.
6. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятков В.П., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. – Новосибирск, Изд-во «Гео», 2000. – 480 с.

7. Bailey D.A., Partington M. Some Middle Jurassic dinocyst from the Brent Group of the northern North Sea // *J. Micropal.*, 1991. – V. 9. – No. 2. – P. 245-252.
8. Davies E.H. The dinoflagellate Oppel-zonation of the Jurassic-Lower Cretaceous sequences in the Sverdrup Basin, Arctic Canada // *Geol. Surv. Canada.*, 1983. – Bul. 359. – P. 1-59.
9. Dodekova L. Dinoflagellate cysts from the Bathonian-Tithonian (Jurassic) of north Bulgaria. I. Taxonomy of Bathonian and Callovian dinoflagellate cysts // *Geol. Balcanica*, 1990. – V. 20. No. 2. – P. 3-45.
10. Piasecki S., Callomon J.H., Stemmerik L. Jurassic dinoflagellate cyst stratigraphy of Store Koldewey, North-East Greenland // *Geol. Surv. Denm. Greenl.*, 2004. – V. 5. – P. 99-112.
11. Powell A.J. (Ed.) A stratigraphic index of dinoflagellate cysts. – London, Chapman and Hall, 1992. – 290 p.
12. Prauss M. Dinozysten-Stratigraphie und Palynofazies im Oberen Lias und Dogger von NW-Deutschland // *Palaeontog.*, 1989. – Ab. B. – V. 214. – No. 1. – P. 1-124.
13. Smelror M., Below R. Dinoflagellate biostratigraphy of the Toarcian to Lower Oxfordian (Jurassic) of the Barents Sea Region // *Arctic geology and petroleum potential. Norweg. Petrol. Soc. Spec. Publ.* 2, 1992. – P. 493-511.

© *Е. Б. Пещевицкая, Б. Л. Никитенко, 2026*

Е. В. Пономарева^{1✉}, С. В. Рыжкова¹, А. А. Дешин²

Оценка плотности эффективного палеотеплового потока в Колтогорско-Нюрольской зоне

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука, г. Новосибирск, Российская Федерация,

²Группа компаний «Газпром нефть»

e-mail: PonomarevaEV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Построены одномерные численные модели отложений осадочного чехла в 12 скважинах Колтогорско-Нюрольской зоны. Выполнена калибровка тепловой истории отложений и оценена величина плотности эффективного палеотеплового потока в основании осадочного чехла. Интервал значений плотности составляет от 40 до 63 мВт/м². За время температурной истории отложений резкое снижение величины эффективного теплового потока происходило 170, 140 и 40 млн лет назад. Этим же периодам соответствуют максимальные скорости осадконакопления, выявленные при моделировании по скважинам. На территории исследования на фоне средних значений порядка 50 мВт/м² выделяются аномалии с повышенными значениями 54-60 мВт/м² (центральные районы Нюрольской мегавпадины), и с пониженными – 42-46 мВт/м² (западные районы от Колтогорско-Нюрольской зоны и Колтогорский мезопрогиб).

Ключевые слова: палеотепловой поток, бассейновое моделирование, Западная Сибирь, Колтогорско-Нюрольская зона

E. V. Ponomareva^{1✉}, S. V. Ryzhkova¹, A. A. Deshin²

Estimation of the effective paleo-heat flow density in the Koltogor-Nyurol'ka zone

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Gazprom Neft.

e-mail: PonomarevaEV@ipgg.sbras.ru

Abstract. One-dimensional numerical models for sedimentary-cover deposits in 12 wells in the Koltogor-Nyurol'ka zone were constructed. The thermal history of the deposits was calibrated, and the effective paleo-heat flow density at the base of the sedimentary cover was estimated. The density ranges from 40 to 63 mW/m², averaging 50 mW/m². Within the study area, high densities of 54-60 mW/m² have been established in the central areas of the Nyurol'ka megadepression, and low densities of 42-46 mW/m², in the western areas of the Koltogor-Nyurol'ka zone and the Koltogor mesotrough. During the thermal history of the deposits, the effective heat flow drastically decreased 170, 140, and 40 Ma. The maximum sedimentation rates estimated during the well modeling correspond to the same time periods.

Keywords: paleo heat flow, basin modeling, West Siberia, Koltogor-Nyurol'ka zone

Введение

При прогнозировании объемов генерации УВ нефтегазопроизводящими толщами важная роль принадлежит изучению геотемпературной истории региона.

Преобразование органического вещества в катагенезе происходит за счет тепловой энергии под действием теплового потока, идущего из верхней мантии, и радиогенного тепла в осадочном чехле и основании. Оценка величины палеотеплового потока, наряду с изучением распределения пластовых температур и поровых давлений, необходима для построения достоверной термобарической модели осадочного чехла при выполнении бассейнового моделирования [1].

Изучением геотермического режима недр Западно-Сибирской нефтегазональной провинции занимались А.Д. Дучков, Н.М. Кругликов, Б.П. Ставицкий, А.Р. Курчиков и др. Согласно карте глубинного теплового потока Западной Сибири [2], на территории южных районов провинции плотность теплового потока изменяется от 40 до 85 мВт/м². Распределение значений плотности теплового потока из основания осадочного чехла с целью выявления очагов генерации углеводородов в Нюрольской мегавпадине рассмотрено в работах Е.Н. Осиповой, В.И. Исаева, А.Н. Фомина и др. Этими авторами показано, что залежи с промышленными запасами в палеозойских отложениях приурочены к выраженной градиентной зоне величины теплового потока [3, 4; и др.]. Отмечена зависимость интенсивности генерации в разных частях мегавпадины и прилегающих структур от приуроченности к зонам развития триасовых грабен-рифтов [5].

Территория исследования находится на западе и северо-западе Томской области. Колтогорско-Нюрольская зона рассматривается в границах Нюрольской мегавпадины и Колтогорского мезопрогиба – отрицательных структур первого и второго порядка соответственно. Объектом исследования являются отложения осадочного чехла в разрезах 12 глубоких скважин, вскрывших доюрское основание.

Этаж нефтегазональности характеризуется широким диапазоном отложений от меловых (многочисленные продуктивные пласты А, Б, Ач (куломзинская, тарская, вартовская, алымская, киялинская, ванденская свиты)) до юрских (горизонты Ю₄, Ю₆ (тюменская свита), горизонт Ю₁ (васюганская свита), Ю₁⁰ (георгиевская свита), Ю₀ (баженовская свита)), включая нефтегазональный горизонт зоны контакта мезозоя и палеозоя. Основной нефтегазопроизводящей толщей на изученной территории признана баженовская свита.

Согласно данным В.А. Конторовича [6] формирование Колтогорского мезопрогиба началось в коньяк-кайнозойский этап развития в результате воздымания юго-восточных районов Западно-Сибирской геосинеклизы. Этот процесс сопровождался активным прогибанием Колтогорского мезопрогиба, с образованием примыкающих к депрессии вытянутыми положительными структурами – мезовалами, которые не унаследовали эрозионно-тектонические выступы фундамента, а имели инверсионную природу.

На территории прослеживаются раннепалеозойские грабен-рифты северо-восточного простираения [7]. Влияние их на геотемпературное поле Западной Сибири в работе разных авторов оценивается неоднозначно [2].

Цель работы – реконструировать температурную историю отложений осадочного чехла и уточнить региональную схему глубинного палеотеплового потока на территории Колтогорско-Нюрольской зоны.

Методы и материалы

Фактическими данными являлись результаты исследований юго-восточных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, полученные в ИНГГ СО РАН: разбивки отложений мезозойско-кайнозойского осадочного чехла, литология стратиграфических интервалов, включающая информацию о содержании аргиллитов (глин), алевролитов, песчаников (песков), угольного и карбонатного вещества, набор сеточных моделей структурных поверхностей, определения отражательной способности витринита (данные А.Н. Фомина).

Методика. Реконструкция тепловой истории выполнялась с помощью одномерного моделирования в программно-методическом комплексе Temis Flow. Описание математического аппарата детально приводится в работах Т. Hantschel, I.A. Kauerauf, [8], Ю.И. Галушкина [9] и других авторов. В качестве вводных параметров для расчета температуры прогрева отложений использовалась плотность теплового потока на нижней границе верхней мантии. Для калибровки модели было принято условие действия постоянного теплового потока. Его значение вычислялось в результате подбора удовлетворительного соответствия фактических и расчетных значений отражательной способности витринита (R_o) в разрезах изучаемых скважин. Для изучения тепловой истории отложений на протяжении геологического времени используется эффективная плотность палеотеплового потока, которая характеризуется количеством тепла, проходящим за единицу времени через единицу поверхности фундамента.

На начальном этапе исследования была построена численная структурно-литологическая модель осадочного чехла с заданными базовыми литотипами в каждой точке разреза. Модель ограничена сверху поверхностью современного рельефа, снизу – подошвой осадочного чехла. На основе полученной модели, с учетом уплотнения пород, была восстановлена история развития мезозойско-кайнозойских отложений на территории исследования.

Следующим этапом, используя результаты замеров в каждой скважине современных температур и определений R_o , была построена термобарическая модель, описывающая восстановление тепловой истории осадочного чехла.

Результаты и обсуждение.

На территории исследования разрез осадочного чехла представлен отложениями четвертичной системы, неогена, палеогена, мела, верхней, средней и нижней юры, залегающих на отложениях палеозойского и триасового возраста. Толщина чехла изменяется от 3200 м до 3440 м в пределах Колтогорского мезопргиба, а в Нюрольской мегавадине – от 3190 м до 3560 м. Базовые литологические типы пород, свойства которых были взяты из программного обеспечения Temis Flow и получены в результате петрофизических исследований керна скважин Западной Сибири, представлены преимущественно алевролитами и песчаниками, их суммарная доля в разрезе достигает 80%, аргиллитами – до 10%, опоками, известняками и углями.

Согласно полученной структурно-литологической модели на территории исследования скорость седиментации не была равномерной на протяжении геологического времени и диапазон ее значений в некоторые временные периоды кардинально отличался для северных и южных районов: от нескольких десятков метров до 120-160 м/млн лет на юге (Нюрольская мегавпадина), и до 600 м/млн лет – на севере (Колтогорский мезопрогиб). Такая разница в значениях скорости может быть объяснима тем, что территория Колтогорского мезопрогиба оказалась, по-видимому, вовлечена в унаследованное погружение северной части геосинеклизы (центральная часть и Ямало-Карская региональная депрессия), которое началось в ранний мел-туронское время и происходило на протяжении последующего времени до кайнозойской эры [6, 10].

В результате одномерного численного моделирования для каждой скважины была получена кривая становления эффективного палеотеплового потока на границе основания (Рис. 1) Величина плотности потока на территории изменялась от 40 до 64 мВт/м².

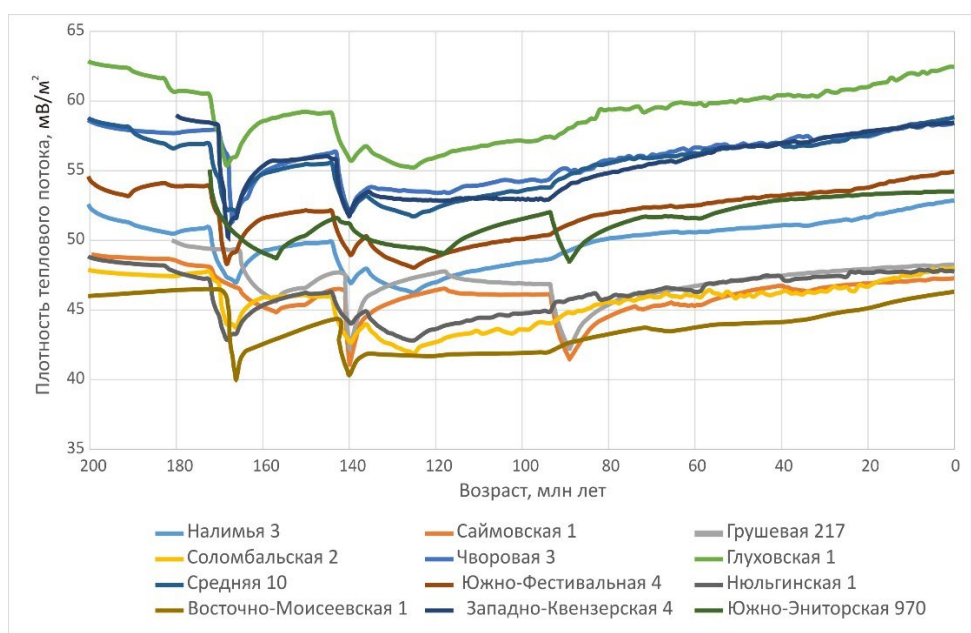


Рис. 1. Изменение плотности эффективного палеотеплового потока на границе основания осадочного чехла во времени.

Максимальные значения палеотеплового потока на протяжении всей истории развития осадочного чехла отмечаются в районе скважин: Глужовской-1, Чворовой-3, Средней-10 и Западно-Квензерской-4, причем в районе Глужовской площади величина потока не снижалась ниже 55 мВт/м². Минимальные значения выявлены в скважинах: Восточно-Моисеевская-1, Соломбальская-2, Ньюльгинская-1. Здесь значения не повышались более 47-48 мВт/м².

Величины палеотеплового потока, выявленные по скважинам, на момент начала образования осадочного чехла и в настоящее время примерно сопоставимы, но на протяжении геологической истории несколько раз происходило

снижение интенсивности теплового потока. На всей территории исследования резкое снижение значений (примерно на 10 мВт/м^2) первый раз произошло на короткое время (около 10 млн лет) 170 млн лет назад (байосский век) в пределах Нюрольской мегавпадины, в то время как севернее, в Колтогорском мезопргибе это снижение произошло чуть позднее и не имело такой большой амплитуды. Следующее изменение интенсивности палеотеплового потока произошло 140 млн лет назад (начало валанжинского века) на длительное время (около 60 млн лет) для южных районов и на короткое время (около 10 млн лет) – для северных. В последующее время в пределах Нюрольской мегавпадины происходило медленное повышение (восстановление) величины теплового потока, в то время как в Колтогорском мезопргибе был еще один значительный непродолжительный (около 15 млн лет) спад интенсивности теплового потока 90 млн лет назад. На эти же временные периоды максимального снижения величины палеотеплового потока приходятся пики максимальных скоростей осадконакопления.

Средние значения величины палеотеплового потока за время формирования осадочного чехла на территории исследования приведены в Таблице.

Согласно полученной карте распределения величины палеотеплового потока (Рис. 2), повышенные значения $54\text{--}60 \text{ мВ/м}^2$ приурочены к центру и северо-востоку Нюрольской мегавпадины, минимальные (42 мВ/м^2) – к западной и юго-западной окраине мегавпадины. Значения порядка 45 мВ/м^2 выявлены в пределах Колтогорского мезопргиба и на северо-западе территории исследования.

Заключение

Анализ данных, полученных в результате построений взаимосвязанных моделей, позволил оценить плотность эффективного палеотеплового потока на территории исследования на протяжении геологической истории формирования осадочного чехла. Интервал значений плотности изменялся от 40 до 63 мВт/м^2 .

Таблица 1. Осредненная по времени плотность эффективного теплового потока на границе основания осадочного чехла

№ п.п.	Скважина	Средняя плотность эффективного теплового потока, mW/m^2
1	Южно-Эниторская 970	50.7
2	Саймовская 1	45.2
3	Грушевая 217	46.1
4	Чворовая 3	56.0
5	Средняя 10	55.7
6	Южно-Фестивальная 4	51.9
7	Глуховская 1	59.7
8	Западно-Квензерская 4	54.5
9	Соломбальская 2	45.6
10	Налимья 3	49.8
11	Нюльгинская 1	46.1
12	Восточно-Моисеевская 1	42.7

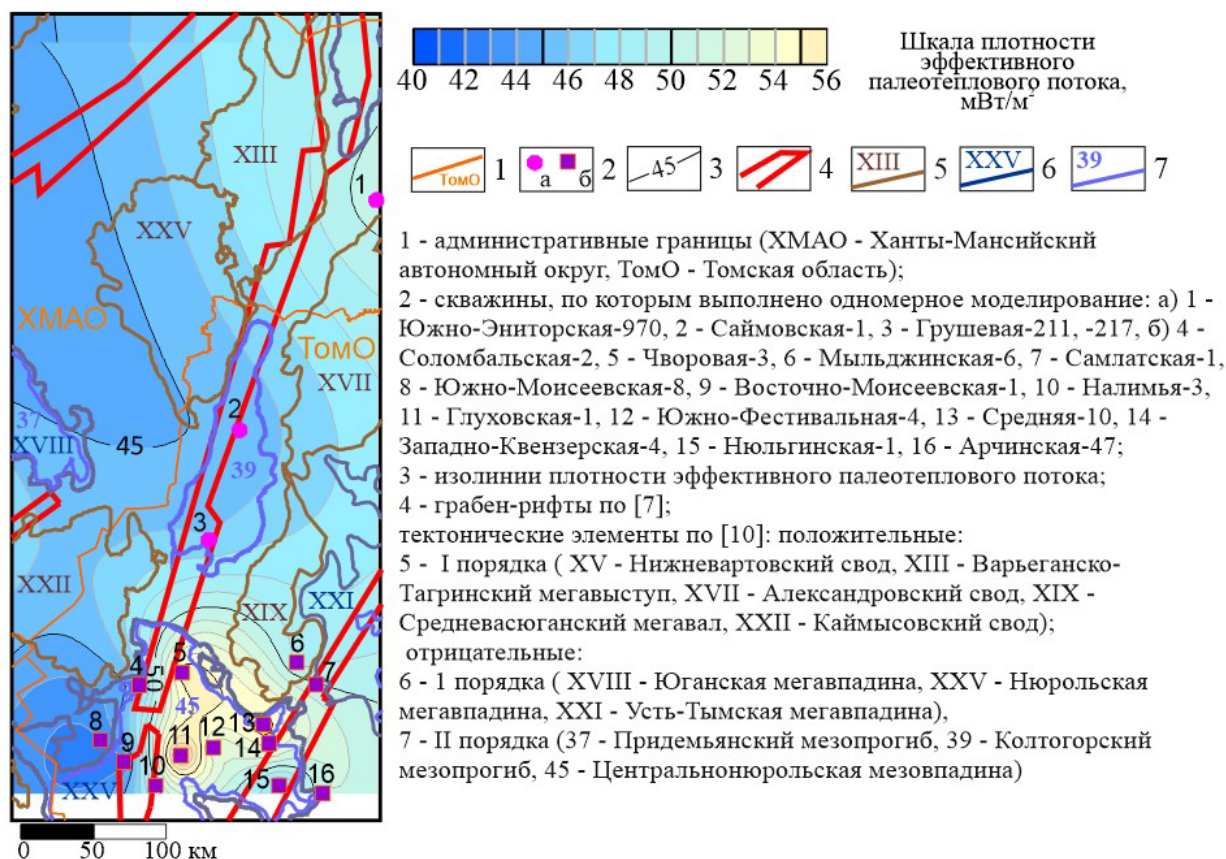


Рис. 2. Карта распределения величины эффективного палеотеплового потока.

Выделяются два различных типа конфигурации кривых становления теплового потока, один тип приурочен к скважинам Нюрольской мегавпадины, второй – Колтогорскому мезопрогибу. Отмечаются три периода значительного (до 10 мВт/м²) снижения интенсивности теплового потока – 170, 140 и 90 млн лет назад, к этому же времени относятся пики максимальных скоростей осадконакопления.

Таким образом, при одномерном моделировании в Колтогорско-Нюрольской зоне была уточнена региональная схема распределения величины эффективного теплового потока. Было выявлено, что фоновые для территории значения составляют около 50 мВт/м². Повышенные значения порядка 54-60 мВт/м² приурочены к центральным и юго-восточным районам Нюрольской мегавпадины, пониженные – к Колтогорскому мезопрогибу и юго-западным районам.

Благодарности

Исследование финансировалась за счет средств бюджета организации в рамках выполнения проектов FWZZ-2026-0048, FWZZ-2026-0045 ИНГТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конторович А.Э., Бурштейн Л. М., Малышев Н. А., Сафронов П.И., Гуськов С.А., Ершов С.В., Казаненков В.А., Ким Н.С., Конторович В.А., Костырева Е.А., Меленевский В.Н., Лившиц В.Р., Поляков А.А., Скворцов М.Б. Историко-геологическое моделирование

- процессов нефтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1179-1226.
2. Курчиков А.Р. Геотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42 (11-12). – С. 1846-1853.
3. Осипова Е.Н., Пракойо Ф.С., Исаев В.И. Реконструкция геотермической истории нефтематеринской баженовской свиты и оценка распределения плотности ресурсов в шельфовом резервуаре неокома Нюрольской мегавпадины // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2014. – Т. 9. – № 2. – http://www.ngtp.ru/rub/4/22_2014.pdf
4. Исаев В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н., Булатов В.И., Кузьменков С.Г., Галиева М.Ф., Крутенко Д.С. Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 125-135.
5. Рыжкова С.В., Дешин А.А. Восстановление истории генерации нефти органическим веществом баженовской свиты северной части Нюрольской мегавпадины (Западная Сибирь) // Нефтегазовая геология. Теория и практика – 2023 – Т.18. – №4. – http://www.ngtp.ru/rub/2023/47_2023.html
6. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СОРАН, филиал «ГЕО», 2002. 253 с.
7. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты – Москва: Недра, 1981. – 143 с.
8. Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer, Berlin, 2009. 476 p.
9. Галушкин Ю.И. – М.: Научный мир, 2007. – 455 с.
10. Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. Тектоническое строение и история тектонического развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – №11. –12. – С. 1832-1845.

© Е. В. Пономарева, С. В. Рыжкова, А. А. Дешин, 2026

А. Н. Пыряев^{1,2✉}, Д. А. Новиков^{2,3}

Изотопный состав углерода, кислорода и водорода в природных водах южного Крыма: к обоснованию локальной линии метеорных вод

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pyrayev@igm.nsc.ru

Аннотация. В работе проведено исследование состава стабильных изотопов кислорода, водорода и углерода в более, чем 130 пробах поверхностных и подземных вод Крыма. Полученные данные использованы для построения локальной линии метеорных вод, описываемой уравнением $\delta D = 7,2979 \times \delta^{18}O + 5,98$. Полученная линия метеорных вод сопоставима с литературными данными близлежащих регионов и может быть использована при дальнейшей интерпретации генезиса природных вод южного Крыма, а также вторичных эффектов изменения изотопного состава вод. Создана фоновая изотопно-концентрационная характеристика отобранных проб, отражающая источники питания вод углекислотой и уровень взаимодействия вод с окружением (породами, газами, органическим веществом).

Ключевые слова: природные воды, стабильные изотопы Н, О, С, южный Крым

A. N. Pyrayev^{1,2✉}, D. A. Novikov^{2,3}

Isotopic composition of carbon, oxygen and hydrogen in natural waters of southern Crimea: validation of a local meteoric water line

¹V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

³Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: pyrayev@igm.nsc.ru

Abstract. This paper examines the stable isotope composition of oxygen, hydrogen, and carbon in more than 130 samples of surface water and groundwater in Crimea. The data obtained were used to plot a local meteoric water line described by the equation $\delta D = 7.2979 \times \delta^{18}O + 5.98$. The resulting meteoric water line is comparable with literature data from nearby regions and can be used for further interpretation of the genesis of southern Crimea's natural waters, as well as the secondary effects of changes in the stable isotope composition of waters. A background isotope-concentration profile was created for the collected samples. It reflects the sources of water carbon dioxide supply and the level of interaction between the waters and the environment (rocks, gases, and organic matter).

Keywords: natural waters, H, O, C stable isotopes, southern Crimea

Введение

Большинство природных вод, исследуемых гидрогеохимиками, имеют метеорное происхождение [1]. Вторичные эффекты могут существенно изменять первоначальный изотопный состав кислорода и водорода вод [2-4]. Для понимания проявлений этих эффектов исследователи опираются на линии метеорных вод. В простейшем случае оперируют глобальной линией метеорных вод - ГЛМВ [5]. В отдельных областях исследований локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) может существенно отличаться от ГЛМВ [6-8]. Некорректный выбор линии метеорных вод для конкретного региона исследований может привести к некорректной интерпретации полученных данных. Это может повлечь за собой серьезные недочеты в исследованиях генезиса вод, условий формирования их состава и преобразования. В особенности это важно при исследованиях подземных вод, когда источники их питания могут находиться отдаленно как территориально, так и по времени. Так, воды с вековой и даже тысячелетней историей накопления и миграции по водоносным горизонтам являются вполне распространенными даже среди легкодоступных источников [9].

Нашим коллективом запланировано обширное исследование генезиса природных вод Крыма, выявление различий изотопного и химического состава поверхностных и подземных вод. Эти данные служат базой для изучения длительности накопления и возобновления ресурсов вод, определения безопасного уровня их потребления [10]. Первоначальной задачей в подобного рода исследованиях стоит создание корректных локальных линий метеорных вод Крыма. Полуостров обладает разнообразным рельефом и имеет несколько климатических зон, существенно разнящихся условиями формирования атмосферной влаги и обзаруемых из нее атмосферных осадков. Выявление таких закономерностей позволит достоверно изучать подземные воды полуострова, поскольку будут заложены в основу интерпретации генезиса вод отдельных регионов Крыма.

Взаимодействие вод с окружением (породами, органическим веществом, газами) неизбежно приводит к изменениям изотопного состава вод. И очень чувствительным инструментом, отражающим такое взаимодействие, служит изотопный состав растворенного в воде неорганического углерода (DIC – dissolved inorganic carbon), что было показано нами ранее [11]. Фоновая изотопно-концентрационная характеристика [12] вод Крыма даст нам представление о возможных источниках питания вод углекислотой. То есть, даст нам общее представление об окружении вод, с которым они могут вступать во взаимодействие.

Мы полагаем, что имеющаяся в нашем распоряжении коллекция предварительно отобранных вод южного Крыма (более 130 проб) позволит нам получить ответы на вышеперечисленные вопросы. Полученный материал будет заложен в основу дальнейшего изучения природных вод Крымского полуострова.

Методы и материалы

Для проведения исследований было отобрано более 130 проб вод из водных объектов южного Крыма. Изученные объекты можно разделить на две основные

группы: поверхностные и подземные воды. К первой группе отнесены речные, пресные и соленые озера (вплоть до крепких рассолов), а также морские акватории. Вторая группа представлена конденсационными (пещерными), грунтовыми и артезианскими (как пресными, так и минеральными) водами. Карта точек отбора проб приведена на рисунке 1. Пробы для анализа стабильных изотопов отбирались и проводились согласно методике, описанной в [9].

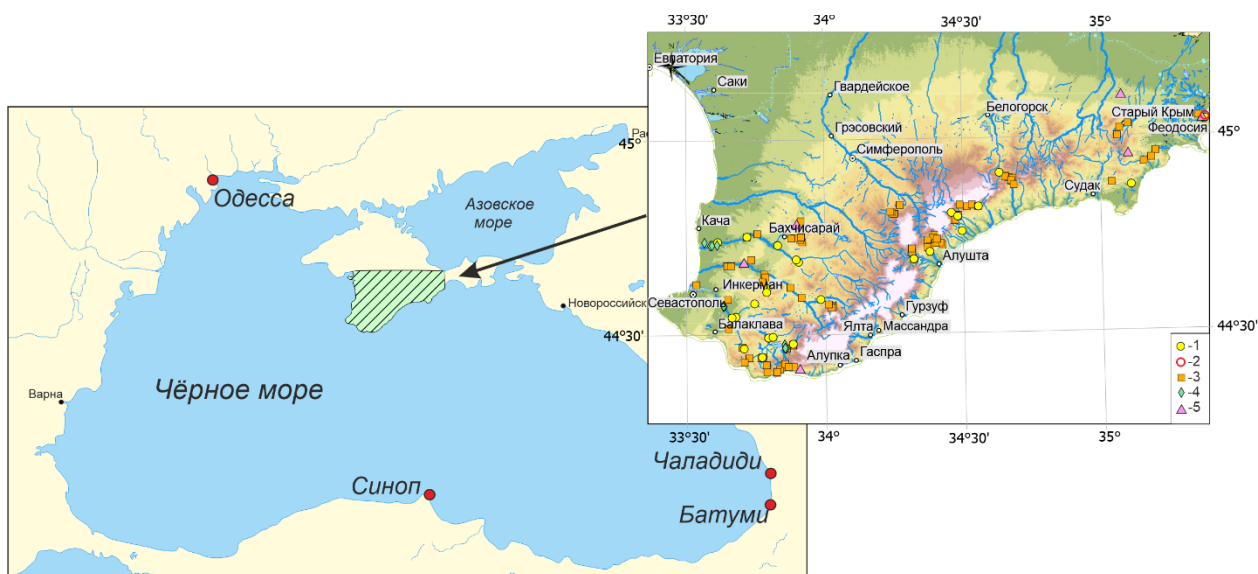


Рис. 1. Карта расположения ближайших метеостанций наблюдения изотопного состава атмосферных осадков (а) и точек отбора проб (б).

Поверхностные вод: 1 – реки, озера (от пресных до рассолов),
2 – морские (Черное море); подземные воды: 3 – грунтовые (родники, колодцы);
4 – артезианские (преимущественно пресные); 5 – артезианские (минеральные).

Анализ состава стабильных изотопов проводили в максимально сжатые сроки, чтобы нивелировать влияние эффекта хранения. Исследование изотопного состава Н и О вод, а также DIC проводилось в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН на масс-спектрометре изотопных отношений FinniganTM MAT 253, снабженном приставками пробоподготовки H/Device (анализ изотопного состава Н) и GasBench II (анализ изотопного состава О и С). Детали пробоподготовки и проведения изотопных исследований представлены в работе [9].

Все измерения проводились относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 – при измерениях $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях δD и $\delta^{18}\text{O}$ [13]. Погрешность измерений стандартов не превышала 0,2 ‰ при анализе изотопного состава О и DIC и 1 ‰ – при анализе водорода. Все полученные результаты представлены относительно международных стандартов [13]: VPDB – при определениях $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ и VSMOW – при определениях δD и $\delta^{18}\text{O}$.

Детальное изучение микрокомпонентного и ионно-солевого состава проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Аналитический комплекс работ включал использование методов титриметрии, ионной хроматографии, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Аналитические измерения выполнены специалистами В.В. Куровской, А.С. Погуца и Э.С. Бирко.

Результаты

Результаты проведенных исследований изотопного состава Н и О природных вод южного Крыма представлены на рисунке 2. Глобальная линия метеорных вод [5] была построена на основе уравнения $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ [1]. Локальные линии метеорных вод для ближайших станций наблюдений были составлены на основе данных международной базы данных wisar (линии ЛЛМВ-Одесса, -Чаладиди, -Синоп) [14] и данных, приведенных в работе [15] (ЛЛМВ-Крым). Обозначение отдельных водопунктов на рисунке сделано маркерами, соответствующими легенде на рисунке 1. Значения δD и $\delta^{18}O$ в изученных водах варьируют в диапазонах от -101 до -21 ‰ и от -14,2 до -2,6 ‰, соответственно.

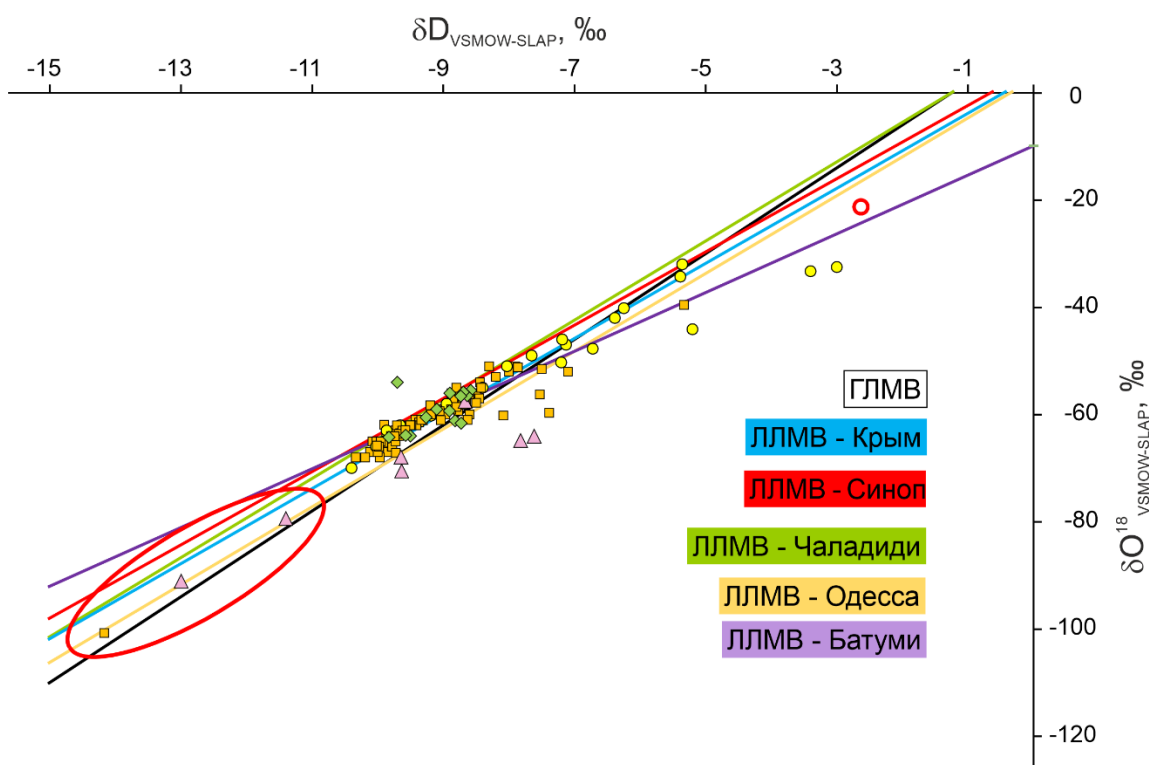


Рис. 2. δD и $\delta^{18}O$ в исследованных природных водах южного Крыма.

Результаты проведенных исследований изотопного состава DIC представлены на рисунке 3. Концентрации DIC в водах рассчитывались как сумма мольных концентраций CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Значения $\delta^{13}C$ в исследованных водах варьируют в диапазоне от -15,5 до -0,3 ‰, концентрация DIC составляет от 1,3 до 11 ммоль/л.

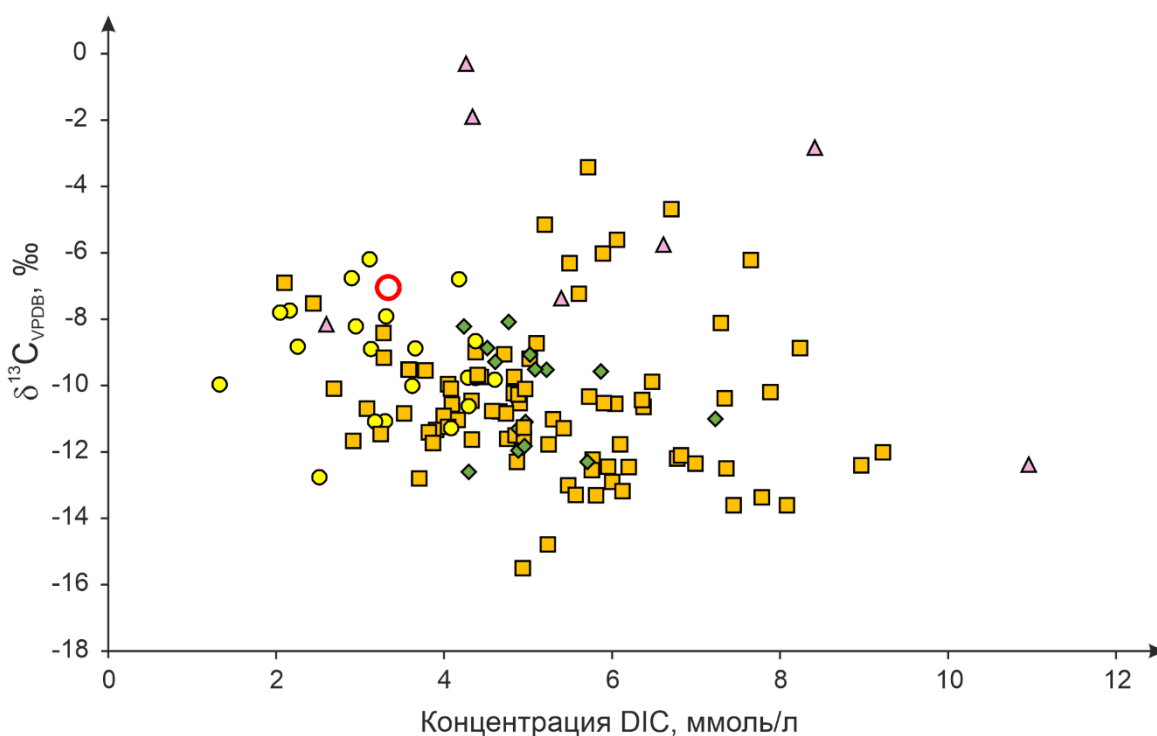


Рис. 3. Изотопный состав и концентрация DIC в водах южного Крыма.

Обсуждение

Вопрос генезиса природных вод, как правило, решается относительным положением точек данных на зависимости $\delta D = f(\delta^{18}O)$. Расположение точек вблизи линий метеорных вод позволяет сделать вывод о метеорном происхождении вод. В нашем случае генезис вод очевиден, поскольку подавляющее большинство изученных водопунктов имеют выраженное питание атмосферными осадками и расположение точек данных на рисунке 2 это также подтверждает. Тем не менее, из представленных данных видно, что большинство полученных точек данных располагается несколько выше ГЛМВ. То есть, изотопный состав вод южного Крыма описывается глобальной линией метеорных вод не вполне корректно.

Выбор корректной ЛЛМВ в нашем случае оказался несколько затруднительным по ряду причин. База данных wiser [14] содержит объемное количество данных об изотопном составе атмосферных осадков в различных регионах нашей планеты. Тем не менее, покрытие отдельных регионов контрольными лабораториями по-прежнему недостаточно плотное. Ближайшими станциями регулярного контроля изотопного состава Н и О в атмосферных осадках являются г. Одесса, станция Синоп (Турция) и станции Чаладиди и Батуми (Грузия) (см. рис. 1). Они относительно удалены от интересующего нас объекта – южного Крыма.

Для станции Батуми наблюдения изотопного состава атмосферных осадков ограничены неполными четырьмя годами (с 1981 по 1984 гг.) с разовой фиксацией общего изотопного состава атмосферных осадков за весь месяц сбора. Аналогичная ситуация с наблюдениями на станции в г. Одесса (неполные 1981-1983 гг.). Наиболее современные и подробные данные имеются для станций Синоп (Турция) и

Чаладиди (Грузия). Для станции Синоп набор данных представлен за период с 2008 по 2022 гг. Для станции Чаладиди – с 2014 по 2018 гг.

Мы построили четыре ЛЛМВ для всех перечисленных станций наблюдений. Построения делались с исключением точек данных с очевидным проявлением эффекта испарения [16, 17]. Эту проблему при составлении линий метеорных вод также подчеркивают авторы работы [15]. При построении ЛЛМВ был произведен учет вклада объема атмосферных осадков по месяцам: точки изотопного состава атмосферных осадков за определенный месяц наблюдений построены с учетом их «веса» - количества атмосферных осадков в указанный месяц по данным wiser. На рисунке 2 также представлена ЛЛМВ, предложенная в работе [15]. Она построена на основании наблюдений за изотопным составом атмосферных осадков в Симферополе (2009-2012 гг.) и на северном склоне нижнего плато массива Чатырдаг (2010-2012 г.) и обозначена как ЛЛМВ-Крым.

Анализ положения ЛЛМВ на рисунке 2 показывает, что наиболее близкое положение имеют ЛЛМВ станций Синоп, Чаладиди и ЛЛМВ-Крым. Локальные линии, основанные на данных остальных станций наблюдений, существенно отличаются от этих трех. Полученные нами точки данных для всех типов изученных вод в основном ложатся близко к линиям ЛЛМВ-Синоп, ЛЛМВ-Крым и ЛЛМВ-Чаладиди (см. рис. 2). Это подтверждает наше предположение о метеорном генезисе изученных вод. Ряд точек отклоняется вправо от указанных ЛЛМВ, что, очевидно, является следствием испарения таких вод с поверхности водоемов, либо до инфильтрации с поверхности почв/в приповерхностном поровом пространстве [17]. Для некоторых точек данных подземных вод отмечаются существенные кислородные изотопные сдвиги [18]. Вероятно, это указывает на изотопный обмен этих вод кислородом с породами коллекторов [19, 20]. В частности, этот эффект можно отметить для минеральных вод, отмеченных на рисунке 2 красным эллипсом.

На основании полученных нами данных мы также предприняли попытку построить локальную линию метеорных вод, основанную на изотопном составе Н и О поверхностных и подземных вод. Для исключения влияния эффекта испарения на изотопный состав вод при построении мы учитывали только те точки данных, для которых кислородный изотопный сдвиг (КС) относительно глобальной линии метеорных вод не превышал 0,2‰.

Полученная нами линия метеорных вод описывается уравнением: $\delta D = 7,3 \times \delta^{18}O + 6,0$. Вышеперечисленные ЛЛМВ из литературы описываются следующими уравнениями: $\delta D = 6,8 \times \delta^{18}O + 4,5$ (ЛЛМВ-Синоп); $\delta D = 7,4 \times \delta^{18}O + 9,3$ (ЛЛМВ-Чаладиди) $\delta D = 7 \times \delta^{18}O + 3,2$ (ЛЛМВ-Крым). Из приведенных уравнений видно, что полученная нами ЛЛМВ занимает промежуточное положение между линиями ЛЛМВ-Чаладиди и ЛЛМВ-Крым.

Изотопный состав DIC, как и его содержание в исследованных водах – очень разнообразны. Значения $\delta^{13}C$ варьируют от -15,5 ‰ до -0,3 ‰ (см. рис. 3). Это указывает на широкое разнообразие типов источников углекислоты, а также различие в их соотношении при питании вод углеродом. В поверхностных и приповерхностных водах преобладающим источником углекислоты является биогенный CO_2 , обра-

зубый при распаде органического вещества [21]. Для подземных вод наблюдается больший вклад обогащенной тяжелым изотопом ^{13}C углекислоты. Полагаем, что эта углекислота образована при выветривании карбонатного материала с тяжелым изотопным составом [22]. Еще одним фактором утяжеления изотопного состава DIC может служить биогенная углекислота, образуемая при органодеструкции растений с фотосинтезом типа C_3 . Для таких растений характерно насыщение их органического материала изотопом ^{13}C [21].

Заключение

В настоящем исследовании проведен сбор и анализ изотопного состава кислорода, водорода и DIC в природных водах южного Крыма. Полученные результаты сопоставлены с данными других исследователей, занимавшихся анализом изотопного состава атмосферных осадков полуострова. Полученные нами материалы позволили построить локальную линию метеорных вод южного Крыма. Сравнение с результатами наших предшественников показывает, что положение локальных линий метеорных вод – близко. Эти результаты могут быть заложены в интерпретацию генезиса природных подземных вод полуострова при дальнейшем исследовании.

Изотопный состав DIC изученных вод – очень разнообразный и указывает на множественность источников углекислоты, растворенной в водах: от биогенных, преобладающих в поверхностных и приповерхностных водах до карбонатов, выветриваемых водами. Последнее в большей степени характерно подземным водам глубоких горизонтов.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 25-43-02207 «Сравнительное исследование радиологической опасности подземных вод в прибрежной зоне Крымского полуострова и Бэйхая».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Ninth edition. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 528 p.
2. Cartwright I., Weaver T., Tweed S., Ahearne D., Cooper M., Czapnik C., Tranter J. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water–rock interaction during dying basaltic volcanism / Journal of Geochemical Exploration, Volumes 69–70, 2000, Pages 257-261.
3. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction / Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 390, 2020, 106708.
4. Yang N., Wang G. Moisture sources and climate evolution during the last 30 kyr in north-eastern Tibetan Plateau: Insights from groundwater isotopes (2H , 18O , 3H and 14C) and water vapour trajectories modeling / Quaternary Science Reviews 242 (2020) 106426.
5. Craig, H., Isotopic variations in meteoric waters, Science, 133, 1702, 1961.
6. Souza, E. , Galvao, P. , Almeida, R. , Pinheiro, C. , Baessa, M. and Cabral, M. (2015) Stable Isotopes Studies in the Urucu Oil Province, Amazon Region, Brazil. Journal of Water Resource and Protection, 7, 131-142.

7. Fritz, M. , Wetterich, S. , McAlister, J. and Meyer, H. (2022): A new local meteoric water line for Inuvik (NT, Canada) , *Earth System Science Data*, 14 (1), pp. 57-63.
8. J. Wang, M. Xu, C. Ling, H. Cheng, H. Zhang, J. Guo. Comparative study of hydrochemical characteristics and formation mechanisms of representative geothermal areas in Xinjiang area, Northwest China / *Geothermics*, Volume 133, 2025, 103459.
9. Pyryaev A.N., Novikov D.A., Petrozhitskiy A.V., Kuleshov D.V. Radiocarbon dating of the natural groundwater in the Ob-Zaisan folded region (Russia) / *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 27, 2024, 101335.
10. Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. & Perrone, D. Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene. *Annu. Rev., 2020. Earth Planet. Sci.* 48, 431–463..
11. Пырьев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим / *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 148-157.
12. Пырьев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хвощевская А.А. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением / *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 22-33.
13. IAEA, 2026. Reference Products for Environment and Trade, 2026 accessed 10 april 2026. <https://analytical-reference-materials.iaea.org/>
14. Wiser, 2026. International database, 2026 accessed 10 april 2026. <https://nucleus.iaea.org/wiser>
15. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпетль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // *Спелеология и карстология*, - № 9. – Симферополь. – 2012. – С. 14-21.
16. Yu H., Ma T., Du Y., Chen L. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: Clues from hydrochemistry and stable isotopes (D, ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br) / *J. Geochem. Explor.* 2019. 196, 57–65.
17. Vystavna Y., Harjung A., Monteiro L.R., Matiatos I., Wassenaar L.I. Stable isotopes in global lakes integrate catchment and climatic controls on evaporation / *Nature Communications* volume 12, Article number: 7224 (2021).
18. Craig H. Isotopic Composition and Origin of the Red Sea and Salton Sea Geothermal Brines // *Science.* – 1966. – Vol. 154. – P. 1544–1548.
19. Shoedarto R.M., Tada Y., Kashiwaya K., Koike K., Iskandar I. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction / *Geothermics* 86 (2020) 101797.
20. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. New data on the isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ AND $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of the Siberian Platform brines / *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2021. V. 332. 7. 20–33.
21. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2005. – V. 236. – P. 419–429.
22. Ферронский В.И., Поляков В.А. (2009). Изотопия гидросферы земли. Москва: Изд-во Научный мир, 632 с.

© А. Н. Пырьев, Д. А. Новиков, 2026

С. В. Рыжкова¹✉, О. С. Дзюба¹, А. Г. Замирайлова¹

К вопросу о стратиграфической изученности георгиевской и баженовской свит зоны сочленения Хантейской гемиантеклизы и Куржинской гряды (Западная Сибирь)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rzhkovasv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Для разрезов георгиевской и баженовской свит территории сочленения Хантейской гемиантеклизы и Куржинской гряды (Западная Сибирь), по которым обобщены данные литологического исследования керна и геофизических исследований скважин, проведен анализ информационного потенциала имеющейся палеонтологической базы данных. Установлено, что наиболее полную геофизическую, лито- и биостратиграфическую изученность баженовская свита имеет в разрезах скважин северной части Александровского свода.

Ключевые слова: Западная Сибирь, верхняя юра, нижний мел, геофизические исследования скважин, фоссилии

S. V. Ryzhkova¹✉, O. S. Dzyuba¹, A. G. Zamirailova¹

On the issue of stratigraphic study of the Georgievka and Bazhenovo formations of the junction zone of the Khantei hemianteclise and the Kurzino ridge (Western Siberia)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rzhkovasv@ipgg.sbras.ru

Abstract. For the sections of the Georgievka and Bazhenovo formations located at the junction of the Khantei hemianteclise and the Kurzino ridge (Western Siberia), for which lithology and well logging data were summarized, an analysis of the information potential of the existing paleontological database was carried out. It has been established that the Bazhenovo formation has been most fully studied from geophysical, litho- and biostratigraphic points of view in well sections of the northern part of the Aleksandrovskoe Arch.

Keywords: Western Siberia, Upper Jurassic, Lower Cretaceous, well log data, fossils

Введение

Баженовская свита является одним из наиболее важных объектов по наращиванию ресурсной базы в Западной Сибири. За последние десять лет существенно увеличилось число залежей, выявленных в баженовском резервуаре [1]. В центральных районах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП) проницаемая часть резервуара представлена продуктивным горизонтом Ю₀ баженовской свиты [2]. В зонах перехода баженовской свиты в стратиграфические аналоги фациальные изменения влияют на структуру и состав указанной части резервуара. Зона сочленения Хантейской гемиантеклизы и Куржинской гряды

относится именно к таким территориям. В ее пределах с запада на северо-восток георгиевская и баженовская свиты замещаются на сиговскую и яновстанскую, а в восточном и юго-восточном – на марьяновскую свиту [3-6]. В пределах Александровского свода обоснован стратиграфический перерыв между георгиевской и баженовской свитами [7]. Для юго-восточных районов распространения баженовской свиты на отдельных территориях обсуждается вопрос отнесения нижней части разреза свиты к георгиевской свите [8]. С этим же вопросом связано предложение о включении нижней части свиты (нижняя часть пачки 1) к подстилающему флюидоупору [9]. Биостратиграфическая информация является существенной частью в обосновании стратиграфической принадлежности упомянутого интервала разреза. С целью получения представления о состоянии стратиграфической изученности разрезов георгиевской и баженовской свит и их возрастных аналогов зоны сочленения Хантейской гемиянтеклизы и Куржинской гряды, охватывающей территории прилегающие с севера к рекам Обь и Вах, выполнен анализ палеонтологической базы данных Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) в комплексе с материалами литологических исследований керна и геофизических исследований скважин (ГИС).

Материалы и методы

Материалом исследования стала палеонтологическая информация, собранная А.Л. Бейзелем (определения А. С. Алифирова, Ю. И. Богомолова, О. С. Дзюба, В. А. Захарова, С. В. Мелединой, В.А. Маринова, О. С. Урман, Б. Н. Шурыгина, О. В. Язиковой), материалы по керну (интервалы отбора, выход керна, литологическое описание) и результаты геофизических исследований скважин (ГИС) из базы данных ИНГГ СО РАН, а также опубликованные данные [10-13; и др.]. Использовались результаты различных методов ГИС: электрический каротаж (зонды кажущегося сопротивления (КС), индукционный (ИК), боковой каротаж (БК), потенциал самопроизвольной поляризации (ПС)), кавернометрия (КВ), акустический каротаж (АК), радиоактивный каротаж (гамма-каротаж (ГК), нейтронный гамма-каротаж (НГК) и его модификации). На первом этапе проведена ревизия информации по схожимости данных керна и ГИС, исключены материалы, в которых неоднозначность привязки образцов по разрезу скважин требует дополнительной информации. Выделение в разрезах георгиевской и баженовской свит и их стратиграфических аналогов (сиговской, яновстанской и марьяновской свит) выполнено с учетом типов разреза васюганского, георгиевского и баженовского стратиграфических горизонтов, приведенных в работах [3, 4, 14]. Разделение баженовской свиты на пачки и их группировка по ГИС (в нижней части свиты – пачки 1–3, в верхней – пачки 4–6 или, при отсутствии верхних двух пачек, пачка 4) проведено в соответствии с критериями, приведенными в публикациях [7, 12, 15; и др.].

Результаты

Изучаемая обширная территория географически охватывает междуречья р. Обь, Вах, Аган и верховья р. Айваседопур (рис. 1). В тектоническом плане на схеме юрского структурного яруса относится к зоне сочленения Хантейской

гемиантеклизы и Куржинской гряды, между которыми выделяется северная часть Александровского свода. Прилегающую к Хантейской гемиантеклизе с севера Южно-Надымскую мегамоноклизу осложняет Пякупурско-Ампутинский наклонный мегапрогиб. Восточная часть мегамоноклизы граничит со Среднепурским наклонным мегажелобом. К Александровскому своду и Куржинской гряде с севера и запада прилегает Красноселькупская моноклиза.

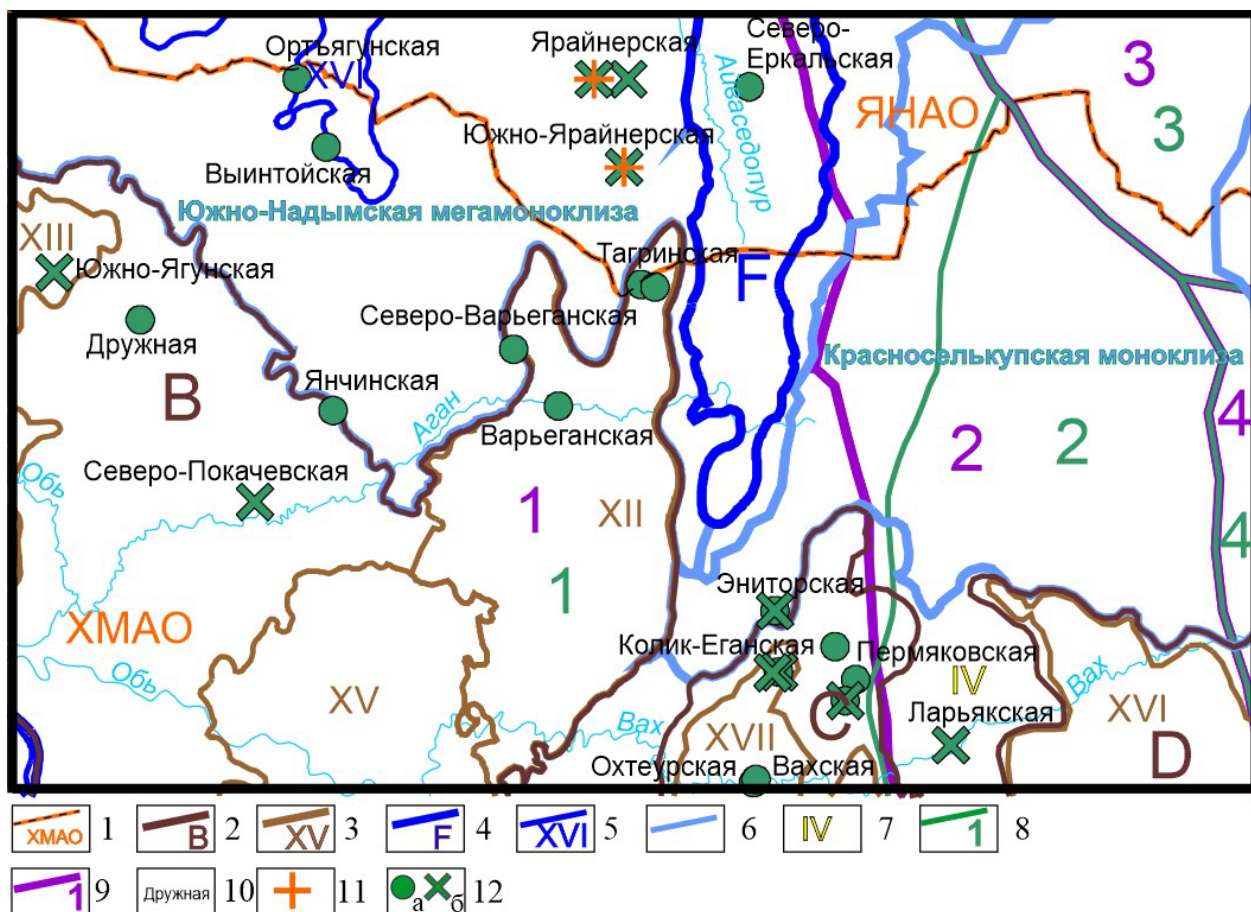


Рис. 1. Обзорная схема территории сочленения Хантейской гемиантеклизы и Куржинской гряды

Условные обозначения: 1 – административные границы (автономные округа: ХМАО – Ханты-Мансийский, ЯНАО – Ямало-Ненецкий); 2–7 – тектонические элементы по [16]: 2, 3 – положительные: 2 – 0 порядка (В – Хантейская гемиантеклиза, С – Обь-Васюганская гряда, D – Куржинская гряда), 3 – I порядка (XII – Сургутский свод, XIII – Варьеганско-Тагринский межавыступ, XV – Нижневартовский свод, XVI – Пыль-Караминский межавал, XVII – Александровский свод); 4, 5 – отрицательные: 4 – 0 порядка (F – Среднепурский наклонный мегажелоб), 5 – I порядка (XVI – Пякупурско-Ампутинский наклонный мегапрогиб); 6, 7 – промежуточные: 6 – мега- и моноклизы, 7 – мегаседловины (IV – Караминская); 8, 9 – границы фацально-стратиграфического районирования: 8 – георгиевского и васюганского горизонтов (районы: 1 – Пурпейско-Васюганский, 2 – Сильгинский, 3 – Тазо-Хетский, 4 – Ажарминский), по [4]; 9 – баженовского горизонта (свиты: 1 – баженовская, 2 – баженовская низкоомная, 3 – яновстанская, 4 – марьяновская), по [3]; 10 – локальные площади; 11, 12 – наличие палеонтологической характеристики: 11 – по георгиевской свите, 12 – по нижней (а) и верхней (б) частям баженовской свиты.

На территории сочленения Хантейской гемиантеклизы и Куржинской гряды комплексная литологическая, геофизическая (по материалам ГИС) и палеонтологическая характеристика разрезов георгиевского и баженовского горизонтов имеется по 23 скважинам, пробуренным на 17 локальных площадях (рис. 1). По результатам анализа информации об ископаемых остатках (аммонитах, белемнитах, двустворках и микрофоссилиях) в керне этих скважин получено представление о состоянии биостратиграфической основы комплексно охарактеризованных разрезов. Результаты исследования сгруппированы по трем интервалам (георгиевская свита, нижняя и верхняя части баженовской свиты). Следует отметить, что в результате комплексного анализа литологического описания керна и ГИС установлен сдвиг керна на 2 м вверх в скважине Колик-Еганская 148 и на 3 м вниз в скважине Пермьяковская 64.

Георгиевская свита. Присутствие в разрезе георгиевской свиты глауконита способствует ее четкому выделению на диаграммах индукционного каротажа [4]. В разрезах скважин, по которым имеются материалы ГИС, георгиевская свита биостратиграфически охарактеризована только в северной части изученной территории – в пределах Южно-Надымской мегамоноклизы (рис. 1). В скважине Южно-Ярайнерская 51, с учетом находок аммонитов, двустворок и микрофауны, интервал с биостратиграфической информацией охватывает больше половины разреза свиты (10 м при общей мощности свиты около 16 м) [11]. В скважине Ярайнерская 23 из георгиевской свиты известны лишь находки фораминифер, определяемые до рода [11].

Нижняя часть баженовской свиты. В охарактеризованных материалами ГИС разрезах палеонтологические определения имеются по 17 скважинам на 13 площадях (рис. 1). Аммониты найдены в керне скважин Александровского свода (Вахская 32, Колик-Еганская 148, Пермьяковская 42, 64, Эниторская 971), северной части Хантейской гемиантеклизы (Дружная 161, Янчинская 71, Северо-Варьеганская 52, Варьеганская 11, Тагринская 55, 70), Пякупурско-Ампутинского наклонного мегапрогиба (Выинтойская 191, Ортъягунская 15) и Среднепурского наклонного мегажелоба (Северо-Еркальская 161). Наибольшее количество двустворок (преимущественно бухий) обнаружено в керне скважин Александровского свода (Вахская 18, Колик-Еганская 148, Эниторская 971). Единичные находки – в пределах Пякупурско-Ампутинского наклонного мегапрогиба (Ортъягунская 15), северной части Хантейской гемиантеклизы (Тагринская 55) и восточной части Южно-Надымской мегамоноклизы (Ярайнерская 23). Белемниты найдены в керне скважин Александровского свода (Пермьяковская 59 и Эниторская 971), однако представлены лишь фрагментами ростров. Динокомплексы выявлены только в разрезе скважины Ярайнерская 23, расположенной в пределах восточной части Южно-Надымской мегамоноклизы [11].

Верхняя часть баженовской свиты. В охарактеризованных материалами ГИС разрезах палеонтологические определения имеются по 10 скважинам на восьми площадях (рис. 1). Аммониты определены преимущественно в северной части Александровского свода (Колик-Еганская 6, 148; Пермьяковская 42 и Эниторская 971) и на прилегающей Караминской мегаседловине (Ларьякская 1), а также в отдельных скважинах Хантейской гемиантеклизы (Северо-Покачевская

98) и Южно-Надымской мегамоноклизы (Южно-Ярайнерская 51). Находками двустворок охарактеризована северная часть Александровского свода (Колик-Еганская 148, Эниторская 971), восточная часть Южно-Надымской мегамоноклизы (Ярайнерская 12, 23, Южно-Ярайнерская 51) и Варьеганско-Тагринский межавыступ Хантейской мегантеклизы (Южно-Ягунская 84). Большинство из этих находок представлены бухиями, однако из-за различной степени сохранности раковин не все из них могут быть идентифицированы до видового уровня, что имело бы биостратиграфическое значение.

Баженовская свита в целом наиболее полно (до 80% разреза) охарактеризована фауной в разрезах скважин Колик-Еганская 148 и Эниторская 971 северной части Александровского свода (рис. 2). Результаты недавних комплексных исследований, включавших анализ материалов литологических исследований керна и ГИС, позволили в разрезах этих скважин датировать отдельные пачки и слои баженовской свиты [13]. Однако самые низы баженовской свиты, как и георгиевская свита, в обеих скважинах лишены находок фоссилий.

Необходимо отметить, что отдельные определения фауны из керна скважин зачастую не дают однозначной информации о возрасте интервалов разреза, в которых она была найдена. Часто при плохой сохранности удастся определить остатки только до уровня рода или даже семейства. Более уверенно определять возраст толщ по керну скважин позволяет анализ последовательности фаунистических комплексов. Вместе с тем, следует иметь в виду, что по целому ряду скважин на территории исследования имеется дополнительная палеонтологическая информация, которая в данной работе не рассматривается в связи с отсутствием материалов для комплексного (литология и/или ГИС) анализа.

Заключение

Баженовская свита к настоящему времени характеризуется относительно высокой степенью комплексной геофизической, лито- и биостратиграфической изученности в северной части Александровского свода. На остальной территории района исследований охарактеризованы лишь отдельные интервалы этой свиты. Сведения о комплексной характеристике георгиевской свиты, по сути, ограничены Южно-Ярайнерской площадью, расположенной в части Южно-Надымской мегамоноклизы, прилегающей с запада к Среднепурскому наклонному мегажелобу. В дальнейшем планируется привлечь всю имеющуюся разрозненную информацию (литология, ГИС, палеонтология) по зоне сочленения Хантейской гемантеклизы и Куржинской гряды для совершенствования критериев выделения свит и их частей.

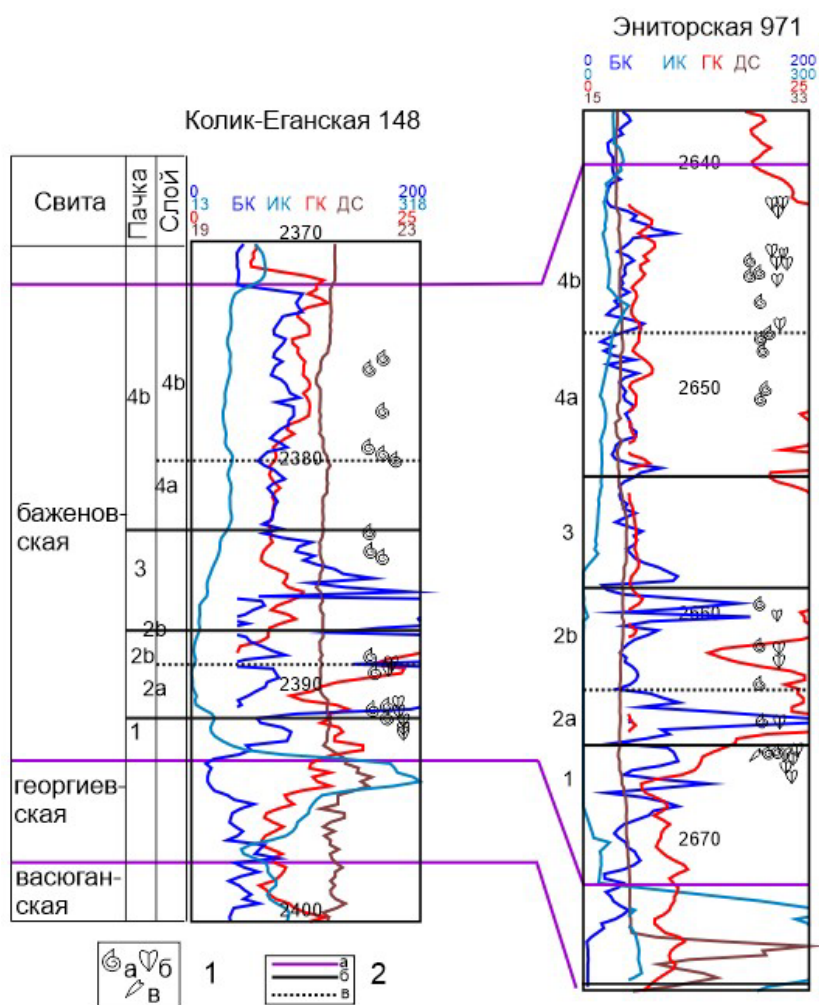


Рис. 2. Стратиграфо-геофизическая характеристика верхнеюрских–нижнемеловых отложений скважин Колик-Еганская 148 и Эниторская 971
Условные обозначения: 1 – фауна: а) аммониты, б) двустворки, в) белемнит; 2 – границы по ГИС: а) свит, б) пачек, в) слоев.

Благодарности

Исследование финансировалась за счет средств бюджета организации в рамках выполнения проектов FWZZ-2026-0048 и FWZZ-2026-0033 ИНГГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжкова С.В., Фомин М.А. Зонирование баженовского резервуара Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2025. – № 46. – С. 139-155.
2. Временное методическое руководство по подсчету запасов нефти в трещинных трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Недропользование XXI век. – 2017. – № 4. – С. 68-101.
3. Рыжкова С.В., Бурштейн Л.М., Ершов С.В., Казаненков В.А., Конторович А.Э., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Никитенко Б.Л., Фомин М.А., Шурыгин Б.Н., Бейзель А.Л., Борисов Е.В., Золотова О.В., Калинина Л.М., Пономарева Е.В. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 7. – С. 1053-1074.

4. Рыжкова С.В., Вакуленко Л.Г., Казаненков В.А., Борисов Е.В., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Пономарева Е.В., Фомин М.А., Ян П.А. Фациально-стратиграфическое районирование келловей-кимериджских отложений Западно-Сибирского осадочного бассейна // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 3. – С. 409-421.
5. Сапьяник В.В., Предтеченская Е.А., Кроль Л.А., Зайцева Ю.Л., Хилько А.П., Павлухин И.С. Системно-исторический подход к прогнозу нефтеперспективных объектов в зоне сочленения баженовской и марьяновской свит // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 3. – С. 29-45.
6. Староселец Д.А., Смирнов П.В. Яновстанская свита Западной Сибири: литология, строение и корреляция отложений // Литосфера. – 2024. – Т. 24. – № 1. – С. 63-80.
7. Панченко И.В. Детальное расчленение нефтеносной верхнеюрской-нижнемеловой черносланцевой толщи Западной Сибири по данным лито-, био-, хемо- и тейфростратиграфии // Стратиграфические исследования Геологического института РАН в первой четверти XXI века (новые проблемы и их решение) / Отв. ред. Ю.Б. Гладенков. – М.: ГЕОС, 2025. – С. 171-198. (Тр. ГИН. – Вып. 638.)
8. Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Зайчикова Е.В., Вакуленко Л.Г., Сотнич И.С. О критериях границы георгиевской и баженовской свит на юге Западно-Сибирского осадочного бассейна // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. – Т. 2. – № 1. – С. 251-257.
9. Рыжкова С.В., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Сотнич И.С., Фомин М.А., Эдер В.Г. Характеристика продуктивного интервала баженовской свиты в юго-восточных районах Западной Сибири (на примере Западно-Квензерской площади) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2022. – Т.17. – №4. – http://www.ngtp.ru/rub/2022/34_2022.html
10. Маринов В.А., Меледина С.В., Дзюба О.С., Урман О.С. Биостратиграфия верхней юры и нижнего мела центральной части Западной Сибири // Новости палеонтологии и стратиграфии. Вып. 12. Прил. к журналу "Геология и геофизика". – 2009. – Т. 50. – С. 119-142.
11. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятов В.П., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К. Стратиграфия нефтегазоносных районов Сибири. Юрская система. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2000. – 480 с.
12. Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Дзюба О.С., Замирайлова А.Г. Литостратиграфия и обстановки седиментации баженовской свиты (Западная Сибирь) в центральном, юго-восточном и северном районах ее распространения // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2022. – Т. 30. – № 5. – С. 46-74.
13. Рыжкова С.В., Дзюба О.С., Замирайлова А.Г. Строение баженовской свиты северного окончания Александровского свода, Западная Сибирь // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: Материалы науч. онлайн-сессии, 20–23 апреля 2026 г. [электронный ресурс] / Под ред. Б.Н. Шурыгина, О.С. Дзюба, О.Б. Кузьминой. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2026. – С. 157-162.
14. Фомин М.А., Сайтов Р.М. Типы разрезов и перспективы нефтеносности баженовской свиты в Надым-Обском междуречье // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 2-11.
15. Немова В.Д. Литогенетическая классификация пород и техноморфизм отложений баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Автореф. дисс. ... доктора геол.-минерал. наук. – Москва, 2021. – 51 с., с прил.
16. Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. Тектоническое строение и история тектонического развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 11–12. – С. 1832-1845.

© С. В. Рыжкова, О. С. Дзюба, А. Г. Замирайлова, 2026

А. С. Сальников^{1✉}, В. М. Соловьев², В. С. Селезнев³, А. Е. Шенмайер²

Глубинные сейсмические исследования на восточной окраине архейского Сибирского кратона (в створе опорного профиля 3-ДВ)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Сейсмологический филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: assalnikov@mail.ru

Аннотация. В работе представлена геолого-геофизическая модель земной коры, полученная с использованием новой технологии глубинных сейсмических зондирований на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ, выполненного на северо-востоке Евразии. Средние скорости продольных волн в земной коре изменяются вдоль профиля от 6.4 км/с до 6.8 км/с, граничная скорость - от 7.7 до 8.5 км/с. Мощность земной коры меняется от 40-45 км до 50-55 км.

Ключевые слова: опорные профили, мощные вибраторы, коррелограмма, глубинные сейсмические разрезы, земная кора, поверхность Мохоровичича

A. S. Salnikov^{1✉}, V. M. Soloviev², V. S. Seleznev³, A. E. Shenmayer²

Deep seismic research on the eastern edge of the Archean Siberian craton (in the 3-DV reference profile)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Altai-Sayan Branch GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³Seismological Branch GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: assalnikov@mail.ru

Abstract. The paper presents a geological and geophysical model of the Earth's crust obtained using a new technology of deep seismic sounding on the Central section of the 3-DV reference profile in northeastern Eurasia. The average velocities of longitudinal waves in the Earth's crust vary along the profile from 6.4 km/s to 6.8 km/s, and the boundary velocity ranges from 7.7 to 8.5 km/s. The thickness of the Earth's crust varies from 40-45 km to 50-55 km.

Keywords: profiles, powerful vibrators, correlogram, deep seismic section, the Earth's crust, the Moho

Введение

В России изучение глубинного строения земной коры на всю ее мощность носит системный характер и осуществляется в рамках региональных геолого-геофизических исследований по сети опорных геолого-геофизических профилей, пересекающих практически все крупные геологические структуры Северо-Восточной Евразии [1].

Одним из этих профилей является опорный профиль 3-ДВ (п. Сквородино – зал. Шелихова) протяженностью около 2900 км, пересекающий структурные элементы, определяющие современную геодинамику Центральной Азии: Евразийскую, Амурскую и Охотоморскую литосферные плиты. Учитывая его значительную протяженность, профиль состоит из четырех участков: Южный (0-700 км), Центральный (700-1400 км), Северо-западный (1400-2100 км), Северо-восточный (2100-2700 км и рассечка 200 км) (рис. 1).

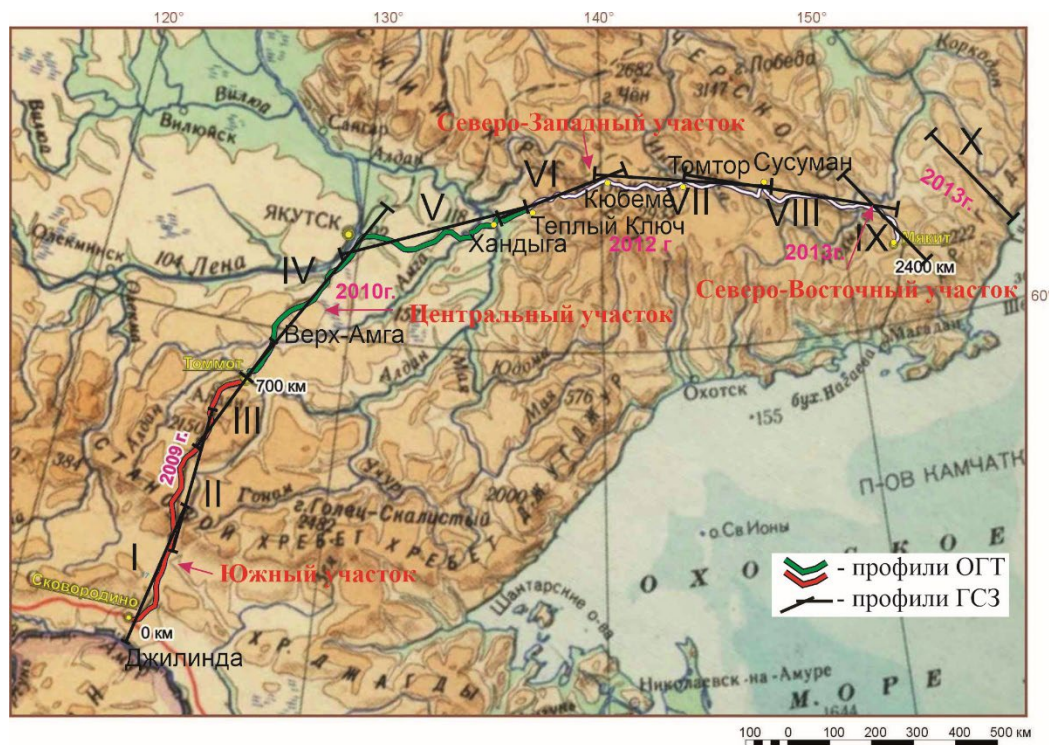


Рис. 1. Схема расположения Центрального участка профиля 3-ДВ

Для изучения глубинного строения Земли на опорных профилях используется комплекс геолого-геофизических методов, в том числе глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ). Часть результатов этих работ была ранее опубликована в ряде статей. Так, структуры области сочленения восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса с южной частью Сибирской платформой освещены в работах [2, 3 и др.], строение зоны сочленения Северо-Азиатского кратона и юго-восточной части Верхояно-Колымского орогенного пояса рассматривалась в работах [4, 5 и др.], а строению последнего посвящены работы [4, 6 и др.].

Материалы ГСЗ по Центральному участку профиля 3-ДВ, освещающие глубинное строение юго-востока Сибирской платформы, включающего северо-восточное окончание Алданской гранулит-гнейсовой области и Верхоянский складчато-надвиговой пояс, до настоящего времени не публиковались. В данном докладе восполняется этот пробел.

Методы и материалы

Полевые исследования методом ГСЗ были выполнены на 800 километровом Центральном участке профиля 3-ДВ от п. Томмот до г. Якутск (450-километровая расстановка 4) и от г.Якутск до п.Теплый ключ (350-километровая расстановка 5), проходящего вдоль федеральной трассы М-056 (рис. 1).

Была реализована достаточно плотная система наблюдений. Расстояния между источниками возбуждения составляли в среднем 15-30 км, между приемниками - 4-6 км. Обработка источников возбуждения осуществлялась взрывным и вибрационным способом. В качестве регистрирующей аппаратуры применялись 24-разрядные станции «Роса-А» и «Байкал-АС» с группами вертикальных и трехкомпонентных приборов. Координаты установки сейсмоприемников и источников возбуждения определялись с использованием GPS-приемников.

Детальный анализ волнового поля показывает, что на записях уверенно выделяются волны в первых вступлениях от границ в верхней части земной коры (осадочного чехла), поверхности кристаллических пород и поверхности Моховичича (рис. 2).

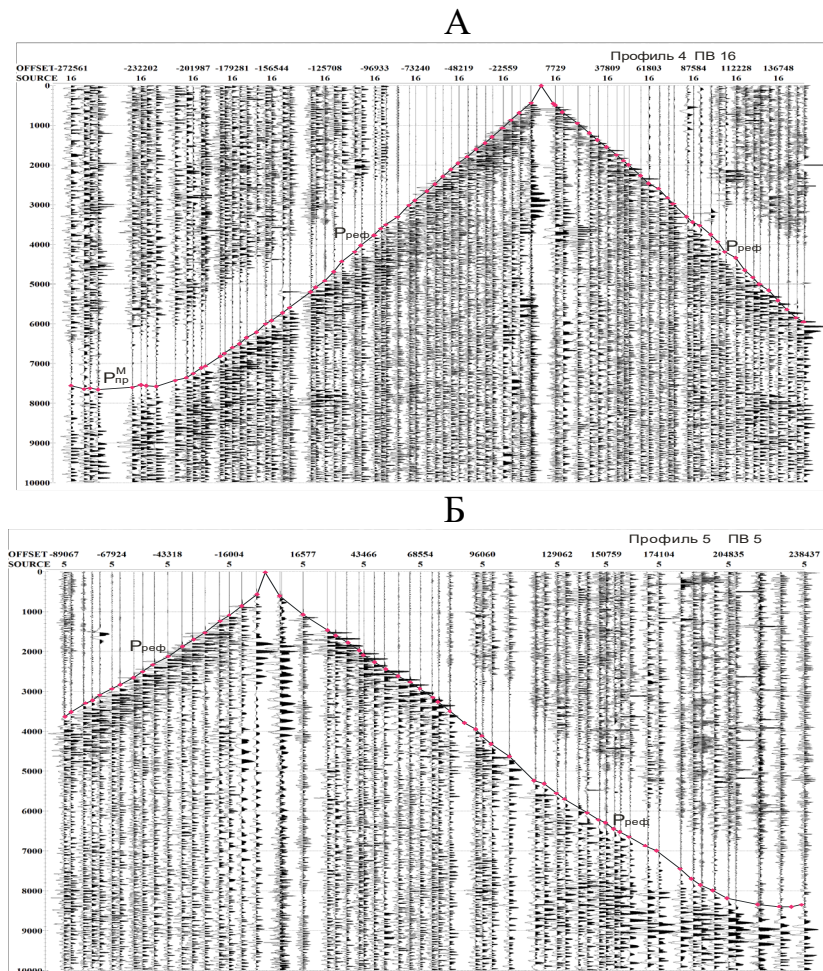


Рис. 2. Примеры динамических годографов от взрывного источника на расстановках 4 (А) и 5 (Б) профиля 3-ДВ (Центральный участок)

Скорости Р-волн в первых вступлениях на удалениях 0 – 10÷15 км в целом изменяются от 3.0 до 5.6-5.8 км/с (рис. 3). На базах свыше 10-15 км скорости продольных волн по годографам возрастают до 6.0 - 6.10 км/с. Уверенное прослеживание первых волн с кажущимися скоростями 6.0-6.1 км/с продолжается до удалений в 60-70 км. На больших удалениях (80-120 км) практически на всех годографах первых волн (только с разных удалений) отмечается уменьшение кажущихся скоростей на 0.2-0.3 км/с. На удалениях свыше 100 – 160 км кажущиеся скорости продольных волн по годографам снова возрастают до значений 6.4 – 6.7 км/с, соответствующим скоростям продольных волн в средней и нижней коре. На удалениях свыше 200-220 км в первых вступлениях начинают регистрироваться волны с высокими значениями кажущихся скоростей в 8.0-9.0 км/с, по кинематическим, динамическим характеристикам и области прослеживания отнесенным к преломленным волнам от поверхности Мохоровичича (P_{np}^M -волнам). Нагоняющие годографы (достроенные с использованием начальных точек отраженных волн) параллельны и увязываются во взаимных точках по системам встречных и нагоняющих годографов.

По выделенным в результате анализа волнового поля группам продольных преломленных волн построены сводные годографы в прямом и встречном направлениях и увязаны во взаимных точках (рис. 3). Интерпретация волн в первых вступлениях проводилась способом сейсмической томографии на временных задержках рефрагированных волн [7].

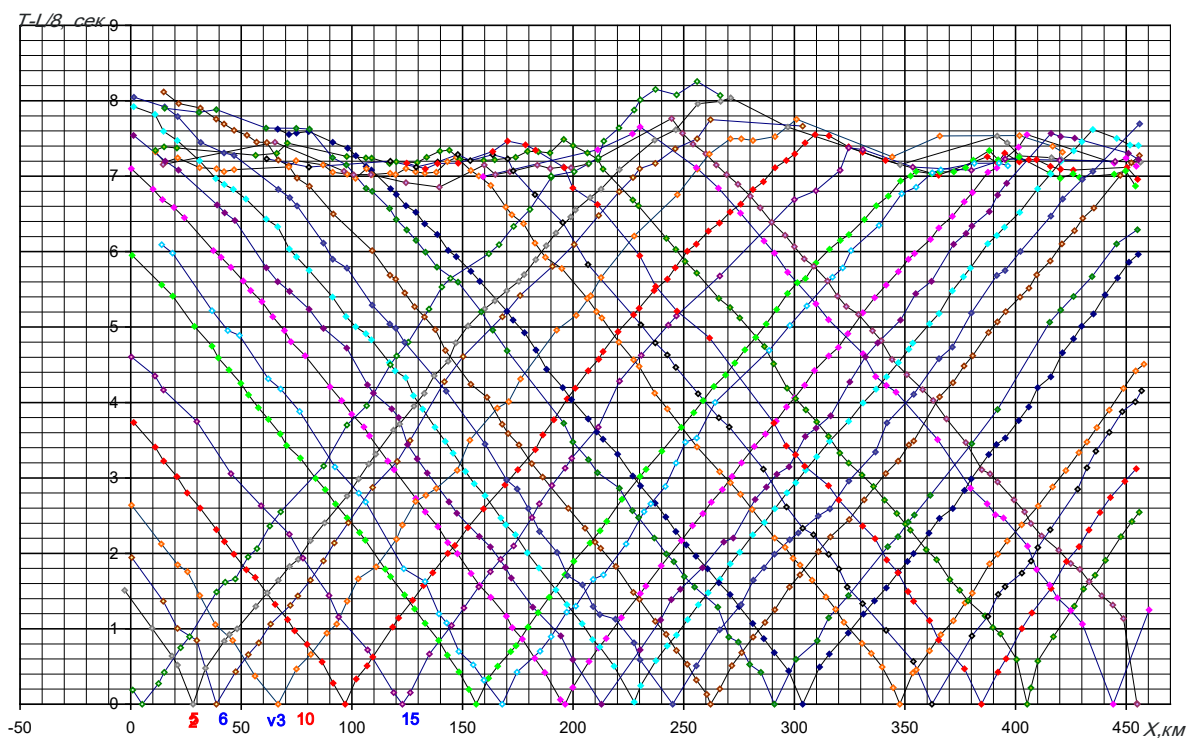


Рис. 3. Редуцированные годографы продольных преломленных волн по расстановке 4 профиля 3-ДВ (Центральный участок)

Наряду с интерпретацией по способу двумерной сейсмической томографии отдельно проводилась интерпретация данных преломленных волн от поверхности Мохоровичича. По годографам $P_{пр}^M$ -волн были определены графики значений кажущихся скоростей в прямом и встречном направлениях, осредненные значения кажущихся скоростей и граничные скорости (с учетом сейсмического сноса). По данным отраженных волн от поверхности Мохоровичича построены сводные редуцированные годографы отраженных волн в квадратичных координатах и поля времен отраженной волны. Глубины до поверхности Мохоровичича на исследуемых профилях определялись с использованием данных отраженных и преломленных волн от границы М.

Результаты

Обобщенный глубинный сейсмический разрез по опорному профилю 3-ДВ (Центральный участок) составлен на основе данных сейсмотомографического разреза земной коры, определения положения поверхности Мохоровичича по данным головных и закритических отраженных волн и освещает строение земной коры и верхи мантии до глубины около 60 км (рис. 4).

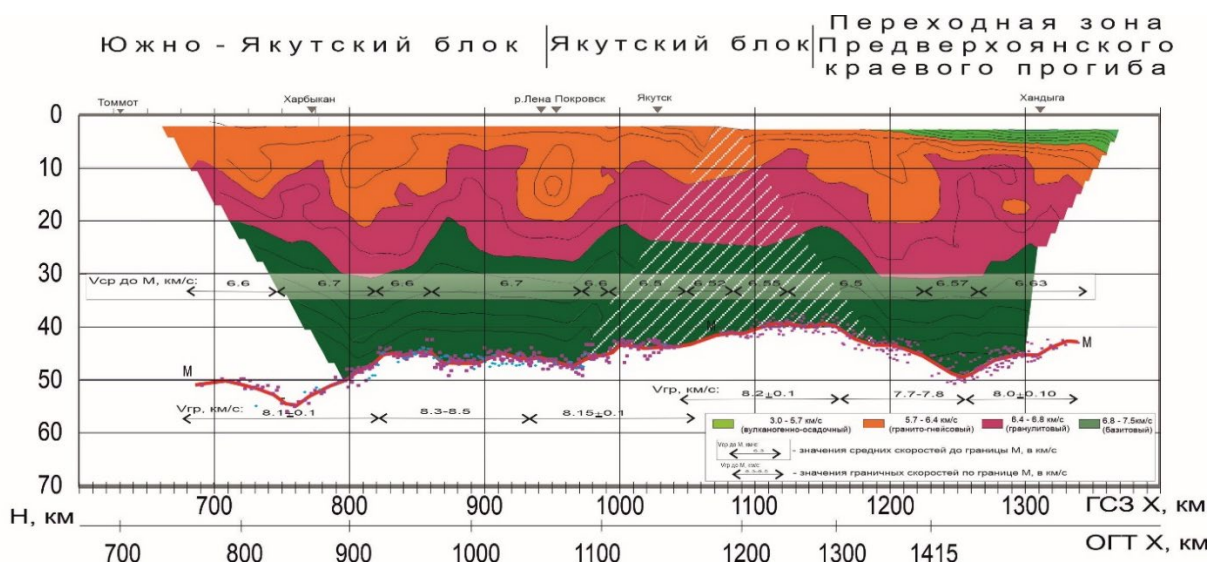


Рис. 4. Геолого-геофизический разрез по Центральному участку профиля 3ДВ (п.Томмот-п.Н.Бестях – п.Теплый Ключ).

Основанием разреза является поверхность Мохоровичича, которая прослежена как отраженными, так и преломленными волнами. Средняя скорость распространения сейсмических волн до нее составляет 6.5-6.7 км/с. Граничная скорость вдоль профиля меняется от 7.7 до 8.5 км/с. Пониженные значения скоростей ($V_{гр}=7.7-7.8$ км/с) установлены в области сочленения Якутского блока и Предверхоянского краевого прогиба ($X=1160-1255$ км), а повышенные ($V_{гр}=8.3-8.5$ км/с) установлены в зоне сочленения Южно-Якутского блока с Якутским блоком $X=820-935$ км.

Мощность земной коры по профилю изменяется от 40-45 км в центральной части профиля ($X=1000-1200$ км) до 50-55 км в северной ($X=1230-1270$ км) и южной ($X=690-810$ км) частях. Сильное увеличение глубины залегания поверхности Мохоровичича от 45 км до 55 км происходит в центральной части Южно-Якутского блока и от 40 км до 50 км в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба.

По характеру распределения скоростей в земной коре можно условно (как и ранее на участках профилей ГСЗ профиля 2ДВ, 2ДВ-А и 3ДВ (Южный участок) [2, 8] выделить 4 слоя.

Нижний – базитовый, характеризуется значениями скоростей от 6.8 до 7.4-7.6 км/с. Мощность его на освещенном участке профиля 3ДВ изменяется от 14-16 км в центральной части Южно-Якутского блока ($X=815-830$ км) и в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба ($X=1190-1210$ км) до 22-28 км в пределах Южно-Якутского блока ($X=700-770$ км, $X=860-880$ км) и Якутского блока ($X=980-1010$ км). Повышение мощности базитового слоя в пределах Южно-Якутского блока привело к значительному увеличению скорости в земной коре до 6.6-6.7 км/с, отмечаемому здесь по данным отраженных волн от границы М. В данной зоне кровля базитового слоя приподнята до глубин 20 км.

На базитовом залегает слой со скоростями, характерными для гранулитовых пород ($V=6.4-6.8$ км/с). Мощность его на большей части профиля составляет 14-16 км. В отдельных частях ($X=760-780$ км, $X=870-930$ км, $X=1235-1300$ км и др.) отмечается столбообразное воздымание гранулитового слоя до глубин 6-10 км и общая мощность на этих участках достигает 20-22 км.

Гранулитовый слой перекрывается пачкой отложений, по скоростной характеристике ($V=5.8-6.4$ км/с) относимых ранее [2] к гранито-гнейсовым образованиям; мощность этого слоя на ряде участков отработанного профиля ($X=785-830$ км, $X=930-965$ км и $X=1185-1235$ км) достигает 20 км. Небольшая мощность гранито-гнейсового слоя в 3-5 км отмечается в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба ($X=1235-1300$ км) и в Южно-Якутском блоке ($X=870-930$ км), где повышены мощности гранулитового слоя.

На гранито-гнейсовом основании по всему профилю залегает пачка низкоскоростных пород ($V=3.2-5.8$ км/с). На томографическом разрезе она представлена лишь фрагментарно - в северной части профиля на глубинах 3-6 км. На других участках профиля по данным интерпретации преломленных продольных волн на малых удалениях (рис. 3.34) мощность низкоскоростного слоя составляет в целом 1.0-1.3 км. Лишь в центральной части Южно-Якутского блока его мощность минимальна и составляет около 500 м.

Средние скорости продольных волн в земной коре, рассчитанные по томографическим разрезам по данным рефрагированных волн (рис. 4), изменяются вдоль отработанных профилей 4 и 5 от 6.4 км/с до 6.8 км/с (от 6.6 км/с до 6.8 км/с на профиле 4 и от 6.4 км/с до 6.55 км/с на профиле 5) и неплохо (с точностью до 0.1 км/с) коррелируют с данными отраженных волн от поверхности Мохоровичича (рассчитанные по центрам зондирования поля времен). Наблюдаемые же различия в 0.1 км/с связаны с интегральным (осредняющим для протяженного блока)

определением скоростей по центрам зондирований отраженных волн, в отличие от расчета скорости напрямую по разрезу по вертикали.

Заключение

В результате проведенных работ методом ГСЗ на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ протяженностью около 800 км выполнен детальный анализ зарегистрированного волнового поля от мощных виброисточников и взрывов, охарактеризовано глубинное строение земной коры и верхней мантии юго-востока Сибирской платформы.

Средние скорости продольных волн в земной коре изменяются вдоль отрабатанных расстановок 4 и 5 от 6.4 км/с до 6.8 км/с (от 6.6 км/с до 6.8 км/с на расстановке 4 и от 6.4 км/с до 6.55 км/с на расстановке 5).

Граничная скорость вдоль профиля меняется от 7.7 до 8.5 км/с. Пониженные значения скоростей ($V_T=7.7-7.8$ км/с) установлены в области сочленения Якутского блока и Предверхоянского краевого прогиба, а повышенные ($V_T=8.3-8.5$ км/с) установлены в зоне сочленения Южно-Якутского блока с Якутским блоком.

Мощность земной коры меняется от 40-45 км до 50-55 км, при этом сильное увеличение глубины залегания поверхности Мохоровичича от 45 км до 55 км происходит в центральной части Южно-Якутского блока и от 40 км до 50 км в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также в рамках проекта FWZZ-2026-0050 «Сейсмогравитационные неоднородности земной коры Сибири в связи с ее напряженным состоянием, признаками сейсмичности и разработка интерактивных вычислительных технологий построения разномасштабных структурно-скоростных сейсмических моделей».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 9–21.
2. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сержников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Востоке России / Проблемы информатики. –Новосибирск, 2013, № 3. –С.30-41.
3. Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В. Сейсмические неоднородности верхней и всей коры Алдано-Станового щита (профиль 3-ДВ) / Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 1. С. 1-14.
4. Соловьев В.М., Сальников А.С., Тимофеев В.Ю., Шибяев С.В., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е. Глубинные сейсмические исследования на субширотном трансекте Хандыга-

Сусуман-Мякит в области сочленения Евразийской, Североамериканской и Охотоморской континентальных плит / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2014. –С.65-70.

5. Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая модель зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (опорный профиль 3-ДВ) / Физика Земли. 2021. № 6. С. 52-67.

6. Суворов В.Д., Мельник А.Е., Павлов Е.В., Сальников А.С. Моделирование структуры земной коры Сибири и Дальнего Востока по данным широкоугольной сейсмики и гравиметрии вдоль профиля 3-ДВ // Тезисы докладов 7^й Международной конференции и выставке «Санкт-Петербург-2016. Через интеграцию геонаук — к постижению гармонии недр», 11-14 апреля 2016 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург, EAGE. 2016. P017.

7. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x, l)$ рефрагированных волн. Численные методы в сейсмических исследованиях. -Новосибирск, «Наука», 1993, с.140-152.

8. Павленкова Н. И., Кашубин С. Н., Павленкова Г. А. Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования / Физика Земли, 2016, № 5, с. 150–164

© А. С. Сальников, В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, 2026

А. И. Седых^{1✉}, Л. В. Маркович¹, А. Н. Козырев¹

Обоснование параметров оценки локализованных ресурсов терригенного комплекса центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: shanginaan@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На основании анализа данных государственного баланса запасов полезных ископаемых Российской Федерации были построены распределения залежей нефти и газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по открытой пористости, пластовому давлению и температуре, площади нефтегазоносности, нефтегазонасыщенным толщинам, по коэффициентам нефтегазонасыщенности.

Ключевые слова: Восточная Сибирь, Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция, оценка ресурсов, нефть, свободный газ

A. I. Sedykh^{1✉}, L. V. Markovich¹, A. N. Kozyrev¹

Assessment parameters for localized resources of the terrigenous complex in the central and southern regions of the Lena-Tunguska oil and gas province.

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shanginaan@ipgg.sbras.ru

Abstract. Based on the official materials oil and gas reservoir distribution by opened porosity, reservoir pressure and temperature, oil-bearing area, oil-saturated thickness, oil saturation factor, gas-bearing area, and gas-saturated thickness has been developed for the Vendian-Lower Cambrian terrigenous complex.

Keywords: Eastern Siberia, Lena-Tunguska oil and gas province, resource assessment, oil, free gas

Введение

Настоящее исследование направлено на обоснование подсчетных параметров при оценке локализованных ресурсов венд-нижнекембрийских комплексов Лено-Тунгусской НГО.

Согласно «Классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов», утвержденной приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.11.2013, ресурсы категории D_0 выделяются на подготовленных к бурению ловушках в районах с доказанной промышленной нефтегазоносностью и в не вскрытых бурением возможно продуктивных пластах открытых месторождений, к локализованным ресурсам категории $D_{\text{л}}$ относят ресурсы нефти, газа и конденсата возможно продуктивных пластов в ловушках, выявлен-

ных по результатам поисковых геологических и геофизических исследований в пределах районов с доказанной и предполагаемой промышленной нефтегазоносностью [Классификация запасов..., 2013; Комаров, 2023]. В большинстве случаев оценка ресурсов категории D_0 и D_L выполняется объемным методом.

Сущность объемного метода заключается в подсчете запасов или локализованных ресурсов нефти или свободного газа в насыщенных ими объемах пустотного пространства коллекторов (объемах залежей), приведенных к стандартным условиям. Для свободного газа это пересчет к давлению 0.1013 Мпа и температуре 20 °С, фактически выполняемый с учетом уравнения Ван-дер-Ваальса для неидеального газа. Для нефти приведение к нормальным условиям выполняется через пересчетный коэффициент, учитывающий усадку объемов нефти, содержащих в пластовых условиях растворенный газ и дегазированных применительно к стандартным условиям, а также плотность нефти в стандартных условиях [Гутман, Саакян, 2017].

Обычно коэффициенты объемной формулы обосновываются по результатам геолого-геофизических исследований смежных с объектом оценки залежей. При наличии представительной выборки залежей в исследуемом нефтегазоносном комплексе возможен альтернативный подход, при котором коэффициенты задаются через вероятностные распределения.

Методы и материалы исследования

Объектом исследования являлись залежи венд-нижнекембрийского терригенного комплекса. По материалам Государственного баланса запасов полезных ископаемых Российской Федерации проанализированы данные по 57 месторождениям (Республика Саха (Якутия), Иркутская область, Красноярский край), которые включают в себя 341 залежей в пределах венд-нижнекембрийского терригенного комплекса. Оценены распределения залежей по открытой пористости, пластовому давлению и температуре, площади нефтеносности, нефтенасыщенной толщине, по коэффициенту нефтенасыщенности, по площади газоносности, по газонасыщенной толщине.

Результаты

Согласно выполненным построениям наиболее вероятное (часто встречающееся) значение открытой пористостью находится в диапазоне от 0.11 до 0.13%. В целом открытая пористость варьирует в диапазоне 0.05 до 0.21% соответственно (рис. 1)

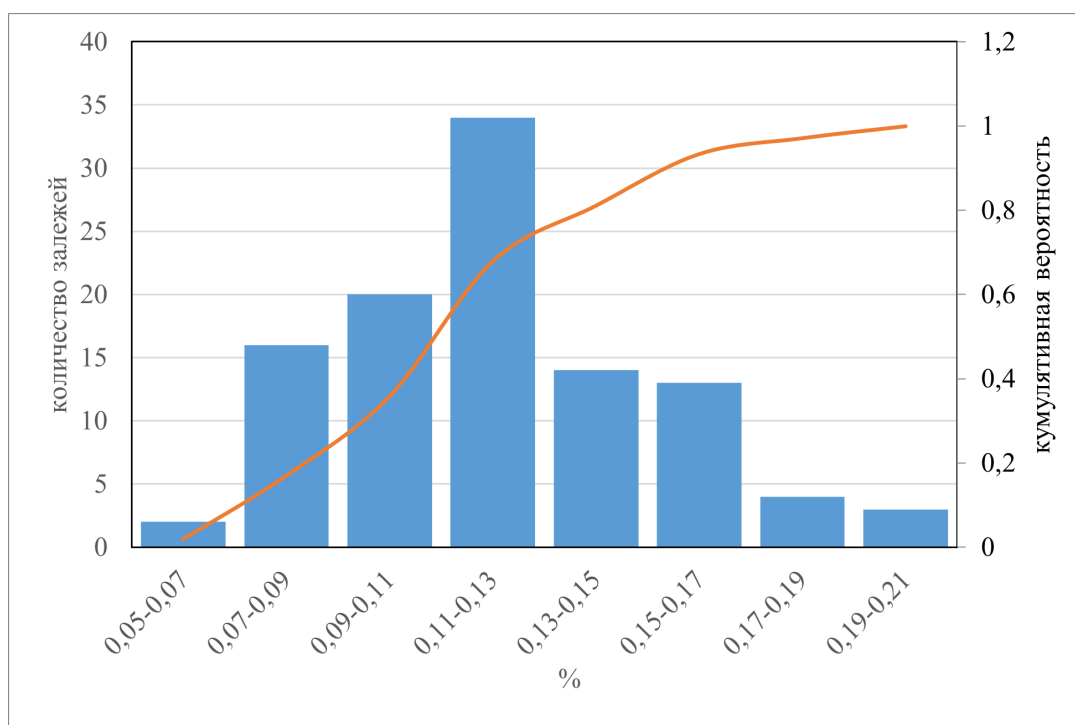


Рис 1. Распределение залежей нефти терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по открытой пористости

Наиболее вероятная площадь нефтеносности варьирует от 2 до 4 тыс м² (рис. 2).

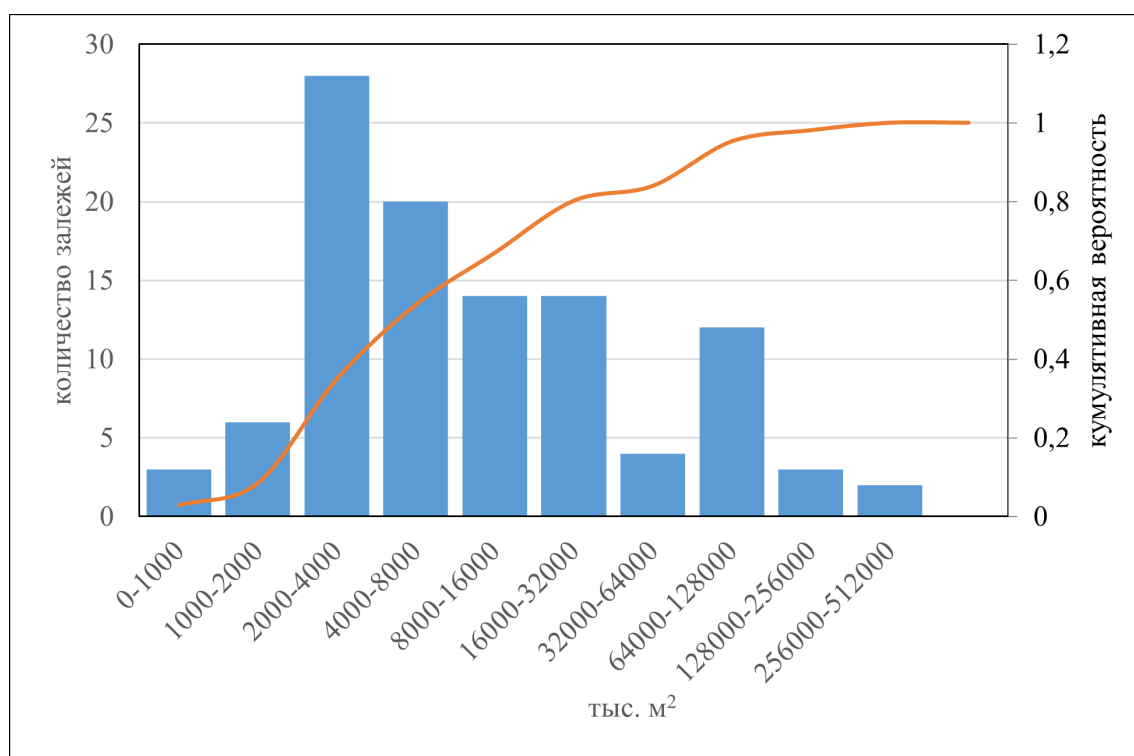


Рис. 2. Распределение залежей нефти терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по площади нефтеносности (логарифмическая шкала)

Часто встречающееся значение нефтенасыщенной толщины 3-5 метров (рис 3).

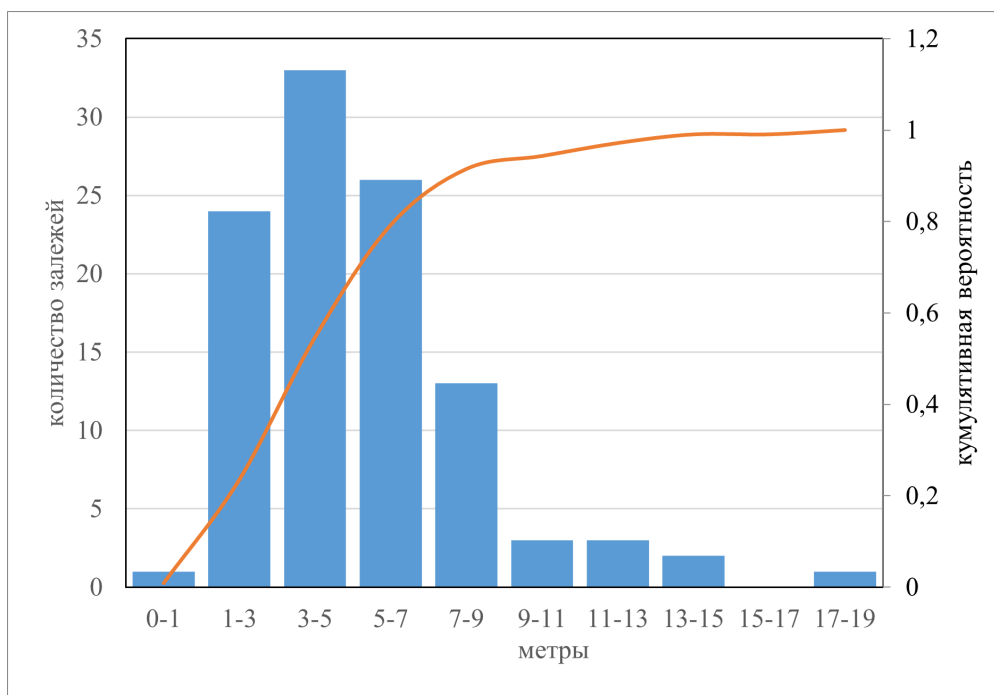


Рис. 3. Распределение залежей нефти терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по нефтенасыщенной толщине

Наиболее вероятное (часто встречающееся) значение коэффициента нефтенасыщенности имеет составляет 0.8 (рис. 4).

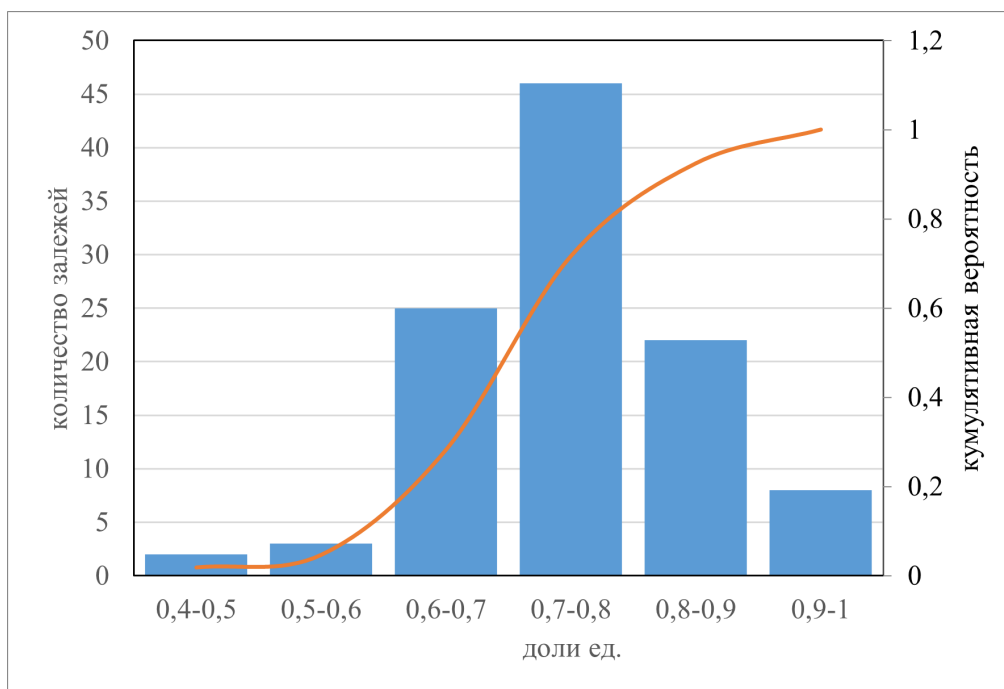


Рис. 4. Распределение залежей нефти терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по коэффициенту нефтенасыщенности

Наиболее вероятная площадь газоносности составляет 8-16 тыс м² (рис 5).

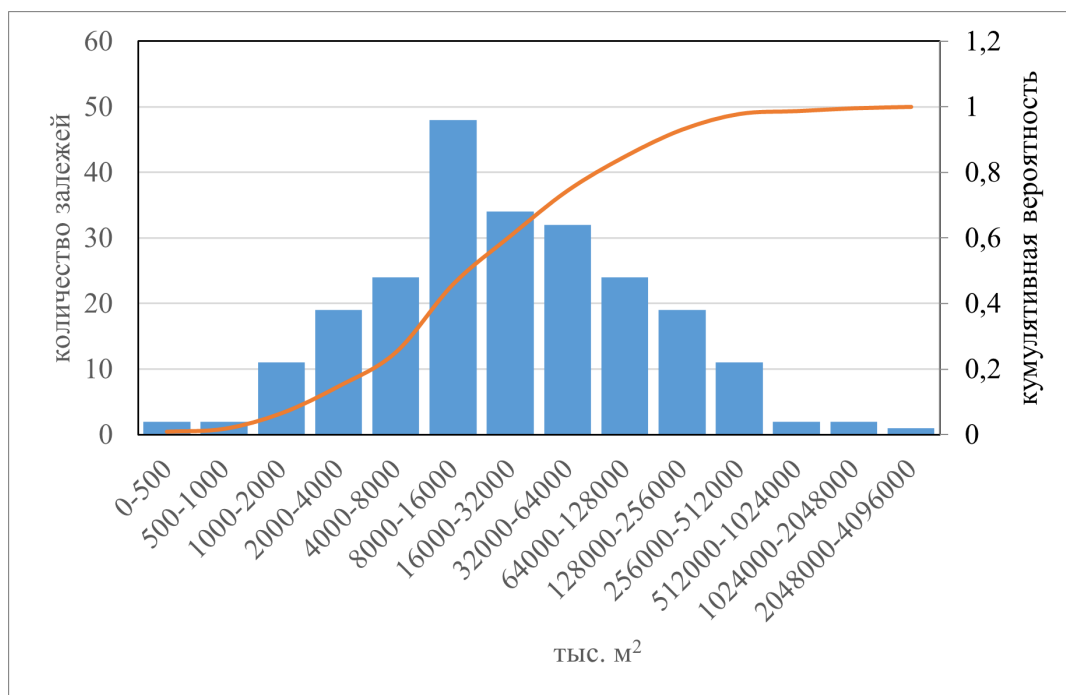


Рис. 5. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по площади газоносности (логарифмическая шкала)

Наиболее вероятная газонасыщенная толщина составляет 4-8 м (рис. 6).

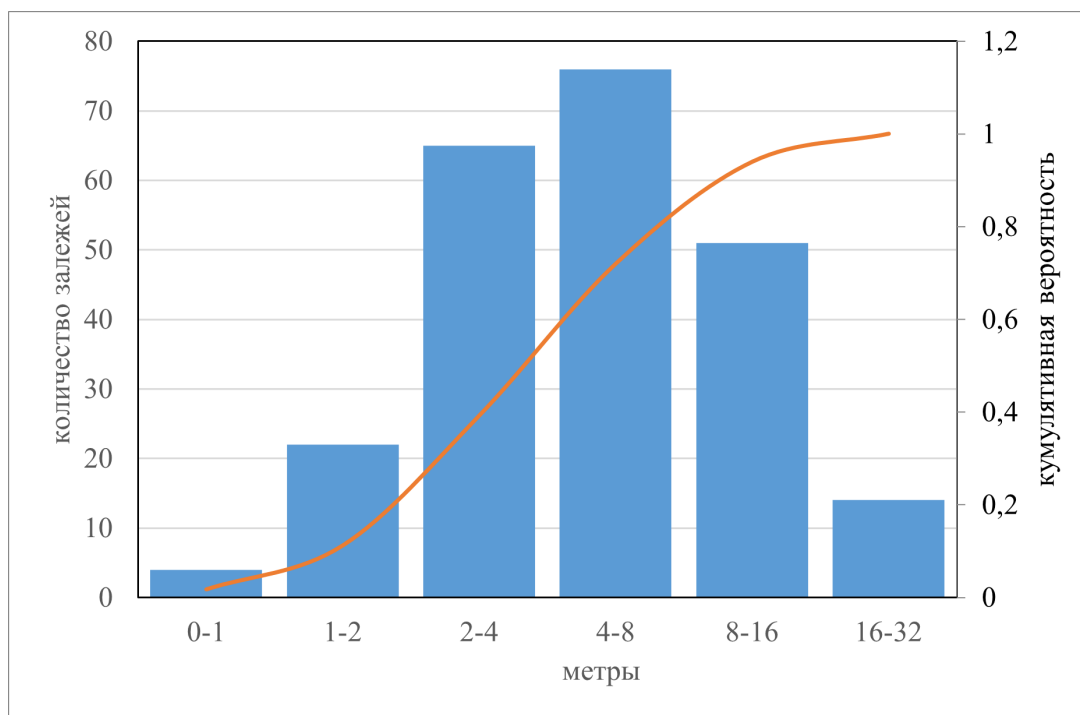


Рис. 6. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по газонасыщенной толщине (логарифмическая шкала)

Наиболее вероятное (часто встречающееся) значение открытой пористостью находится в диапазоне от 0.11 до 0.14 (рис. 7).

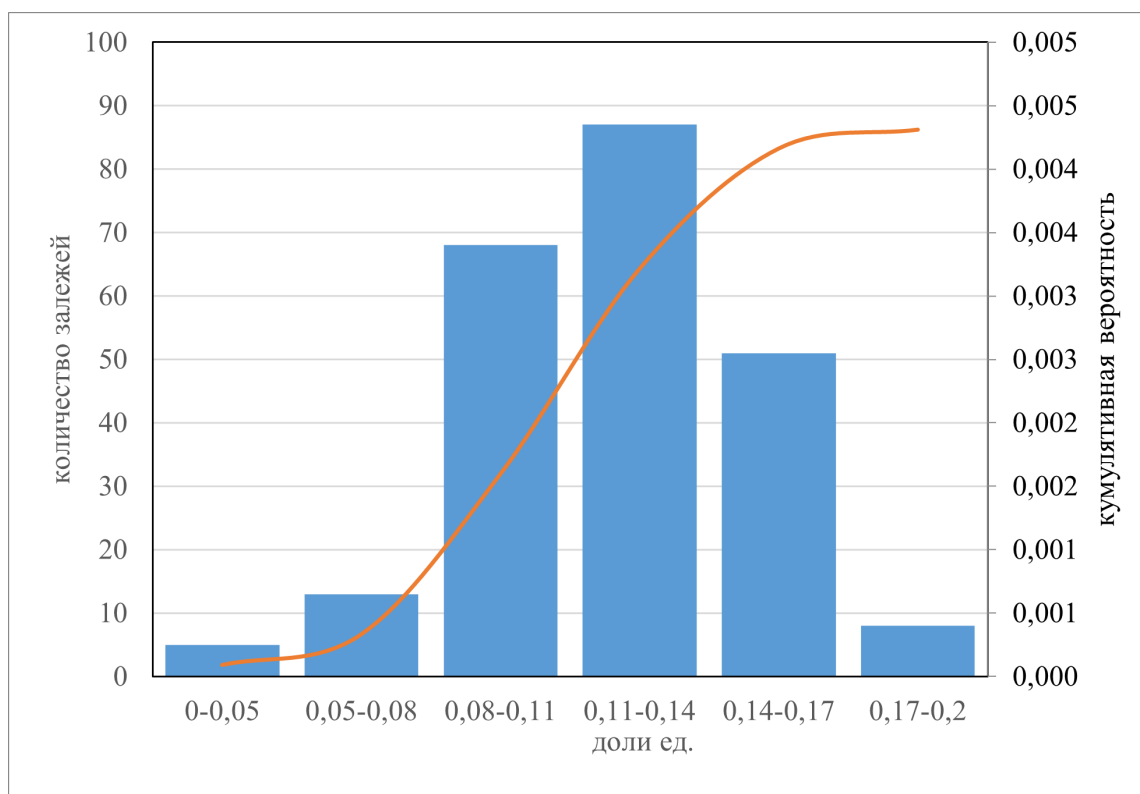


Рис. 7. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по открытой пористости

Проанализированы физические свойства залежей свободного газа. Пластовое давление варьирует в пределах 10-35 МПа*с. Наибольшее количество залежей характеризуются значением 10-15 МПа*с (рис. 8).

Пластовые температуры меняются в широком диапазоне 3-63°C (рис. 9). Наибольшее число залежей находятся в пределах 3-13°C.

Наиболее часто встречающееся значение газонасыщенности составляет 0.8 (рис. 10).

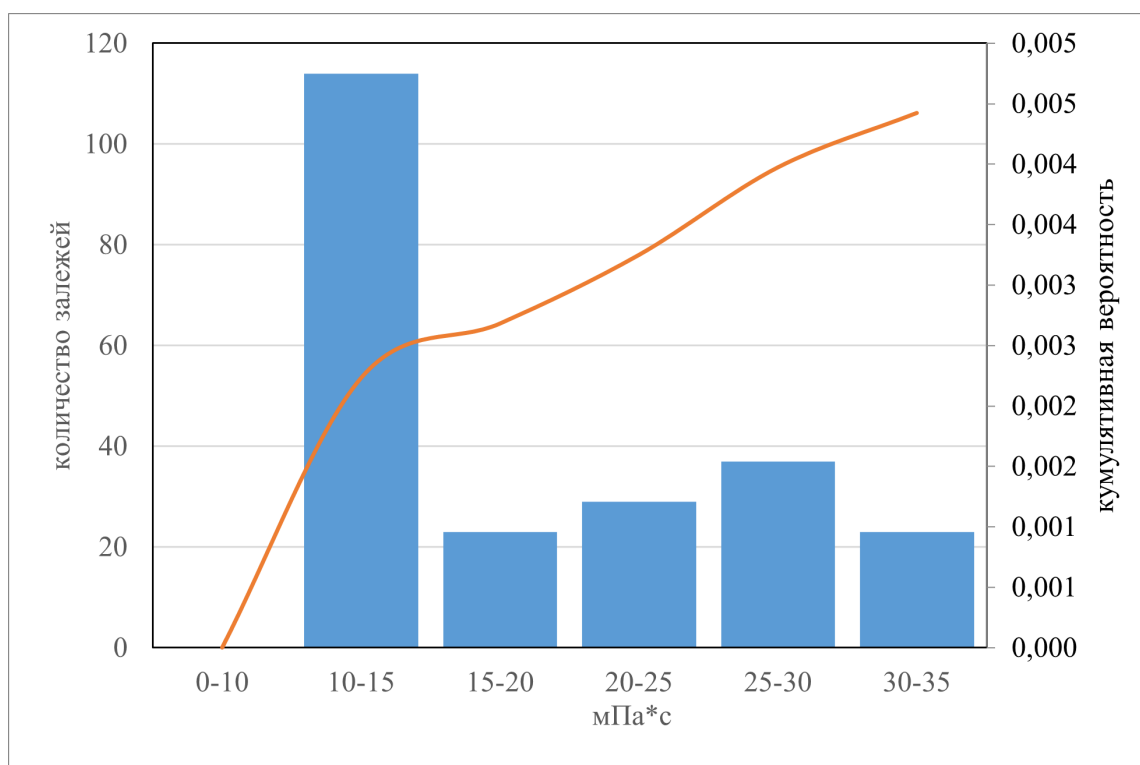


Рис. 8. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по пластовому давлению

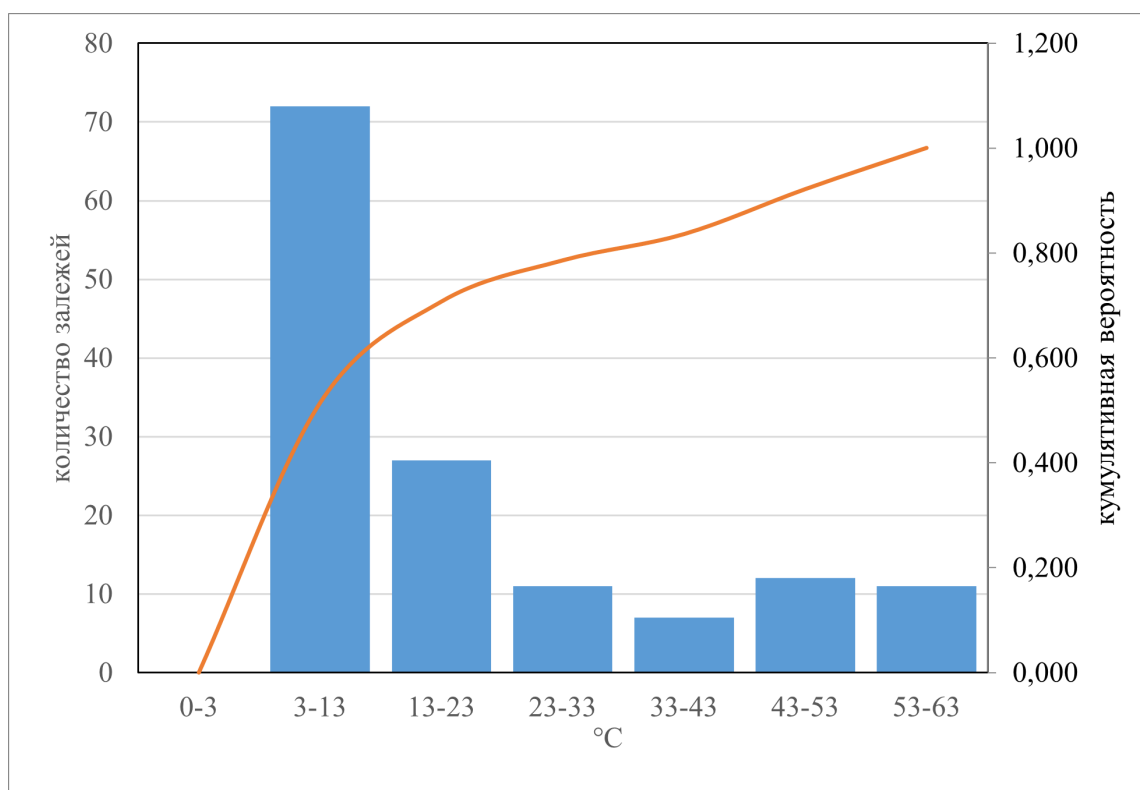


Рис. 9. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по пластовой температуре

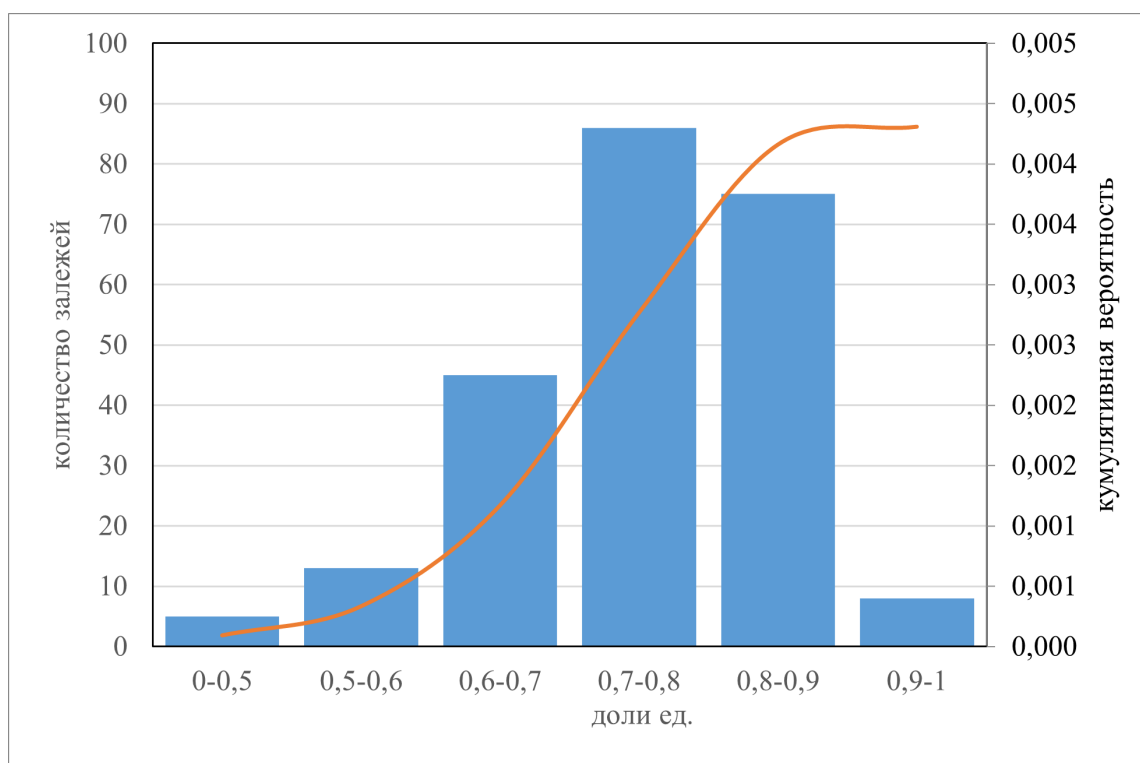


Рис. 10. Распределение залежей свободного газа терригенного комплекса венда-нижнего кембрия по газонасыщенности

Заключение

Таким образом сформирован набор эмпирических вероятностных распределений подсчетных параметров, которые могут использоваться при оценке локализованных ресурсов венд-нижнекембрийского комплекса центральных и южных районов Лено-Тунгуской нефтегазоносной провинции.

Работа выполнена в рамках темы FWZZ-2026-0045 Государственной программы ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гутман И. С., Саакян М.И., Методы подсчета запасов и оценки ресурсов нефти и газа. – М. – Недра, 2017 – 336с.
2. Классификация запасов и ресурсов нефти и горючих газов. Утверждена приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.11.2013 № 477.
3. Комаров, А. Ю. Оценка локализованных ресурсов малоизученных регионов: применение стохастического метода и его особенности / А. Ю. Комаров // Состояние и перспективы ГРП на нефть и газ на континентальном шельфе Российской Федерации : СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Санкт-Петербург, 01–02 июня 2023 года. Том Выпуск 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», 2023. – С. 31-32. – EDN FZLJXC.

© А. И. Седых, Л. В. Маркович, А. Н. Козырев, 2026

А. Ф. Сухорукова^{1✉}, Н. И. Яндола¹

Мониторинг радона в подземных водах Новосибирской городской агломерации

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассматривается годовое изменения концентрации радона в подземных водах двух водоносных комплексов трещиноватых пород: субщелочных гранитоидов и глинистых сланцев в районе г. Новосибирска. Проблема изменения концентрации радона в течение года в подземных водах, используемых для обеспечения населения питьевой водой или в бальнеологических целях, остается одной из самых малоизученных для этой группы вод. Для трех объектов, эксплуатирующих воды гранитоидов отмечены концентрации радона от 107 до 597 Бк/дм³, для централизованного водозабора в глинистых сланцах «Зырянка» от 13 до 97 Бк/дм³. Выявлена закономерность - концентрация радона в воде увеличивается в теплое время года для обоих водоносных комплексов. В связи с этим необходимо проводить работу по мониторингу концентраций радона, для учета и уменьшения долгосрочных рисков здоровью, информированию населения о мерах снижения содержания радона в воде.

Ключевые слова: подземные воды, концентрация радона, годовой мониторинг радона, город Новосибирск

A. F. Sukhorukova^{1✉}, N. I. Yandola¹

Radon monitoring in groundwater in the Novosibirsk urban agglomeration

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper examines annual changes in radon concentrations in groundwater in two aquifers of fractured rock: subalkaline granitoids and clay shales. The problem of annual radon concentration changes in groundwater used for drinking water or spa treatments remains one of the least studied in this group of waters. Radon concentrations ranging from 107 to 597 Bq/dm³ were recorded for three facilities exploiting granitoid water, while for the centralized water intake in the Zyryanka clay shales, they ranged from 13 to 97 Bq/dm³. A pattern has been identified: radon concentrations in water increase during the warmer months for both aquifer systems. Therefore, it is necessary to monitor radon concentrations to assess and mitigate long-term health risks and inform the public about measures to reduce radon levels in water.

Keywords: groundwater, radon concentration, annual radon monitoring, Novosibirsk

Введение

Изучение радоновых род как особого объекта подземной гидросферы проводятся уже не первое столетие во многих странах мира с различных точек зрения. Оценивается как отрицательное воздействие высоких концентраций радона,

так и положительное (бальнеологическое) воздействие радона на организм человека. При этом, необходимо отметить, что проблема изменения концентрации радона в течение года в подземных водах, используемых для обеспечения населения питьевой водой или в бальнеологических целях, остается одной из самых малоизученных для этой группы вод, которые, как известно, широко распространены в различных геолого-гидрологических условиях по всему миру. В последние годы во многих странах начали проводиться исследования по оценке изменения годовой эффективной концентрации радона в родниковых и грунтовых водах, в зависимости от геологического строения территории, сезонных климатических и неотектонических условий. В зарубежных публикациях особое внимание при этом уделяется необходимости информированию населения о способах снижения концентрации радона в питьевых водах [1-3]. В сейсмически активных районах выявляются вариации концентрации радона в подземных водах отражающие изменения регионального напряженного состояния [4]. Комплексные исследования химического и радионуклидного состава подземных вод района г. Новосибирска проводятся в лаборатории Гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири, начиная с 2018 года, получен большой объем фактического материала по радоновым водам и вмещающим породам [5-9]. В связи с этим, представляется актуальной оценка изменения концентрации радона в течение года в подземных водах четырех объектах разных гидрогеологических комплексов.

Методы и материалы

В период 2020-2023 годов сотрудниками лаборатории Гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН с целью годового мониторинга концентрации радона были отобраны 38 проб воды. Для трех объектов отбор проводился ежемесячно в течении года: месторождение «Тулинское» (скважина государственной клинической больницы №34); частная скважина в СНТ Аэрофлот-1; скважина для обеспечения нужд бетонного завода 4 моста через Обь (Четвертый мост), один раз в квартал для скважин водозабора «Зырянка» Новосибирского научного центра (рис.1а). Определение концентрации радона-222 осуществлялось на альфа-радиометре «Альфарад +» не позднее 2 суток после отбора проб. В настоящей работе также использованы: фондовые материалы ТФГИ по Сибирскому федеральному округу и ФГУП «Управления энергетики и водоснабжения» (ФГУП УЭВ) г. Новосибирска, а именно: более 150 замеров суммарных альфа и бета активностей, концентрации радона, сведения о среднесуточном водоотборе за период с 2002 по 2023 года для скважин водозабора «Зырянка». Гидрометеорологическая информация о количестве осадков в теплые и холодные периоды получена с сайта Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Геолого-гидрогеологические условия

В геологическом отношении территория города Новосибирска расположена в пределах области погружения Колывань-Томской складчатой зоны, которая является краевой структурой Алтае-Саянской складчатой области. В ее строении принимают участие близко залегающие слаботрещинчатые породы юргинской

свиты верхнедевонского возраста и залегающий на них комплекс четвертичных отложений надпойменных террас р. Оби и отложений краснодубровской свиты. На большей части территории в долине р. Оби, где отсутствует кора выветривания, подземные воды палеозойских пород гидравлически связаны с подземными водами аллювиальных отложений и эксплуатируются совместно. Водозабор «Зырянка» ННЦ расположен на III надпойменной террасе р. Оби, на берегу Новосибирского водохранилища, начиная с 1962 года эксплуатирует подземные воды палеозойских пород, представленные трещиноватыми девонскими глинистыми сланцами. Питание водоносного комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, подтока со стороны Приобского плато и подпора Новосибирского водохранилища.

В строении фундамента участвуют интрузивные образования представленные позднепермско-раннетриасовыми субщелочными комплексами гранитоидного состава. Под большей частью мегаполиса залегают породы второй фазы приобского комплекса Новосибирского гранитоидного массива (на глубинах от первых десятков до 100 и более метров). Массив является постоянно действующий источником эманации радона, который фиксируется в пониженных участках, цокольных и подвальных этажах, подземных сооружениях и, конечно, подземных водах. Скважины месторождение «Тулинское» СНТ Аэрофлот; «Четвертый мост» вскрывают и эксплуатируют трещинные воды гранитоидов, питание которых в большей степени осуществляется за счет более глубокозалегающих водоносных горизонтов, в меньшей степени за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока со стороны р. Обь (наиболее существенно для скважины «Четвертый мост»).

Мониторинг радона в подземных водах

Проведенные исследования концентрации радона в течении года в подземных водах города Новосибирска показали, что максимально высокие его значения отмечены, для объектов, эксплуатирующее водоносный горизонт субщелочных гранитоидов приобской фазы внедрения (таблица 1).

По результатам мониторинга выявлены следующие закономерности. Наибольшее содержание радона зафиксировано на объекте «Четвертый мост» в скважине глубиной 41 м (от 159 до 597 Бк/дм³), режим откачек в которой определяется производственными нуждами бетонного завода и непостоянен в течение года. В воде скважины (глубиной 153 м) «СНТ Аэрофлот-1» значения остаются устойчиво высокими (в диапазоне 196–352 Бк/дм³).

Таблица 1

Объект, год исследования	кол-во проб	Общая β активность, мБк/дм³	Концентрация радона, Бк/дм³	
			Теплый период: апрель-октябрь	Холодный период: ноябрь март
Водоносный комплекс трещиноватых субщелочных гранитоидов				
Месторождение «Тулин- ское», 2019-2020	11	80	107-247 188	110-276 201
«СНТ Аэрофлот-1», 2022-2023	12	855	224-352 289	196-325 250

Окончание табл. 1

Объект, год исследования	кол-во проб	Общая β активность, мБк/дм³	Концентрация радона, Бк/дм³	
			Теплый период: апрель-октябрь	Холодный период: ноябрь март
Водоносный комплекс трещиноватых субщелочных гранитоидов				
«Четвертый мост», 2023-2024	12	349	285-597 450	159-475 309
Водоносный комплекс трещиноватых глинистых сланцев				
Водозабор «Зырянка», 2002-2023	156	27	51-97 68	13-76 54

Примечание. В знаменателе диапазон значений, в числителе средние

Для вод «Тулинского» месторождения, которые вскрыты скважиной глубиной 176 м для обеспечения водолечебницы радоновыми водами, концентрация радона несколько ниже, чем у вышеназванных объектов и находится в пределах 107-276 168 Бк/дм³. Все объекты эксплуатируют водоносный горизонт трещиноватых субщелочных гранитов, но с разными целями: «СНТ Аэрофлот-1» для питьевого и хозяйственного водоснабжения частного домовладения; «Четвертый мост» для нужд бетонного завода; месторождение «Тулинское» для бальнеологического использования. Для всех исследованных вод отмечается колебание концентрации радона по месяцам, при этом отмечена тенденция увеличения его концентрации в теплый период года, по сравнению с холодным периодом, за исключением «Тулинского». Для вод «Тулинского» в течение года происходит хаотичное колебание содержания радона, при этом для 5 замеров из 11 радона содержится менее 185 Бк/дм³, что ниже чем необходимо для бальнеологических целей. Скважина пройдена непосредственно из подвального помещения водолечебницы на территории городской клинической больницы №34, которая практически вся занята сооружениями или заасфальтирована, что исключает инфильтрацию атмосферных осадков из процесса питания водоносного горизонта для конкретной скважины.

По данным Западно-Сибирского УГМС за холодный период выпадает 95 мм осадков, а за теплый 330 мм, что оказывает влияние на питание водоносного горизонта остальных изученных объектов и предположительно на концентрацию радона в воде. Возможным фактором влияния на концентрацию радона может служить водоотбор, увеличение которого в теплый период года также приводит к повышению концентрации радона, за счет подтягивания нижележащих объемов воды. Этим фактом можно объяснить увеличение концентрации радона в теплый период в скважине «СНТ Аэропорт-1», так как со слов хозяина, в теплое время года существенно увеличивается расход воды на полив приусадебного участка.

Новосибирский научный центр (ННЦ) г. Новосибирска с момента своего образования имеет централизованное водоснабжение за счет подземных вод, один из двух водозаборов «Зырянка» поставяет воду в коттеджную зону, на улицы Академическая, Золотодолинская, в также пос. Кирова и Геологов. приурочены к водоносному комплексу, представленному гидравлически взаимосвязанными

трещинными водами глинистых сланцев верхнего девона и водоносным горизонтом аллювиальных отложений р. Оби. Повышенное содержание радона в подземных водах водозаборного участка "Зырянка" является характерной чертой их качественного состава, концентрация которого изменяется в диапазоне от 13 до 97 Бк/мг³ (по данным скважины 24э в период с 2002 по 2023 года), при общей бета активности не превышающей 27 мБк/дм³ (табл.1). Здесь также наблюдается тенденция повышения концентрации в теплое время года до средних значений 68 Бк/дм³, что незначительно превышает ПДК, по действующему в России Сан-Пину. В настоящее время ведется работа по анализу взаимосвязи среднесуточного и среднемесячного водозабора, уровня воды в Новосибирском водохранилище и концентрации радона в подземных водах.

Воды водозабора Зырянка подаются населению без водоподготовки, разводящая сеть является пусть и простейшей, но системой водоподготовки, позволяющей освободить подземные воды и радона. Учитывая недлительный период полураспада радона (3,8 сут), в воде подаваемых потребителям концентрации радона снижаются до величин в среднем не более 55 Бк/дм³.

Заключение

Полученные результаты подчеркивают необходимость постоянного мониторинга уровня радона в водоносных комплексах г. Новосибирска. В границах зон внедрения гранитоидного массива распространены трещинные подземные воды, которые характеризуются значениями концентрации радона, позволяющие использовать их в качестве бальнеологических, с другой они создают высокую радиологическую нагрузку на население. Воды трещиноватых глинистых сланцев, широко используемые для водоснабжения сельского населения восточной части Новосибирской области (аналогичные водам водозабора «Зырянка» ННЦ) характеризуются относительно невысокими, но часто превышающими ПДК концентрациями радона. Необходимо отметить, что концентрация радона в воде увеличивается в теплое время года для обоих водоносных комплексов. В связи с этим необходимо проводить работу по мониторингу концентраций радона в регионе для снижения долгосрочных рисков здоровью, а также информированию населения о способах снижения содержания радона в воде.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 25-17-20024 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области (№ 30-2025-000896).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yehia Manawi, Arzoo Hassan, Muataz Ali Atieh, Jenny Lawler Overview of radon gas in groundwater around the world: Health effects and treatment technologies, Journal of Environmental Management, Volume 368, 2024, 122176, ISSN 0301-4797, doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122176.
2. Jeyeon Kim, Kang-Kun Lee Seasonal effects on hydrochemistry, microbial diversity, and human health risks in radon-contaminated groundwater areas, Environment International, Volume 178, 2023, 108098, ISSN 0160-4120, doi.org/10.1016/j.envint.2023.108098.)

3. Yuanxin Zhao, Zhaofei Liu, Ying Li, Le Hu, Zhi Chen, Fengxia Sun, Chang Lu A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance, *Applied Geochemistry*, Volume 131, 2021, 105014, ISSN 0883-2927, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105014>.

4. Семинский А.К. Радон в подземных водах Южного Прибайкалья: результаты мониторинга и прогноз концентраций // *Известия Сиб. Отдел. Секции наук о Земле Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2017. Т. 40. № 4. С. 57–68. doi: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-57-68

5. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пырьев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фиге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинин, С.А. Растигеев // *Геология и геофизика*. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714-1733.

6. Novikov, D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – V. 15. – 8 p.

7. Сухорукова А.Ф., Плаксина Н.А., Максимова А.А., Яндола Н.И. Гидрогеохимический мониторинг водозабора Новосибирского научного центра // *Химия в интересах устойчивого развития* – том 32 – № 6 – С. 783-792 – 2024

8. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Вакуленко Л.Г., Сухоруков В.П., Фомина Я.В., Яндола Н.И., Максимова А.А., Черных А.В., Сухорукова А.Ф., Деркачев А.С. Радиоактивность водовмещающих пород Обь-Зайсанской складчатой области // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири* – № 1 – С. 110-120 – 2024

9. Деркачев А.С., Новиков Д.А., Черных В.В. Оценка эффективной дозы облучения населения радоном из подземных вод (восточные районы Новосибирской области) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири* – № 46 – С. 162-172 – 2025 doi 10.20403/2078-0575-2025-46-162-172

© А. Ф. Сухорукова, Н. И. Яндола, 2026

А. В. Тимохин¹✉

Широтная зональность трилобитов в верхнем кембрии и ордовике Сибирской платформы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: TimokhinAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Проанализирована структура и хорология трилобитовых сообществ внутреннего мелководного шельфа Сибирской платформы верхнего кембрия и ордовика. Выявлена широтная зональность комплексов трилобитов.

Ключевые слова: верхний кембрий, ордовик, трилобиты, Сибирская платформа, внутренний шельф

A. V. Timokhin¹✉

Latitudinal zonation of trilobites in the Upper Cambrian and Ordovician of the Siberian platform

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: TimokhinAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The structure and horology of trilobite communities of the inner shallow shelf of the Siberian Platform of the Upper Cambrian and Ordovician are analyzed. Latitudinal zonation in the composition of these trilobite complexes was discovered.

Keywords: Upper Cambrian, Ordovician, trilobites, Siberian platform, inner shelf

Введение

В эпоху ордовика практически вся площадь Сибирского эпиконтинентального бассейна располагалась на внутреннем шельфе, что соответствует одной биономической зоне [1]. За период от верхнего кембрия (мансийский горизонт) до верхнего ордовика (бурский горизонт) на Сибирской платформе было обнаружено 132 вида трилобитов, относящихся к 50 родам и 23 семействам. В пределах одного горизонта количество обнаруженных видов трилобитов редко превышало 20 штук. Можно предположить, что большинство этих видов были повсеместно распространены по всей биономической зоне, с учетом возможных изменений, связанных с конкретными фациями.

Методы и материалы

Сибирская платформа (СПФ) с верхнего кембрия до силура представляла собой внутренний эпиконтинентальный бассейн характеризовавшимся в первую очередь малыми глубинами (первые десятки метров в наиболее глубоких частях бассейна). [1] Как следствие: при незначительном колебании уровня моря единый

бассейн мог распадаться на систему лагун с частичным или полным осушением значительных территорий. В результате этого конфигурация бассейна претерпевала значительные изменения с одной стороны, и приводила к возникновению барьеров внутри ранее единого эпиконтинентального бассейна. Как следствие, бентосные сообщества, в первую очередь, в каждой структурно-фациальной зоне (СФЗ) должны были сформировать характерный набор видов. И можно предположить, чем более «эндемичным» будет этот набор, тем более обособленным будет эта часть бассейна от других частей эпиконтинентального бассейна. При анализе этих комплексов следует учитывать литофации в конкретных СФЗ потому что, с одной стороны не корректно ожидать идентичных комплексов фауны в разнофациальных отложениях, и с другой зачастую разновозрастные свиты в разных СФЗ имеющие свои собственные названия, фактически идентичны по составу и относятся к одному фациальному типу. Например: мангазейская, неручандская, загорнинская, джеромская свиты верхнего ордовика.

Трилобиты как основной компонент бентосных сообществ с верхнего кембрия и ордовика являются идеальным объектом для такого анализа из-за своей многочисленности и изученности. Более того, трилобиты в пределах Сибирского эпиконтинентального бассейна встречаются только в карбонатных отложениях (известняки, глинистые известняки, мергели), тем самым фактически снимается проблема разнофациальных комплексов, т.к. фактически находки трилобитов – это индикатор либо нормально морских, либо очень близких к ним отложений. Поэтому сравнение трилобитовых сообществ в разных СФЗ между собой позволяет более корректно говорить о единстве или разобщенности этих районов в пределах единого эпиконтинентального бассейна. В качестве осложняющих факторов при таком анализе является разная степень изученности, как по стратиграфической колонке, так и по конкретным СФЗ.

Глобальным фактором влияющим на состав и распределение трилобитовых сообществ в этом громадном эпиконтинентальном бассейне (2х2 тыс. км) возможно может быть наличие климатических зон. Согласно последним палинспастическим реконструкциям за период с 500 млн лет назад (мансийский горизонт верхнего кембрия) до 470 млн лет назад (долборский горизонт верхнего ордовика) Сибирский палеоконтинент сместился на 1500 км с юга на север (т.е. порядка 15 градусов в палеоординатах). [2, 3, 4]

При анализе трилобитовых комплексов в разных СФЗ следует учитывать связь их с внешним шельфом через существующие проливы. [1, 5]

Результаты

Прежде чем проводить анализ распределения трилобитовых сообществ по площади Сибирского эпиконтинентального бассейна, следует оценить масштаб, особенности и собственно эволюцию трилобитов как одной из ведущих группы бентосных организмов. В первую очередь обращает внимание на себя примечательный факт полного отсутствия трилобитов в вихоревское, муктейское и киренско-кудринское время [6]. В вихоревское время - время максимальной регрессии экологическая ниша трилобитов была занята ракоскорпионами - широко

распространенными в южной части Сибирского эпиконтинентального бассейна. Муктейское время – это время начало крупной региональной трансгрессии и отложения этого времени содержат специфический комплекс биоты (только конодонты и остракоды) и как правило эти отложения маломощны и литологически своеобразны. Спецификой этих условий и можно объяснить отсутствие трилобитов и замковых брахиопод на этом стратиграфическом уровне. Сложно указать причину отсутствия трилобитов в киренско-кудринское время, так как вся остальная фауна представлена в этом стратиграфическом интервале, хотя таксономическая разнообразие замковых брахиопод падает (известны редкие находки в нижней трети этого горизонта). Находки ракоскорпионов известны из этих отложений, но широкого распространения их не наблюдается.

Оценка структуры трилобитовых сообществ во времени позволяет оценить степень изменчивости окружающей среды. Если условия стабильны и меняются не резко, то следует ожидать унаследованность части форм (на уровне видов - в первую очередь, потом родов и семейств) из ниже лежащих стратиграфических подразделений. Анализ данных показывает, что обстановки с мансийского до волгинского времени были резко дискретными и проходящих форм было крайне мало даже на уровне родов. Почти все вновь появившиеся таксоны известны только в пределах одного горизонта. В следующем горизонте комплекс трилобитов кардинально обновляется. Начиная с чертовского времени наблюдается большое количество транзитных («мигрирующих») форм уже на уровне видов. Это можно интерпретировать как отсутствие резких изменений и стабилизацию обстановок в течении длительного геологического времени. (рис. 1, 2, 3).

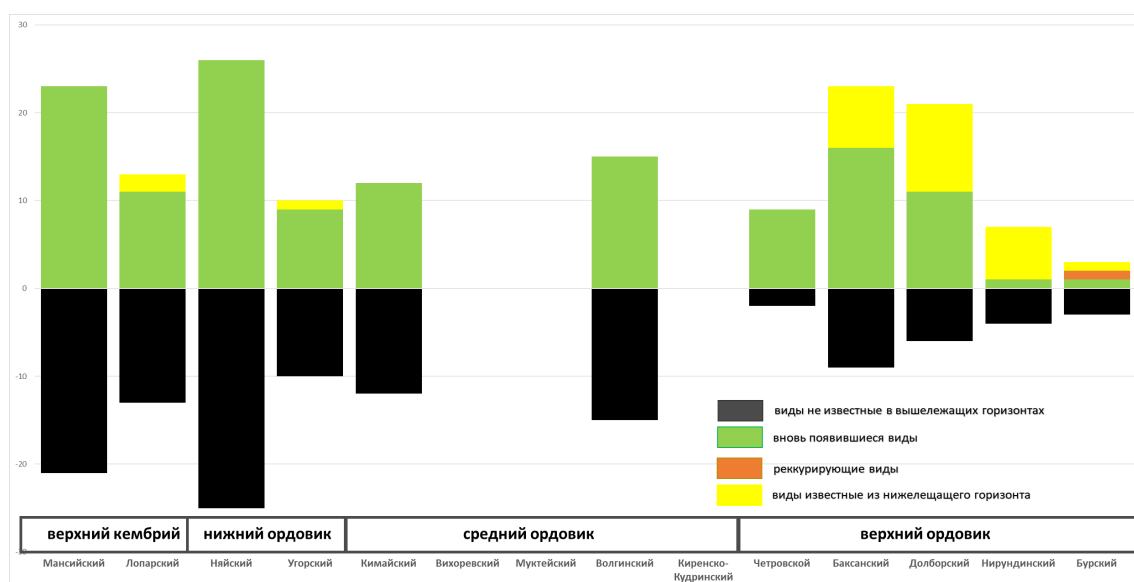


Рис. 1. Динамика появления и исчезновения видов трилобитов.

Под рекуррирующим видом или родом понимается повторно появляющаяся в данном горизонте таксономическая единица после отсутствия ее в нижележащем горизонте, т.е. известная через один или ниже горизонтов. Например, вид

известен в долборском и бурском горизонтах, в нирундинском не был встречен - значит данный вид является рекуррентным для бурского горизонта.

Вновь появившиеся таксономические единицы - это рода или виды ранее не известные (пока не находили) в ниже лежащих горизонтах СПФ. Формально мы не можем доказать, где произошло видообразование на СПФ или вне ее. Поэтому считаем, что вся фауна в пределах ордовикского эпиконтинентального бассейна СПФ произошла вне его и здесь появилась потом т.е. мигрировала.

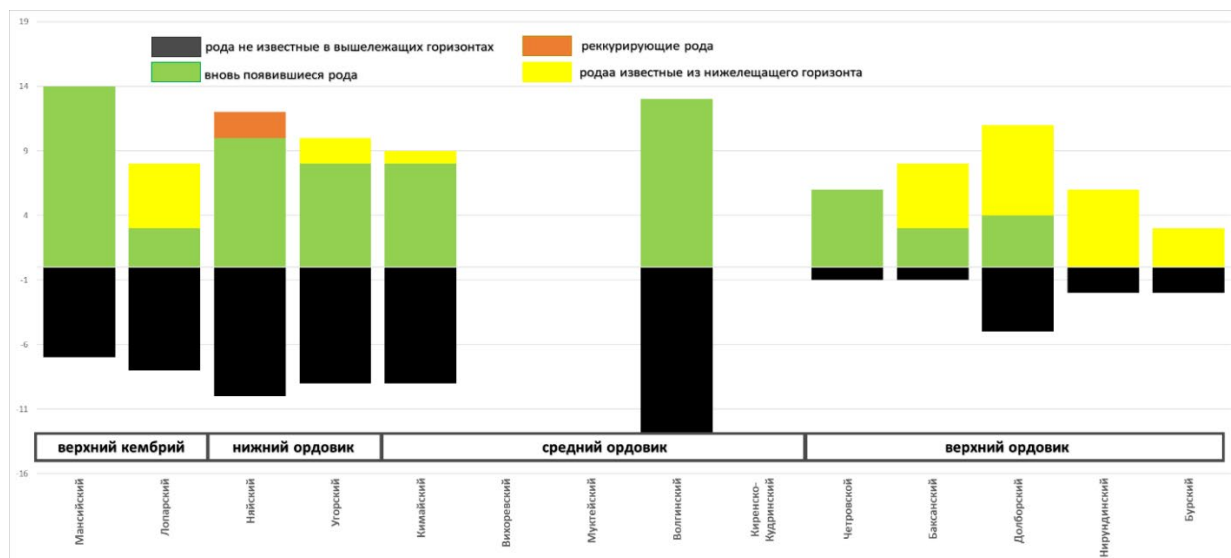


Рис. 2. Динамика появления и исчезновения родов трилобитов.

В рассматриваемый период времени для отложений внутреннего шельфа не смотря на все их разнообразие позволившее выделить на территории СПФ 14 СФЗ (для каждой из которых характерен свой набор свит) можно выделить общность их генезиса основываясь на батиметрии соответствующих отложений. Согласно общим представлениям палеобассейн представлял собой протяженный пролив открытый в сторону Игаро-Норильской и Вилуйской СФЗ, где наиболее глубокие его части соответствовали Центрально Тунгусской, Верхнеленской, Вилуйской, Нюйско-Джербинской и Березовской СФЗ. Остальные СФЗ большей своей частью являлись краевыми частями этого залива и соответственно более мелководными. [1, 7] Связь с внешним шельфом осуществлялась не только через северо-запад и восток. Также предполагались менее крупные проливы на разных этапах эволюции бассейна в западной, юго-восточной и северо восточной части палеобассейна (в современных координатах) [1, 5, 8, 9, 10].

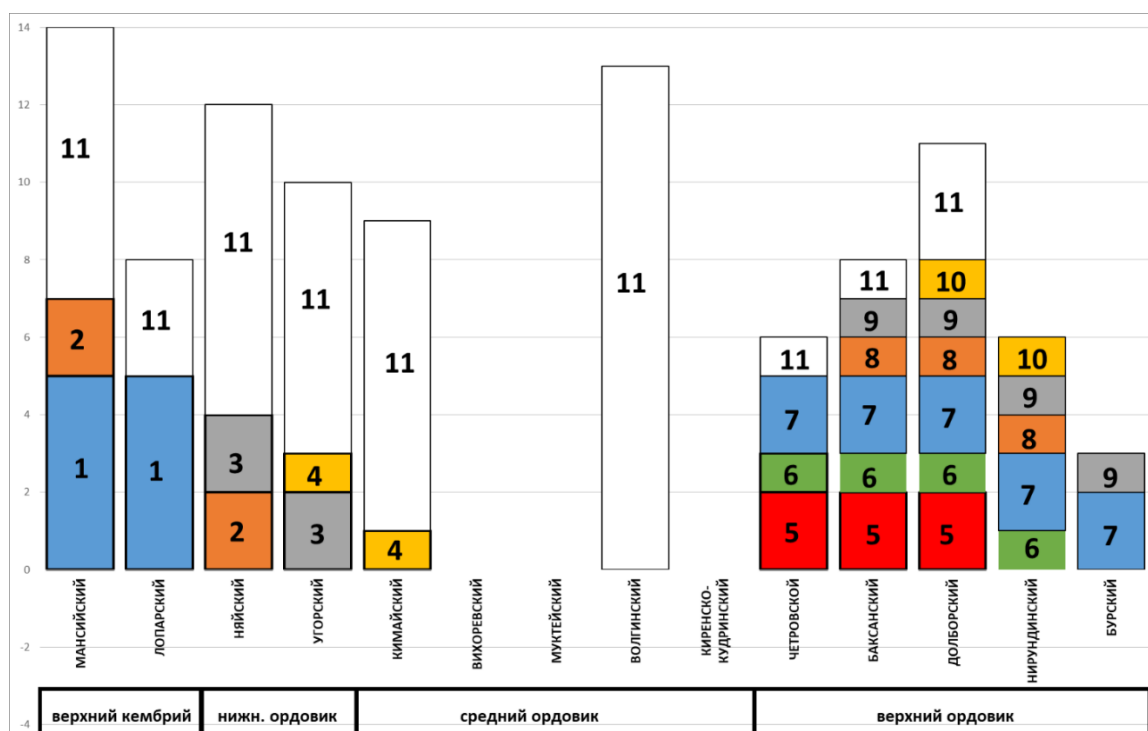


Рис. 3. Структура транзитных и мигрирующих родов трилобитов.

Условные обозначения. Рода трилобитов:

1. Diceratocephalina, Loparella, Plethopeltides, Pseudoacrocephalites, Kirengina;
2. Apatokephalus, Dolgeuloma; 3. Nyaya, Platypeltoides; 4. Pseudomera;
5. Ceraurus, Isotelus; 6. Cerauriscaspis; 7. Evenkaspis, Monorakos; 8. Carinopyge;
9. Bumastus; 10. Stenopareia; 11. Рода известные только в этом горизонте.

Начиная в верхнего ордовика большинство этих проливов перестали функционировать и к концу ордовика бассейн стал закрываться. Результатом этого закрытия площадь бассейна значительно сократилась и связь с открытым морем осуществлялась только на северо-западе (в современных координатах) [11].

Основное разнообразие трилобитовых сообществ связано в первую очередь с наиболее глубокой его частью, поэтому можно было ожидать, что этот комплекс будет единым на всем протяжении всей этой относительно глубоководной зоны. Фактические данные по распределению, количеству и составу трилобитовых сообществ показывают четкое деление на две субширотные области. Южная (в современных координатах) область: Ангарская, Верхоленинская, Березовская, Ньюско-Джербинская, Каларская, Вилюйская (частично) СФЗ и северная область - все остальные СФЗ Сибирской платформы. Причем в южной области комплекс трилобитов более разнообразен до верхнего ордовика за счет большего количества «эндемичных» видов. Начиная с верхнего ордовика комплекс трилобитов в южной области резко деградирует до полного исчезновения в связи с неблагоприятными фациями (рис. 4, 5).

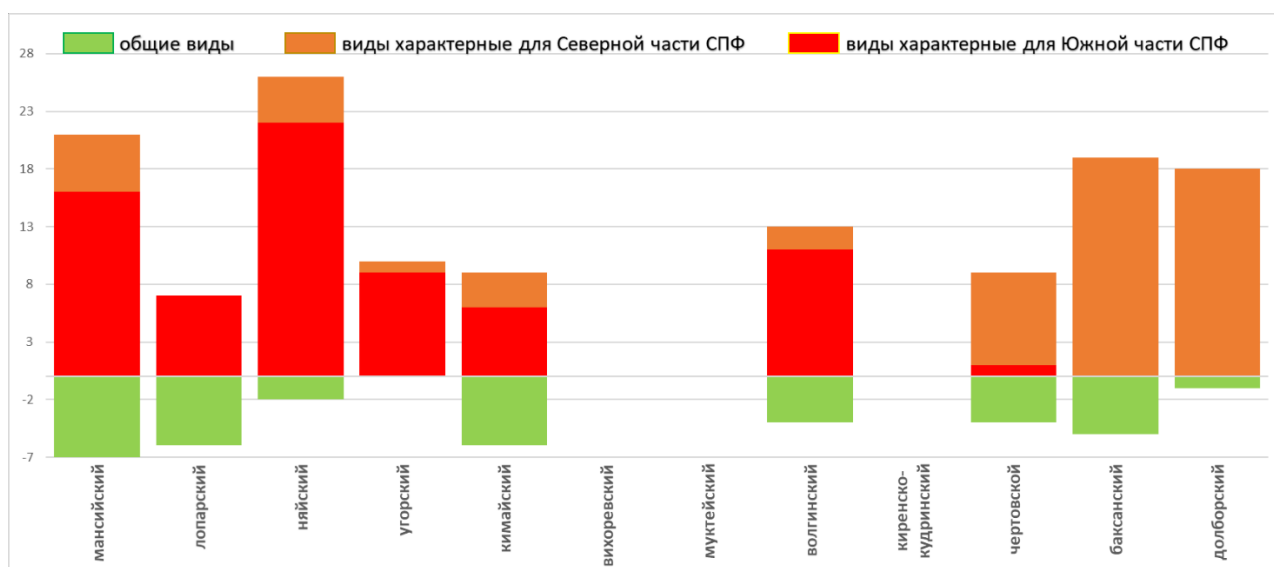


Рис. 4. Соотношение общих и «эндемичных» видов трилобитов между северной и южной частями Сибирской платформы.

Отмечается: 1. уменьшение общих родов и видов от мансийского до ныйского времени; 2. Отсутствие характерных родов и видов для северной части СПФ в лопарское время.

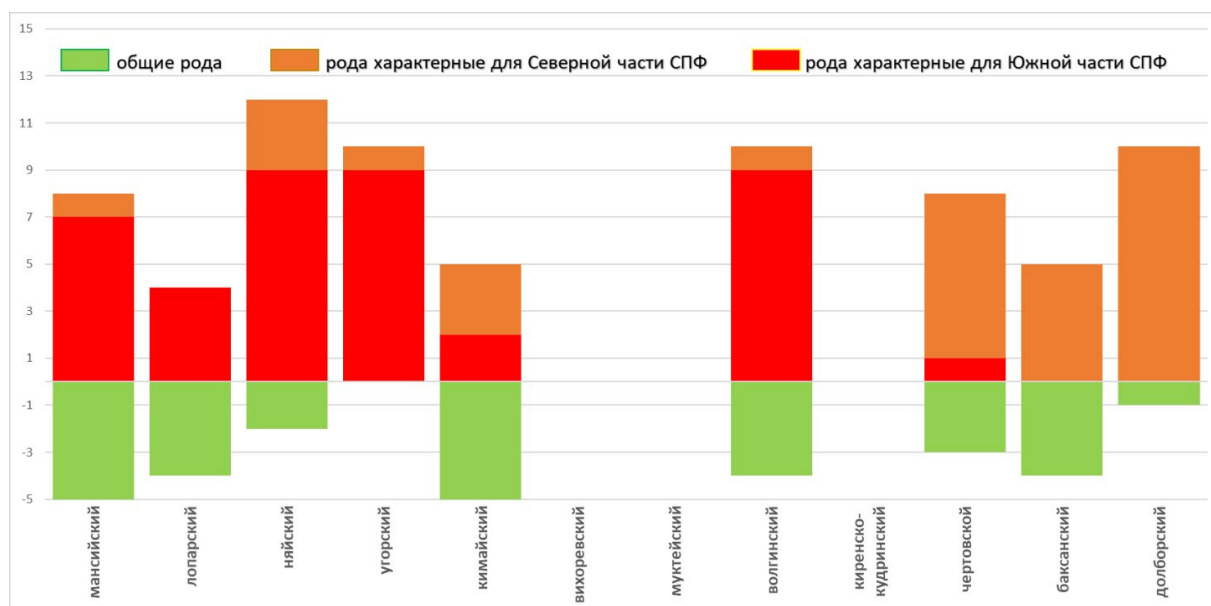


Рис. 5. Соотношение общих и «эндемичных» родов трилобитов между северной и южной частями Сибирской платформы.

Обсуждение

Представляется некорректным связывать субширотную зональность дифференциации комплексов трилобитов напрямую с климатической зональностью. Возможно, смещение Сибирского палеоконтинента на север так, что экватор в

верхнем ордовике проходил по группе СФЗ объединенных в группу «Южная» послужило одним из многих факторов которые привели широкому распространению неблагоприятных литофаций в этой области бассейна.

Учитывая факт дискретности трилобитовых сообществ от верхнего кембрия до верхнего ордовика в пределах Сибирского мелководного эпиконтинентального бассейна, который может быть объяснен только инвазивным характером трилобитовой фауны, можно сделать наиболее корректное предположение о том, что различия в составе и разнообразии выделенных комплексов связано с миграциями из различных внешних более глубоководных и соответственно более стабильных бассейнов. [5]

Сами эти бассейны имели свой специфический набор родов и видов в силу удаленного положения друг от друга. Тем не менее связь между этими бассейнами существовала, так как часть комплекса была общей для всех этих бассейнов. Разнообразие трилобитовых сообществ в каждой конкретной области эпиконтинентального бассейна связано как с наличием и частотой «благоприятных» фаций для трилобитов на СПФ, так и с их характеристиками (глубина, наличие течений) существующих проливов на тот момент времени, а также с собственно потенциалом бассейна из которого происходила миграция. Так же следует учитывать возможную эврибионтность некоторых видов трилобитов позволившую им расселиться по всей акватории эпиконтинентального бассейна.

Заключение

1. Отмечена дискретность фаунистических комплексов трилобитов в пределах горизонтов, почти полное отсутствие общих видов в до вихоревское время и резкое увеличение количество долгоживущих видов после этого времени. Провалы в нирундинское и бурское время объясняются недостаточной фаунистической охарактеризованностью в связи с фрагментарностью соответствующих отложений, в результате постордовикского регионального перерыва, в течении которого терминальная часть ордовикских отложений была эродирована фактически на всей территории Сибирской платформы.

2. Выявлена субширотная зональность в распределении комплексов трилобитов связанная с их инвазивной природой, а также с фациальными характеристиками вмещающих отложений.

3. Не выявлено прямой связи зональности с положением СПФ по отношению к экватору (климатическим зонам).

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания РАН по ФНИ (проект FWZZ-2026-0033 «Интегративная стратиграфия палеозоя и мезозоя азиатской части России (включая Арктику) и смежных территорий для палеоклиматических, палеобиогеографических и палеогеографических реконструкций, детальных биохронологических шкал и стратиграфических схем»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каныгин А.В., Ядренкина А.Г., Тимохин А.В., Москаленко Т.А., Сычев О.В. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. В 9-ти кн. Ордовик Сибирской платформы. Академическое изд-во "Гео", Новосибирск, 2007. 270 с.
2. Cocks L., Robin M., Torsvik T.H. Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic // *Earth Sci. Rev.*, 2007. v. 82, P. 29—74.
3. Torsvik T.H., Cocks R.M. *Earth history and palaeogeography*. Oslo, 2017, 317 p.
4. Павлов В. Э., Пасенко А. М., Дронов А. В., Федюкин И. В.. Новый палеомагнитный полюс для позднего ордовика Сибири и кинематика Сибирской платформы на временном интервале ~505–405 млн лет назад» // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2021, том 498. № 2. С. 163–170.
5. Тимохин А.В. Хорология трилобитов в верхнекембрийском и ордовикском эпиконтинентальном бассейне Сибирской платформы / Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. СГУГиТ. Новосибирск, 2024. том Т. 2. № 1. С. 194-201.
6. Тимохин А.В., Коровников И.В. Нижнепалеозойские трилобиты внутреннего шельфа Сибирской платформы / Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" сборник материалов в 8 т. СГУГиТ. Новосибирск. 2025. Т. 2. № 3. С. 3-10.
7. Ядренкина А.Г., Каныгин А.В., Сычев О.В., Тимохин А.В., Гонта Т.В. Новая версия схемы корреляции и фациального районирования ордовикских отложений Сибирской платформы: важнейшие уточнения и дополнения к прежней схеме / Региональная геология. Стратиграфия и палеонтология докембрия и нижнего палеозоя Сибири: Сб. науч. тр. – СНИИГ-ГиМС, Новосибирск, 2010. С. 123-129.
8. Бгатов В.И. Литолого-геохимические закономерности осадкообразования в ордовике и силуре Сибирской платформы. Красноярск, Новосибирск., Тр. СНИИГГиМС, Вып. 147. 1973. 240 с.
9. Малич Н.С. Тектоническое развитие чехла Сибирской платформы М. Недра, 1975. 215 с.
10. Марков Е.П. Палеогеография раннего ордовика Сибирской платформы / Закономерности размещения скоплений нефти и газа на Сибирской платформе. Новосибирск., Тр. СНИИГГиМС, Вып. 271. 1979. С. 32-41.
11. Тесаков Ю.И. Силурийский бассейн Восточной Сибири: В 4-х т. Т. 3: Бассейновая палеогеография (на хронозональной и биогеоценотической основе). ИНГГ СО РАН. Новосибирск, 2014. 389 с.

© А. В. Тимохин, 2026

Д. А. Токарев¹✉, Н. В. Сенников¹, И. А. Ботов², А. А. Терлеев¹

Новые сведения по стратотипу сарасинской свиты раннего кембрия Северной части Горного Алтая

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская федерация

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская федерация
e-mail: tokarevda@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сарасинская свита закартирована и выделена В.Н. Коржневым в 1978 году. Свита хорошо охарактеризована фаунистически и биостратиграфически сопоставляется с большей частью нижнего кембрия Горного Алтая. Ее стратотипический разрез находится на правом борту руч. Сосновенький правого притока р. Большая Кыркыла (правый приток р. Сарасы) и имеет преимущественно карбонатный состав. Стратотипический разрез является составным и отчетливо делится на две части – нижнюю терригенную и верхнюю карбонатную части. В основном разрезе выделяется 6 пачек и в нижней его составной части 3 пачки. После проведенных работ стало возможным выделение археоциатовых зон в стратотипическом разрезе, и соотнесение их с определенными интервалами пачек. Расширен видовой состав этих зон, что существенно повышает его внутри- и межрегиональный корреляционный потенциал.

Ключевые слова: Алтай, нижний кембрий, сарасинская свита, археоциаты, стратиграфия

D. A. Tokarev¹✉, N. V. Sennikov¹, I. A. Botov², A. A. Terleev¹

New information on the stratotype of the Sarasinsk formation of the Early Cambrian in the Northern part of Gorny Altai

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy
of Sciences Novosibirsk, Russian federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: tokarevda@ipgg.sbras.ru

Аннотация. The Sarasinskaya Formation was mapped and identified by V.N. Korzhnev in 1978. The formation is well characterized faunally and biostratigraphically correlates with much of the Lower Cambrian of the Altai Mountains. Its stratotype section is located on the right bank of the Sosnovenkiy Creek, a right tributary of the Bolshaya Kyrkyla River (a right tributary of the Sarasa River), and is predominantly carbonate in composition. The stratotype section is composite and clearly divided into two parts—the lower terrigenous and the upper carbonate parts. Six members are distinguished within the main section and three members in its lower component part. Following this work, it became possible to identify archaeocyaths zones within the stratotype section and correlate them with specific intervals within the members. The species composition of these zones has been expanded, significantly increasing its intra- and interregional correlation potential.

Ключевые слова: Altai, Lower Cambrian, Sarasinskaya formation, archeocyathes, stratigraphy

На территории Алтая нижнекембрийские отложения представлены относительно широко, история их изучения составляет более 100 лет. Разрезы чаще всего имеют довольно хорошую обнаженность и охарактеризованы фаунистически

[археоциаты (*Nochorocyathus mariinskii*, *Orbicyathus mongolicus*, *Loculicyathus tolli* и др.), трилобиты (*Kootinella slatkowskii*, *Resimopsis mariinica*, *Sibiriaspis pospelovi* и др.) известковые водоросли (цианобактерии – *Subtiflora delicata*, *Korilophyton inopinatus*, *Epiphyton bolonense* и др.) [1]. С 1925 года начинается мелкомасштабная площадная геологическая съемка Горного Алтая. Большое внимание было уделено как докембрийским, так и нижнепалеозойским отложениям. [2].

Первые находки археоциат на территории Алтая сделаны В.П. Нехорошевым в 1925 году в верховьях рч. Ак-Саусканды (Аксаазкан) впадающего в р. Сумульту, правый приток Катунь [3], а также, краеведом И.П. Комаровым в 1927 году, который в бассейне р. Сараса (район с. Пролетарка) собрал коллекцию археоциат и назвал содержащие их отложения «сарасинские известняки» [4]. Это было первое описание нижнекембрийских отложений на территории Алтая. В 1958 году П.С. Краснопеевой по находкам археоциат был выделен сарасинский горизонт, который сопоставлялся с нижней частью камешковского горизонта [5]. Чуть позже В.В. Хоментовским с соавторами [2] приводится детальное описание нижнекембрийских свит Алтая, в том числен и разрезы на р. Сараса. В 1978 году в монографии Л.Н. Репиной и Е.В. Романенко по нижнему кембрию Горного Алтая [6] дается схематическое литологическое описание разреза по руч. Сосновенькому с выделением пачек, а также приведен список трилобитов и археоциат. В этом же году алтайским геологом-съемщиком В.Н. Коржневым рассматриваемые нижнекембрийские отложения были закартированы и выделена новая сарасинская свита (по р. Сарасе и деревне Сараса). Свита сопоставляется с большей частью нижнего кембрия Горного Алтая. Стратотипический разрез находится на правом борту руч. Сосновенький правого притока р. Большая Кыркыла (рис.1) и имеет преимущественно карбонатный состав [7-11].

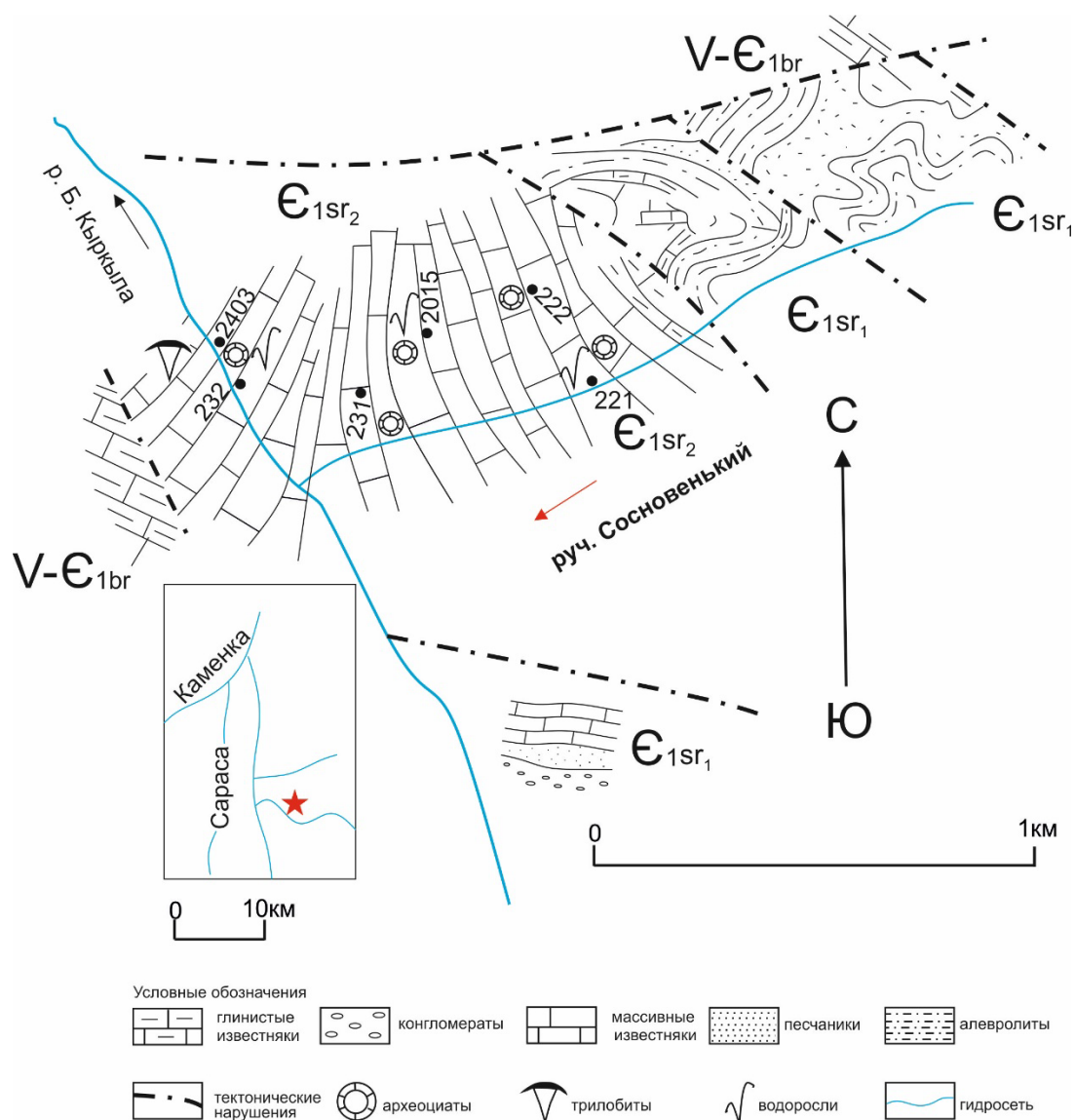


Рис. 1. Схематическая карта расположения стратотипического разреза сарасинской свиты

Разрез является составным, так как нижняя его часть обнажается в 1,5 км южнее устья руч. Сосновенький. Общая мощность составляет около 930 м. (рис.2)

Разрез отчетливо делится на две части – нижнюю терригенную и верхнюю карбонатную части. Нами в основном разрезе выделяется 6 пачек и в нижней его составной части 3 пачки. Фаунистически охарактеризованы пачки 5-ая и 6-ая (рис.2). Здесь встречены археоциаты водоросли и в верхней части разреза (пачка 6) по литературным данным указываются находки трилобитов *Elganellus* sp., *Elganellus elongatus*, *Resimopsis mariinica*, *Resimopsis* sp, *Sibiriaspis pospelovi* [6] которые характерны для зоны *Resimopsis* ACCO.

Сарасинская свита с угловым несогласием залегает на баратальской свите венд-кембрийского возраста. Наличие такого несогласия отмечается В.Н. Коржневым в разрезе у с. Пролетарка, по руч. Сосновенький и на южных склонах г. Светлой [8].

Для Сарасинского блока ранее по археоциатам были предложены зоны: *Nochorocyathus mariinskii*, *Gordonicyathus howelli*, *Nalivkinicyathus cyroflexus*, *Clathricoscinus*, *Tercyathus altaicus*, *Syringocyathus aspectabilis* [1, 9, 10]. Зоны были выделены без привязки их границ к конкретным пачкам разрезов сарасинской свиты.

В течении нескольких полевых сезонов 2021-2024 годов сотрудниками лаборатории палеонтологии и стратиграфии палеозоя ИНГГ СО РАН был детально изучен и описан составной стратотипический разрез сарасинской свиты раннего кембрия по руч. Сосновенький (Сарасинский блок, Северная часть Горного Алтая). Отобрана представительная палеонтологическая коллекция археоциат и водорослей (цианобактерий), а также собраны образцы для литологического изучения (рис. 2).

После определения и монографического описания археоциат, были выделены два комплекса археоциат, характерных для зон *Nochorocyathus mariinskii* и *Gordonicyathus howelli* в их стратотипе - разрез «Крутой Лог» в Батеневском кряже, а также в опорном «Кийском» разрезе Кузнецкого Алатау. Первый комплекс представлен формами: *Nochorocyathus mariinskii*, *Rotundocyathus nadleri*, *Tenerycyathus veronikae*, *Leptocyathus sp.* и др. Для второго комплекса характерны *Rotundocyathus khemtshikensis*, *Nochorocyathus fragilis*, *Nochorocyathus vulgaris*, *Nochorocyathus grandis*, *Archaeolynthus sibiricus*, *Archaeolynthus porosus*, и др. (рис. 3). Анализ комплексов дал возможность впервые в стратотипическом разрезе сарасинской свиты по руч. Сосновенький выделить две нижние из известных нижнекембрийских на территории АССО археоциатовых зон (рис. 2) а также, соотнести их к определенным интервалам пачек, расширив видовой состав этих зон, что существенно повысит его внутри- и межрегиональный корреляционный потенциал.

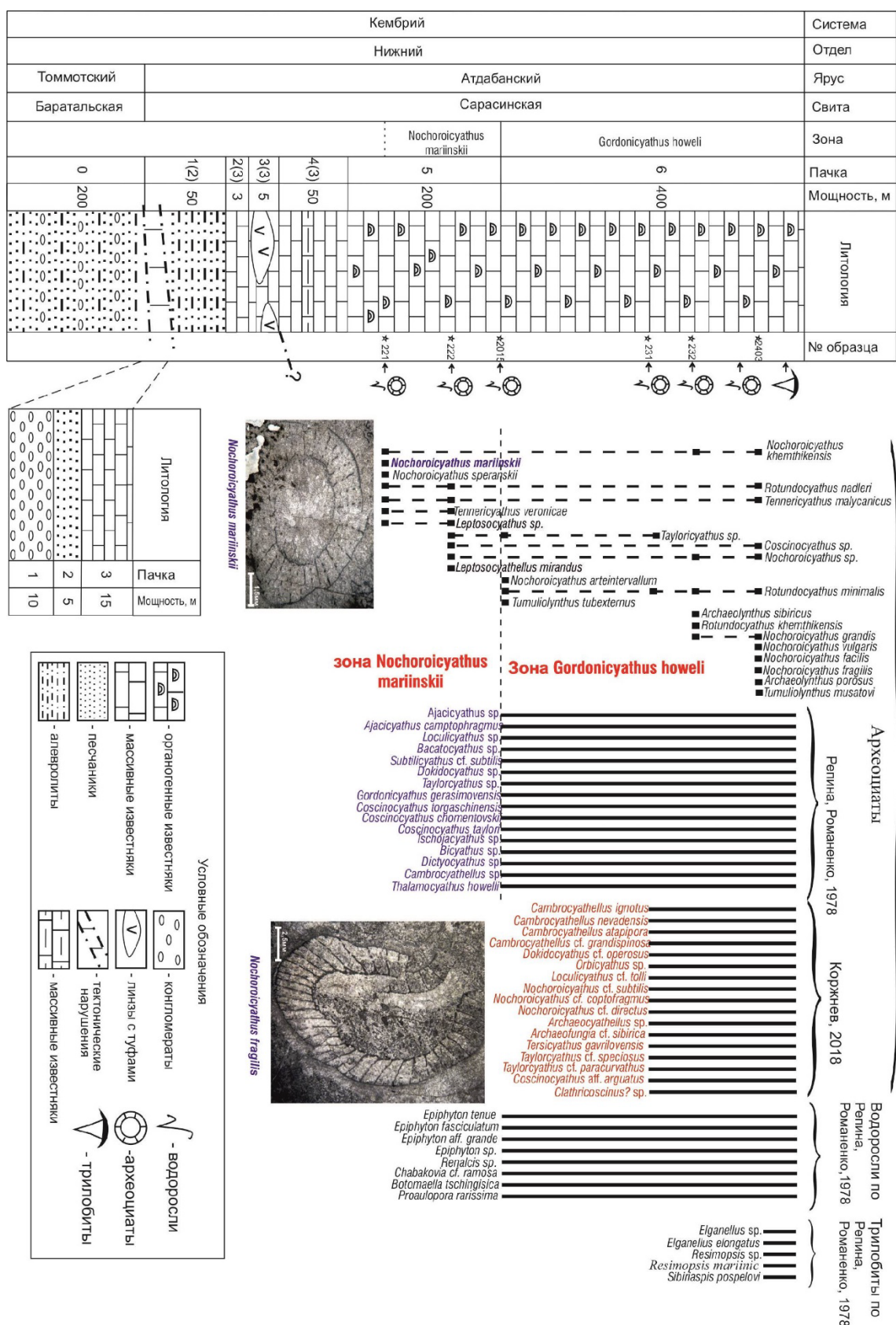


Рис. 2. Распространение органических остатков в разрезе «Сосновенький»

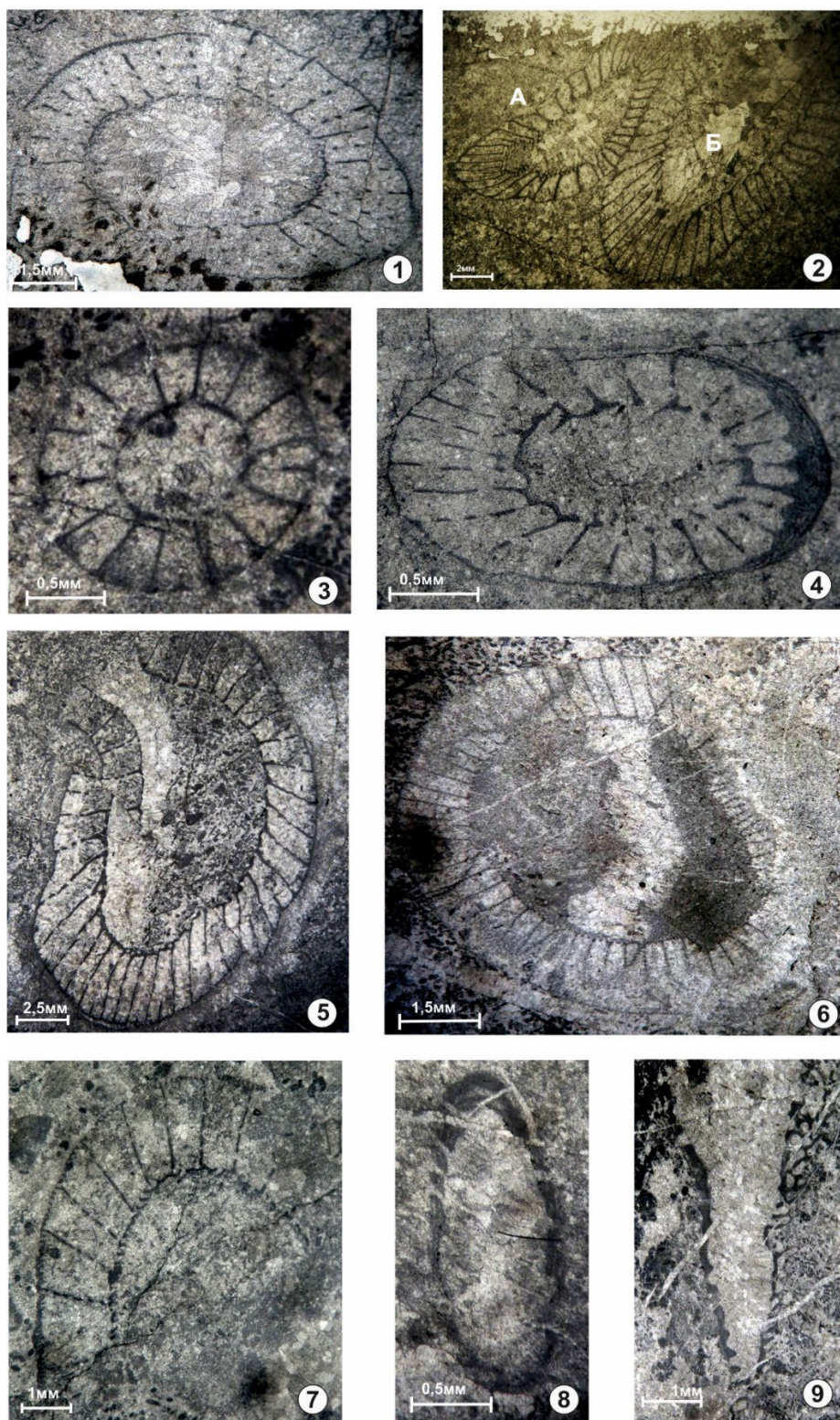


Рис. 3. Раннекембрийские археоциаты сарасинской свиты Северной части Горного Алтая

1. *Nochoicyathus mariinskii*, 2. А - *Tenerycyathus veronikae*, Б - *Leptocyathus* sp., 3. *Rotundocyathus nadleri*, 4. *Rotundocyathus khemtshikensis*, 5. *Nochoicyathus fragilis*, 6. *Nochoicyathus vulgaris*, 7. *Nochoicyathus grandis*, 8. *Archaeolynthus sibiricus*, 9. *Archaeolynthus porosus*.

Работа выполнена в рамках базового проекта НИР FWZZ-2026-0033.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири (Новосибирск 1979) – Новосибирск, 1983. - ч.1. – 215 с.
2. Хоментовский В.В., Журавлева И.Т., Репина Л.Н., Розанов А.Ю. Нижний кембрий Горного Алтая// Известия АН СССР. Серия геологическая, 1962, № 3. С. 55-71
3. Нехорошев В.П. Кембрий и докембрий в Горном Алтае // Вестник Геологического комитета, № 1, 1927
4. Комаров И.П. Силур и кембрий в Северо-Западном Алтае // Вестник Геологического комитета, т. 3, № 4, 1928
5. Краснопеева П.С. Археоциатовые и археоциатово-трилобитовые горизонты кембрия Алтае-Саянской области // Материалы по геологии Западной Сибири. Т. 61. – М.: Госгеолтехиздат, 1958. С. 105-111.
6. Репина Л.Н., Романенко Е.В. Трилобиты и стратиграфия нижнего кембрия Алтая. – М.: Наука, 1978. – 304.
7. Афонин А.И., Поспелов А.Г., Фефелов Г.Г. Ранний кембрий северной части Горного Алтая (Катунский Антиклинорий) // Стратиграфия докембрия и кембрия Средней Сибири. Красноярское книжное издательство. 1967. С. 95-99
8. Коржнев В.Н. Новые данные по стратиграфии докембрия и палеозоя Катунского антиклинория в Горном Алтае // Труды СНИИГГиМС. 1978. Вып. 258. С. 30-33.
9. Коржнев В.Н. Стратиграфия кембрийских отложений северо-восточной части Горного Алтая // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2012. - № 363 (октябрь). – С. 196-203.
10. Коржнев В.Н. Сарасинская свита нижнего кембрия Горного Алтая // Изв. Алт. отделения РГО. – 2018. - № 4 (51). – С. 37-62.
11. Коржнев В.Н. Проблемы стратиграфии нижнего и среднего палеозоя северной части Горного Алтая: монография. - Барнаул: ООО «Пять плюс», 2021. – 228 с.

© Д. А. Токарев, Н. В. Сенников, И. А. Ботов, А. А. Терлеев, 2026

М. О. Федорович¹✉, А. Ю. Космачева¹

Особенности геологического строения глинистых покрышек в мезозойских отложениях Вилуйской гемисинеклизы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: zahryaminamo@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Выполнен детальный анализ геологического строения глинистых покрышек в мезозойских отложениях Вилуйской гемисинеклизы. Роль флюидоупоров для верхнепермского, нижнетриасового и нижнеюрского нефтегазоносных комплексов (НГК) выполняют относительно выдержанные по площади региональные глинистые толщи неджелинской и мономской свит нижнего триаса и сунтарская свита нижней юры. Кроме того, в отложениях таганджинской свиты нижнетриасового НГК небольшие залежи газа продуктивного пласта Т₁-Х экранируются хорошо выдержанной локальной глинистой пачкой. В кызылсырской свите нижней юры присутствуют залежи газа, которые также контролируются глинистыми пачками локального распространения. Проведен анализ литологической неоднородности региональных флюидоупоров. Показано, что на Хапчагайском мегавале и восточном его продолжении в мономской и неджелинской свитах присутствуют мощные пропластки песчаных и песчано-алевролитовых пород, образуя «литологические окна».

Ключевые слова: Вилуйская гемисинеклиза, глинистая покрышка, «литологические окна», песчаные прослои

М. О. Fedorovich¹✉, A. U. Kosmacheva¹

Geological structure of seal rocks in the Mesozoic deposits of the Vilyui hemisyncline

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: zahryaminamo@ipgg.sbras.ru

Abstract. A detailed analysis of the geological structure of seal rocks in Mesozoic deposits of the Vilyui hemisyncline was performed. Relatively consistent regional clay strata of the Nedzhelinskaya and Monomskaya formations of the Lower Triassic and the Suntarskaya formation of the Lower Jurassic serve as seals for the Upper Permian, Lower Triassic, and Lower Jurassic petroleum systems (PPS). Furthermore, in the deposits of the Taganja Formation of the Lower Triassic PPS, small gas accumulations in the T₁-X productive formation are screened by a well-continued local clay member. The Kyzylsyrskaya Formation of the Lower Jurassic contains gas accumulations, which are also controlled by locally distributed clay members. An analysis of the lithological heterogeneity of regional seals was conducted. It has been shown that on the Khapchagai megaswell and its eastern continuation in the Monom and Nedzhelin suites there are thick layers of sandy and sandy-siltstone rocks, forming “lithological windows”.

Keywords: Vilyuiskaya hemisyncline, seal rock, Mesozoic deposits, “lithological windows”, sandy interlayers

На проведение геологразведочных работ в Якутии в 3-летнем проекте бюджета Российской Федерации на 2025-2027 гг. запланировано около 18 млрд. руб. В 2023 году республика получила статус пилотного региона по интенсивному наращиванию минерально-сырьевой базы в рамках федерального проекта «Геология: возрождение легенды». На сегодняшняя территория Якутии в геологическом отношении изучена приблизительно на 24% и занимает 1 место на Дальнем Востоке по добыче природного газа [1].

Глава Роснедр О. Казанов в [2] отмечает, что для обеспечения переходящего остатка подготовленных рентабельных запасов углеводородов (УВ) нужна непрерывная геологразведка. И решающая роль государственного финансирования – это выявление перспективных площадей и геологических структур, в пределах которых компании будут открывать месторождения. На этом этапе ощущается недостаток базовой геологической информации.

Выдержанные глинистые толщи играют критическую роль в нефтегазоносности территорий, выполняя функции региональных или локальных покрышек, предотвращающих вертикальную миграцию углеводородов и обеспечивающих сохранность залежей. Выступая в качестве флюидоупоров, они являются основным элементом углеводородной системы в моделировании процессов формирования месторождений нефти и газа.

В настоящее время в пределах Вилуйской синеклизы открыто 11 газовых и газоконденсатных месторождений с суммарными геологическими запасами природного газа около одного трлн.м³. При этом Мастахское месторождение по отдельным залежам выработано, а Средневилуйское находится на второй стадии разработки. Среднетюнгское месторождение разрабатывается незначительными объемами (до 5 млн.м³ в год) по локальному участку принадлежащей АО «Сахатранснефтегаз». Нижневилуйское, Бадаранское, Соболох-Неджелинское, Толонское, Эвальда Туги, Хайлахское, Нижнетюкянское и Андылахское месторождения находятся на различных стадиях разведки [3].

Вилуйская гемисинеклиза рассматривается как одна из самых крупных и глубоких депрессий Сибирской платформы. В тектоническом отношении Вилуйская гемисинеклиза на севере граничит с Анабарской антеклизой, на северо-западе – с Сюгджерской седловиной, на западе – с Непско-Ботуобинской антеклизой, на юго-западе – с Предпатомским региональным прогибом, на юге – с Алданской антеклизой, на востоке сливается с Предверхоянским краевым прогибом [4] (рис. 1).

Закономерности размещения залежей углеводородов в существенно песчаном разрезе мезозойского осадочного чехла Вилуйской гемисинеклизы в значительной степени определяются стратиграфическим и площадным распространением глинистых покрышек, которые контролируют основные запасы газа на исследуемой территории. По площадному распространению и по мощности их можно разделить на региональные и локальные.

Региональная покрышка – это достаточно мощный литологически выдержанный слой глинистых пород, распространенный на обширной территории.

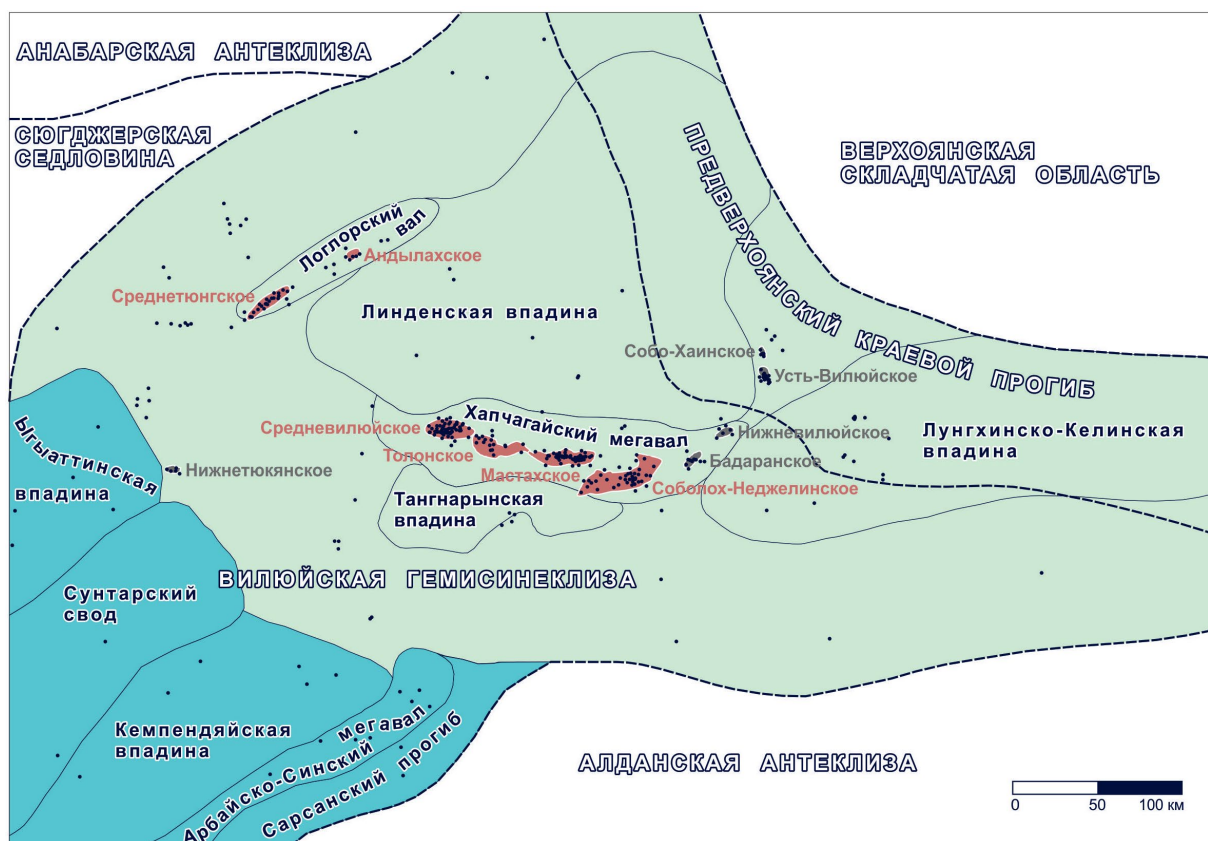


Рис. 1. Структурно-тектоническое и нефтегазогеологическое районирование Вилуйской гемисинеклизы и Предверхоянского краевого прогиба [5, 6, 7]

Она является надежным флюидоупором, препятствующим миграции и разрушению залежей УВ в масштабах всего региона.

Локальная глинистая покрывка – это относительно непроницаемое для флюидов (нефти, газа, воды) геологическое тело ограниченного распространения, приуроченное к пределам месторождения или близко расположенных месторождений. Она служит экраном, удерживающим залежи углеводородов от вертикальной миграции.

Наиболее перспективные в отношении нефтегазоносности верхнепермские и нижнетриасовые отложения представлены (снизу вверх) тарагайской (P_2), неджелинской (T_1), таганджинской (T_1) и мономской (T_1) свитами [8, 9, 10, 11]. Роль флюидоупоров для продуктивных комплексов выполняют относительно выдержанные по площади региональные глинистые толщи неджелинской и мономской свит нижнего триаса, а также сунтарская свита нижней юры [12]. Кроме того, в отложениях таганджинской свиты небольшие залежи газа продуктивного пласта T_1 -Х экранируются хорошо выдержанной локальной глинистой пачкой.

Залежи газа с конденсатом верхнепермских продуктивных горизонтов контролируются существенно глинистой нижнетриасовой неджелинской свитой (рис. 2), которая сама содержит газоконденсатные залежи в расклинивающих ее невыдержанных песчаных пластах. Зависимость суммарной мощности песчаных прослоев

в неджелинской свите от ее общей мощности показана на рис. 3. Можно отметить, что на месторождениях Хапчагайского мегавала при общей мощности свиты от 80 до 125 м суммарная мощность песчаных прослоев составляет от 15 до более 40 м на Соболах-Неджелинском и Бадаранском месторождениях.

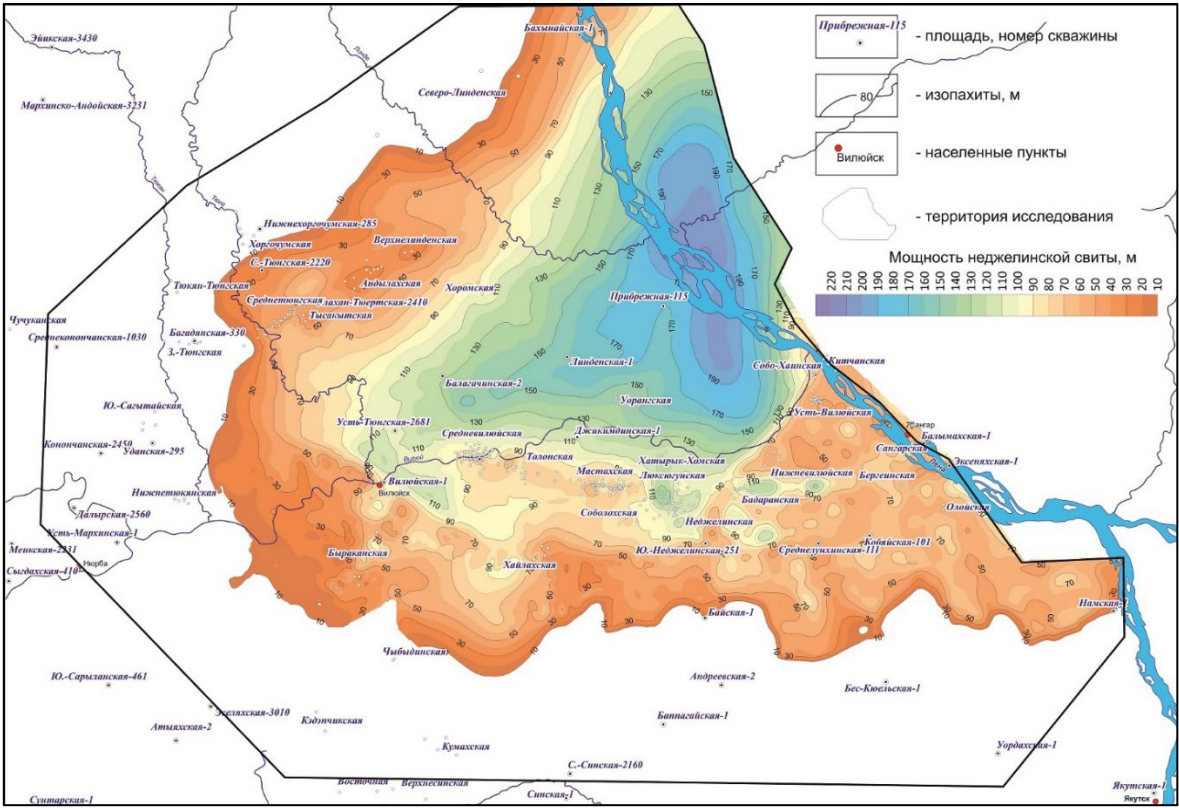


Рис. 2. Карта мощности неджелинской свиты

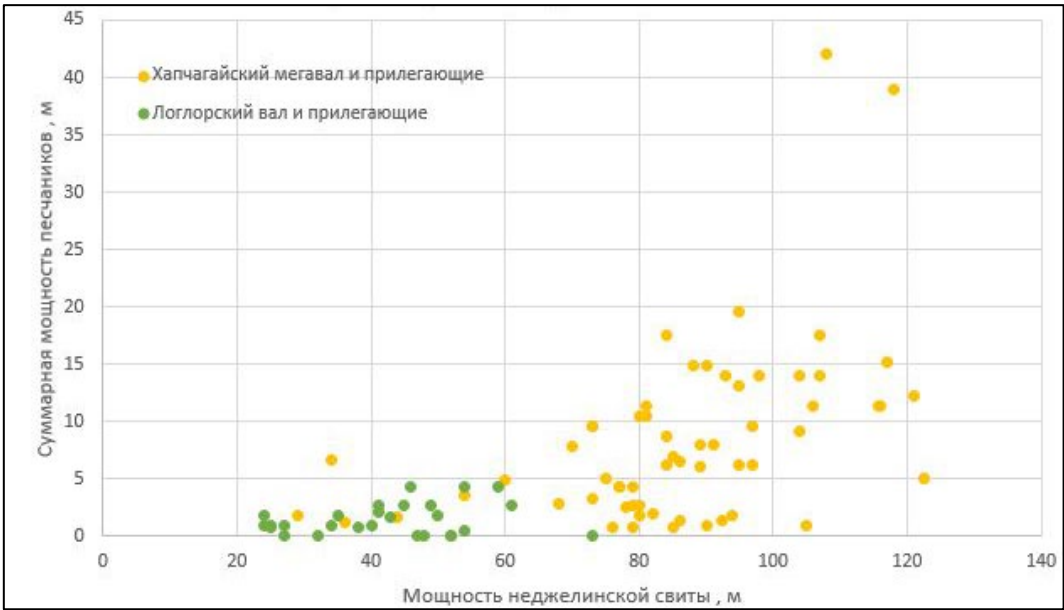


Рис. 3. Зависимость суммарной мощности песчаных прослоев от общей мощности неджелинской свиты

Наиболее крупные залежи газа в более молодых отложениях индского яруса нижнего триаса контролируются сложной преимущественно глинистыми породами мономской свиты оленекского яруса (рис. 4).

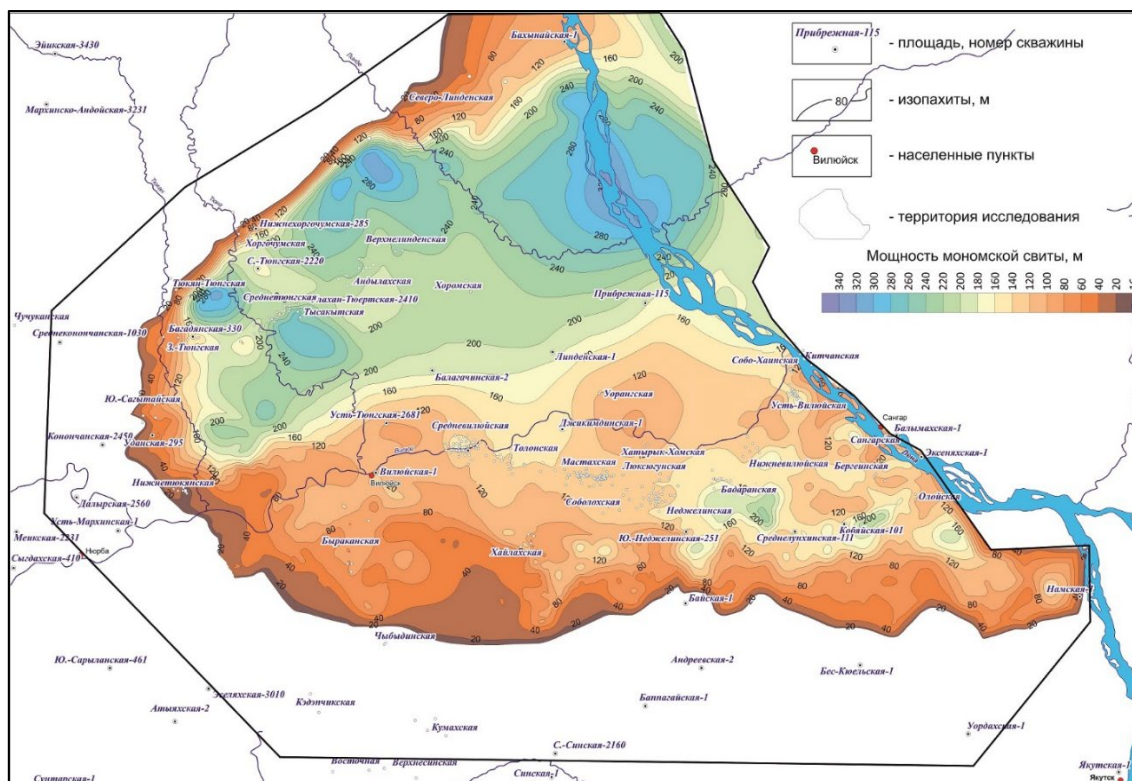


Рис. 4. Карта мощности мономской свиты

Мономская свита при мощности от 80 до 150 м также содержит продуктивные песчаные пласты. Суммарная мощность песчаных прослоев показана на рис. 5.

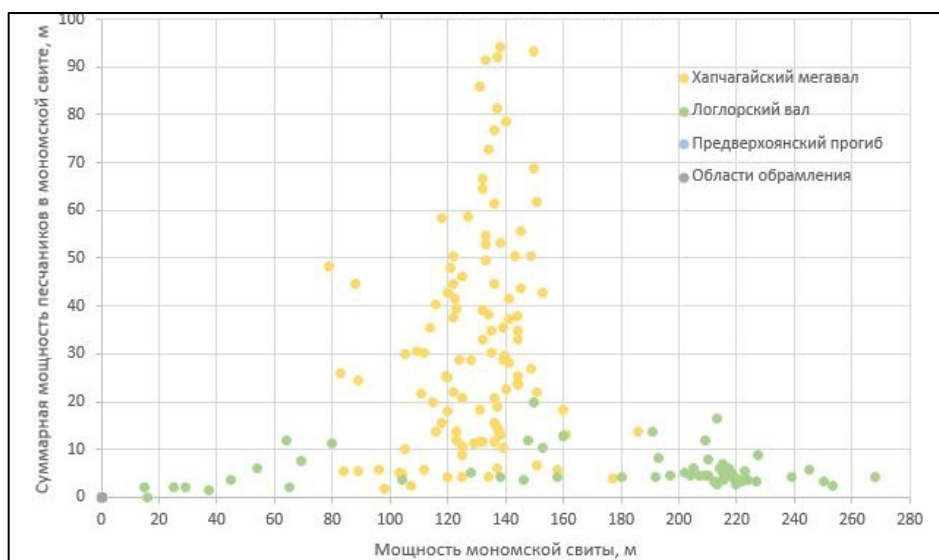


Рис. 5. Зависимость суммарной мощности песчаных прослоев от общей мощности мономской свиты

Нижнеюрские залежи газа контролируются залегающей в кровле нижней юры сунтарской свитой (рис. 6). В кызылсырской свите нижней юры присутствуют залежи газа, которые контролируются глинистыми пачками локального распространения.

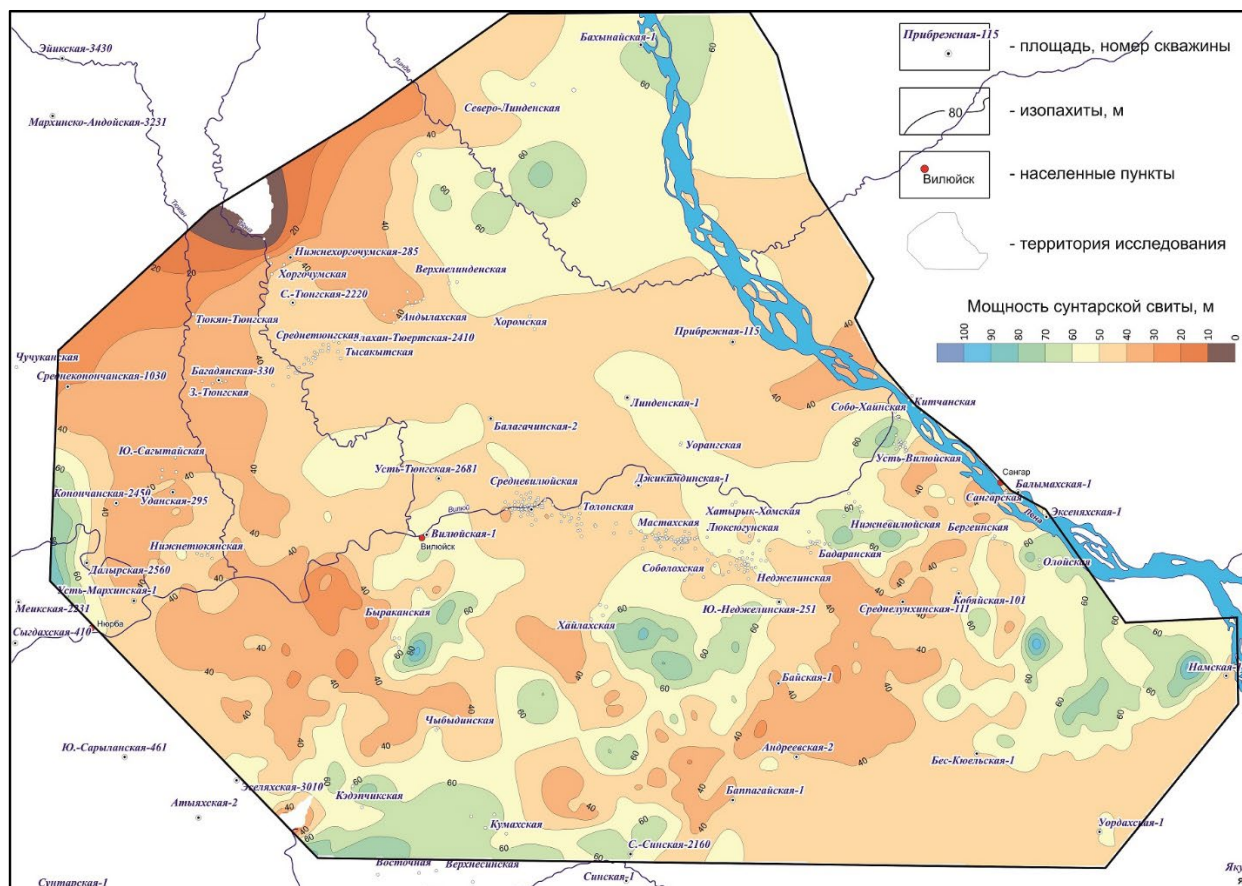


Рис. 6. Карта мощности сунтарской свиты

Таким образом, детальный анализ геологического строения инд-оленокских покровов позволил изучить особенности распределения по площади Вилюйской гемисинеклизы как региональных флюидоупоров, так и локальных глинистых прослоев с высокими изолирующими свойствами. Отмечено, что на Хапчагайском мегавале и его восточном продолжении региональные покровы максимально теряют свою однородность и содержат прослои песчаников суммарной мощностью до 40 м в неджелинской свите и до 100 м в мономской свите, практически полностью замещая глинистые отложения, образуя, так называемые, «литологические окна». Региональные флюидоупоры нижнего триаса в направлении от центральных к прибортовым районам исследуемой территории постепенно выклиниваются, лишь в северо-восточной части по направлению к Предверхо-янскому краевому прогибу в Линденской впадине их мощности достигают максимальных. Для мономской свиты увеличение мощностей наблюдается в северо-западном и северном направлении. Региональная глинистая покровная нижняя

юры – сунтарская свита – распространена по всей территории и имеет достаточно выдержанную мощность.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № FWZZ-2026-0045.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/863973-na-geologorazvedku-v-yakutii-iz-federalnogo-byudzheta-budet-napravleno-okolo-18-mlrd-rub/>
2. <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/899647-grr-i-kak-ikh-stimulirovat-glava-rosnedr-poyasnil-chto-zapasov-nefti-v-rossii-khvatit-na-vse-vremya-/>
3. Kalinin A.I., Sivtsev A.I. Differentiated assessment of the oil and gas potential of the sides of the Vilyui syncline. Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences. 2025;(4): 25-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-25-43
4. Федорович М.О., Космачева А.Ю. (2023). Прогноз нефтегазоносности Вилюйской гемисинеклизы на базе интерпретации геолого-геофизических материалов и технологии бассейнового моделирования (Республика Саха (Якутия)). Георесурсы, 25(1), с. 81–94. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.9>
5. Обзорная структурно-тектоническая карта нефтегазоносных территорий Республики Саха (Якутия) (2015). 1:1500000. Якутск: Якутскгеофизика.
6. Лено-Вилюйская нефтегазоносная провинция (1969). М: Наука, 278 с.
7. Конторович, А.Э. Нефтегазогеологическое районирование Сибирской платформы (уточненная версия) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.И. Вальчак, И.А. Губин, А.О. Гордеева, Е.Н. Кузнецова, В.А. Конторович, С.А. Моисеев, М.Ю. Скузоватов, А.М. Фомин // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: Сб. материалов Междунар. науч. конф. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017 (Новосибирск, 17-21 апр. 2017 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – Т. 1. – С. 57-64.
8. Граусман, В.В. Стратиграфия верхнего докембрия и фанерозоя перспективных на нефть и газ территорий Западной Якутии: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук / В.В. Граусман. – Новосибирск, 1994. – 38 с.
9. Граусман, В.В. О строении таганджинской свиты в разрезе триаса центральной части Лено-Вилюйской нефтегазоносной области (НГО) / В.В. Граусман, В.Д. Матвеев // Стратиграфия нефтегазоносных отложений Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1980. – С. 46-51.
10. Граусман, В.В. Стратиграфия пермских отложений Вилюйской синеклизы / В.В. Граусман, В.Д. Матвеев, С.В. Мейен // Известия академии наук СССР. Серия геологическая. – 1982. – № 11. – С. 57-67.
11. Граусман, В.В. Стратиграфия верхнепалеозойских отложений Вилюйской синеклизы / В.В. Граусман, С.В. Мейен // Известия академии наук СССР. Серия геологическая. – 1987. – № 10. – С. 53-60.
12. Федорович, М. О. Перспективы нефтегазоносности верхнепалеозой-мезозойских отложений южной части Вилюйской гемисинеклизы / М. О. Федорович, А. Ю. Космачева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 2, № 1. – С. 212-218. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-2-1-212-218. – EDN BYBIEN.

©М. О. Федорович, А. Ю. Космачева 2026

Ю. Ф. Филиппов¹✉

Худосейский грабен-рифт – миф или реальность?

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: PhilippovYF@ipgg.nsc.ru

Аннотация. Проведен анализ материалов сейсмопрофилирования ОГТ в зоне развития ранне-мезозойского Худосейского грабен-рифта, выделенного на северо-востоке ЗСП в 60-70-е годы прошлого столетия. Сделан вывод о несоответствии линейной зоны гравитационных и магнитных аномалий в левобережной части Енисея на широте г. Дудинка Худосейской структуре. Вместо ожидаемой «троговой» структуры растяжения, на сейсмических разрезах отчетливо фиксируется узкая антиклинальная зона выхода на предъюрскую поверхность древних (рипейских?) дислоцированных толщ, осложненная разломами взбросо-надвигового характера и мел-кайнозойским возрастом наиболее «молодых» дислокаций.

Ключевые слова: грабен-рифт, гравимагнитные аномалии, сейсмогеологический разрез, Западно-Сибирская плита

Yu. F. Filippov¹

The Khudoseysky Graben-Rift: Myth or Reality?

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,
e-mail: PhilippovYF@ipgg.nsc.ru

Abstract. An analysis of CDP seismic profiling data was conducted in the development zone of the Early Mesozoic Khudosey graben-rift, identified in the northeastern West Siberian Plate in the 1960s-70s. A conclusion was made about the discrepancy between the linear zone of gravitational and magnetic anomalies in the left-bank part of the Yenisei at the latitude of Dudinka and the Khudoseyskaya structure. Instead of the expected «trough» extensional structure, seismic sections clearly reveal a narrow anticline zone of outcrop of ancient (Riphean?) dislocated strata on the Pre-Jurassic surface, complicated by reverse-thrust faults and the Cretaceous-Cenozoic age of the "youngest" dislocations.

Keywords: graben-rift, gravity-magnetic anomalies, seismogeological section, West Siberian Plate

В 60-х годах прошлого столетия специалистами СНИИГГиМС под руководством В.С.Суркова в фундаменте Западно-Сибирской плиты (ЗСП) была выделена система раннемезозойских субмеридиональных грабен-рифтовых структур (под различными названиями), наиболее значимые из которых – Колтогорско-Уренгойский в центральной части и Худосейский в восточной [1]. Эти структуры выделялись, в основном, по результатам интерпертации геофизических данных, а именно - на основании линейного характера распределения аномалий магнитного и гравитационного полей. Положительные магнитные и гравитационные аномалии интерпретировались как зоны прогибания и разломов, вдоль которых на границе перми и триаса, одновременно с образованием траппов на Сибирской платформе (СП), происходили излияния базальтовых магм на поверхность. По

мнению авторов, такая масштабная перестройка земной коры могла послужить одной из основных причин образования в мезозое огромного осадочного бассейна и формирования чехла ЗСП. И если наличие центрального Колтогорско-Уренгойского «желоба» впоследствии было подтверждено сейсмическими данными и бурением сверхглубоких скважин (СГ-6, СГ-7 и др.), то в отношении Худосейской структуры, северный фрагмент которой (с поворотом на восток) прослеживается на картах аномальных полей на территории Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП), вопрос остается открытым.

В последние годы были получены новые сейсмогеологические данные, которые заставляют серьезно усомниться в подобной интерпретации аномальной зоны. На рис.1 показан северный фрагмент Худосейского грабен-рифта на геологической карте и картах аномальных потенциальных полей, который пересечен сейсмическими профилями ОГТ.

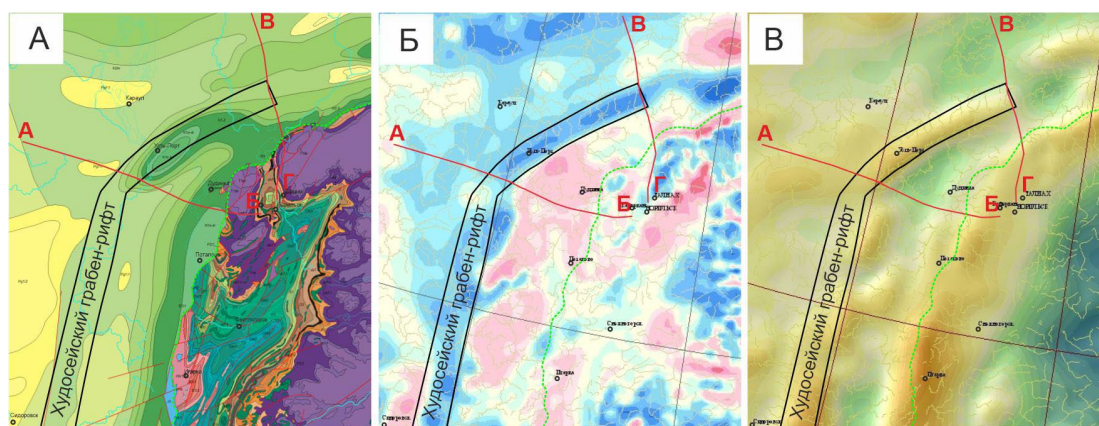


Рис. 1. Положение северного фрагмента Худосейского грабен-рифта (по [1]) на геологической карте(А), карте магнитных аномалий(Б), карте гравитационных аномалий (В).

Красными линиями показаны сейсмопрофили (приведены на рис.2-3), зеленой линией – восточная граница ЗСП

На субширотных композитных сейсмических разрезах, пересекающих лево – и правобережные территории Енисея, отчетливо фиксируются зоны поднятия блоков фундамента по разломам взбросо-надвигового характера, сопровождающиеся складчатостью юго-восточной вергентности. На приведенном ниже разрезе (рис. 2) обращает на себя внимание различное соотношение этих поднятых блоков с разновозрастными перекрывающими осадочными толщами. В восточной части разреза (правобережье р. Енисей) фиксируется предвендское несогласие, характерное для западных районов СП, где умеренно складчатые и частично денудированные комплексы рифея перекрыты полого залегающими вендскими и более молодыми раннепалеозойскими отложениями. Непосредственно в районе р. Енисей и прилегающей левобережной части на предъюрской поверхности обнажаются наиболее древние фрагменты рифея, а перекрывающие венд-палеозойские толщи полностью денудированы. При этом юрско-меловые толщи чехла ЗСП плащеобразно перекрывают

дислоцированный рифей, никак не наследуя его структуру. Еще западнее, в центральной части разреза фиксируется другой, контрастный и достаточно узкий (не более 30-40 км) выступ с хаотичной волновой картиной, характерной для существенно дислоцированных структур. Непосредственно над этим выступом фиксируется амплитудное воздымание юрских и меловых толщ с денудацией значительной части последних (рис.1А, 2), что резко отличает его от восточного и говорит о существенно более молодом (поздний мел – кайнозой) возрасте формирования поднятия.

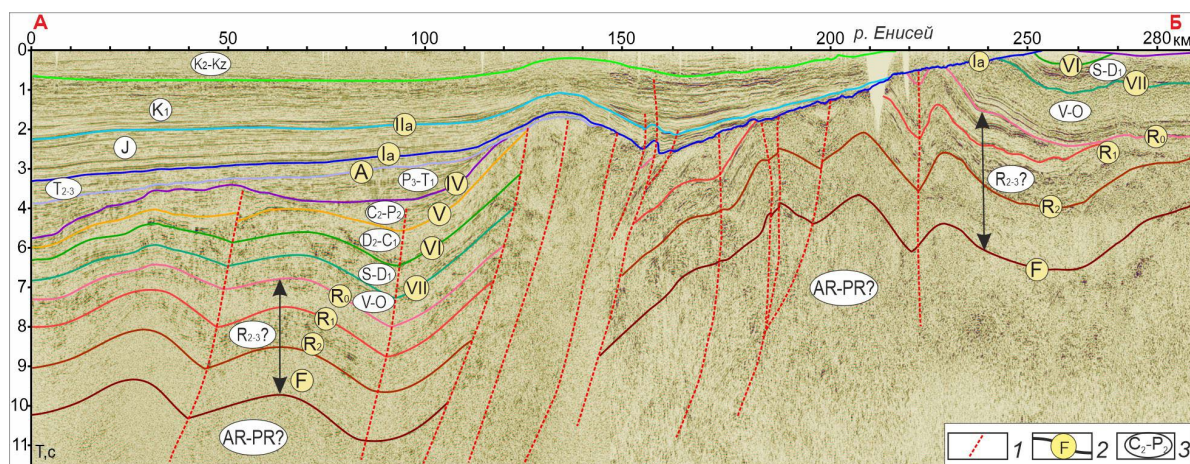


Рис. 2. Временной сейсмогеологический разрез по профилю АБ
1 – разломы; 2 – отражающие горизонты и их индекс; 3 – возраст комплекса.

Важным моментом является тот факт, что эта линейная в плане зона выступов, судя по распределению аномальных гравимагнитных полей, протягивается под мезозойским чехлом ЗСП в левобережной части Енисея далеко на юг, а на севере (с поворотом на восток) прослеживается вдоль южного борта ЕХРП, где также фиксируется на другом субмеридиональном разрезе (рис.3).

Эта зона на всем протяжении совпадает с хорошо выраженными линейными положительными аномалиями магнитного и гравитационного полей, которые в свое время и послужили основанием для выделения здесь Худосейского грабен-рифта [1] (рис.1). Как показывают приведенные сейсмические материалы – ничего общего с грабен-рифтовыми структурами эта зона не имеет. Вместо ожидаемой для таких структур характерной зоны прогибания в условиях растяжения, фиксируется зона «молодых» (мел-кайнозойских) дислокаций и поднятий в условиях сжатия, и полное отсутствие триасовых базальтовых комплексов, которые прослеживаются западнее и южнее, а в пределах ЕХРП – севернее. При этом, прилегающие к этим зонам со стороны СП выступы складчатых рифейских комплексов более раннего генезиса (позднегерцинского и раннекиммерийского), никак не проявившихся в структуре перекрывающего их мезозойского чехла, приурочены, наоборот, преимущественно к отрицательным магнитным аномалиям, как и весь Енисейский тектонический пояс, включая Енисейский кряж на юге и приграничные области ЕХРП на севере.

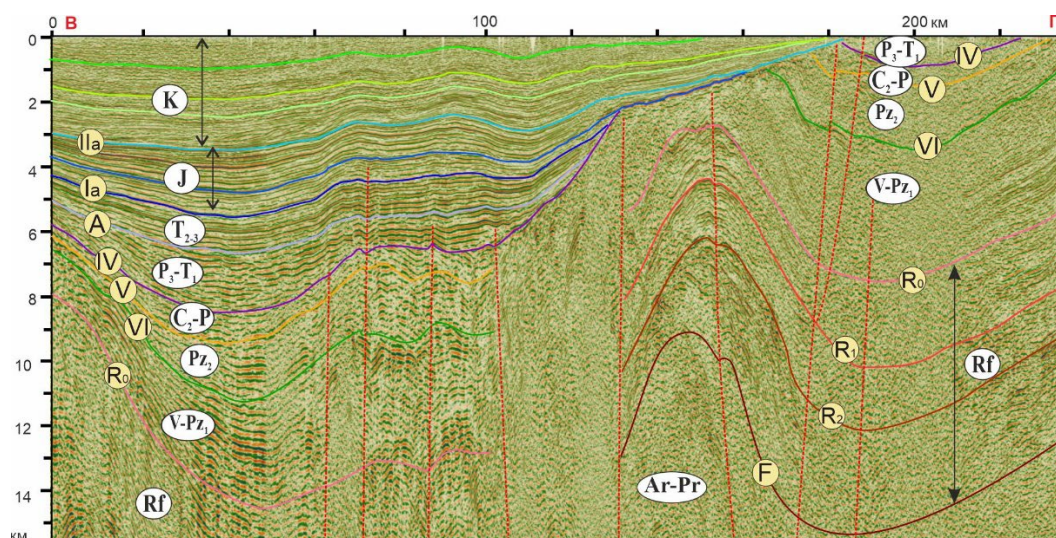


Рис. 3. Глубинный сейсмогеологический разрез по профилю ВГ.

Чем объясняется такая дифференциация выступов и очень контрастная граница между ними в потенциальных полях, не совсем ясно – для этого требуется проведение дополнительных исследований.

К сожалению, в левобережной части Енисея от устья Подкаменной Тунгуски до упомянутых профилей на широте г. Дудинки кондиционные сейсмические материалы, характеризующие строение доюрских комплексов, практически отсутствуют. Тем не менее есть другие надежные свидетельства распространения на этих территориях под юрско-меловым чехлом ЗСП древних комплексов. Так, в скв. Медвежья-316 (западнее Игарки) под юрскими отложениями вскрыты метаморфизованные углеродистые сланцы, возраст которых по данным изотопного (U-Pb) датирования составляет более 2,1 млрд. лет [2]. Аналогичный возраст (2 млрд. лет) получен по некоторым цирконам (SHRIMP-II) из гранитоидов, вскрытых на Тыньярской площади на востоке Ханты-Мансийского округа [3]. Колонковыми скважинами на Костровской и Ермаковской площадях (в 100 км южнее Медвежьей-316) вскрыты метаморфизованные сланцы и мраморы, относимые к протерозою [2, 4]. Некоторые специалисты однозначно трактуют эти свидетельства в пользу продолжения структур фундамента СП на запад под чехлом ЗСП [2], другие считают их фрагментами байкальского Енисейского тектонического пояса - складчатого обрамления СП, где, как и на Енисейском кряже, могут встречаться архейско-протерозойские ядра [4]. Базальтовые трапловые тела в пределах предполагаемой Худосейской структуры неизвестны – они фрагментарно вскрываются скважинами южнее и западнее ее, и строго не приурочены к полям положительных магнитных аномалий.

Тектоническая природа зоны выступа древних толщ, реактивированной в кайнозой, остается неясной. К северо-западу от нее по последним геолого-геофизическим данным выделяется древний устойчивый Гыданский блок, где на архейско-протерозойском основании получил распространение умеренно дислоцированный рифейско-палеозойский осадочный комплекс, который фиксируется и в основании ЕХРП [5]. Этот блок может представлять собой северо-западный фрагмент СП, где

формирование рифейского и венд-нижнекаменноугольного комплексов, вероятно, происходило в условиях пассивной континентальной окраины. В этом случае остается неясным генезис вышеописанных линейных дислокаций и древних выступов – они по своему положению оказываются внутрикратонными (рис.4). В случае же террейновой природы Гыданского блока необходимы свидетельства коллизионных или аккреционных процессов и, соответственно, наличие шовных зон (сутур) между Сибирским кратоном и блоком. Отнести к таковым зафиксированную на сейсмических разрезах и совпадающую с положительными гравимагнитными аномалиями узкую линейную зону проблематично.



Рис. 4. Схема основных доюрских тектонических элементов на западной и северо-западной периферии Сибирской платформы.

1 - Сибирский кратон и тектонические блоки с архейско-протерозойским основанием, перекрытые умеренно дислоцированным рифейско-палеозойским осадочным чехлом; 2 - существенно дислоцированные рифейско-палеозойские комплексы, выходящие на дневную поверхность или в основание осадочного чехла ЗСП; 3 - архейско-протерозойские метаморфизованные комплексы в составе Енисейского тектонического пояса, выходящие на дневную поверхность или в основание осадочного чехла ЗСП; 4 – зона преимущественно салаирской складчатости в составе Алтае-Саянской складчатой области, погребенная под осадочным чехлом ЗСП; 5 - зона преимущественно герцинской складчатости фундамента ЗСП; 6 – зоны переработки рифейско-палеозойских комплексов позднегерцинским и раннекиммерийским тектоногенезом на территории Таймырского п-ова; 7 – фрагмент Колтогорско-Уренгойского грабен-рифта; 8 - офиолитовые комплексы в составе Исаковского и Предивинского террейнов на Енисейском кряже; 9 – основные разломы в складчатых зонах по периферии СП (показаны схематично); 10 - граница осадочного чехла ЗСП и ЕХРП

Исследование выполнено по государственному заданию ИНГГ СО РАН в рамках Программы ФНИ (FWZZ-2026-0044).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. - М.: Недра, 1981. - 143 с.
2. Кригин В.А. Западная граница Сибирской платформы и перспективы нефтегазоносности ее окраины // Геология нефти и газа. - 2024. - №5. - С. 67 – 88.
3. Иванов К.С. Ерохин Ю.В., Ронкин Ю.Л., В.В. Хиллер, Родионов Н.В., Лепихина О.П. Первые сведения о раннепротерозойском сиалическом фундаменте на востоке Западно-Сибирской платформы (результаты исследования Тыньярского риолит-гранитного массива) // Геология и геофизика. – 2012. - Т.53. - №10. - С. 1304-1321
4. Старосельцев В.С. Западно-Сибирский бассейн – возможный источник битумов Турханского горста // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2016. - №3(27). - С. 24-30.
5. Конторович В.А., Филиппов Ю.Ф. Условия формирования и геологическое строение Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геофизические технологии. - 2021. - № 4. - С. 16–25.

© Ю. Ф. Филиппов, 2026

А. М. Фомин^{1✉}, Д. С. Потапова², С. А. Моисеев^{1,2}

Закономерности распределения соленасыщенных горизонтов кембрия на территории Мирнинского выступа Непско-Ботубинской антеклизы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация
e-mail: FominAM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Соленосно-карбонатные отложения нижнего кембрия на территории Мирнинского выступа представляют интерес в связи с их нефтегазоносным потенциалом. По результатам исследования было выявлен характер изменения толщин каменной соли в юрегинской, толбачанской и чарской свитах, выявлены области максимального соленасыщения для каждой из свит. Показано изменение положения депоцентра солеродного бассейна на каждый из трех этапов кембрийского соленакопления.

Ключевые слова: нижний кембрий, межсолевые горизонты, Мирнинский выступ, Непско-Ботубинская антеклиза

A. M. Fomin^{1✉}, D. S. Potapova², S. A. Moiseev^{1,2}

Patterns of distribution of salt-saturated Cambrian horizons in the territory of the Mirny protrusion of the Nepa-Botuoba antecline

¹The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: FominAM@ipgg.sbras.ru

Abstract. Lower Cambrian salt-carbonate deposits in the Mirny Salt Basin are of interest due to their petroleum potential. The study revealed patterns of rock salt thickness variations in the Yuregin, Tolbachan, and Chara formations, identifying areas of maximum salt saturation for each formation. The change in the position of the salt basin depocenter during each of the three stages of Cambrian salt accumulation was demonstrated.

Keywords: Lower Cambrian, intersalt horizons, Mirny ledge, Nepa-Botuoba antecline

Введение

В разрезе вендско-нижнекембрийской осадочной толщи на территории Непско-Ботубинской антеклизы выделяются следующие нефтегазоносные комплексы: терригенный вендский, карбонатный вендско-нижнекембрийский и межсолевой средне-нижнекембрийский.

В последнее годы изучению геологического строения межсолевого комплекса на территории Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и, в частности на Непско-Ботубинской нефтегазоносной области, уделяется все более

пристальное внимание. Связано это прежде всего с тем, что эти горизонты рассматриваются как возвратные объекты по наращиванию минерально-сырьевой базы нефти и газа на уже эксплуатируемых месторождениях.

Согласно районированию кембрия, предложенному Н. В. Мельниковым [1] район исследования относится к Ботуобинскому району Ботуобинско-Сюгджерской фациальной области, его особенностью является бессолевой разрез нелбинской, эльганской, олекминской и метегерской свит и наличие прослоев каменной соли в юрегинской, толбачанской и чарской свитах.

Внутри этой толщи выделяется ряд проницаемых горизонтов. В ичерской свите – это ичерский горизонт, чарской свите – чарский, в олекминской свите – олекминский, в толбачанской – толбачанские 1 и 2, в эльганской – эльганский, в билирской свите – осинский [1]. Кроме выделенных горизонтов, в этом разрез фиксируется множество более мелких прослоев сульфатно-карбонатных пород, придающих жесткость соленосному комплексу и способствующих передаче напряжений на большие расстояния. В то же время как пластичные соли обеспечивают высокую подвижность пород этого комплекса [1, 2].

Традиционно на территории Сибирской платформы и, в частности на Непско-Ботуобинской НГО, целевыми горизонтами для поисков и разведки залежей нефти и газа были терригенные и карбонатные отложения венда. Их геологическое строение достаточно хорошо изучено и описано в многочисленных публикациях.

В то же время, с самого начала геологоразведочных работ, изучению межсолевых проницаемых горизонтов нижнего кембрия не уделялось должного внимания. Следует отметить, что нижнекембрийские отложения характеризуются крайне неоднородными гидродинамическими характеристиками. Так было установлено, что при вскрытии бурением данных отложений отмечаются как интенсивные поглощения бурового раствора, так и газопроявления, и проявления пластовых концентрированных рассолов – рапы, с которой связаны основные трудности при строительстве скважин. Сложность оценки перспектив карбонатных горизонтов кембрия заключается в неоднозначности понимания как строения их геологической модели, так и их характера насыщения по территории распространения. Целенаправленные исследования межсолевых горизонтов проводилось лишь в единичных случаях. Это относится как к отбору керна, так и к опробованию и испытанию скважин. Вследствие этого нижнекембрийские отложения чаще всего оставались недоизученными [3].

Перспективы нефтегазоносности исследуемой территории связаны, в первую очередь, с подсолевыми отложениями венда (ботуобинский улаханский продуктивные горизонты) и нижнего кембрия (осинский продуктивный горизонт). В последние годы на ряде месторождений открыты залежи в толбачанской и олекминской свитах нижнего кембрия (рис. 1).

В настоящей работе нами будут рассмотрены закономерности распределения общих толщин соленосной части юрегинской, верхнетолбачанской и чарской свит в Ботуобинском фациальном районе Сюгджеро-Ботуобинской фациальной области.

Месторождения	Год открытия													
	1970	1981	1981	1984	1985	1986	1988	1990	1990	1994	2017	2021	2022	2024
Среднеботуобинское														
Иреляхское														
Тас-Юряхское														
Иктехское														
Маччобинское														
Северо-Нелбинское														
Нелбинское														
Бесюряхское														
Мирнинское														
Станахское														
Стульдюкарское														
Южно-Стульдюкарское														
Кубалахское														
Нелятское														

С

1

С

2

3

Рис. 1. Нефтегазоносность нижнекембрийских отложений на территории северо-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы.

Залежи нефти и газа средние по запасам (5-30 млн т):
1 – газа, 2 – нефти; 3 – непромышленные притоки газа

Методы и материалы

Нами был собран и проанализирован материал по 130 скважинам на северо-востоке Непско-Ботубинской антеклизы. С использованием материалов ГИС были выделены отдельные пропластки солей и подсчитаны их суммарные толщины по юрегинской, толбачанской и чарской свитам. Итогом работы явились детальные карты общих толщин солей.

Для юрегинской свиты наблюдается закономерное уменьшение толщин со 200 до 40 м с юга на север в направлении к Якутской системе кембрийских барьерных рифов. В районе Иктехского месторождения (скв. 651 и др.) выделяется область увеличенных толщин (178-212 м). Минимальные толщины, менее 40 м, наблюдаются в Отулахской-680, Багдынской-2810, Чуоналырской-1561 и Восточно-Сюльдюкарской-1002 скважинах (рис. 2).

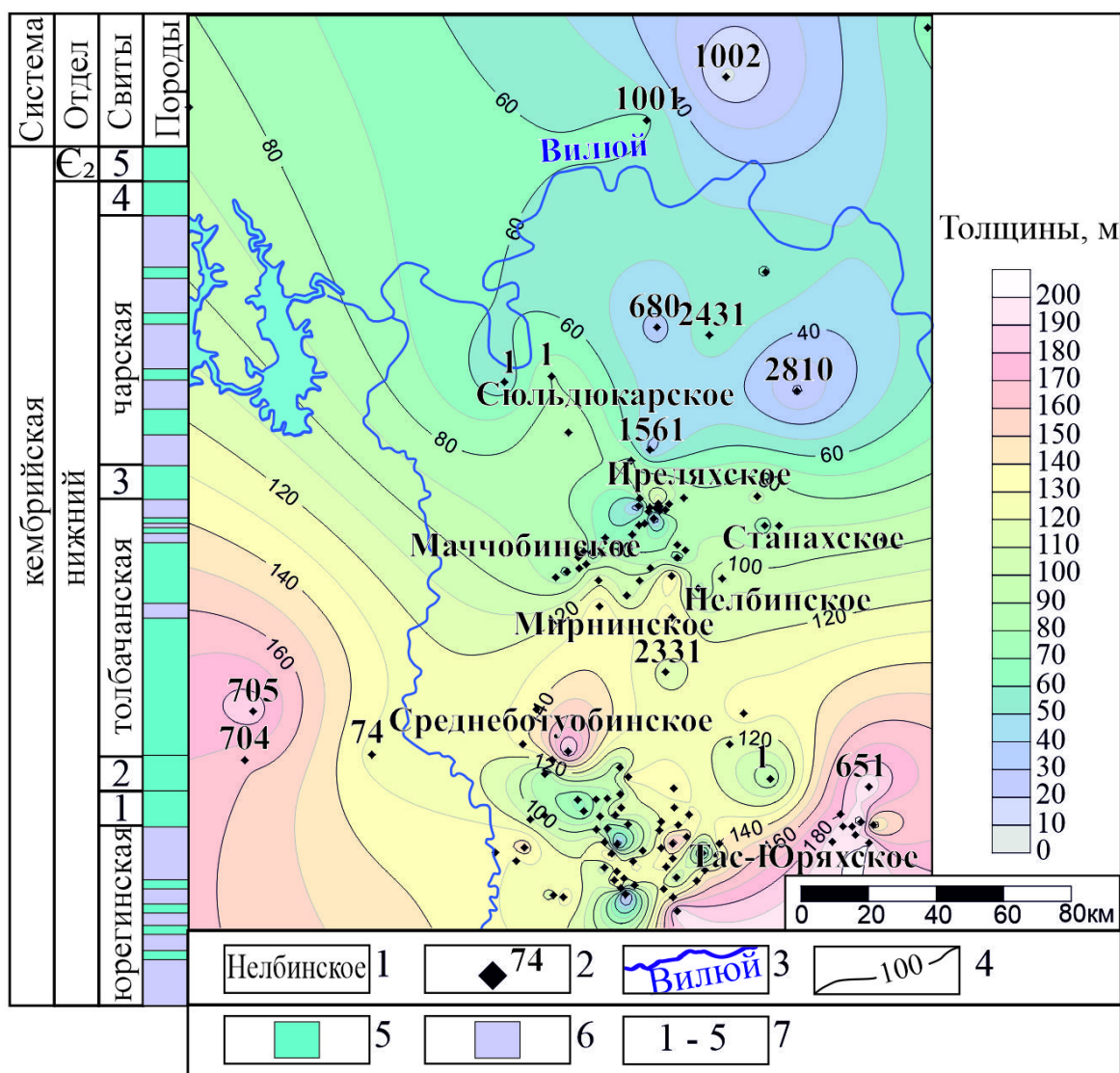


Рис. 2. Карта толщин солей юрегинской свиты

1 – месторождение углеводородов; 2 – скважина; 3 – реки; 4 – толщины солей;
породы: 5 – карбонатные, 6 – каменная соль;
свиты в стратиграфической колонке: 1 – нелбинская, 2 – эльгянская, 3 – олекминская,
4 – ичерская, 5 – метегерская

Толбачанская свита также распространена повсеместно в пределах полигона исследования. Соленасыщенные отложения накапливались преимущественно в верхнетолбачанской подсвите.

Ее мощности увеличиваются на юго-восток (Иктехское месторождение), где составляют 120-170 м. На Мирнинском выступе мощности солей верхнетолбачанской подсвиты сокращаются с юга на север, от 80 м для Тас-Юряхского и Среднеботуобинского месторождений до 40-60 м на Иреляхском и Маччобинском месторождениях (рис. 3).

Следует отметить, что на ряде скважин Тас-Юряхского месторождения, Чуоналырской, Дьогуской, Юрегинской и Восточно-Сюльдюкарской площадях

наблюдаются аномально низкие значения соленасыщенности, возможно связанных с вымыванием солей.

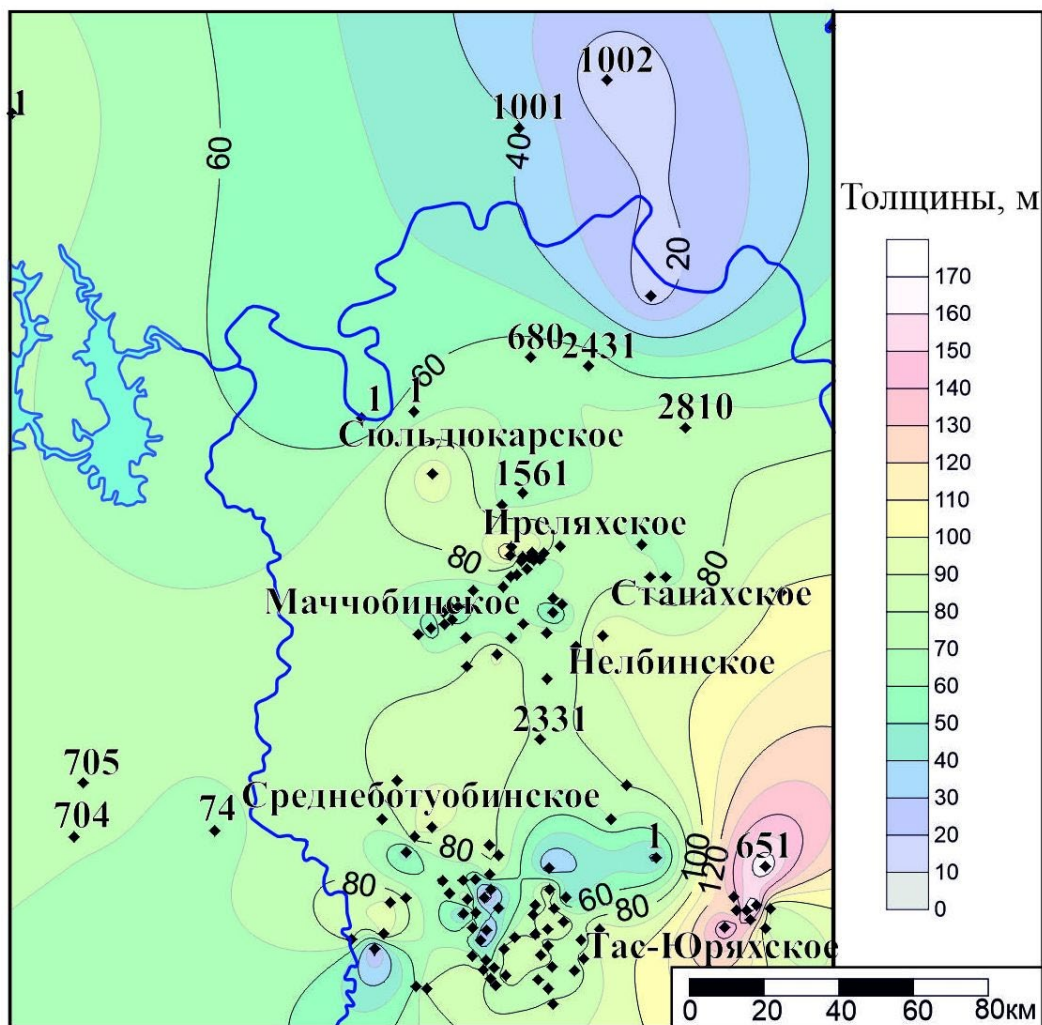


Рис. 3. Карта толщин солей верхнетолбачанской подсвиты

Сравнивая соленасыщение юрегинской свиты и верхнетолбачанской подсвиты можно сделать вывод о сохранении депоцентра на юго-востоке территории (Иктехское месторождение).

Поскольку соленосные фации отлагались только в поздне-толбачанское время, соленасыщенность свиты составляет около 68 % от юрегинской.

В чарское время толщины солей достигли максимальных значений, в пределах территории исследования наблюдается их незначительное уменьшение на севере до 120 м. Появляются два депоцентра – западный с толщинами от 200 до 280 м (Сюльдюкарское месторождение) и восточный с толщинами 200-250 м (Станяхское месторождение, Кугасская площадь). В целом соленасыщенность чарской свиты составляет больше юрегинской на 122 % (рис. 4).

По литературным данным в направлении к Якутской системе кембрийских барьерных рифов севернее территории исследования наблюдаются толщины чарских солей до 300 м [3].

При этом тенденция минимальной соленасыщенности (менее 50 м) в целом ряде скважин на Тас-Юряхской, Среднеботубинской, Юрегинской и Восточно-Сюльдюкарской сохраняется с позднетолбчанского времени.

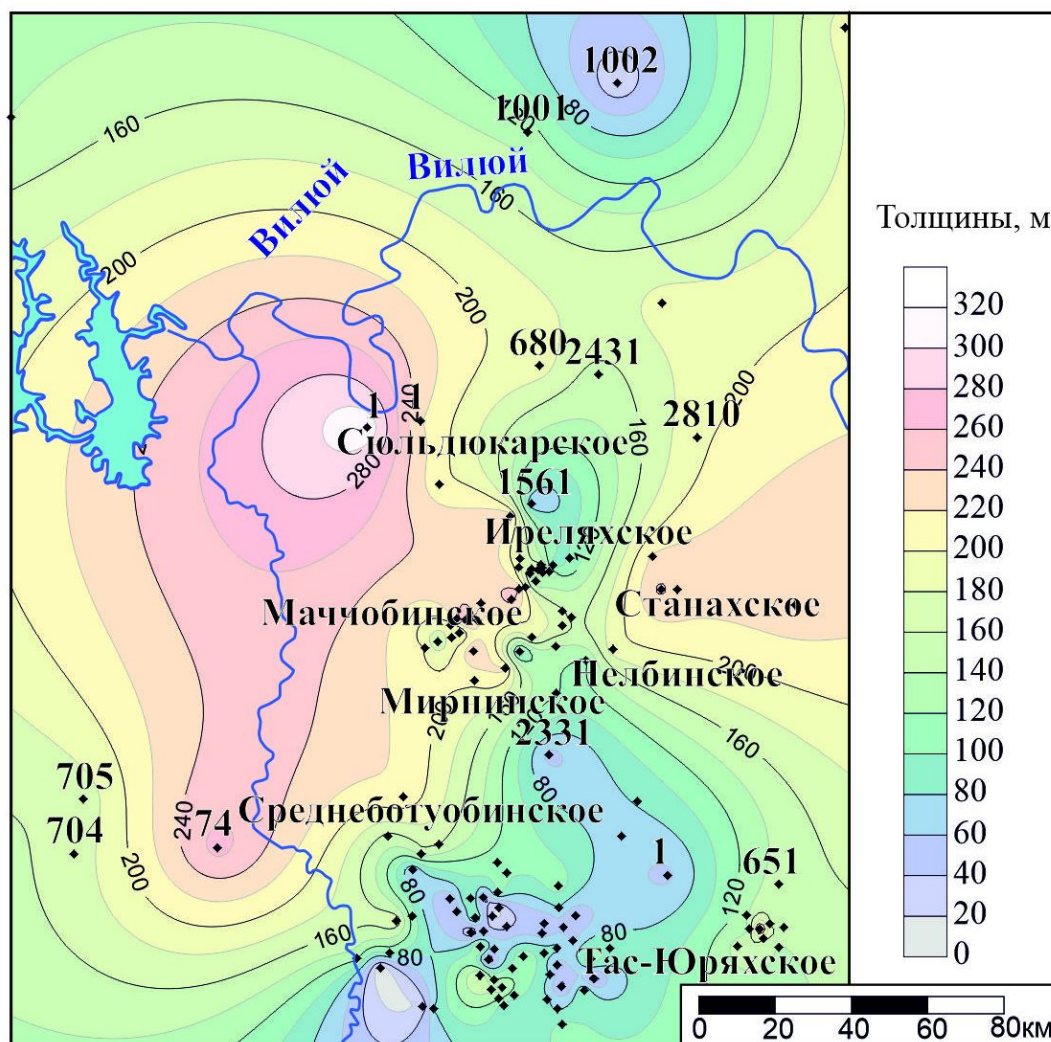


Рис. 4. Карта толщин солей чарской свиты
Условные обозначения смотри на рис. 2

Уменьшение толщин солей в соленосно-карбонатных свитах может быть связано с внедрением трапловых тел. Из приведенных карт толщин солей были вычтены толщины трапов.

Заключение и выводы

Едва ли не впервые для территории северо-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы построены карты солей для юрегинской, толбчанской и

чарской свит и установлены закономерности распространения солей для каждой из свит.

Показано резкое изменение мощностей солей в центральной части полигона, связанное по-видимому, с влиянием Вилуйско-Мархинской зоны глубоких разломов.

Выполненная работа позволяет наметить зоны благоприятные для формирования и сохраненности залежей нефти и газа в межсолевом нижнекембрийского комплекса в северных районах Непско-Ботуобинской НГО, что может быть весьма важным при проведении здесь поисково-разведочных работ.

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований FWZZ-2026-0045 Государственной программы ФНИ «Геолого-геофизические и ресурсные модели нефтегазоносных провинций Сибири как основа прогноза высокотехнологического развития нефтегазового комплекса до 2050 г.».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история) / Новосибирск: СНИИГГиМС, 2018. – 177 с.
2. Фомин А.М., Моисеев С.А. Перспективы нефтегазоносности и характеристика продуктивных горизонтов кембрийских межсолевых отложений центральной части Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14. – № 3. – http://www.ngtp.ru/rub/2019/26_2019.html
3. Конторович А.Э. Палеогеография Сибирской платформы в кембрии и ее влияние на нефтегазоносность / А.Э. Конторович, А.М. Фомин, С.А. Моисеев, И.А. Губин, Е.Н. Кузнецова // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича (29 января–1 февраля 2024 г., Новосибирск, Россия). – Новосибирск: СО РАН, 2024. – С. 111-114.

© А. М. Фомин, Д. С. Потапова, С. А. Моисеев, 2026

Я. В. Фомина^{1✉}, А. А. Муравьева^{1,2}

Гидрогеохимические особенности карбонатного комплекса кембрия Сибирской платформы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрены особенности химического состава подземных вод нижне-среднекембрийских отложений Сибирской платформы. Кембрийские отложения представлены тремя водоносными комплексами – литвинцевским, нижнебулайско-ангарским и усольско-бельским, которые относятся к соленосной гидрогеологической формации. В разрезе распространены слабометаморфизованные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания с минерализацией от 30 до 300 г/дм³ и сильно метаморфизованные седиментогенные хлоридные кальциевые и хлоридные натриево-кальциевые рассолы с минерализацией от 300 до 600 г/дм³. В них установлены высокие концентрации полезных компонентов: Li, Rb, Sr, B, Br, I и др, которые возрастают вниз по разрезу по мере роста минерализации.

Ключевые слова: генетические коэффициенты, гидрогеохимические условия подземных вод, рассолы, Сибирская платформа

Ya. V. Fomina^{1✉}, A. A. Muravyeva^{1,2}

Hydrogeochemical features of the cambrian carbonate complex of the Siberian platform

¹A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper examines the chemical composition of groundwater in Cambrian aquifers on the Siberian Platform. Cambrian deposits are represented by three aquifer systems—the Litvintsevsky, Nizhnebulai-Angara, and Usolsko-Bel'sky—which belong to a saline hydrogeological formation. The section is characterized by weakly metamorphosed sodium chloride leaching brines with mineralization ranging from 30 to 300 g/dm³ and highly metamorphosed sedimentogenic calcium chloride and sodium-calcium chloride brines with mineralization ranging from 300 to 600 g/dm³. These brines contain high concentrations of useful components, including Li, Rb, Sr, B, Br, I, and others, which increase downsection as mineralization increases.

Keywords: genetic coefficients, hydrogeochemical conditions of groundwater, brines, Siberian platform

Введение

Уникальность подземных рассолов изучаемого региона обусловлена высокой минерализацией и степенью метаморфизма, древним возрастом вмещающих

пород, а также высокими концентрациями в рассолах промышленных компонентов, таких как: литий, бор, бром, стронций, рубидий, церий и др. Их содержания в рассолах соленосной формации во много раз превышают минимальные промышленные концентрации.

В настоящее время во всем мире вопросы геохимии рассолов, их генезиса и содержания полезных компонентов широко изучаются специалистами в области гидрогеологии, геохимии и металлогении. Процесс образования рассолов может быть разным: от захоронения древних морских вод и выщелачивания соляных толщ до солнечного концентрирования в лагунах и формирования континентальных соленых озер. Специфической обстановкой образования крепких рассолов являются себхи.

Геохимией сверхкрепких рассолов осадочных бассейнов США занимались такие исследователи, как Kharaka Y.K., Maest A.S., Carpenter W.W., Labotka D.M., Panno S.V., Locke R.A., Wilson T.P., Long D.T. [1,2,3].

Процессы производства, извлечения и переработки ценных компонентов рассолов рассматривали в своих трудах M. Haddad, L. Bazinet, B. Barbeau, G. Scelfo, A. Trezzi, F. Vassallo, A. Cipollina, V. Landi, C. Xenogianni, A. Tamburini, D. Xevgenos, G. Micale [4,5].

Попутно добываемые воды нефтяных и газовых месторождений изучали X. Wang, N. Numedahl, C. Jiang [6]. Проблемой переработки рассолов и извлечения лития занимались D. Fuentealba, C. Flores-Fernandez, E. Troncoso, H. Estay (по литиевым рассолам соленых озер Южной Америки и Китая), M. Marza, G. Ferguson, J. Thorson, I. Barton, Ji-Hyun Kim, L. Ma, J. McIntosh (по бассейнам Северной Америки), A. Panagopoulos, K-J. Haralambous, M. Loizidou [7,8].

Глобальный обзор технологии прямого извлечения лития из рассолов был опубликован J. Farahbakhsh, F. Arshadi, Z. Mofidi, M. Mohseni-Dargah, C. Kok, M. Assefi, A. Soozanipourf, M. Zargar, M. Asadnia, Y. Boroumand, V. Presser, A. Razmjou [9,10].

Кембрий повсеместно распространен на Сибирской платформе. Галогенно-карбонатные породы нижнего и среднего кембрия относятся к соленосной гидрогеологической формации, в пределах которой обособляются (сверху вниз) литвинцевский, нижнебулайско-ангарский и усольско-бельский водоносные комплексы. В них можно выделить водоносные горизонты, разделенные между собой пластами солей. В литвинцевском комплексе выделен келорский, в нижнебулайско-ангарском — бильчирский и биркинский, в усольско-бельском — христофоровский, атовский, балыхтинский и осинский горизонты. Для всех перечисленных горизонтов характерны порово-трещинные и трещинно-порово-кавернозные типы коллекторов [11].

Сложность геологического строения в пределах изучаемых районов Сибирской платформы нашла свое отражение в гидрогеологических условиях, площадном распространении рассолов различной минерализации, геохимических и генетических типов [12]. Пластовые воды в нижней части надсолевой формации с глубиной быстро засоляются и становятся сначала крепкими и весьма крепкими рассолами выщелачивания хлоридного натриевого и кальциево-натриевого

состава, а в горизонтах соленосной формации сменяются на высоко метаморфизованные хлоридные рассолы натриево-кальциевого и кальциевого типов.

В ходе исследования была собрана, проинтерпретирована и разбракана база данных, состоящая из более, чем 1000 объектов, куда были включены результаты гидрогеохимического опробования водоносных горизонтов средне-нижне кембрийского возраста.

Основные результаты

Объектом исследования являются подземные воды соленосной гидрогеологической формации средне-нижнекембрийского возраста.

Соленосная гидрогеологическая формация служит зоной перехода от затрудненного водообмена к застойному. Ниже кровли литвинцевской свиты рассолы пользуются повсеместным распространением. В келорском горизонте соленость вод составляет от 9-380 г/дм³ (на глубинах 300-800 м), в бильчирском горизонте распространены воды с общей минерализацией 280-465 г/дм³, далее вниз по разрезу минерализация достигает 500-600 г/дм³ и более (Табл.1). Содержание брома в водах соленосной формации в среднем составляет 3,6 г/дм³, иногда достигает 11-13 г/дм³. Возрастает также содержание других полезных компонентов (литий, стронций, рубидий и др.), водорастворенных органических веществ и газов (ВРГ). Состав газов по вертикали изменяется от азотного и метаново-азотного к азотно-метановому и метановому (метана в сумме с его гомологами более 75 %).

Таблица 1. Характеристика химического состава подземных вод соленосной гидрогеологической формации Сибирской платформы*

Водоносный комплекс	Мобщ	Na+K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
	г/дм ³						
литвинцевский	8,8-380 316(169)	1,55-132,6 54,1(167)	1,0-79,2 55,3(169)	0,1-25,6 8,7(163)	5,3-239,3 197,7(169)	0,01-1,6 0,4(169)	0,01-1,2 0,6(163)
нижнебулайско-ангарский	128-512 321(155)	4,9-122,2 56,3(153)	1,6-144,7 55,5(155)	0,1-42,0 9,1(155)	80,0-336,7 197,8(153)	0,01-5,2 0,9(141)	0,1-3,7 0,7(137)
усольско-бельский	215-632 405(359)	2,3-124,4 47,8(357)	1,6-183,9 86,6(359)	0,16-74,3 12,2(350)	122,2-405,6 254,0(343)	0,03-4,7 0,46(264)	0,02-3,8 0,9(262)

*В числителе приведены предельные значения, в знаменателе - среднее значение, в скобках - количество проб.

По генетическому типу преобладают преимущественно инфильтрогенные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания и седиментогенные высокометаморфизованные натриево-кальциевые и кальциевые рассолы. При минерализации ниже 310-330 г/дм³ практически все рассолы имеют хлоридный натриевый состав, тогда как более минерализованные воды являются натриево-кальциевыми и кальциевыми.

Преимущественно инфильтрогенные рассолы выщелачивания повсеместно распространены вдоль западной и юго-западной границ региона вдоль структур обрамления Сибирской платформы. Их пространственное распространение контролируется глубиной залегания горизонтов и удаленностью от областей питания. Они незначительно метаморфизованы, что подтверждается пониженными значениями натрий-хлорного и хлор-бромного и повышенными значениями кальций-магниевого коэффициентов. Кроме того, установлены пониженная сульфатность и повышенные концентрации кальция, калия, бора и других микрокомпонентов [13,14].

Седиментогенные высокометаморфизованные рассолы натриево-кальциевого и кальциевого типов распространены в центральной части бассейна, их роль уменьшается и в северном направлении к структурам обрамления (от Присаяно-Енисейской синеклизы к Байкитской антеклизе и Катангской седловине). В Тунгусском бассейне большинство изученных рассолов являются натриево-кальциевыми по составу с общей минерализацией 350-400 г/дм³. Зона распространения кальциевых рассолов так же предполагается в центральной и западной частях Курейской синеклизы.

Для большинства структур Сибирской платформы характерен прямой тип вертикальной гидрогеохимической зональности. Однако наблюдается резкое повышение минерализации в верхней части усольской и нижней части бельской свит, что связано с их накоплением в эпохи максимальной солености палеобассейна. На ряде структур выделяется инверсионная гидрогеохимическая зональность (Катанская седловина, Непско-Ботуобинская антеклиза), выражающаяся в уменьшении величины общей минерализации с глубиной. Но зональность имеет не классический линейный вид, а характеризуется более сложной формой зависимости.

Анализ химического состава рассолов по горизонтам показал, что залегающий в основании соленосной формации осинский водоносный горизонт изучен наиболее полно глубоким бурением в пределах всей Сибирской платформы. В нем распространены хлоридные кальциево-натриевые рассолы с минерализацией от 214 до 632 г/дм³. Наиболее минерализованные воды встречены в Ангаро-Ленском бассейне на Балаганкинской и Марковской площадях, что связано с наличием пластов солей в основании усольской свиты (таб. 1). Кроме того, в осинском горизонте в больших концентрациях присутствуют промышленные компоненты (мг/дм³): бром – от 650 до 10580 (в среднем 4840), окись бора – от 80 до 962 (458), литий – от 7 до 590 (166), рубидий – от 2 до 175 (25), церий – от 420 до 9960 (3836) (табл. 2).

Рассолы христофоровского, атовского и балыхтинского горизонтов изучены преимущественно в пределах Ангаро-Ленского бассейна. В целом, на Сибирской платформе в этих горизонтах распространены подземные воды с минерализацией от 265 до 555 г/дм³, в горизонтах отмечены повышенные концентрации полезных компонентов (мг/дм³): лития – до 700, рубидия – до 200, церия – до 10600. При минерализации менее 370 г/дм³ по составу рассолы являются хлоридными натриевыми с низкой сульфатностью. Далее по мере роста минерализации они переходят

в кальциевые. На Тулунской площади встречаются хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией 543 г/дм³, содержания брома составляют 7,9 г/дм³, на Коркинской и Тутурской площадях – с минерализацией 450-462 г/дм³, брома – 3,7 г/дм³.

Таблица 2. Содержание промышленных компонентов в соленосной гидрогеологической формации Сибирской платформы*

Водоносный комплекс	Br	I	B ₂ O ₃	Li	Rb	Sr
	г/дм ³	мг/дм ³				
литвинцевский	0,02-4,9 3,3(159)	0,1-32 25(137)	3,8-16,7 12(34)	0,1-670 234(88)	5,6-33 19,8(128)	109-5918 2029(135)
нижебулайско-ангарский	0,14-6,3 3,1(129)	0,2-30 0,3(91)	11,2-2535 756(46)	15-476 142(95)	0,1-105,0 15,6(115)	0,6-8070 1254(133)
усольско-бельский	0,01-36,8 4,9(267)	0,1-290 25,0(178)	7,3-963 392(56)	5,8-700 167(248)	0,2-199,0 28,2(270)	3,6-9963 3125(288)
минимальная промышленная концентрация	0,2	10,0	320,0	10,0	3,0	300,0

*В числителе приведены предельные значения, в знаменателе - среднее значение, в скобках - количество проб.

Рассолы биркинского горизонта имеют преимущественно хлоридный натриевый состав. Их минерализация в изученных скважинах изменяется в основном от 190 до 330 г/ дм³. Близким составом характеризуются рассолы бильчирского горизонта нижебулайско-ангарского комплекса. По составу они хлоридные натриевые с минерализацией, достигающей 318-325 г/дм³. Хлоридные кальциевые рассолы получены из наиболее закрытых частей разреза на Тутурской (346 г/дм³), Коркинской, Илимской (402 г/дм³), Шелонинской (422 г/дм³) площадях. Содержания промышленных компонентов достаточно высоки, достигают (мг/дм³): лития – 200, рубидия – 50, церия – 8070.

В верхней части гидрогеологического разреза в литвинцевском водоносном комплексе преобладают соленые воды, которые постепенно переходят в рассолы выщелачивания. По результатам опробования келорского горизонта литвинцевского водоносного комплекса на Непско-Ботуобинской антеклизе (Преображенская и Даниловская площади) выявлено распространение подземных вод с минерализацией 30,0-61,3 г/дм³ хлоридного натриевого состава. Концентрации микрокомпонентов достаточно низки(мг/дм³): лития содержится не более 1, стронция – 27, бора – 5,2. В Курейской синеклизе (Южно-Тунгусская НГО) среднекембрийские отложения опробованы множеством скважин, в ней распространены рассолы с минерализацией от 203 до 380 г/дм³ и более. Соответственно содержание полезных компонентов так же возрастает: лития(мг/дм³) – до 670, рубидия – до 33, церия – до 5918.

Заключение

Таким образом, в ниже-среднекембрийских отложениях развиты рассолы с минерализацией от 9 до 632 г/дм³ двух основных типов — инфильтрационные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания и сильно метаморфизованные седиментогенные натриево-кальциевые и кальциевые рассолы. В целом, в регионе преобладает прямая вертикальная гидрогеохимическая зональность, осложненная повышением минерализации в верхней части усольской и нижней части бельской свит, связанным с обстановками осадконакопления. В латеральной зональности наиболее минерализованные рассолы тяготеют к внутренним частям бассейна, опресняясь по направлению к структурам обрамления, где развиты области питания подземных вод. Помимо наличия солевых пластов и удаленности от зон внутреннего питания на состав подземных вод в пределах Сибирской платформы так же влияют развитие интрузий и многолетне-мерзлых пород на севере региона. Наибольший интерес представляют воды усольско-бельского комплекса —самые богатые промышленными компонентами.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования № FWZZ-2026-0047.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kharaka Y.K. Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi Salt Dome Basin, USA. /Y.K. Kharaka, A.S. Maest, W.W. Carpenter, L.M. Law, R.J. Lamother, T.L. Fries // *Applied Geochemistry*. – 1987. — Vol. 2. – P.543-561.
2. Labotka D.M. Isotopic and geochemical characterization of fossil brines of the Cambrian Mt. Simon Sandstone and Ironton–Galesville Formation from the Illinois Basin, USA. / D.M. Labotka, S.V. Panno, R.A. Locke, J.T. Freiburg // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2015. – Vol. 165. – P. 342–360.
3. Wilson T.P. Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan Basin, U.S.A. / T.P. Wilson, D.T. Long // *Applied Geochemistry*. – 1993. – Vol. 8. – P. 507-524.
4. Haddad M. Eco-efficient treatment of ion exchange spent brine via electrodialysis to recover NaCl and minimize waste disposal / M. Haddad, L. Bazinet, B. Barbeau // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 690. – P. 400–409.
5. Demonstration of ultra-high-water recovery and brine concentration in a prototype evaporation unit: Towards zero liquid discharge desalination / G. Scelfo, A. Trezzi, F. Vassallo, A. Cipollina, V. Landi, C. Xenogianni, A. Tamburini, D. Xevgenos, G. Micale // *Separation and Purification Technology*. – 2025. Vol. 354. – 129427.
6. Direct lithium extraction from Canadian oil and gas produced water using functional ionic liquids – A preliminary study / X. Wang, N. Numedahl, C. Jiang // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Vol. 172. – 106126.
7. Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes / D. Fuentealba, C. Flores-Fernandez, E. Troncoso, H. Estay // *Resources Policy*. – 2023. – Vol. 83. – 103572.
8. Geological controls on lithium production from basinal brines across North America / M. Marza, G. Ferguson, J. Thorson, I. Barton, Ji-Hyun Kim, L. Ma, J. McIntosh // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2024. Vol. 257. – 107383.

9. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review / A. Panagopoulos, K.-J. Haralambous, M. Loizidou // *Science of the Total Environment*. – 2019. Vol. 693. – 133545.
10. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization / J. Farahbakhsh, F. Arshadi, Z. Mofidi, M. Mohseni-Dargah, C. Kok, M. Assefi, A. Soozanipourf, M. Zargar, M. Asadnia, Y. Boroumand, V. Presser, A. Razmjou // *Desalination*. – 2024. – Vol. 575. – 117249.
11. Никитенков А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Пенигин А.В., Вараксина И.В., Жуковская Е.А. О возможности реализации проектов CCS в карбонатных коллекторах Сибирской платформы // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 68-78.
12. Новиков Д.А., Черных А.В., Константинова Л.Н., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И. Гидрогеохимия венда Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. – 2021. – Т. 62. – № 8. – С. 1081-1101.
13. Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Вахромеев А.Г. и др. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения // *Рациональное освоение недр*. – 2013. – №1. – С.44-51.
14. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects// *Applied geochemistry*. – 2020. – V.117. – P. 104588.

© Я. В. Фомина, А. А. Муравьева, 2026

Р. А. Хабибулина¹✉

Табуляты разреза «Клубничный» из стратотипической местности куимовской свиты Горного Алтая

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: khabibulinara@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Впервые были изучены табуляты из разреза «Клубничный», который расположен в стратотипической местности куимовской свиты (силур, венлок, лудлов) Горного Алтая, в районе п. Тигирек. Разрез расположен в Чарышско-Инской структурно-фациальной зоне, в западной части Горного Алтая. Ранее в этом разрезе определялись другие группы фауны: ругозы, брахиоподы, трилобиты, остракоды, строматопороидеи. Определенный комплекс табулят представлен девятью видами: *Favosites porrectus* Пошта, *Mesofavosites* sp., *Pachyfavosites* aff. *kozakowskii* Sokolov, *Cladopora* sp., *Taxopora* sp., *Plicatomurus parvus* Chang Chao-cheng, *Heliolites decipiens* (McCoy), *Pseudoplasmodora dzhungaria* Bondarenko и *Squameolites squamiger* Bondarenko. Комплекс табулят разреза «Клубничный» отличается от комплекса табулят из стратотипа куимовской свиты. Только вид *Squameolites squamiger* Bondarenko встречается и в разрезе «Клубничный», и в стратотипе куимовской свиты - разрезе «Тигирек».

Ключевые слова: табуляты, силур, венлок, лудлов, куимовская свита, Горный Алтай

R. A. Khabibulina¹✉

Tabulate corals of the Klubnichnyi section from the stratotype locality of the kuimov formation of Gorny Altai

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch
of Russian Academic Science, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: khabibulinara@ipgg.sbras.ru

Abstract. Tabulates from the Klubnichnyi Section, situated in the stratotype locality of the Kuimov Formation (Silurian, Wenlock, Ludlow) of Gorny Altai, near the Tigirek village, were studied for the first time. The section is located in the Charysh-Inya Facies Zone, in the western part of Gorny Altai. Other faunal groups were previously recovered in this section: rugoses, brachiopods, trilobites, ostracods, and stromatoporoids. The identified tabulate assemblage is represented by nine species: *Favosites porrectus* Pošta, *Mesofavosites* sp., *Pachyfavosites* aff. *kozakowskii* Sokolov, *Cladopora* sp., *Taxopora* sp., *Plicatomurus parvus* Chang Chao-cheng, *Heliolites decipiens* (McCoy), *Pseudoplasmodora dzhungaria* Bondarenko, and *Squameolites squamiger* Bondarenko. The tabulate assemblage of the Klubnichnyi Section differs from that of the stratotype of the Kuimov Formation. The only species *Squameolites squamiger* Bondarenko is found in both the Klubnichnyi Section and the stratotype of the Kuimov Formation—the Tigirek Section.

Keywords: tabulate coral, Kuimov Formation, Wenlock, Ludlow, Silurian, Gorny Altai

Силурийские отложения широко распространены в западной части Горного Алтая. Стратотип куимовской свиты находится в Чарышско-Инской структурно-

фациальной зоне, в районе п. Тигирек, на правом борту р. Иня, недалеко от ручья Куимов, напротив бывшего пос. Комсомолец. Стратотип куимовской свиты был предложен Кульковым Н.П. для обособления верхней терригенно-карбонатной части чагырской свиты [1, 2]. Разрез, описанный Кульковым Н.П. в 1967 году в правобережье р. Иня, у с. Тигирек, был назван «Тигирек». Разрез, описанный Елкиным Е.А. с соавторами позднее под наименованием «Тигирек», понимался как последовательность отложений в логу под наименованием «Клубничный» на водоразделе р. Иня и ручья Тигирек. Разрез «Клубничный» и разрез «Тигирек» являются единым площадным разрезом куимовской свиты. Куимовская свита представлена глинистыми слоистыми известняками с прослоями алевролитов, общая мощность свиты около 400 метров. Куимовская свита и в дальнейшем куимовский горизонт соответствовали верхнему лудлову. В настоящий момент куимовская свита охватывает гомерский, горстийский и лудфордский яруса силура [3], а чагырская свита соотносится с нижним венлоком (шейнвудским ярусом) [4]. Разрез «Клубничный» расположен в стратотипической местности куимовской свиты которая находится в районе с. Тигирек, в западной части Горного Алтая [3, 4] (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение разреза «Клубничный» на геологической карте

Впервые разрез «Клубничный» был описан в 1974 году Елкиным Е.А. и Желтоноговой В.А. [5]. Разрез находится в левом борту лога, который спускается

с севера в долину ручья Тигирек и начинается справа от дороги из с. Тигирек в с. Чинета. Общая мощность разреза 340 метров. Этот разрез является продолжением разреза «Тигирек», который находится в 1,5 километрах то разреза «Клубничный», и представлен переслаиванием различных известняков с большим количеством табулят, ругоз, брахиопод. В разрезе отмечается несколько циклов ритмичного переслаивания слоистых и массивных известняков [3]. Ранее из этого разреза были определены ругозы, брахиоподы, остракоды, трилобиты, строматопороидеи. Также при характеристике разреза указывались конодонты, табуляты, криноидеи. В 2024 году в ходе полевых исследований были отобраны для изучения образцы табулят из 7,8 и 9 пачки разреза «Клубничный».

Впервые в разрезе «Клубничный» определены виды табулят, ранее в этом разрезе были определены другие группы фауны: ругозы, брахиоподы, трилобиты, строматопороидеи, остракоды [3, 5, 6]. Определенный комплекс табулят представлен девятью видами: *Favosites porrectus* Ро́та, *Mesofavosites* sp., *Pachyfavosites* aff. *kozkowski* Sokolov, *Cladopora* sp., *Taxopora* sp., *Plicatomurus parvus* Chang Chao-cheng, *Heliolites decipiens* (McCoy), *Pseudoplasmodora dzhungaria* Bondarenko, *Squameolites squamiger* Bondarenko (рис. 2, рис. 3). Вид *Favosites porrectus* Ро́та, впервые был описан из верхнесилурийских отложений Чехии [7]. Вид *Plicatomurus parvus* Chang Chao-cheng известен из верхнесилурийских лудловских отложений Казастана [8]. Ранее другой вид этого редкого рода *Plicatomurus* Chang Chao-cheng был определен в северо-западной части Горного Алтая в разрезе куимовской свиты «Марагда-2» и в разрезе черноануйской свиты «Черный Ануй-2» [9]. Вид *Heliolites decipiens* (McCoy) известен из венлокских отложений Англии и Японии [10], из лудловских отложений Чехии [7], Северной Америки [11]. *Squameolites squamiger* Bondarenko встречается в верхнесилурийских лудловских отложениях Центрального Казахстана [12], ранее этот вид был определен в разрезе «Генералка-склоновый» в районе с. Генералка [9] и в стратотипе куимовской свиты [6]. Вид *Pseudoplasmodora dzhungaria* Bondarenko известен из нижнедевонских отложений [13]. Вид *Pachyfavosites kozlowskii* Sokolov известен из верхнелудловских отложений Подолии [14]. Вид *Pachyfavosites* aff. *kozkowski* Sokolov из разреза «Клубничный» очень близок к виду, определенному Соколовым Б.С. из Подолии.

Определенный комплекс табулят большей частью характерен для лудловского отдела силура. Комплекс табулят из разреза «Клубничный» отличается от комплекса табулят из стратотипа куимовской свиты разреза «Тигирек» [15]. Табуляты из разреза «Клубничный» имеют плохую сохранность и часто наблюдаются перекристаллизованные стенки. Комплекс табулят из разреза «Тигирек» состоит из 25 видов табулят, очень хорошей сохранности и пигментированными стенками. Только вид *Squameolites squamiger* Bondarenko встречается и в разрезе «Тигирек» и в разрезе «Клубничный». В разрезе «Тигирек» вид *Squameolites squamiger* встречен во второй подсвите куимовской свиты, которая соответствует горстийскому ярусу, в разрезе «Клубничный» этот вид определен из третьей подсвиты куимовской свиты, которая сопоставляется с лудфордским ярусом.

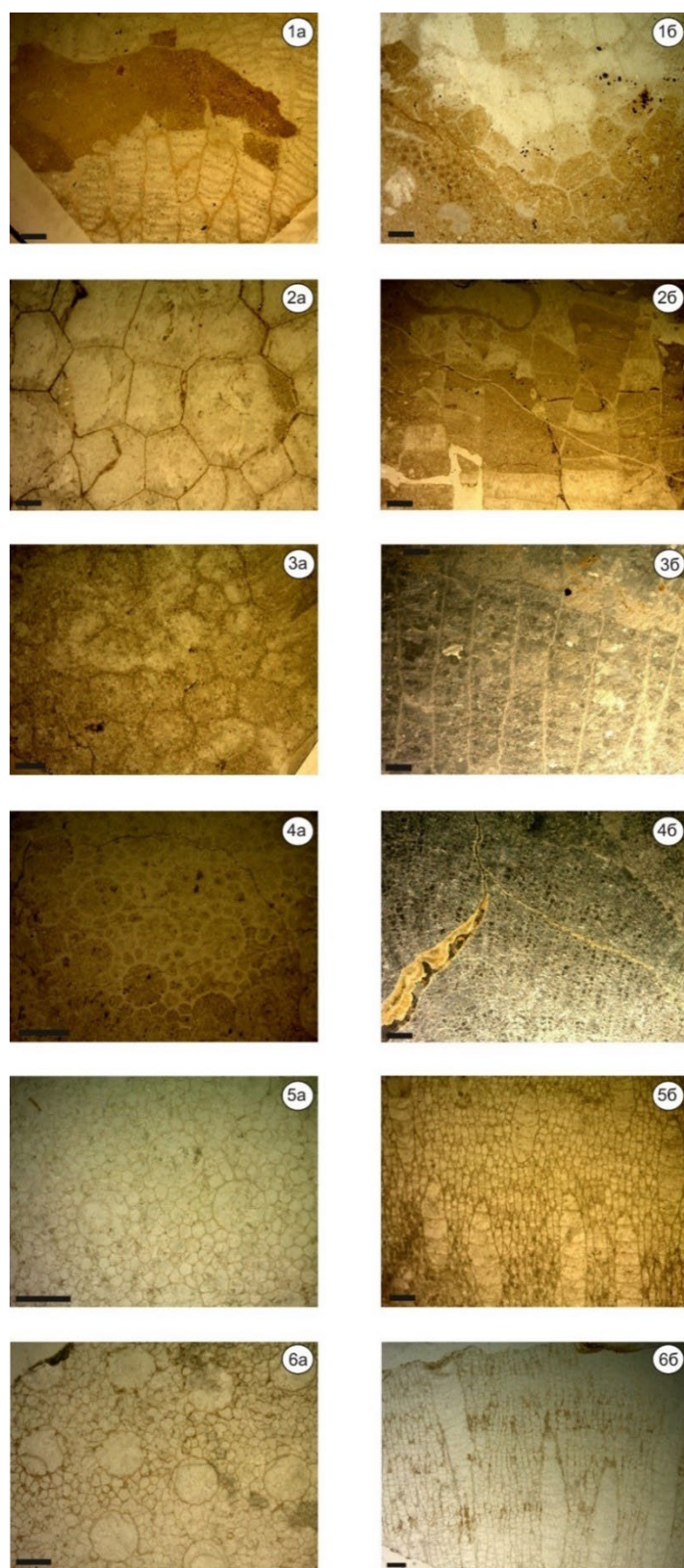


Рис. 3. Виды табулят из разреза «Клубничный»:
 1а-б, *Mesofavosites* sp.; 2а-б, *Favosites porrectus* Роѣта; 3а-б, *Plicatomurus parvus*
 Chang Chao-cheng; 4а-б, *Pseudoplasmodora dzhungaria* Bondarenko;
 5а-б, *Heliolites decipiens* (McCoy); 7а-б, *Squameolites squamiger* Bondarenko.
 Длина масштабной линейки – 1 мм

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульков, Н.П. К стратиграфии силурийских отложений Горного Алтая / Н.П. Кульков // Бюллетень Московского общества испытателей природы, отд. геологии. – 1966. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 77–82.
2. Кульков, Н.П. Брахиоподы и стратиграфия силура Горного Алтая / Н.П. Кульков. – М.: Наука, 1967. – 151 с.
3. Сенников, Н.В. Терригенно-карбонатный тип седиментации в силуре Горного Алтая: строение, фациальные особенности, фаунистические комплексы и стратиграфическое положение / Н.В. Сенников, Р.А. Хабибулина, О.Т. Обут, Н.В. Новожилова, Д.А. Токарев, В.А. Лучинина // Геология и геофизика. – 2019б. – Т. 60. – № 4. – С. 532–554.
4. Сенников, Н.В. Некоторые проблемные вопросы стратиграфии и палеогеографии раннего палеозоя Алтае-Саянской складчатой области / Н.В. Сенников, И.В. Коровников, О.Т. Обут, Е.В. Лыкова, Н.В. Новожилова, О.А. Родина, Д.А. Токарев, Р.А. Хабибулина, Т.В. Хлебникова // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогеническое прогнозирование: Материалы Второго Российско-Казахстанского международного научного совещания. 1-4 апр. 2014 г., Новосибирск, Россия. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – С. 146–148.
5. Елкин, Е.А. Древнейшие дехенеллиды (трилобиты) и стратиграфия силура Горного Алтая / Е.А. Елкин, В.А. Желтоногова, Н.В. Сенников, Л.С. Базарова. – Новосибирск: Наука, 1974. – 109 с.
6. Sennikov, N.V. Ordovician-Silurian Biostratigraphy and Paleogeography of the Gorny Altai / N.V. Sennikov, E.A. Yolkin, Z.E. Petrunina, L.A. Gladkikh, O.T. Obut, N.G. Izokh, T.P. Kipriyanova. – Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2008. – 154 p.
7. Pořta, Ph. Anthozoaires et Alcyonaires / Ph. Pořta / Barrande J. (ed.). Système Silurien du Centre de la Bohême, Prague, № 8. – 1902. – 347 p.
8. Чжан, Чжао-чэн. *Plicatomurus* gen. nov. (Favositidae) из верхнесилурийских отложений Центрального Казахстана / Чжао-чэн Чжан // Палеонтологический журнал. – 1959. – № 3. – С. 27–32
9. Хабибулина Р.А. Табуляты силура Горного Алтая и их стратиграфическое значение. автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. - Новосибирск. 2025.- 22 с.
10. Sugiyama, T. Stratigraphical and palaeontological studies of the Gotlandian deposits of Kitakami mountainland / T. Sugiyama // The Science Reports of the Tohoku Imperial University. Ser. 2. – 1940. – Vol. 21. – № 2. – P. 81–146.
11. Lee, D. Heliolitid corals of the Upper Silurian West Point Formation, Gaspé, Quebec / D. Lee, J. Noble // Journal of Paleontology. – 1988. – 62(6). – P. 855–865.
12. Бондаренко, О.Б. Ревизия рода *Plasmopora* / О.Б. Бондаренко // Палеонтологический журнал. – 1963. – № 1. – С. 42–52.
13. Бондаренко, О.Б./ Гелиолитиды // Характеристика фауны пограничных слоев силура и девона Центрального Казахстана. Том XII.- Под ред. Меннера В.В. Материалы по геологии Центрального Казахстана. Москва «Недра». 1975. - 247с
14. Соколов, Б.С. Табуляты палеозоя европейской части СССР. Введение. Общие вопросы систематики и истории развития табулят (с характеристикой морфологически близких групп) / Б.С. Соколов // Труды ВНИГРИ. Новая серия. Вып. 85. – Л.: Гостоптехиздат. 1955. – 527 с
15. Хабибулина, Р.А. Силурийские табуляты из стратотипа куимовской свиты силура района п. Тигирек (Горный Алтай) / Р.А. Хабибулина, Н.В. Сенников // Биogeография и эволюционные процессы. Материалы LXXII сессии Палеонтологического общества при РАН — СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2026. – С. 203–205.

© Р. А. Хабибулина, 2026

А. В. Ядренкин¹✉

Первые находки микрофауны в триасовых отложениях кряжа Прончищева (север Средней Сибири)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: YadrenkinAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Представлены первые результаты микрофаунистических исследований триасовых отложений центральной части кряжа Прончищева. Микрофауна представлена фораминиферами, конодонтами, остракодами. Изучен таксономический состав комплексов и стратиграфическое распределение в разрезе. Находки микрофауны приурочены к пяти стратиграфическим уровням отвечающим трансгрессивным периодам развития Сибирского палеобассейна: нижний оленек, верхний оленек, нижний ладин, нижний карний и рэт. Установлено присутствие конодонтовой зоны *Neogondolella mosheri* (чекановская свита) и слоев с фораминиферами *Orthovertella* ex gr. *coctilis* - *Ammobaculites longus* (ыстаннахская свита) и *Involutaria triassica* – *Marginulina nordvikensis* (осипайская и нижняя часть чайдахской свит). Раннеладинский и рэтский возраст выделенных комплексов фораминифер определен по их сходству с комплексами из соседних районов, где возраст обоснован по макрофауне. Актуальность результатов исследований определяется необходимостью разработки надежной биостратиграфических шкал по микрофауне как приоритетной группой при исследовании закрытых площадей, в том числе при бурении на шельфе моря Лаптевых.

Ключевые слова: микрофауна, фораминиферы, конодонты, триас, кряж Прончищева (север Средней Сибири)

A. V. Yadrenkin¹✉

The first finds of microfauna from the Triassic deposits of the Pronchishchev Ridge (north of Middle Siberia)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: YadrenkinAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The first results of microfaunal studies of Triassic deposits in the central part of the Pronchishchev Ridge are presented. The microfauna is represented by foraminifera, conodonts, and ostracods. The taxonomic composition of the assemblages and their stratigraphic distribution in the section are studied. Microfaunal finds are confined to five stratigraphic levels corresponding to transgressive periods in the development of the Siberian Paleobasin: Lower Olenekian, Upper Olenekian, Lower Ladinian, Lower Carnian, and Rhaetian. Conodont zone *Neogondolella mosheri* are presented in the Chekanovskogo Formatin and beds with foraminifers *Orthovertella* ex gr. *coctilis* - *Ammobaculites longus* (Ystanakh Formation) and *Involutaria triassica* - *Marginulina nordvikensis* (Osipa Formation and of the lower part Chaidakh Formations) was established. The Early Ladinian and Rhaetian ages of the identified foraminiferal assemblages were determined based on their similarity to assemblages from adjacent areas, where the age was substantiated by macrofauna. The relevance of these research results is determined by the need to develop reliable biostratigraphic scales based on microfauna as a priority group when exploring closed areas, including during drilling on the Laptev Sea shelf.

Keywords: microfauna, foraminifera, conodont, Trias, Pronchishchev Ridge, north of the Middle Siberia

Введение

В настоящее время остро встает вопрос о необходимости изучения геологического строения шельфа арктических морей России в связи с оценкой его потенциальной нефтегазоносности. Решение данного вопроса предполагает ревизию всего геологического материала, а также состояния биостратиграфической изученности по данной территории, и в первую очередь естественных выходов, расположенных на островах и арктическом побережье.

Стратиграфия триаса кряжа Прончищева остается одной из наименее изученных в Лаптевоморском секторе Арктики. Район исследований расположен на арктическом побережье междуречья рек Анабар и Оленек (рис. 1). Согласно принятому фациальному районированию (Казakov и др., 2002) он находится между Усть-Анабарским и Лено-Оленекским фациальными районами, но его положение до настоящего времени было неясным. Изученность геологического строения кряжа Прончищева базируется на результатах геологической съемки 40 – 60-х гг., когда закартированные отложения триаса были разделены до отделов [1]. В 80-х гг. на завершающем этапе с участием ПГО «Аэрогеология» были выделены свиты: для нижнего отдела – нерасчлененные ыстаннахская и пастахская (верхний оленек), в среднем – устьянабарская и гуримисская, а в верхнем – осипайская, чайдахская и тумулская [2]. Триас на кряже Прончищева представлен терригенными толщами преимущественно морского, прибрежно-морского и континентального генезиса. Возрастное обоснование выполнено по относительно немногочисленным находкам морской макрофауны (аммоноидеи, двустворчатые моллюски, брахиоподы). Следует отметить, что тематические палеонтолого-стратиграфические исследования, в том числе микрофаунистические, до сих пор не проводились.



Рис. 1. Местоположение района исследований и фрагмент геологической карты (масштаб 1:200 000) с положением изученных разрезов (1 – р. Сеннигез-Песчаная, 2 – р. Песчаная, 3 – р. Урассалах).

В 2012 г. геологами ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) были проведены комплексные био- литостратиграфические, геохимические работы по изучению верхнепалеозойских и мезозойских отложений в естественных выходах в центральной части кряжа Прончищева в местах пересечения его реками Песчаная, Сеннигез-Песчаная и Урассалах. В результате существенно уточнено строение триаса на данной территории, литостратиграфия и фациальное районирование и условия осадконакопления [3, 4]. По мнению предшественников, средний триас, включающий усть-анабарскую и гуримисскую свиты, по строению отвечает Усть-Анабарскому фациальному району [2]. Однако, нашими исследованиями обосновано присутствие полного набора свит (карангатинской, туора-хаинской, усть-оленекской и олимпийской), характерных для Лено-Оленекского фациального района [4]. Также доказано, что нижний отдел представлен полностью, а не только верхним оленеком [5].

Материалы и методы

В результате комплексных био- литостратиграфических исследований по изучению триасовых отложений в центральной части кряжа Прончищева были отобраны образцы пород для микрофаунистического анализа. Микрофаунистический анализ выполнен по общепринятой методике [6]. Дезинтеграция пород алевроито-глинистой разности проводилась с помощью многократного плавления в тиосульфате натрия, известняки растворялись в 5% растворе уксусной кислоты.

Отбор микрофоссилий выполнено под бинокуляром, а изучение и фотографирование раковин фораминифер на микроскопе Discovery. V12. SteREO ZEISS с программным обеспечением AxioVision Rel.4.8. Раковины фотографировались в отраженном и проходящем свете, просветленные в иммерсионной жидкости, что позволяло получить качественные изображения, включая особенности их внутреннего строения.

Все образцы имеют точную привязку в разрезах и обоснование возраста согласно ранее опубликованным материалам и принятым био- и литостратиграфическим схемам [3, 4, 7, 8].

Результаты

Микрофауна немногочисленна и присутствует в 17 образцах. В нижнем триасе она установлена в разрезе на р. Сеннигез-Песчаная в чекановской и баянхонгорской свитах. В среднем и верхнем триасе - в разрезе на р. Песчаная в усть-оленекской, осипайской, чайдахской и тумулской свитах (рис. 2).

[illegible]

Рис. 2. Стратиграфическая схема триаса Усть-Анабарского и Лено-Оленекского фациальных районов и стратиграфическое положение находок микрофауны в сводном разрезе кряжа Прончищева (р. Сеннигез-Песчаная и р. Песчаная).

Чекановская свита охарактеризована многочисленными конодонтами, реже встречаются зубы рыб, элясмобранхии акулообразных. Среди конодонтов доминируют стержневые формы (*Xaniognathus* ex gr. *expansus* Mosher, *Arctocristatus* cf. *unicus* (A. Dagys), *A. borealis* (A. Dagys). Платформенные формы (*Scythogondolella* cf. *mosheri* (Kozur et Mostler), *Pseudogondolella* ex gr. *nepalensis* (Kozur et Mostler) и листовидные (*Neospatodus curtus* A. Dagys) встречаются единично. Такой таксономический состав конодонтов характерен для нижней части нижнего оленека зоны *Neospatodus waageni*, которая имеет широкое распространение в Лено-Оленекском и Буур-Оленекском районах [9]. Ыстаннахская свита. Микрофауна редка и однообразна, встречены единичные фораминиферы *Hyperammina proneptis*, *Ammobaculites longus*, *Dentalina* cf. *splendida* и зубы рыб. Все вышеперечисленные виды были ранее описаны А.А. Герке (1961) из оленекских отложений Нордвикского района и бассейна р.Буур (левый приток р.Оленек) и характерны для слоев с *Orthovertella* ex gr. *costilis* - *Ammobaculites longus* (верхний оленек) [8].

Усть-оленекская свита (слои 20 и 22 по [4]). фораминиферы редки и представлены единичными экземплярами мелких *Ammodiscus* ex gr. *septentrionalis* Gerke. Кроме фораминифер отмечены единичные зубы рыб и *Tasmanites*? Подобный таксономически однообразный комплекс фораминифер, в котором доминируют мелкие аммодискусы был ранее описан З.И. Булатовой [10, 11] для нижнего ладина разреза мыса Аиркат Усть-Анабарского фациального района (гуримиская свита).

Осипайская свита. В нижней части (пачка 1 по [3]) установлен относительно разнообразный комплекс фораминифер, представленный практически только известковистыми формами нодозариид, за исключением единичных аммодискусов. В его составе преобладают *Marginulina subnordvikensis* Gerke, *Pseudonodosaria humiliformis* (Mamontova), *Dentalina gladioides* Gerke, *Nodosaria subprimitiva* Gerke, обычные – *Involutaria triassica* Gerke, *Anmarginulina* cf. *mirifica* (Gerke); редкие – *Ammodiscus* sp., *Trochammina* sp., *Mesodentalina* ex gr. *tenuistriata* (Terquem), *Marginulina nordvikensis* Mjatluk, *Dainitella insueta* Levchuk et Yadrenkin, *Fronicularia lepida* Gerke, *Ichthyolaria* ex gr. *sulcata* (Bornemann), *Astacolus dolganensis* Levchuk et Yadrenkin, *Marginulinopsis incompta* Levchuk et Yadrenkin. Кроме фораминифер, отмечается присутствие остракод родов *Ogmazonha*, *Nordvikia*, *Nordvikella*, а также мелких гастропод, обычны *Tasmanites* и иглы морских ежей.

Выделенный комплекс фораминифер типичен для осипайской свиты Лено-Оленекского фациального района. Сравнение нашего материала с комплексами фораминифер из стратотипического разреза осипайской свиты мыса Цветкова (Восточный Таймыр) показало, что данный комплекс отвечает слоям с фораминиферами *Involutaria triassica* – *Marginulina nordvikensis* установленными для ее верхней части [8].

Чайдахская свита. В нижней части (пачка 3 по [3]) установлен довольно многочисленный в количественном отношении комплекс фораминифер, в составе которого преобладают *Nodosaria conspicienda* Gerke, *Pseudonodosaria humiliformis* (Mamontova), *Dentalina* cf. *gladioides* Gerke, *D.* cf. *praenuda* Gerke, *Involutaria triassica* Gerke, *Geinitzinita* cf. *antiqua* (Gerke); редки и единичны

Mesodentalina ex gr. *tenuistriata* (Terquem), *P. obconica* (Reuss), *Frondicularia* cf. *brizoides* Gerke, *F.* cf. *lepidaeiformis* Yadrenkin, *Ichthyolaria* cf. *triassica* (Gerke), *Dainitella* *insueta* Levchuk et Yadrenkin, *Marginulinopsis* *incompta* Levchuk et Yadrenkin, *Vaginulinopsis* cf. *efimovae* Yadrenkin.

В целом, комплекс представлен обычным набором видов характерным для нижнего карния [12], но несколько отличается от нижележащих слоев таксономическим составом и структурой. В целом же, он отвечает слоям с фораминиферами *Involutaria triassica* – *Marginulina nordvikensis* и верхней части нижнекарнийской зоны *Boreotrachyceras omkutchanicum* по аммоноидеям [8].

Тумулская свита [2]. В верхней части свиты выделен обедненный комплекс фораминифер, в составе которого отмечены единичные *Saccamina arctica* Gerke, *Glomospira* ex gr. *gordialis* (Parker et Jones), *G. perplexa* Franke, *Trochammina* ex gr. *helicta* Tappan, *T.* ex gr. *sublapidosa* Sapjanik, *Evolutinella* aff. *vertens* (Tappan), *Verneuilinoides* ex gr. *pudica* (Schleifer), *V.* cf. *columnaris* Ziegler, *Nodosaria* cf. *shublikensis* Tappan.

Trochammina helicta Tappan, *Nodosaria shublikensis* Tappan, *Evolutinella vertens* Tappan характерны для верхнего триаса Шублик формации Северной Аляски [13]. *Verneuilinoides columnaris* Ziegler, *Glomospira* ex gr. *gordialis* (Parker et Jones), *G. perplexa* Franke, известны из рэта Австрии [14, 15]. Большинство вышеперечисленных видов отмечались в комплексе из булунканской свиты разрезов восточного типа Буур-Оленекского фациального района (разрезы бассейнов рр. Келимяр и Хорбусуонка), а также в разрезе мыса Тумул (Лено-Оленекский фациальный район), в которых рэтский возраст отложений обоснован присутствием руководящей макрофауны [8, 10].

Заключение

Микрофауна триаса кряжа Прончищева представлена фораминиферами, конодонтами и остракодами. Также в пробах присутствовали и учитывались другие микрофоссилии: зубы рыб, чешуя элясмобиранхий (акулообразные) и остатки водорослей, вероятно, празиофиты рода *Tasmanites*, которые служат хорошими индикаторами морских обстановок.

Находки микрофауны немногочисленны и выявлены для пяти стратиграфических уровней, отвечающим трансгрессивным периодам развития палеобассейна. Таковыми являются ранний оленек, поздний оленек, ранний ладин, ранний карний и рэт. В чекановской свите по конодонтам установлено присутствие зоны *Neospatodus waageni* (низы нижнего оленека), в ыстаннахской – по фораминиферам слои с *Orthovertella* ex gr. *costilis* - *Ammobaculites longus* (верхний оленек). Комплекс фораминифер усть-оленекской свиты обедненный и близок по составу с комплексом из изохронных отложений гуримисской свиты Усть-Анабарского района, где раннеоленекский возраст обоснован по макрофауне. Хорошим стратиграфическим репером является нижний карний, охарактеризованный относительно многочисленными и разнообразными фораминиферами. Осипайская и нижняя часть чайдахской свиты соответствует нижнекарнийской зоне *Boreotrachyceras omkutchanicum* по аммоноидеям и слоям с *Involutaria triassica* —

Marginulina nordvikensis по фораминиферам. В терминальной части триасового разреза на р. Песчаной установлен комплекс фораминифер, который по составу близок комплексам из рэтских отложений Буур-Оленекского и Лено-Оленекского фациальных районов, где возраст обоснован находками руководящей макрофауны.

Таким образом, полученные первые результаты по таксономическому составу и стратиграфическому распределению микрофауны в триасовых отложениях Кряжа Прончищева представляют собой основу для разработки биостратиграфических шкал по разным группам фауны. Микрофауна в силу своих мелких размеров и высокой частоте встречаемости, является приоритетной группой при исследовании закрытых площадей. Поэтому задача разработки и совершенствования детальных биостратиграфических шкал по микрофауне, становится весьма актуальной при ожидаемом бурении на шельфе моря Лаптевых.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам сотрудникам ИНГГ СО РАН А. Ю. Попову, Е. С. Соболеву за консультации и помощь при изучении триасовых разрезов и О.Т. Обут за обработку и растворение проб известняков для последующего выделения из них конодонтов.

Работа финансировалась за счет средств бюджета (проект FWZZ-2026-0042) Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист S-50–52 (Быковский) / А.В. Ванин, Р.О. Галабала, Г.В. Крутий, Л.Н. Набатова, А.В. Трещалов. Объяснительная записка. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2001. – 189 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-50 – Усть-Оленек Объяснительная записка / Проскурнин В. Ф., Шкарубо С. И., Заварзина Г. А., Нагайцева Н. И. и др. – С-Пб.: ВСЕГЕИ, 2017. – 264 с.
3. Попов А.Ю., Соболев Е.С., Ядренкин А.В. Строение и условия формирования осипайской и чайдахской свит (верхний триас) в районе кряжа Прончищева (Средняя Сибирь) // Изв. вузов. Геология и разведка, 2015. № 3. С. 15–19.
4. Попов А.Ю., Соболев Е.С., Ядренкин А.В. Литолого-фациальная характеристика и анализ цикличности среднего триаса кряжа Прончищева (север Средней Сибири) // Литосфера, 2017, № 5, с. 16–27.
5. Попов А.Ю., Шевко А.Я., Соболев Е.С., Ядренкин А.В., Никитенко Б.Л., Травин А.В. Вулканогенно-осадочные и магматические образования триаса кряжа Прончищева (Восточная Сибирь, Арктика): состав, строение, генезис, возраст // Геология и геофизика. 2023. Т.64. №6. С. 767–782.
6. Фурсенко А.В. Введение в изучение фораминифер // Тр. ИГиГ СО АН СССР. Изд-во Наука, Новосибирск, 1978. Вып. 391. – 243 с.
7. Казаков А.М., Константинов А.Г., Курушин Н.И., Могучева Н.К., Соболев Е.С., Фрадкина А.Ф., Ядренкин А.В., Девятов В.П., Смирнов Л.В. Стратиграфия нефтегазоносных

бассейнов Сибири. Триасовая система. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2002. – 322 с.

8. Константинов А.Г., Соболев Е.С., Ядренкин А.В. Стратиграфия триаса восточной части побережья моря Лаптевых и Новосибирских островов // Геология и геофизика, 2013. Т. 54 (8). С. 1028 1–046.

9. Дагис А.А. Раннетриасовые конодонты севера Средней Сибири. // Тр. ИГиГ СО АН СССР, М.: Наука, 1984. Вып. 554. – 70 с.)

10. Дагис А.А., Дагис А.С., Казаков А.М., Курушин Н.И., Булатова З.И., Могучева Н.К. Стратиграфия триасовых отложений побережья Анабарского залива. Геология и нефтегазонасыщенность мезозойских седиментационных бассейнов Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 21–28.

11. Дагис А.С., Казаков А.М. Стратиграфия, литология и цикличность триасовых отложений севера Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. – 177 с.

12. Герке А.А. Фораминиферы пермских, триасовых и лейасовых отложений нефтеносных районов севера Центральной Сибири // Труды НИИГА. Т.120. Ленинград, 1961. – 519 с.

13. Tappan H. Foraminifera from the Arctic Slope of Alaska. Triassic Foraminifera // Geol Surv. Prof. Paper. Washington, 1951. Vol. 236-A. P. 5–20.

14. Ziegler J. H. Beschreibung einer Foraminiferenfauna aus dem Rhat vorn Groben Habber (Nordbayern). Bemerkungen zur Stratigraphie und Palaeogeographie des Rhats in Franken // Geologica Bavarica. Munchen, 1960. №53. P. 36–59.

15. Kristan-Tollmann E. Die Foraminiferen aus den rhatischen Zlambachmergeln der Fischerwiese bei Aussee im Salzkammergut // Jahrb. der Geol. bundesanst. Sonderband/ 1964. N 10. 189 p.

© А. В. Ядренкин, 2026

Е. С. Ярославцева^{1✉}, Т. М. Парфенова¹, Л. М. Бурштейн¹, А. Н. Козырев¹

Распределение содержания органического вещества в отложениях куонамской свиты и ее аналогов (кембрий Сибирской платформы)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: YaroslavtsevaES@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На основании анализа прямых замеров и результатов интерпретации геолого-геофизических материалов выполнено построение карт распределения толщин пород куонамской нефтегазопроизводящей толщи и ее аналогов с содержанием органического углерода в фиксированном диапазоне

Ключевые слова: Восточная Сибирь, куонамская нефтегазопроизводящая толща, кембрий, органическое вещество

E. S. Yaroslavtseva^{1✉}, T. M. Parfenova¹, L. M. Burshtein¹, A. N. Kozyrev¹

Distribution of organic matter content in the lower-middle cambrian kuonamka formation (Siberian platform)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: YaroslavtsevaES@ipgg.sbras.ru

Abstract. Based on the analysis of geochemical investigations and by the results of geological and geophysical material interpretation, the map of the distribution of the organic matter content of the Kuonamka source rock kerogen was constructed.

Keywords: East Siberia, Kuonamka formation, Cambrian, organic matter

В осадочном чехле Восточной Сибири присутствует уникальная чрезвычайно обогащенная ОВ и регионально распространенная куонамская свита нижнего-среднего кембрия и ее аналоги (синская, иниканская, шумнинская свиты и др.), с которыми связывают значительные перспективы нефтегазоносности территории, в том числе и трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ).

Одним из ключевых элементов прогноза нефтегазоносности является историко-геологическое моделирование, при котором реконструируется динамика катагенеза нефтегазопроизводящих толщ (НГПТ) в ходе развития осадочного чехла. Важнейшую основу такой реконструкции представляет обоснование исходных (на начало мезокатагенеза) геохимических характеристик НГПТ, в том числе содержания в них органического вещества (ОВ). В этом отношении возможны два основных подхода: формирование карт содержания средних Сорг в НГПТ или построение схем толщин с Сорг в фиксированном диапазоне. Второй подход предпочтителен и в связи с неравномерным уровнем геолого-геофизической изученности НГПТ

по площади ее распространения, и с точки зрения выявления возможных зон распространения ТРИЗ.

В прошлые годы коллективом авторов во главе с А.Э. Конторовичем были опубликованы схемы толщин пород куонамской свиты и ее аналогов с содержанием Сорг более 5 и более 10% [Ярославцева и др., 2022, 2024]. Настоящая публикация является логическим продолжением данного исследования и описывает построение карты толщин пород с содержанием Сорг 1-5%.

Теоретической основой построения послужили результаты многолетних исследований куонамской свиты и ее аналогов, а также общие представления о закономерностях накопления органического вещества в современных осадках [Геология нефти и газа, 1981; Бахтуров и др., 1988; Баженова и др., 2014; Геохимия..., 1981; Конторович и др., 1981, 1999; Парфенова и др., 2004, 2010, Варламов и др., 2023; Коровников и др., 2024; Соболев и др., 2015; Масленников и др., 2021; Страхов, 1963; Романкевич и др., 2009].

Авторами проведено обобщение и анализ геолого-геофизического материала по распределению Сорг в разрезе и по площади распространения куонамской свиты и ее аналогов. Во всех доступных обнажениях и разрезах скважин выделены слои с фиксированным диапазоном содержаний Сорг: 1-5%, более 5%, более 10% на породу и оценены их толщины. Для разрезов без прямых замеров Сорг построение опирается на качественные связи керн-ГИС.

Фактический материал

Основой для представленного в работе построения послужили все доступные авторам данные по количественным и качественным определениям Сорг (литературные данные и материалы ИНГГ СО РАН), а также результаты интерпретации гаммакаротажа. Проанализированы данные проведенного в ИНГГ СО РАН анализа Сорг по 918 пробам пород из обнажений, 36 пробам пород из скважин восточной, северо-восточной и юго-восточной частей Сибирской платформы.

Особое внимание следует уделить принципу выделения толщин обогащенных пород в слабоизученных разрезах запада и востока Сибирской платформы. В пределах Курейской синеклизы, где отложения кембрия изучены слабо, погружены глубоко и ОВ пород имеет высокую катагенетическую преобразованность, куонамская свита вскрыта единичными скважинами: Чириндинская-271 (с интрузией в центральной части), Сорг в пределах 0,86-0,96, Нижнеимбакская-219 (с интрузией в разрезе вышележащих отложений) с Сорг 2,72–10 %, Сохсолохская-706 (интервал 2023-2247, с интрузией мощностью около 100 м) [Дивина и др., 1996; Соболев и др., 2010; Шабанов и др., 1987; Мельников и др., 2013]. Шумнинская свита вскрыта разрезами скважин Гремякинская и Южно-Пясинская, а также представлена в обнажениях по р. Брус, Сухариха, Кулюмбе, Горбиячин (Сорг до 0,27–0,64 %). Катагенез ОВ пород описанных разрезов высокий и достигает градаций АК (по шкале Конторовича) [Конторович, 1976]. Известно, что потери аквагенного органического вещества в катагенезе высоки, в связи с чем есть основания предполагать гораздо более высокое содержание ОВ в породах куонамской свиты и ее аналогов в пределах данной территории [Вассоевич и др., 1973].

Изучены каротажные диаграммы (гамма-каротаж) по скважинам Чириндинская-271, Нижнеимбакская-219, Сохсолохская-706, вскрывающих куонамскую свиту, а также они проанализированы по скважинам, приуроченным к зоне перехода между депрессионным комплексом и солевым разрезом: Айхальская-706, Удачнинская-2531, Быстыхская-1991, Эйская-3430, Мархинско-Андоиская-3231, Кумахская-481, Северо-Синская-2160, Баппагайская-1, Уордахская-1.

Таким образом, согласно данным гамма-каротажа в разрезе скв. Чириндинская-271 в интервале глубин 4364–4366 интенсивность излучения превышает 20 мкР/ч в интервалах суммарной мощностью 25 м. В разрезе скв. Сохсолохская-706 в интервале 2023–2247 – 7 м. Интенсивность излучения более 15 мкР/ч в соответствующей части разреза в скв. Чириндинская-271 характерна для пород суммарной мощностью до 30 м, в разрезе скв. Сохсолохская-706 – до 20 м, в разрезе скв. Нижнеимбакская в составе глинисто-известняковой толщи – 5 м (инт. 2250-2360 м [Соболев и др., 2010]).

Результаты исследования

На карте распределения толщин пород, содержащих 1-5 % $C_{орг}$, наибольшие значения (более 30 м) характерны для обнажений бассейна р. Большая Куонамка, а также юго-востока Сибирской платформы, Лено-Амгинского междуречья. Толщины 20-30 метров отмечаются в северо-восточной части Сибирской платформы – междуречье Большой Куонамки и Молодо, в районах рек Оленек и Арга-Сала, в Лено-Амгинском междуречье, а также прогнозируются в центральной части Курейской синеклизы. Толщины 10–20 метров пород с $C_{орг}$ 1–5 % распределены практически во всей восточной части Сибирской платформы и прогнозируются в центральной части Курейской синеклизы. Толщины более 5 м с $C_{орг}$ 1–5 % распространены на востоке Сибирской платформы практически повсеместно и прогнозируются в центральной части Курейской синеклизы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № FWZZ-2026-0048 Государственной программы ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженова Т.К., Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Лебедев В.С., Можегова С.В., Ларкин В.Н., Назарова Е.С., Нечитайло Г.С., Грайзер Э.М., Киселев С.М., Киселева Ю.А., Горюнова Е.А., Борисова Л.Б. Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего – среднего кембрия Сибирской платформы. – М.: ВНИГНИ, 2014. – 128 с.
2. Бахтуров С.Ф., Евтушенко В.М., Переладов В.С. Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация. – Новосибирск: Наука, 1988. – 160 с.
3. Варламов А.И., Мельников П.Н., Ефимов А.С., Кригин В.А., Мигурский Ф.А., Проскун В.И., Кравченко М.Н., Смирнов М.Ю., Ухлова Г.Д., Гогоненков Г.Н., Парасына В.С., Виценовский М.Ю., Комлев Д.А. Методология, результат работ и перспективы открытия месторождений нефти и газа в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология нефти и газа. – 2023. - №4. – С. 21-65
4. Вассоевич Н.Б. Особенности катагенеза рассеянного органического вещества в бедных коллекторами глинистых толщах / Н.Б. Вассоевич, Ю.И. Корчагина, М.И. Гербер [и др.] // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1973. № 4, с. 116-124.

5. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука – М.: Недра, 1981. – 552 с.
6. Геохимия нефтегазоносных толщ кембрия Сибирской платформы. Под ред. А.Э. Конторовича. Новосибирск. Тр.СНИИГГиМСа: вып. 139, 1972. 111с..
7. Дивина Т.А. Новые материалы по стратиграфии докембрия и кембрия северо-востока Тунгусской синеклизы / Т.А. Дивина, Л.И. Егорова, А.А. Сплихов [и др.] // Геология и геофизика. – 1996а. – № 7. – С. 23–33.
8. Конторович А.Э., Бахтуров С.Ф., Башарин А.К., Беляев С.Ю., Бурштейн Л.М., Конторович А.А., Кринин В.А., Ларичев А.И., Ли Году, Меленевский В.Н., Тимошина И.Д., Фрадкин Г.С., Хоменко А.В. Разновозрастные очаги нафтидообразования и нафтидонакопления на Северо-Азиатском кратоне // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 11. – С. 1676-1693.
9. Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. Труды СНИИГГиМСа. Вып. 229. М.: Недра. – 1976. – 250 с
10. Конторович А.Э., Евтушенко В.М., Ивлев Н.Ф., Ларичев А.И. Закономерности накопления органического вещества на территории Сибирской платформы в докембрии и кембрии / Литология и геохимия нефтегазоносных толщ Сибирской платформы – М.: Наука, 1981. – С.19-42.
11. Коровников И.В., Вараксина И. В., Конторович А.Э., Парфенова Т.М. Биостратиграфия. Литология и геохимия пород нижнего и среднего кембрия в бассейне реки Кюленке (первые результаты исследования керна скважин // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 1. – С. 151-163. DOI: 10.15372/GIG2023153
12. Масленников М. А., Сухов С.С., Соболев П.Н., Наумова Е. Г., Прощко А.Н., Ракитина И.В., Константинова О.Л. Перспективы нефтегазоносности кембрийских барьерных рифовых систем Сибирской платформы в свете новых геолого-геофизических данных/ Геология нефти и газа. – 2021. – № 4. – С. 29-50. – DOI 10.31087/0016-7894-2021-4-29-50.
13. Мельников Н.В. Уточнение стратиграфии кембрия Бахтинской области Туруханно-Иркутско-Олекминского региона Сибирской платформы (по результатам изучения параметрической Нижнеимбакской скв. 219) / Н.В. Мельников, О.С. Шабанова, И.Е. Горяева // Геология и минеральные ресурсы. – 2013. – №2 (14). – С. 35-44.
14. Парфенова Т.М., Бахтуров С.Ф., Шабанов Ю.Я. Органическая геохимия нефтепроизводящих пород куонамской свиты кембрия (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (7).
15. Парфенова Т.М., Конторович А.Э., Борисова Л.С., Меленевский В.Н. Кероген куонамской свиты кембрия (северо-восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2010. № 3. С. 357-367.
16. Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И. Органическое вещество мирового океана // Геология и геофизика. - 2009. – Т. 50. – №4. – С. 401-411
17. Соболев П.Н. Аналоги доманикоидных отложений куонамской свиты на западе Сибирской Платформы / П.Н. Соболев, В.И. Сухоручко, О.А. Анциферова// Успехи органической геохимии. Материалы Всероссийской научной конференции (11-15 окт. 2010 г.) ИНГГ СО РАН. – 2010. – С. 315-319
18. Соболев П.Н., Попова М.В. Прокудин С.Г. Доманикоидные отложения ииниканской свиты нижнего—среднего кембрия в скважине Усть-Майская-366 (юго-восток Сибирской платформы) // Черные сланцы. Геология, геохимия, значение для нефтегазового комплекса, перспективы использования как альтернативного углеводородного сырья (Материалы Всероссийской научн.-практ. конференции). Якутск, 2015, с. 81—84.
19. Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. – М., Госгеолтехиздат, 1963. – 530 с.
20. Шабанов Ю.Я. Нижний палеозой юго-западного склона Анадарской антеклизы (по материалам бурения) / Ю.Я. Шабанов, В.А. Асташкин, Т.В. Пегель [и др.]. – Новосибирск: Наука. – 1987. – 209 С.
21. Ярославцева Е.С., Бурштейн Л.М., Конторович А.Э, Парфенова Т.М. Закономерности

распределения содержания органического вещества в породах куонамской свиты и ее стратиграфических аналогов (кембрий Сибирской платформы) ///Успехи органической геохимии: Материалы 2-й Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посв. 120-летию со дня рожд. чл.-корр. АН СССР Н.Б. Вассоевича и 95-летию со дня рожд. засл. геолога РСФСР, проф. С.Г. Неручева (г. Новосибирск, 5-6 апреля 2022 г.) – ИПЦ НГУ – Новосибирск – С. 310-313 – 2022. Успехи Органической геохимии

22. Ярославцева Е.С., Парфенова Т.М., Конторович А.Э., Бурштейн Л.М. Распределение органического углерода в породах куонамского комплекса (кембрий Сибирской платформы) // Геология нефти и газа – № 4 – С. 69-78 – 2024

© Е. С. Ярославцева Т. М. Парфенова, Л. М. Бурштейн, А. Н. Козырев, 2026

Д. С. Мельник^{1✉}

Геохимия органического вещества рифейских отложений из скв. Бурская-3410 и Хастахская-930 (Лено-Анабарский прогиб)

¹ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: melnikds@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены результаты геохимического изучения органического вещества (ОВ) рифейских отложений из скважин Бурская-3410 и Хастахская-930 (Лено-Анабарский прогиб) с целью оценки их нефтегазоматеринского потенциала и степени катагенеза. Современные концентрации $C_{орг}$ пиролитические параметры (S_2 , HI) молекулярные параметры (метилфенантроновые индексы, расчетная отражательная способность витринита ~5%, деградация биомаркеров) указывают на высокий катагенез ОВ, соответствующий грациям АК₄₋₅, свидетельствуют о реализации генерационного потенциала. Показано, что начальные содержания $C_{орг}$ на начало мезокатагенеза достигали 2,3%, а породы хастахской, куладинской и тукуланской свит могли быть источником углеводородов для вышележащих вендско-нижнепалеозойских комплексов.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Арктический сектор, рифей, нефтегазоматеринские породы, органическая геохимия, генерационный потенциал, хемофоссилии

D. S. Melnik^{1✉}

Geochemistry of the organic matter in riphean deposits from the Burskaya-3410 and Khastakhskaya-930 wells (Lena-Anabar trough)

¹IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: melnikds@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents the results of a geochemical study of organic matter (OM) of Riphean sediments from the Burskaya-3410 and Khastakhskaya-930 wells (Lena-Anabar Trough) in order to assess their oil and gas source potential and the degree of catagenesis. Modern concentrations of C_{org} , pyrolytic parameters (S_2 , HI), molecular parameters (methylphenanthrene indices, estimated vitrinite reflectivity of ~5%, biomarker degradation) indicate a high catagenesis of OM, corresponding to gradations AC₄₋₅, and indicate the realization of the generation potential. It is shown that the initial C_{org} contents at the onset of mesocatagenesis reached 2.3%, and the rocks of the Khastakh, Kuladin, and Tukulan formations could have been a source of hydrocarbons for the overlying Vendian-Lower Paleozoic complexes.

Keywords: Siberian Platform, Arctic sector, Riphean, source rocks, organic geochemistry, generative potential, chemofossils

Введение

На сегодняшний день вопрос о роли рифея в качестве источника углеводородов для формирования промышленных скоплений нефти и газа на Сибирской платформе остается дискуссионным. В то время как одни специалисты считают рифейский комплекс на северо-востоке Сибирской платформы "пустым" (Баженова и др., 1981,

2014; Каширцев, 2003; Полякова и др., 2016), другие достаточно высоко оценивают его генерационные характеристики (Соболев и др., 2019, Лежнин и др., 2021).

Существует две противоположные точки зрения относительно катагенеза органического вещества рифейских отложений в пределах Лено-Анабарского прогиба. Так, на основе пиролитических данных был сделан вывод о том, что катагенез ОВ рифейских отложений в скважинах Бурская-3410 и Хастахская-930 соответствует градациям МК₂-МК₃ по шкале Н.Б. Вассоевича и отвечает главной зоне нефтеобразования (Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021). Однако данные замеров отражательной способности битуминита в пересчете на отражательную способность витринита демонстрируют высокие значения до 3–5% и свидетельствуют о высоком катагенезе рифейских отложений в скважинах Лено-Анабарского прогиба, на уровне конца мезокатагенеза и начала апокатагенеза, что говорит о реализации этими отложениями как нефтяного, так и газового потенциала (Конторович и др., 2024). При этом состав компонентов органического вещества на молекулярном уровне не изучался.

Цель настоящего исследования – уточнить обогащенность пород ОВ, его тип и катагенез с привлечением современных физико-химических методов, оценить породы рифейских отложений из скважин Лено-Анабарского прогиба в качестве потенциально нефтегазопроизводивших и как источник трудноизвлекаемого УВ сырья.

Методы и материалы

Исследовали коллекцию из 30 образцов рифейских отложений из скважин Лено-Анабарского прогиба. В скважине Бурская-3410 изучены свиты: таймыльрская (глубина отбора 2158–2042 м), хастахская (2565–2246 м), куладинская (2820–2557 м); тулуканская (3066–3000 м), в скв. Хастахская-930 – хастахская (2857–2778 м), куладинская (3112 м).

Для определения содержания органического углерода породы дробили до 0,25 мм, обрабатывали 10 % соляной кислотой для получения нерастворимого остатка (НО). На экспресс-анализаторе методом сжигания в кислороде проб НО определено содержание органического углерода (С_{орг}) в породах. На пиролитической установке НАWK проанализированы генерационные свойства пород, определены величины S₁, S₂, водородного индекса HI, индекса продуктивности PI, температуры T_{max}.

Экстракцию битумоидов проводили из порошков дробленых образцов хлороформом при комнатной температуре с использованием центрифуги; экстракты очищены от серы ртутью. Деление битумоида на фракции проводили по методике, принятой в ИНГГ СО РАН. Метано-нафтеновые фракции битумоидов были проанализированы методом газовой хроматографии, метано-нафтеновые нафтенно-ароматические – методом хромато-масс-спектрометрии в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН.

Результаты

Изученные образцы хастахской, куладинской, тукуланской свит представлены темно-серыми, зеленовато-темно-серыми, черными аргиллитами и аргиллитами

известковистыми. Содержание НО в них составит 74–96%, $C_{орг}$ – от 0,09 до 0,66%, в среднем – 0,2%, что существенно ниже кларковых значения для аргиллитов (0,9% по Н.Б. Вассоевичу). Один образец куладинской свиты представлен доломитом с содержанием НО 3% и $C_{орг}$ – 0,07%. Выходы битумидов ($b_{хл}$) крайне низкие, в пределах 0,002–0,040%, значения битумоидного коэффициента (β) также низкие, обычно на уровне 1–2%, редко повышаются до 4% в доломитах и до 13% в известковых аргиллитах. В групповом составе битумоидов преобладают смолы – 60–87%. На метано-нафтеновые и нафтенно-ароматические фракции в сумме приходится 13–35%, чаще всего их не удавалось поделить из-за низких выходов битумоидов. В двух образцах определено содержание асфальтенов, оно составляет 5–18%. Величины «битумоидной» составляющей S_1 изменяются в пределах 0,01–0,13 мг УВ/г породы, «керогеновой» составляющей S_2 – 0,01–0,66 мг УВ/ г породы. Значения T_{max} изменяются главным образом от 421 до 447°C, изредка отклоняясь до 320, 322, 470, 603°C. В среднем значения водородного индекса НІ низкие, на уровне 50 мг УВ/г $C_{орг}$, редко повышены до 80–124 мг УВ/г $C_{орг}$.

Таймыларская свита представлена двумя образцами желтовато-серых доломитов (НО = 3-10%, $C_{орг}$ = 0,03-0,12%), которые при расколе дают явный нефтяной запах. Внешние части образцов толщиной до 2 см обрезались циркулярной пилой. Битумоиды экстрагировали отдельно из внутренних и внешних частей образцов. Значения $b_{хл}$ и β для внешней части образцов слегка повышены и составляют 0,004-0,019% и 8-12% против 0,003-0,017% и 7-11% соответственно. Отличия наблюдаются также в групповом составе. Для внешней части образцов характерно повышенное содержание углеводородной части битумоидов – на сумму метано-нафтеновых и нафтенно-ароматических фракций приходится до 25-42%, тогда как для внутренней части образцов оно составляет 10-38%. Асфальтены определены в одном образце. Их содержание составляет 5 и 4% соответственно. Пиролитические характеристики следующие: S_1 – 0,03, S_2 – 0,03–0,28 мг УВ/г породы, T_{max} – 440-442°C, НІ – 91-233 мг УВ/г $C_{орг}$.

На газожидкостных хроматограммах метано-нафтеновых фракций в большинстве случаев присутствуют высокие нафтеновые горбы (области неразделенных УВ), максимум распределения n-алканов непостоянный, от n- C_{17} (как правило) до n- C_{25} . Отношение пристана к фитану варьирует от 0,3 до 0,8. Отношения пристан/n- C_{17} и фитан/n- C_{18} в среднем на уровне 0,3, повышаются до 0,4–0,6 в битумоидах из доломитов таймыларской свиты. Отношение n- C_{27} /n- C_{17} значительно изменяется от 0,3 до 4,6, суммы нормальных алканов к сумме изопреноидных – от 4 до 17. На хроматограммах, где возможно было рассчитать индекс СРІ (carbon preference index, по (Bray, Evans, 1968)), его значения повышены и составляют 1,1–1,5.

На масс-хроматограммах по m/z 217 изучались стераны, m/z 191 и 177 – терпаны. В серии образцов аргиллитов и известковых аргиллитов, особенно обедненных органическим веществом ($C_{орг} < 0,2\%$), полициклические углеводороды-биомаркеры почти полностью разрушены, на масс-хроматограммах по типовым m/z регистрируется шум.

Среди стерановых УВ идентифицированы прегнаны C_{21} – C_{22} , стераны C_{27} – C_{29} , в некоторых образцах C_{30} . Распределение стеранов однотипное – гомологи C_{27} и C_{29} содержатся примерно в равных пропорциях, C_{28} незначительно уступает. В одном образце доломитов таймыльской свиты C_{29} явно преобладает над C_{27} . Зарегистрированы диастераны, в среднем их отношение к регулярным стеранам составляет 0,35, повышаясь до 0,5 в доломитах таймыльской свиты.

Среди терпанов идентифицированы трицикланы, тетрациклан C_{24} , гопаны и гомогопаны. Как правило, максимальные концентрации имеют гопаны и гомогопаны (в среднем 65% от суммы терпанов). Распределение их гомологов относительно – превалирует гопан C_{30} , концентрации гомогопанов уменьшаются в ряду $C_{31} > C_{32} > C_{33} > C_{34} > C_{35}$. Отношение триснорнеогпана к трисноргопану значительно варьирует от 0,1 до 1,1, при этом в образцах с низкими значениями Ts/Tm также отчетливо регистрируются моретаны. Значения трицикланового индекса (Конторович и др., 1999) как правило меньше 1 (на уровне 0,4–0,7), однако в серии образцов достигают 1,5–4. В серии проб по m/z 177 регистрируются деметилированные 25-норгопаны.

В нафтено-ароматических фракциях исследовались фенантрен и метилфенантрены (m/z 178 и 192), дибензотиофен и метилдибензотиофены (m/z 184 и 198), моно- и триароматические стероиды (m/z 253 и 231 соответственно) по методике (Конторович и др., 2004). Среди исследованных соединений преобладают фенантрены, при этом их относительное содержание в целом увеличивается с глубиной отбора проб от 60 до 99% ($r = +0,40$). В большинстве проб моно- и триароматические стероиды отсутствуют или присутствуют в следовых количествах. В пробах с верхних изученных уровней их содержание возрастает до 20% на сумму изученных соединений.

Остановимся подробнее на распределении метилзамещенных гомологов фенантренов. Рассчитывались типовые отношения для оценки термического преобразования ОБ: МФИ, MPI-1, PP-1 (Radke et al., 1982; Петров, 1984; Alexander et al., 1986), а также, на основе этих индексов, отражательная способность витринита (Radke, Welte, 1983; Долженко, Фомин, 2022). Значения МФИ и MPI-1 составляют 0,3–0,7, PP-1 – 0,6–2,0. При использовании в расчетах индекса МФИ синтетические значения R^o составили 4,5–6,1% (в среднем – 5,2%), а при использовании PP-1 – 4,2–5,6% (в среднем – 4,9%).

Обсуждение

Генерационные характеристики пород. Изученные породы (аргиллиты, известковистые аргиллиты и доломиты) хастахской, куладинской, тукуланской и таймыльской свит характеризуются низким содержанием органического углерода (C_{org} в среднем 0,2%). Качественная интерпретация результатов пиролиза возможно при величинах $C_{org} > 0,5\%$ «керогеновой составляющей» $S_2 > 0,5$ мг УВ/г породы (Peters, Cassa, 1994). В большинстве изученных проб S_2 не превышает 0,1–0,2 мг УВ/г породы, достигая максимально 0,66 мг УВ/г породы лишь в единичном образце. Значения $S_2 < 2$ мг УВ/г породы характеризуют изученные породы как не нефтематеринские, с низким потенциалом генерировать газ

(Тиссо, Вельте, 1982). Водородный индекс HI в среднем находится на уровне 50 мг УВ/г $C_{орг}$, изредка повышаясь до 80–124 мг УВ/г $C_{орг}$. Неопротерозойский возраст исследуемых отложений несомненно указывает на аквагенный генезис органического вещества и отсутствие источников, связанных с высшей наземной растительностью. Поэтому столь низкие значения HI свидетельствуют о реализации генерационного потенциала породами рифейских отложений в Лено-Анабарском прогибе.

Катагенез ОВ. Для оценки перспектив нефтегазоносности территории исследования важно также учитывать степень зрелости органического вещества потенциально нефтематеринских пород (Конторович, 1976; Peters et al., 2005). Данные пиролиза, значения T_{max} в диапазоне 421–445°C, свидетельствуют о катагенезе ОВ на уровне конца протокатагенеза–начала мезокатагенеза (Peters, 1986; Меленевский, 1991). Однако, обращают на себя внимание: низкие содержания $C_{орг}$ (в среднем 0,2%) и $b_{хл}$ (в среднем 0,007%) в породах, низкие значения β (обычно до 2%), низкие значения отношений пристан/ n - C_{17} и фитан/ n - C_{18} (часто <0,3), низкие пики углеводородов-биомаркеров (стеранов, терпанов), отсутствие моно- и триароматических стероидов в нафтено-ароматических фракциях большинства проб, распределение метилфенантронов и расчетные значения метилфенантроновых показателей зрелости и синтетические значения отражательной способности витринита на уровне 5%. Обобщая данные битуминологических исследований, а также особенности составов и распределений соединений метано-нафтеновых и нафтено-ароматических фракций, можно предположить высокий региональный катагенез рифейских отложений в скважинах Лено-Анабарского прогиба, на уровне градаций АК₄₋₅. В этом свете узкий диапазон значений T_{max} 421–445°C в широком интервале глубин (от 3111 до 2150 м) выглядит логичным, так как отражает деструкцию не керогена, а асфальто-смолистых компонентов битумоидов (Меленевский, 1991). Соответственно, величина HI также в большей степени характеризует не остаточный кероген, а битумоидную составляющую пород. Такая оценка высокого катагенеза согласуется с данными авторов (Фомин, Меленевский, 2023; Конторович и др., 2024), которые показали, что рифейские отложения в скважинах Бурская-3410 и Хастахская-930 содержат графитизированные частицы ОВ неясной генетической природы. Ранее для рифейских отложений Сибирской платформы также было показано, что показатель T_{max} не увеличивается при возрастании глубины и катагенеза ОВ (Филипцов, 2015).

Оценка пород в качестве потенциально нефтегазопроизводивших. При подобных оценках одним из ведущих критериев является обогащенность пород рассеянным ОВ. Для изученных интервалов рифея в скважинах Лено-Анабарского прогиба современные концентрации $C_{орг}$ составляют 0,1–0,7%. Для оценок масштабов генерации УВ необходимо использовать начальное содержание $C_{орг}$ в породах (Вассоевич, 1967; Неручев, 1967; Конторович, 1976; Баженова и др., 2014, 2020; Конторович и др., 2021). Используя предложенные коэффициенты (Баженова, 2020; Конторович и др., 2021) и современные значения $C_{орг}$ были рассчитаны значения начального содержания $C_{орг}$ на начало градации МК₁¹. Они составили 0,3–2,3%. Следовательно, изначально породы обладали умеренным и

высоким нефтематеринским потенциалом, но к настоящему моменту потеряли до 70% своей исходной массы ОВ из-за генерации и эмиграции углеводородов. Учитывая мощность верхнерифейского терригенного комплекса в пределах северной окраины Сибирской платформы, которая в наиболее погруженных частях достигает нескольких километров (Конторович и др., 2024), можно предполагать, что потенциально нефтегазопроизводившие породы хастахской, куладинской, тукуланской свит играли существенную роль в генерации углеводородов и могли быть источником промышленных скоплений нефти и газа в вышележащих комплексах (вендском, нижнепалеозойском) при благоприятных геологических условиях (наличии надежных флюидоупоров, коллекторов и ловушек).

Оценка рифейского комплекса в качестве источника трудноизвлекаемого углеводородного сырья. Анализ битумоидов из доломитов таймыльской свиты показал, что значения $b_{\text{хл}}$ достигают 0,02%, β – 12%, что на порядок больше чем в изученных аргиллитах. На сумму УВ в групповом составе битумоидов приходится до 42%. При этом наблюдаются признаки активной биodeградации в зоне гипергенеза – повышенные до 0,6 отношения пристан/ n - C_{17} и фитан/ n - C_{18} , присутствие деметилированных 25-норгопанов. Резкое преобладание этилхолестанов C_{29} среди стеранов, повышенное отношение диастеранов к регулярным стеранам, присутствие моно- и триароматических стероидов в высоких относительных концентрациях (до 60%) явно свидетельствует об аллохтонной природе битумоидов. Ранее в карбонатах таймыльской свит отмечалась трещиноватость, кавернозность, однако в целом они характеризуются низкими фильтрационно-емкостными свойствами (Вараксина, Шаваров, 2020). Вышеуказанное не позволяет рассматривать карбонатные комплексы рифея в качестве коллекторов с легкой нефтью или газоконденсатом; однако они представляют интерес для добычи тяжелых высоковязких нефтей или природных битумов с применением методов интенсификации притоков.

Выводы

1. На основе комплекса данных, впервые с привлечением результатов молекулярного исследования компонентов битумоидов, была дана новая оценка катагенеза ОВ рифейских отложений в скважинах Лено-Анабарского прогиба. Он соответствует грациям АК_{4.5}.

2. На основе современных содержаний $C_{\text{орг}}$ и выполненной оценки катагенеза были рассчитаны начальные содержания $C_{\text{орг}}$ в породах рифейских отложений на исследуемой территории. Показано, что в аргиллитах и известковых аргиллитах содержание $C_{\text{орг}}$ на начало мезокатагенеза составляло 0,3–2,3%.

3. Предполагается, что потенциально нефтегазопроизводившие породы хастахской, куладинской, тукуланской свит играли существенную роль в генерации углеводородов и могли быть источником промышленных скоплений нефти и газа в вышележащих комплексах (вендском, нижнепалеозойском) при благоприятных геологических условиях.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Программы ФНИ (проекты № FWZZ-2026-0043 и FWZZ-2026-0048).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженова Т.К. (2020). Основы региональной органической геохимии. М., ГЕОС, 120 с.
2. Баженова Т.К., Белецкая С.Н., Беляева Л.С., Биккенина Д.А., Гурко Н.Н., Ивановская А.В., Ипатов Ю.И., Кичуева У.О., Макаров К.К., Неручев С.Г., Парпарова Г.М., Рогозина Е.А., Рудавская В.А., Соловьева И.Л., Файзулина Е.М., Шапиро А.И., Шиманский В.К., Шуменкова Ю.М., Арефьев О.А., Гуляева Н.Д., Кулибакина И.Б., Работнов В.Т., Прохоров В.С., Шадский И.П. (1981). Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Л., Недра, 211 с.
3. Баженова Т.К., Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Лебедев В.С., Можегова С.В., Ларкин В.Н., Назарова Е.С., Нечитайло Г.С., Грайзер Э.М., Киселев С.М., Киселева Ю.А., Горюнова Е.А., Борисова Л.С. (2014). Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего-среднего кембрия Сибирской платформы. М., ВНИГНИ, 128 с.
4. Вараксина И.В., Шаваров Р.Д. (2020). Литология и коллекторские свойства докембрийских отложений Лено-Анабарской нефтегазоносной области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 331(9), с. 159-169.
5. Вассоевич Н.Б. (1967). Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Изв. АН СССР, сер. геологическая, № 11, с. 135–156.
6. Долженко К.В., Фомин А.Н. (2022). Информативность фенантреновых показателей зрелости органического вещества в позднем мезокатагенезе и апокатагенезе (на примере сверхглубокой скважины Средневилюйская-27, Восточная Сибирь) // Геохимия, т. 67 (1), с. 37–46.
7. Каширцев В.А. (2003). Органическая геохимия нафтидов востока Сибирской платформы. Якутск, ЯФ Изд-ва СО РАН, 160 с.
8. Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Иванова Е.Н., Фомин А.Н. (2004). Фенантрены, ароматические стераны и дибензотиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии // Геология и геофизика, т. 45, № 7, с. 873–883.
9. Конторович В.А., Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Костырева Е.А., Мельник Д.С., Моисеев С.А., Парфенова Т.М., Сафронов П.И., Соловьев М.В., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. (2024). Геологическое строение, нефтегазоносность, ресурсы углеводородов и направления геолого-разведочных работ на северо-восточной континентальной окраине Сибирской платформы (Анабаро-Хатангская и Лено-Анабарская НГО) // Геология и геофизика, т. 65, № 6, с. 823–849.
10. Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р. (2021). Теория нафтидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе // Геология и геофизика, т. 62, № 8, с. 1026–1047.
11. Конторович А.Э. (1976). Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М., Недра, 250 с.
12. Лежнин Д.С., Афанасенков А.П., Соболев П.Н., Найденов Л.Ф. (2021). Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Хатангско-Ленского междуречья // Геология нефти и газа, № 4, с. 7–28.
13. Неручев С.Г. (1967). Закономерности преобразования рассеянного органического вещества в погружающихся осадках как основа для диагностики нефтепроизводивших отложений // Генезис нефти. М., Недра, с. 71–77.
14. Петров А.А. (1984). Углеводороды нефти. М., Наука, 263 с.

15. Соболев П.Н., Лежнин Д.С., Панарин И.А., Гаврилова Е.Н., Пименова А.М. (2019). Геохимические критерии нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского регионального прогиба и сопредельных территорий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, № 8, с. 62–74
16. Фомин А.Н., Меленевский В.Н. (2023). Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности протерозойских, палеозойских и мезозойских отложений Лено-Анабарского междуречья // Геология нефти и газа. – № 6. – С. 31–39.
17. Alexander R., Strachan M.G., Kagi R.I., Van Bronswijk W. (1986). Heating rate effects on aromatic maturity indicators // Org. Geochem., v. 10 (4–6), p. 997–1003.
18. Peters K.E. (1986). Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // AAPG Bull., v. 70 (3), p. 318–329.
19. Peters K.E., Cassa M.R. (1994). Applied source rock geochemistry, in: Magoon, L.B., Dow, W.G., Ch. 5: The Petroleum System – from Source to Trap. AAPG Mem. 60, p. 93–120.
20. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005). The Biomarker Guide, 2nd ed. II. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. Cambridge University Press, 1155 p.
21. Radke M., Welte D.H., Willsch H. (1982). Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter // Geochim. Cosmochim. Acta, v. 46 (1), p. 1–10,

© Д. С. Мельник, 2026

Д. Е. Аюнов¹✉, А. Д. Дучков¹

Тепловой поток и температура земной коры Алтае-Саянской складчатой области

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экстраполяции температуры в верхней части земной коры Алтае-Саянской складчатой области на глубину 5, 10 и 30 км. При расчетах использован уточненный массив значений теплового потока и специальная корреляционная методика оценки глубинных температур. Представлены карта теплового потока региона и три карты распределения температур на разных глубинах земной коры. Кратко описаны основные особенности температурных карт.

Ключевые слова: Алтае-Саянская складчатая область, тепловой поток, глубинные температуры земной коры

D. E. Ayunov¹✉, A. D. Duchkov¹

Heat flow and the Earth's crust temperatures of the Altai-Sayan region

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents the results of extrapolation of temperature in the upper part of the Earth's crust of the Altai-Sayan region to a depth of 5, 10 and 30 km. The calculations used a refined array of heat flow values and a special correlation technique for estimating deep temperatures. Three maps of the temperature distribution at different depths of the earth's crust and a corrected map of the heat flow of the region are presented. The main features of the temperature maps are briefly described.

Keywords: Altai-Sayan region, heat flow, deep temperatures of the Earth's crust

Введение

Значительное место в геотермических исследованиях занимает построение тепловых моделей земной коры с целью оценки глубинных температур [1, 2 и др.]. Метод основан на решении уравнения теплопроводности для физической модели земной коры с заданными граничными условиями. Теоретические оценки [3] показали, что в большинстве континентальных регионов современное температурное поле земной коры (до глубин 50-70 км) хорошо описывается стационарным уравнением теплопроводности. Для построения физической модели коры необходимо знать строение земной коры, поверхностный тепловой поток (q), пространственное распределение источников тепла (радиоактивных элементов) в земной коре и изменение теплопроводности (λ) пород с глубиной. После построения модели земной коры расчет температур (T) сводится к решению

стационарного уравнения теплопроводности. Данные о распределении q используются в качестве одного из граничных условий, другим является поверхностная температура обычно принимаемая равной 0. Наиболее достоверные тепловые модели земной коры создаются вдоль профилей ГСЗ, если по этим же профилям определены необходимые геотермические параметры: q , λ и интенсивность радиогенной теплогенерации (A).

Методика оценки глубинных температур

В Алтае-Саянском регионе измерения геотермических параметров велись не по профилям ГСЗ, а по отдельным скважинам, крайне неравномерно распределенным по огромной площади. В этой ситуации для оценки глубинных температур в земной коре была разработана другая методика, описанная в работе [1]. Первоначально авторами методики были построены тепловые модели (термограммы до глубины 50 км) для нескольких десятков наиболее изученных пунктов в различных регионах юга Сибири. Во всех этих моделях земная кора представлялась состоящей из осадочного, гранитно-метаморфического и базальтового слоев, мощности которых изменялись в пределах 0-6 км, 10-22 км, 15-30 км соответственно. Мощность земной коры изменялась от 35 до 45 км, а тепловой поток - от 20 до 140 мВт/м².

Расчеты глубинных температур проводились как для случая постоянной теплопроводности пород в каждом слое земной коры, так и с учетом ее зависимости от T . Среднее λ основных типов магматических, метаморфических и осадочно-вулканогенных пород региона колеблется незначительно – 2,1-2,5 Вт/(м К). Теплопроводность осадочных пород изменяется в более широких пределах – 1,3-3,8 Вт/(м К). Интенсивность генерации радиогенного тепла (A) в каждом слое земной коры принималась постоянной и определялась по имеющимся сведениям о содержании в породах радиоактивных элементов. Величина A изменялась в указанных слоях земной коры в пределах 1,26-1,42; 1,05-3,56 и 0,46 мкВт/м³, соответственно.

Результаты расчетов анализировались с целью выяснения влияния параметров моделей (колебания мощностей слоев земной коры, значений A , λ , q) на оценки T в земной коре. В итоге было установлено, что наиболее существенно во всех случаях влияние теплового потока. Для T менее 800-900⁰С и фиксированной глубины (H) оно является определяющим. В этом случае между величинами q и расчетными T для конкретной H устанавливается четкая линейная зависимость вида:

$$T = m_1 \cdot q - m_2. \quad (1)$$

Полученные материалы позволили построить графики зависимости расчетной температуры земной коры региона на разных глубинах (5, 10, 20, 30 км) от величины теплового потока [1]:

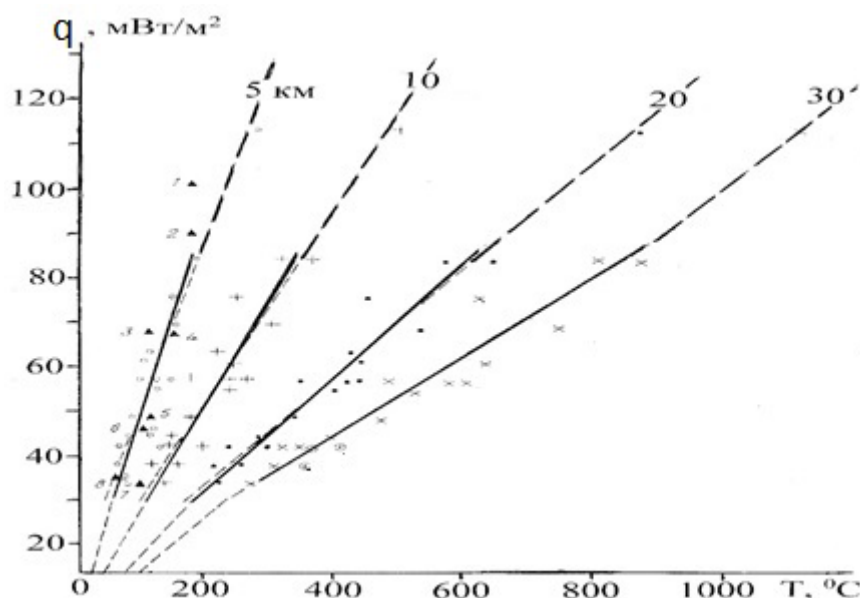


Рис. 1. Экстраполяция температуры в земной коре АССО на разную глубину в зависимости от величины теплового потока [1]. Черные треугольники – температуры измерены непосредственно в скважинах глубиной 5 км, пробуренных в Фергане, Индоло-Кубанском прогибе, Прикаспийской низменности, Апшеронском и Кольском полуостровах.

В Таблице 1 приведены статистические параметры установленных корреляционных зависимостей (1) для разных глубин: значения коэффициентов m_1 и m_2 , коэффициента корреляции r и среднеквадратичного отклонения δ для центральных частей регрессионных зависимостей.

Таблица 1. Статистические параметры корреляционных зависимостей $T = m_1 \cdot q - m_2$ для разных глубин (Н) земной коры АССО [1].

Н, км	m_1 , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{мВт}$	m_2 , $^{\circ}\text{C}$	r	δ , $^{\circ}\text{C}$
5	2,58	23	0,97	20
10	4,65	39	0,98	25
20	7,64	42	0,96	35
30	11,05	95	0,97	45

В работе [1] выявленные корреляционные зависимости было предложено использовать для оценки глубинных температур в земной коре по измеренным значениям теплового потока. Там же приведены примеры проверки достоверности этой методики путем сопоставления расчетных значений T с измеренными на той же глубине в разных регионах страны (пока такие сопоставления возможны лишь до глубин 5-10 км). В большинстве случаев расхождения между измеренными и рассчитанными значениями T не превышали заметно значений $\delta = 20\text{-}25^{\circ}\text{C}$, указанных в

Таблице 1. В работе [1] выявленные корреляционные зависимости применялись для оценки распределения температуры у подошвы земной коры территории Сибири. Позднее по этой методике оценивались глубинные температуры в разных работах [4, 5 и др.]

В настоящей статье описанная выше методика применена для оценки температуры пород земной коры АССО на глубинах 5, 10, 30 км. Расчеты T выполнялись по формуле (1), с учетом значение теплового потока и сведений о коэффициентах m_1 и m_2 (Таблица 1).

С 1960 годов до настоящего времени оценки теплового потока проведены в пределах 40 геологических структур АССО на 147 участках (по измерениям температуры в 312 скважинах и изотопов гелия в газах 28 термоминеральных источников). Сведения о значениях теплового потока включены в Геотермический атлас [6]. Всего при проведении расчетов T учтено 216 значений теплового потока, измеренного на территории АССО и примыкающих регионов.

В настоящей работе на рис. 2 приводим исправленный вариант карты теплового потока АССО, ранее опубликованной в работе [7], в которой содержалась ошибка в данных.

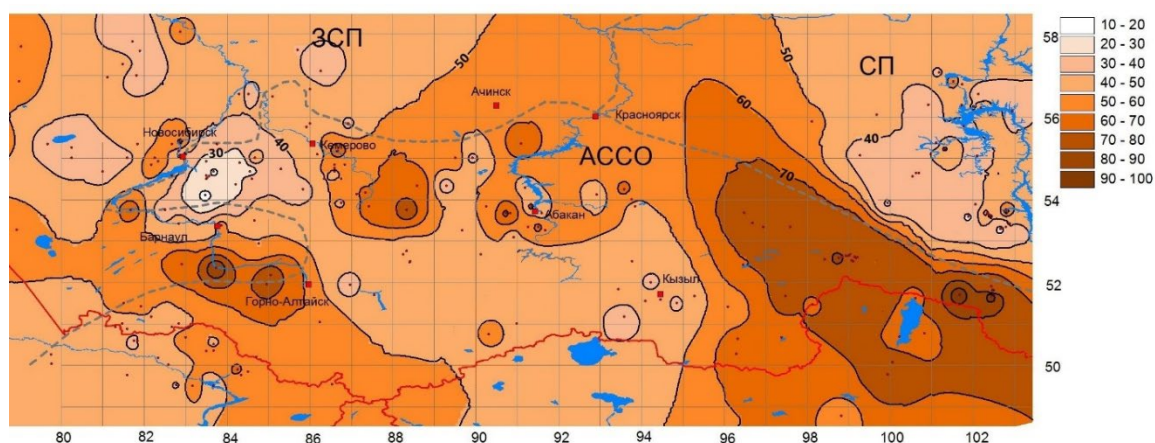


Рис. 2. Тепловой поток Алтае-Саянской складчатой области (исправленный вариант относительно ранее опубликованной карты в работе [7]).

Легенды – плотность теплового потока, мВт/м^2 ; основные изолинии пунктирная линия – граница сочленения АССО с Западно-Сибирской плитой (ЗСП) и Сибирской платформой (СП); красная сплошная линия – государственная граница РФ с Казахстаном, Китаем и Монголией; красные точки – геотермические пункты.

Краткий анализ распределений температур

Массив расчетных температур собран в таблице, которая хранится в архиве лаборатории №563 ИНГГ. В настоящей статье этот массив визуализирован в виде гистограмм (Рис. 3) и электронных температурных карт (Рис. 4) для глубин 5, 10 и 30 км.

Для упрощения дальнейшего изложения введем новые обозначения температур на глубине 5, 10 и 30 км – T_5 , T_{10} , T_{30} .

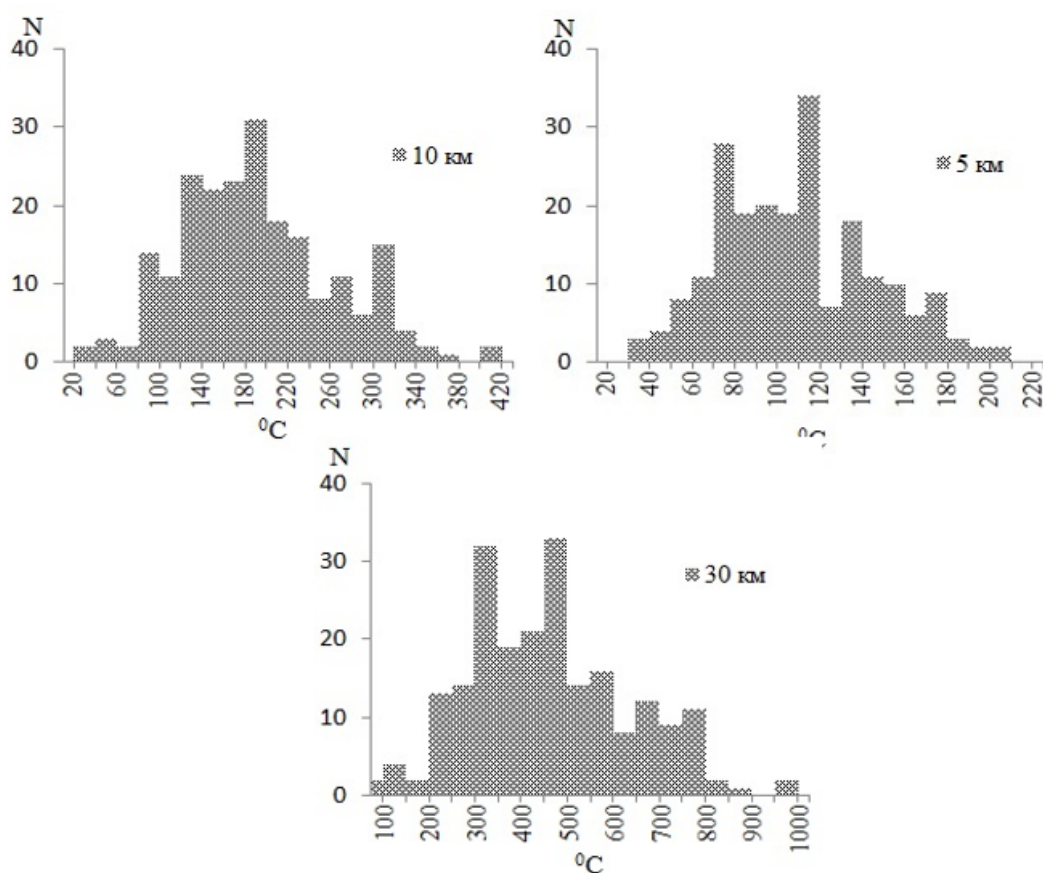


Рис. 3. Гистограммы оценок температуры земной коры АССО на глубинах 5, 10 и 30 км.

Гистограммы имеют форму близкую к симметричной, несколько растянуты в сторону более высоких значений T . Анализ гистограмм показывает, что в пределах изученного региона температура пород изменяется следующим образом: T_5 - от 30 до 210 °C (среднее значение $T_5 = 110$ °C), T_{10} - от 40 до 420 °C (среднее значение $T_{10} = 190$ °C), T_{30} - от 100 до 1000 °C (среднее значение $T_{30} = 460$ °C).

При построении карт в изолиниях использовалась интерполяция данных между пунктами методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

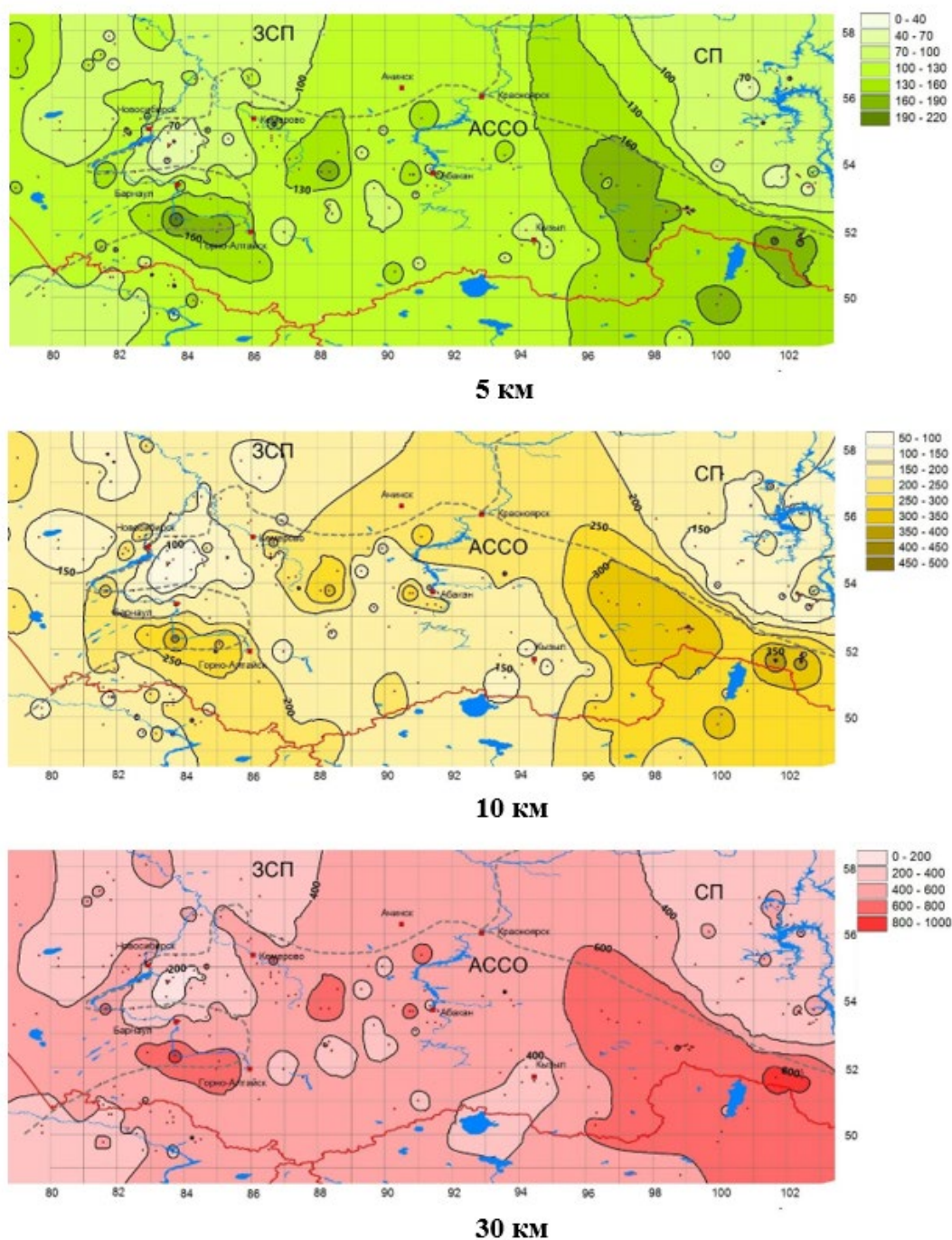


Рис. 4. Оценки температур пород земной коры Алтае-Саянской складчатой области (АССО) на глубине 5, 10 и 30 км.

Легенды – температура, $^{\circ}\text{C}$; основные изолинии пунктирная линия – граница сочленения АССО) с Западно-Сибирской плитой (ЗСП) и Сибирской платформой (СП); красная сплошная линия – государственная граница РФ с Казахстаном, Китаем и Монголией; красные точки – геотермические пункты.

При построении распределений T использовался один и тот же набор значений q , поэтому на всех температурных картах сохраняются некоторые одинаковые особенности теплового поля, которые рассматриваются ниже.

Так, для всех глубин характерно, что районы, отличающиеся высокой температурой пород земной коры, расположены на западе и востоке региона. В то же время центральная часть территории АССО характеризуется стабильным температурным полем: $T_5 = 80-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 180-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{30} = 500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальные значения глубинных температур в пределах АССО зафиксированы только на северо-западе региона, в пределах Салаирского кряжа и Горловского прогиба. Здесь прогнозируются такие температуры пород: T_5 – менее $40-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{10} – менее $100-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – менее $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фактически это наиболее охлажденный блок земной коры региона [1, 4]. В пределах АССО более заметно распространение прогретых блоков земной коры. Так весьма прогретыми в западной части региона представляются юго-восточная часть Кузнецкого прогиба ($T_5 = 100-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 200-230\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600\text{ }^{\circ}\text{C}$) и Бийско-Барнаульская впадина с примыкающими участками Рудного Алтая ($T_5 = 100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 250-350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{30} = 600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наиболее значительная по площади аномалия высоких глубинных температур (T_5 – более $100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{10} – более $200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$) выявлена в восточной части АССО (Восточный Саян, Восточно-Тувинский массив), непосредственно примыкающей к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Аномалия фиксирует распространение на запад рифтогенных и магматических процессов, идущих в земной коре БРЗ. В пределах этой аномалии зафиксированы многочисленные проявления кайнозойского вулканизма и источников термальных вод.

Заключение

Уточненная база данных по тепловому потоку использована для прогностической оценки температуры горных пород в земной коре АССО (на глубине 5, 10 и 30 км). Тепловая модель строилась по ранее выявленной для АССО корреляционной связи между измеренным тепловым потоком и расчетной температурой на определенной глубине [1]. Наиболее охлажденный блок земной коры (T_5 – менее $40-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – менее $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$) выявлен в северо-западной части региона. Наиболее высокие глубинные температуры (T_5 – более $100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$) фиксируются на востоке АССО. Геотермические измерения выявили здесь значительное распространение на северо-запад горячего астеносферного слоя, наиболее развитого в БРЗ. Основными причинами вариаций глубинных температур являются процессы теплопереноса в осадочных породах, изменения интенсивности генерации радиогенного тепла в породах земной коры, изменения мантийного теплового потока. Естественно, что полученные распределения глубинных температур в недрах АССО нуждаются в проверке или подтверждении другими методами. Для этого необходимо проведение специальных исследований, включающих поиск различий скоростей сейсмических волн и значений электропроводности, оценок расположения изотермы Кюри в блоках земной коры с разной температурной обстановкой. В качестве примера сошлемся на известную статью И.М. Артемьевой [8]. В этой работе получено значительное количество геотермических результатов и в том числе выполнена оценка глубины

расположения нижней границы магнитной коры (изотермы 550⁰С) в пределах континентальной литосферы. Согласно [8] в центральной части АССО эта изотерма располагается на глубине 30 км. Ранее в настоящей статье мы отмечали, что по нашим оценкам в этой части региона на глубине 30 км температура достигает значений 500-600⁰С, что согласуется с результатами Артемьевой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловое поле недр Сибири // Отв. редактор Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987, 197 с.
2. Геотермические модели геологических структур. Сб. научн. трудов. Спб.: 1991, 185 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966, 724 с.
4. Крылов С.В., Дучков А.Д. Глубинное деформационно-прочностное районирование земной коры (на примере Алтае-Саянской и Байкальской сейсмических областей) // Геология и геофизика, 1996, №9, 56-65.
5. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Оценка термоупругих напряжений в земной коре Восточной Тувы в зоне сейсмической активизации 2011-2012 гг. // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 4 т. Т. 2 – Новосибирск: СГГА, 2014.- С. 52-57.
6. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е., Веселов О.В., Соколова Л.С., Казанцев С.А., Горнов П.Ю., Добрецов Н.Н., Болдырев И.И., Пчельников Д.В., Добрецов А.Н. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока. (2012). - 2012 [Электронный ресурс]. - URL: <http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru/>
7. Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Уточненная карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области // Интерэкспо Гео-Сибирь. XXI Междунар. науч. конгр. 21-22 мая 2025 г., Новосибирск: Сборник материалов в 8 т. Т. 2: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2025. С. 106-112.
8. Artemieva I.M. Global 1⁰x1⁰ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics, 2006, V. 416, p. 245-277.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, 2026

*А. Ю. Белинская^{1✉}, А. А. Боровко¹, А. В. Ойнац², М. В. Цедрик², А. В. Подлесный²,
П. А. Дергач¹*

Сейсмо-ионосферные возмущения: данные трех землетрясений

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния сейсмических явлений на состояние ионосферы. Проведены комплексные наблюдения ионосферных возмущений, ассоциированных с тремя сильными землетрясениями, зарегистрированными в период 2024–2025 гг. Мониторинг ионосферы осуществлялся методами вертикального и наклонного зондирования на сети станций в азиатской части России. В ходе исследования установлено, что ионосферные возмущения являются откликом на распространение поверхностных волн Рэлея и регистрируются на ионограммах в виде характерных искажений. Полученные результаты демонстрируют последовательное смещение ионосферных возмущений в сторону больших частот и высот, что подтверждает их распространение снизу вверх от сейсмического источника. Показано, что характер искажений на ионограммах наклонного зондирования указывает на возможность существенного ухудшения качества коротковолновой связи после сильных землетрясений.

Ключевые слова: ионосфера, землетрясение, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, рэлеевская волна, ионосферные возмущения

A. Yu. Belinskaya^{1✉}, A. A. Borovko¹, A. V. Oinats², M. V. Cedric², A. V. Podlesny², P. A. Dergach¹

Seismo-ionospheric effects: data of three earthquake events

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
e-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper presents the results of a study investigating the impact of seismic events on the ionosphere. Comprehensive observations of ionospheric disturbances triggered by three major earthquakes between 2024 and 2025 were conducted. The ionosphere was monitored using vertical and oblique sounding techniques at a network of stations located in the Asian part of Russia. The research revealed that ionospheric disturbances are a response to the propagation of Rayleigh surface waves and are recorded on ionograms as characteristic irregularities. The obtained data demonstrate a consistent shift of ionospheric disturbances toward higher frequencies and altitudes, confirming their upward propagation from the seismic source. The distortions observed on oblique sounding ionograms indicate that major earthquakes can lead to a significant degradation in shortwave communication quality.

Keywords: ionosphere, earthquake, vertical sounding, oblique ionospheric sounding, Rayleigh wave, ionospheric disturbances

Введение

В рамках изучения механизмов взаимодействия литосферных процессов с верхней атмосферой особое внимание уделяется воздействию сейсмических явлений на состояние ионосферы. Установлено, что на расстояниях более 500 км вертикальное движение грунта, обусловленное распространением волн Рэлея, выступает доминирующим источником атмосферных возмущений, распространяющихся вверх в диапазоне акустических волн (например, [1]). Взаимодействие данных акустических волн с ионосферной плазмой происходит за счет столкновений нейтральных частиц и ионов, что инициирует периодические флуктуации плотности электронов в ионосфере, синхронизированные с прохождением акустических возмущений. Распространение ионосферных возмущений вдоль поверхности Земли демонстрирует характерные особенности волн Рэлея. Ионосферные возмущения, вызванные короткопериодной фазой волн Рэлея, регистрировались методом доплеровского зондирования с использованием отражения высокочастотных (ВЧ) радиоволн (например, [2]). При этом доплеровское зондирование имеет существенные ограничения: высота регистрации возмущений определяется профилем плотности и частотой зондирования, а при многочастотных измерениях возникает неоднозначность интерпретации [3]. Кроме того, метод дает неполную картину высотного профиля возмущений и вертикального распространения инфразвука. Анализ ионограмм вертикального и наклонного зондирования в сочетании с многопунктовыми наблюдениями позволяет детально исследовать структуру и динамику ионосферных возмущений, обеспечивая комплексный взгляд на их пространственно-временное развитие.

Исходя из скорости распространения ионосферных откликов от землетрясений, регистрируемых на картах полного электронного содержания, в данных ионосферных доплеровских радаров и ионозондов, принято считать, что за их появление несут ответственность поверхностные рэлеевские волны, имеющие скорость $\sim 3\text{--}4$ км/с [4].

Наблюдения

Мониторинг ионосферы осуществлялся методами вертикального зондирования (ВЗ) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ТОРУ, п. Торы) с частотой 15 с и в Обсерватории «Солнечно-Земной физики» ИНГГ СО РАН (NVS, г. Новосибирск) с частотой 1 мин и методом наклонного зондирования (НЗ) на радиотрассе Новосибирск-Торы (NSK-ТОРУ) с частотой 1 мин. Все наблюдения выполнялись при помощи ЛЧМ-ионозондов «Ионозонд-МС» [5].

Дополнительно привлекались данные, полученные на сейсмологическом пункте (СП) в г. Новосибирск: скорость вертикального смещения (мкм/с) для двух землетрясений 28.03.2025 г. и 29.07.2025 г.

Координаты пунктов наблюдения и расстояние до эпицентра приведены в табл. 1.

Таблица 1. Координаты пунктов наблюдения и расстояние до эпицентра землетрясения

Пункт наблюдений	Вид наблюдений	Широта с.ш.	Долгота в.д.	Расстояние от эпицентра, км		
				02.04.2024	28.03.2025	29.07.2025
п. Торы (TORY)	ВЗ	51,81	103,08	3487,3	3370,9	3806,6
Средняя точка (NVS-TORY)	НЗ	53,74	93,51	4065,5	3534,6	4297,7
г. Новосибирск (NVS)	СП, ВЗ	54,85	83,23	4667,5	3802,6	4827,2

Для анализа были выбраны три землетрясения, для которых велись полноценные непрерывные 1-минутные наблюдения ионосферы. Величину сейсмической энергии E сильного землетрясения можно рассчитать по формуле [6] $\lg W = 5 + 1.5 \cdot M_w$, где M_w – магнитуда события. Известно, что сейсмическая энергия составляет примерно 1% общей энергии источника W_o [7-8], таким образом для каждого из рассмотренных событий была оценена величина общей энергии источника (см. табл. 2).

Таблица 2. Характеристики землетрясений

Место; продолжительность (с)	Дата	Время UT	Эпицентр		Глубина км	Магнитуда M_w	W_o Дж
			Широта с.ш.	Долгота в.д.			
Хуалянь, Тайвань; 35	02.04.2024	23:58	23,819	121,562	40	7,4	$\sim 1,26 \times 10^{18}$
Мандалай, Мьянма; 80	28.03.2025	06:21	22,001	95,925	10	7,9	$\sim 7,08 \times 10^{18}$
Камчатка, Россия; 270	29.07.2025	23:25	52,473	160,396	35	8,8	$\sim 1,58 \times 10^{20}$

Результаты

В день землетрясения на ионограммах вертикального и наклонного зондирования регистрировались среднемасштабные возмущения, которые не наблюдались ни в предыдущие, ни в последующие дни. Эффект отражается на ионограммах в виде многочисленных волнообразных возмущений основного следа отражения (рис. 1 а, б, в). Каждый пик действующей высоты отражения на ионограмме ВЗ соответствует отражению от точки изгиба на профиле плазменной частоты F-слоя. На ионограммах НЗ наблюдаются расслоения сигнала (рис. 1 г, д). Такие аномальные ионограммы фиксировались в отдельные моменты времени после землетрясения.

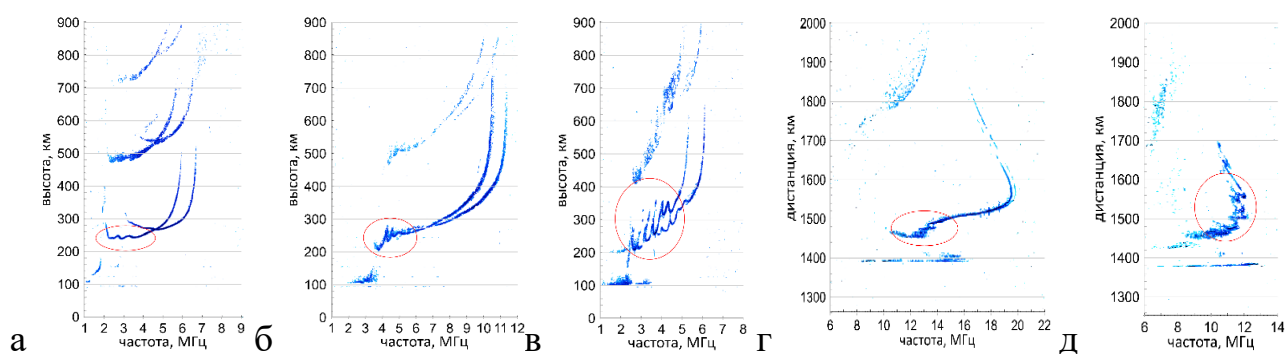


Рис. 1. Ионограммы вертикального зондирования в Новосибирске а) 03.04.2024 00:33UTC, б) 28.03.2025 06:50UTC, в) 30.07.2025 00:02UTC и ионограммы наклонного зондирования на трассе Новосибирск-Торы г) 28.03.2025 06:48UTC, д) 29.07.2025 23:58UTC. Красным отмечены видоизмененные следы отражения

Для каждого события были построены Н-тар по данным ВЗ для станции NVS и TORY, на которых цветом показана действующая высота отражения радиосигнала на определенной частоте в конкретный момент времени. Такая визуализация помогает определить периоды, когда наблюдались возмущения в ионосфере, а также на каких частотах и высотах они возникали.

Землетрясение 02.04.2024 г., 23:58UTC

Отклик на землетрясение 02.04.2024 г. в ионосфере был зафиксирован как в г. Новосибирске, так и в п. Торы (рис. 2).

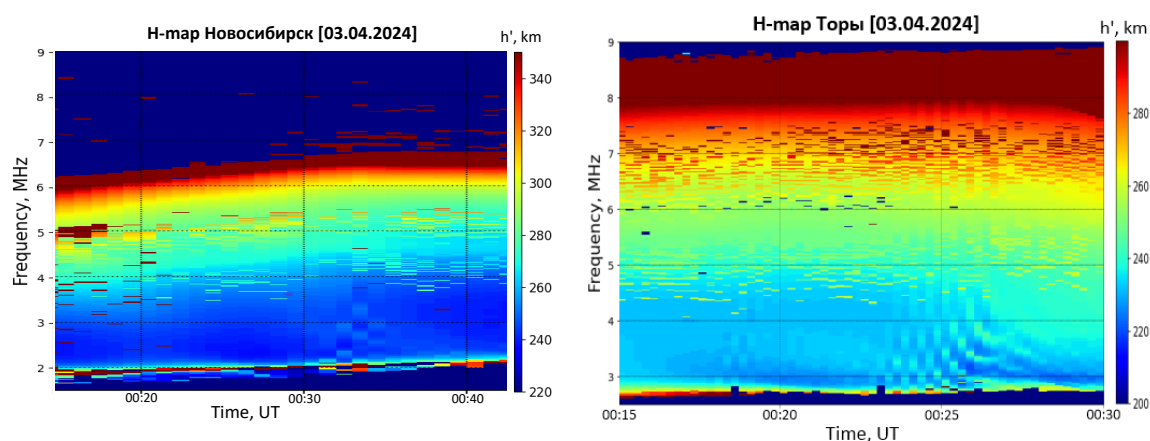


Рис. 2. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные 03.04.2024 г. при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б)

Прохождение ионосферного возмущения в Новосибирске началось в 00:32UTC и закончилось в 00:35UTC. Таким образом, эффект наблюдался через ~ 34 мин после основного толчка. В Торах прохождение ионосферного возмущения было более выраженными и продолжалось с 00:23UTC до 00:27UTC. В средней точке трассы NVS – TORY значимых возмущений в эти периоды не наблю-

далось. Интересно, что небольшое расслоение было в 03:50UTC. С учетом того, что рэлеевская волна на поверхности Земли распространяются примерно в 10 раз быстрее звука в воздухе ($\sim 3\text{--}4\text{ км/с}$) [9], есть вероятность, что здесь наблюдались повторные отклики рэлеевской волны пришедшей, либо со стороны короткой дуги большого радиуса, либо с другой стороны Земли по длинной дуге большого радиуса.

Землетрясение 28.03.2025г., 06:21UTC

На рис. 3 представлены скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на сейсмологическом пункте Новосибирске 28.03.2025 г. Первые продольные сейсмические сигналы (Р-волны) в Новосибирске были зафиксированы в 6:27:40UTC. С точки зрения анализа ионосферных эффектов стоит отметить, что приход поперечных S-волн отмечается 06:33:23UTC, и максимальные амплитуды поверхностной волны Рэ-лея (R-волны) наблюдались в период с 6:40:18UTC до 06:47UTC (нижняя панель рис. 3).

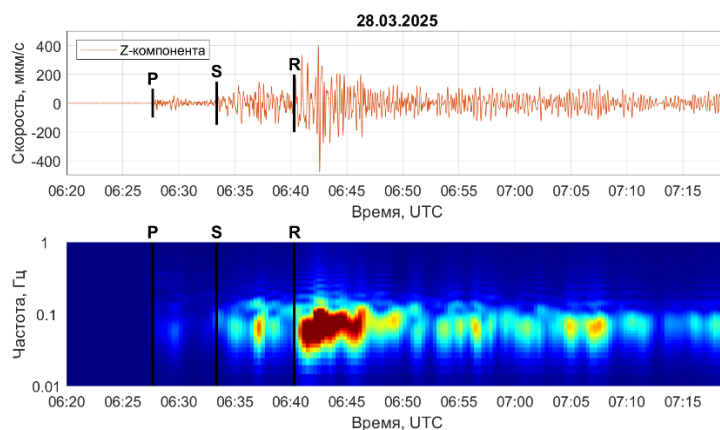


Рис. 3. Скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на СП Новосибирске 28.03.2025 г. Черными линиями обозначены времена приходов Р-, S- и R- волн

В Новосибирске возмущения в ионосфере начались в 6:40UTC (рис. 4а). Эти искажения, вероятно, соответствуют эффектам от прохождения сейсмической S-волны. Наиболее четкие искажения наблюдались с 6:48UTC до 06:54 UTC. И затем постепенно исчезают к 07:20UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над Новосибирском наблюдался через ~ 27 минут после основного толчка землетрясения и позже на 8 мин, чем в сейсмоданных.

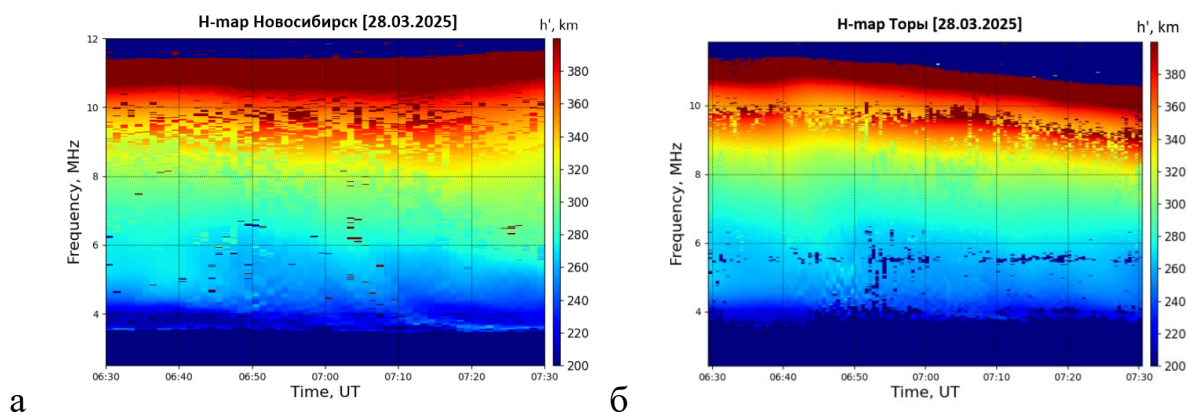


Рис. 4. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б) 28.03.2025 г.

Небольшие искажения на ионограммах в Торах видны уже в 06:41UTC (рис. 4б). Однако наиболее отчетливо искажения становятся видны с 06:45UTC, возмущения длятся до 07:08UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над Торами наблюдался через ~ 24 минуты после основного толчка землетрясения.

На трассе Новосибирск-Торы в средней точке расслоения наблюдались с 06:42UTC до 07:08UTC, с наиболее четким проявлением волны Рэлея в период 06:47UTC - 06:50UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над средней точкой трассы Новосибирск-Торы был на 1 минуту раньше, чем в Новосибирске, и 2 минуты позже, чем в Торах.

Землетрясение 29.07.2025г., 23:25UTC

Первые результаты наблюдений за геофизическими эффектами сильного землетрясения 29.07.2025 г. на Камчатке приведены в [10]. Подробный анализ возмущений в ионосфере после этого землетрясения приведен в публикациях [11, 12].

Отметим, что времена прихода сейсмических волн в Новосибирск были следующие (см. рис. 5): Р-волна в 23:32:51UTC, S-волна в 23:39:19UTC и волна Рэлея в 23:49:00UTC.

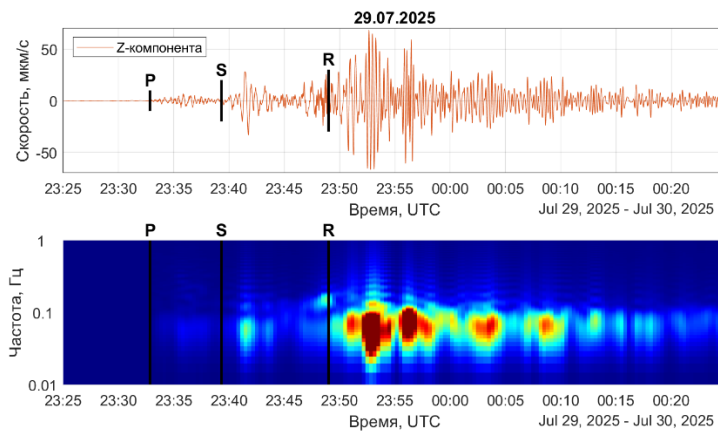


Рис. 5. Скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на СП Новосибирске 29 - 30.07.2025 г. Черными линиями обозначены времена приходов P-, S- и R- волн

Над Новосибирском первые небольшие искажения в нижней части следов начали появляться примерно в 23:41UTC 29.07.2025 г. (Р-волна). С 23:54UTC 29.07.2025 г. до 00:12UTC 30.07.2025 г. наблюдалась многопиковая структура (волна Рэля). Таким образом, отклик на рэлеевскую волну в ионосфере наблюдали через ~ 29 минут после основного толчка землетрясения и через ~ 5 минут после прихода R-волны по сейсмоданным.

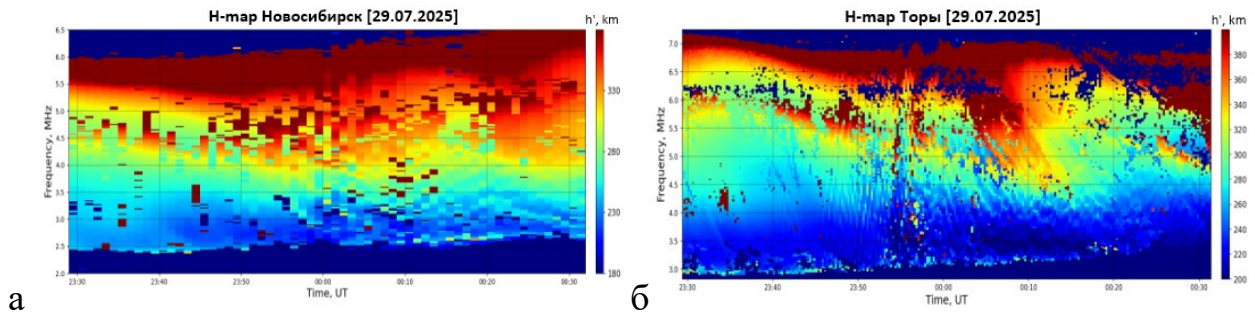


Рис. 6. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б) 29 – 30.07.2025 г.

На ионосферной станции в п. Торы (см. рис. 6б) с 23:40UTC наблюдались небольшие искажения, которые соответствуют прохождению продольной волны (Р-волны). Далее наблюдались более сильные искажения, соответствующие прохождению поперечной волны (S-волны). Начиная примерно с 23:51UTC на следах наблюдается многопиковая структура, которая соответствует волне Рэля. Ионосферные возмущения наблюдались в той или иной степени на протяжении нескольких часов. Таким образом, над п. Торы эффект наблюдался через ~ 26 минут после основного толчка.

Отчетливые эффекты от прохождения инфразвуковой волны в средней точке трассы Новосибирск – Тора наблюдались, начиная с 23:55UTC (через ~ 30 минут после основного толчка) до 00:19UTC 30.07.2025 г.

Обсуждение

Представленные результаты в целом хорошо соответствуют данными, ранее опубликованными другими авторами с использованием данных вертикального зондирования (ВЗ), полученных после сильных землетрясений [4, 13].

Для всех трех землетрясений, которые рассматриваются в данной работе, неоднородности ионосферы, имеющие вид многопиковой структуры, последовательно смещались в сторону больших частот/высот. Это позволяет предположить, что соответствующее ионосферное возмущение распространялось снизу-вверх от сверхзвукового наземного источника – сейсмической волны. Время регистрации возмущения в ионосфере над Новосибирском отличается от наземной регистрации рэлеевской волны по сейсмоданным на 8 и 5 мин (для событий в марте и июле 2025 г.), что примерно соответствует времени, необходимому для подъема инфразвуковой волны вертикально до ионосферных высот.

Искажения следов на ионограммах вертикального зондирования сначала регистрировались в Торах, а затем – на станции в Новосибирске. Время задержки в двух случаях составило 3 мин, а в случае слабого землетрясения 02.04.2024 г. – 9 мин. В целом, эффект от землетрясения в Торах начинали наблюдать через ~ 24 - 26 минут. Полученные данные демонстрируют расхождение с результатами наблюдений, проведенных на Иркутской ионосферной станции после землетрясения у побережья Японии 11.03.2011 г. В указанном событии основной толчок зафиксирован в 05:46:23UTC (магнитуда $M_w = 9,1$), а ионосферные возмущения были зарегистрированы в 06:01UTC на расстоянии 3400 км от эпицентра – спустя приблизительно 14 минут после основного толчка [14]. Ключевым фактором, объясняющим наблюдаемые различия, может служить значительно более высокая общая энергия очага японского землетрясения ($\sim 4,47 \times 10^{20}$ Дж), которая существенно превышает энергетические параметры событий, рассматриваемых в рамках настоящего исследования. Это указывает на возможную зависимость появления ионосферных эффектов от энергетического потенциала сейсмического источника.

Согласно ионограммам НЗ, полученным на трассе Новосибирск – Тора, наблюдались искажения следа 1F2, указывающие на значительную стратификацию ионосферной F-области вблизи средней точки радиотрассы. Высокое временное разрешение наблюдений позволяет предположить, что соответствующие ионосферные возмущения распространялись вверх и являлись результатом прохождения сейсмической волны. После землетрясения на Камчатке, искажения ионограмм в Новосибирске было отмечено раньше, чем в средней точке радиотрассы Новосибирск – Тора, когда как для двух других событий последовательность была другой. На трассах Магадан/Норильск – Новосибирск эффектов землетрясений замечено не было. Эти два момента требуют дополнительного изучения.

В дальнейшем полученные результаты можно будет использовать для сравнения с модельными расчетами. Например, в работе [15] представлены результаты

моделирования ионосферного отклика на сейсмическую волну после землетрясения на Тайване в 2024 году с учетом диссипации энергии акустической волны из-за вязкости и теплопроводности. Полученные высотно-временные распределения возмущенной электронной концентрации затем использовали для моделирования ионограмм ВЗ. Было продемонстрировано хорошее качественное соответствие между расчетными зависимостями и наблюдаемыми ионограммами.

Характер искажений на ионограммах НЗ свидетельствует о том, что качество КВ-связи может существенно ухудшиться после сильных землетрясений. Это должно учитываться при прогнозировании каналов радиосвязи, которые могут попасть в зону влияния сейсмических и подобных им (например, подземных мощных взрывов) событий.

Заключение.

В результате проведенного исследования подтверждено, что сейсмические явления оказывают влияние на состояние ионосферы, проявляющееся в формировании характерных неоднородностей и возмущений. Показано, что ионосферные эффекты, вызванные землетрясениями, регистрируются методами вертикального и наклонного зондирования. Установлено, что наблюдается последовательное смещение ионосферных возмущений в сторону больших частот и высот, что подтверждает их распространение снизу-вверх от сейсмического источника. Общая задержка наблюдения эффектов в ионосфере складывается из времени, которое необходимо сейсмической волне (Р-, S- или волне Рэлея), чтобы добежать по поверхности Земли до подионосферной точки, и времени распространения акустической волны от поверхности до высот ионосферы со скоростью звука.

Полученные результаты будут полезны для прогнозирования качества радиосвязи в регионах, которые могут попасть в зону влияния сейсмических явлений. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются сравнение наблюдаемых эффектов с модельными расчетами, изучение механизмов формирования ионосферных неоднородностей и разработка методов оперативного прогнозирования ионосферных возмущений. Дополнительную информацию о воздействии акустических волн на ионосферу можно получить с помощью конвертирования ионограммы в $Ne(h)$ профиль и изучения особенности вертикального распространения акустических волн, порожденных рэлеевскими волнами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты FWZZ-2026-0051, FWSE-2026-0003 и FWZZ-2026-0052). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН ([https:// ckprf.ru/catalog/ckp/3056/](https://ckprf.ru/catalog/ckp/3056/)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary // Ann. Geophys. – 1985 – V. 3(6) – P. 673–688.

2. Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J. Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech Republic excited by the 2011 Tohoku earthquake // *J. Geophys. Res.* – 2012 – V. 117 – A08319. – DOI: 10.1029/2012JA017767.
3. Artru J., Farges T., Lognonné P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: Propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modelling // *Geophys. J. Int.* – 2004 – V. 158 – P. 1067–1077.
4. Maruyama T., Tsugawa T., Kato H. et al. Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // *J. Geophys. Res.* – 2012 – V. 117 – A08306. – DOI: 10.1029/2012JA017952.
5. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // *Гелиогеофизические исследования.* – 2013 – № 4 – С. 24–31.
6. Шебалин Н.В. Сейсмология – наука о землетрясениях. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
7. Пасечник И.П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – М.: Наука, 1970. – 191 с.
8. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // *Докл. АН СССР.* – 1985 – Т. 283, № 5 – С. 1153–1156.
9. Bourdillon A., Occhipinti G., Molinie J.-P., Rannou V. HF radar detection of infrasonic waves generated in the ionosphere by the 28 March 2005 Sumatra earthquake // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2014 – V. 109 – P. 75–79.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Тихонова А.В. Первые результаты наблюдений за геофизическими эффектами сильного ($M = 8,8$) землетрясения 29.07.2025 г. на Камчатке // *Геофизические процессы и биосфера.* – 2025 – Т. 24, № 3 – С. 81–92. – DOI: 10.21455/GPB2025.3-6.
11. Oinats A.V., Cedric M.V., Dyukov I.Yu., Podlesny A.V., Belinskaya A.Yu., Borovko A.A., Sorokin A.G., Dobrynin V.A., Dergach P.A. Ionospheric Response on the Seismic Wave Induced by Kamchatka Earthquake on July 30, 2025 // *Russian Journal of Earth Sciences.* – 2026 (в печати).
12. Ойнац А.В., Цедрик М.В., Дюков И.Ю., Подлесный А.В., Белинская А.Ю., Сорокин А.Г., Добрынин В.А. Обзор эффектов в ионосфере, вызванных прохождением рэлеевской волны от землетрясения на Камчатке 30 июля 2025 г. // *Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса».* – Москва: ИКИ РАН, 2025. – С. 460. – DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
13. Maruyama T., Shinagawa H. Infrasonic sounds excited by seismic waves of the 2011 Tohoku-oki earthquake as visualized in ionograms // *J. Geophys. Res.* – 2014 – V. 119 – P. 4094–4108. – DOI: 10.1002/2013JA019707.
14. Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20 UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* – 2015 – V. 132 – P. 106–115. – DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.004.
15. Цедрик М.В., Ойнац А.В., Подлесный А.В., Серебренникова С.А. Моделирование отклика ионосферы на прохождение Рэлеевской волны, вызванной землетрясением на Тайване 2 апреля 2024 года // *Труды конференции РРВ-29 (30.06–04.07.2025, Казань).* – С. 80–83. – DOI: 10.26907/rwp29.2025.80-83.

© А. Ю. Белинская, А. А. Боровко, А. В. Ойнац, М. В. Цедрик, А. В. Подлесный,
П. А. Дергач, 2026

Я. О. Бондарчук¹✉

Особенности геоэлектрического строения районов новейшей тектоники западной части АССО (на примере Горного Алтая)

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты магнитотеллурических исследований по профилю п. Акташ - берег Телецкого озера. На геоэлектрических разрезах установлено мелкоблочное строение земной коры региона. Зоны новейших разрывных нарушений и флюидопроводящие каналы маркируются аномально низкими значениями УЭС (менее 5-10 Ом·м), в том числе субвертикальными и наклонными областями проводимости. Охарактеризованы четыре основных тектонических блока, определены их геоэлектрические параметры и глубинное строение. В пределах разреза выделены высокоомные интрузивные тела, элементы Телецко-Башкаусской зоны сдвига, а также участки повышенной тектонической раздробленности и флюидонасыщения коры. Полученные данные важны для понимания глубинных геодинамических процессов и новейшего тектонического строения Горного Алтая.

Ключевые слова: Магнитотеллурические зондирования, Горный Алтай, неотектоника, земная кора, геоэлектрические неоднородности, Телецкое озеро

Y. O. Bondarchuk¹✉

Features of the geoelectric structure of the regions of the latest tectonics of the western part of the Altai-Sayan Orogenic Area (using the example of the Altai Mountains)

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Abstract. The paper presents the results of magnetotelluric studies along a profile from the village of Aktash to the shores of Lake Teletskoye. The geoelectric sections reveal a small-block structure of the Earth's crust in the region. Zones of recent fault disturbances and fluid-conducting channels are marked by anomalously low electrical resistivity values (less than 5–10 Ohm·m), including subvertical and inclined conductivity domains. Four main tectonic blocks are characterized, and their geoelectric parameters and deep structure are determined. Within the section, high-resistivity intrusive bodies, elements of the Teletsk–Bashkaus strike-slip zone, as well as areas of increased tectonic fragmentation and fluid saturation of the crust are identified. The obtained data are important for understanding deep geodynamic processes and the neotectonic structure of Gorny Altai.

Keywords: Magnetotelluric sounding, Gorny Altai, neotectonics, Earth crust, geoelectric inhomogeneities, Lake Teletskoye

Введение

Горный Алтай представляет собой сложно построенную систему метаморфизованных комплексов активных и пассивных континентальных окраин, пронизанных интрузиями. В позднем девоне – раннем карбоне произошла коллизия

Казахстанско-Байкальского и Сибирского континентов, после чего на территории Горного Алтая установился континентальный режим, однако сформированная зона оставалась мобильной. Последний период активизации разломо- и горообразования происходит в неоген-четвертичное время в результате коллизии Евразийской и Индо-Австралийской плит [1].

Тектонические структуры региона имеют преимущественно северо-западное простирание и характеризуются длительной историей геологического развития. Для территории характерна тесная связь крупных озер с тектоногенными межгорными впадинами. Телецкое озеро, расположенное на границе Алтая и Западного Саяна, находится в узком новейшем грабене. Его длина составляет 45 км, ширина около 4 км, а уровень водной поверхности находится на отметке 434 м [2]. Согласно исследованиям [3], формирование бассейна озера произошло в результате неотектонической активизации в позднем плейстоцене. Телецкое озеро представляет собой локальный бассейн растяжения, возникший в результате разнонаправленных движений тектонических блоков в условиях общего регионального сжатия Центральной Азии.

Профиль магнитотеллурических исследований проходит по территории Курайского хребта, Улаганского плато и Чулышманской долины, что позволяет охарактеризовать глубинное строение различных структур региона.

Изучение новейших тектонических структур, флюидного режима и глубинного строения является актуальным для понимания геодинамических процессов, распространенных на территории юго-восточной части Горного Алтая.

Методы и материалы

При изучении строения юго-восточной части Горного Алтая методом магнитотеллурического зондирования применялась аппаратура канадской компании «Phoenix Geophysics Ltd». При помощи измерительных модулей MTU-5 регистрировались четыре компонент магнитотеллурического поля (E_x , E_y , H_x , H_y) в диапазоне периодов 0,003 – 1000 с. Шаг по профилю в среднем составлял 4 – 5 км. Использовалась крестообразная установка, ориентированная на север – ось X , на восток – ось Y , длина приемных электрических линий составляла 100 м. Пространственная и высотная привязка пунктов зондирования осуществлялась с помощью встроенной системы GPS. Запись на каждой точке наблюдения длилась в среднем 19 – 22 ч. Полевые данные были обработаны с помощью программного обеспечения SSMT-2000 компании «Phoenix Geophysics Ltd». Для дальнейшего редактирования кривых, 1D и 2D инверсий использовался программный комплекс «WinGLink», а построение разреза осадочного чехла происходило с помощью электронной палетки MTZ.exe. Методика качественной и количественной интерпретация подробно рассмотрена в [4, 5, 16].

Результаты

Исследуемый профиль протягивается от поселка Акташ до южного берега Телецкого озера.

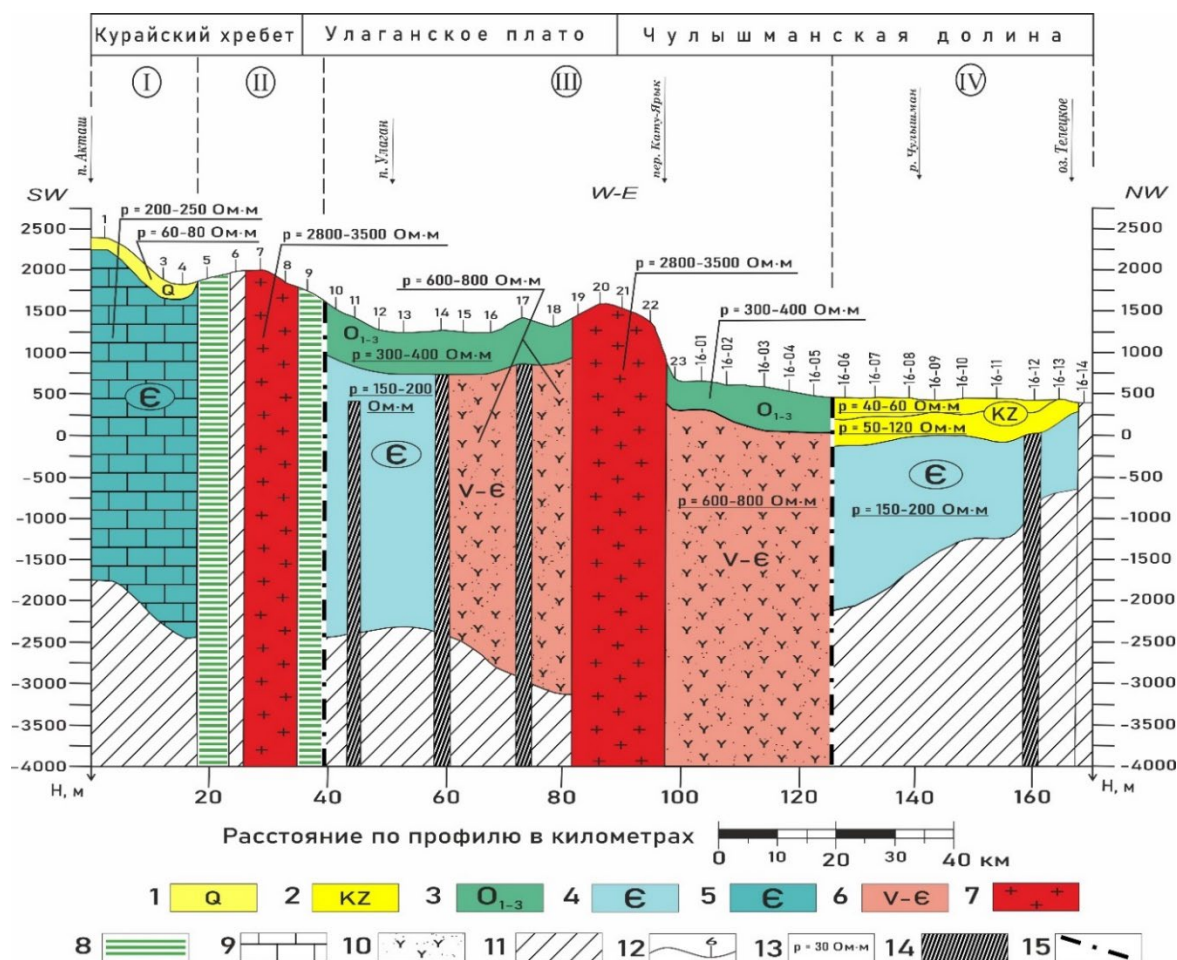


Рис. 1. Геоэлектрический разрез осадочного чехла вдоль профиля п. Акташ – оз. Телецкое:

- 1 – отложения четвертичной системы; 2 – нерасчлененные отложения кайнозоя; 3 – нерасчлененные отложения ордовикской системы; 4 – отложения среднего-верхнего отделов кембрийской системы; 5 – отложения нижнего отдела кембрийской системы; 6 – отложения венда-кембрия; 7 – среднепалеозойские граниты; 8 – метаморфизованные блоки; 9 – мраморизованные известняки; 10 – вулканогенно-осадочные отложения нерасчлененные по составу; 11 – области аномально низких значений удельного; 12 – пункты МТ-зондирования; 13 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м; 14 – области распространения зон дробления; 15 – разрывные нарушения, выделенные по данным МТЗ.

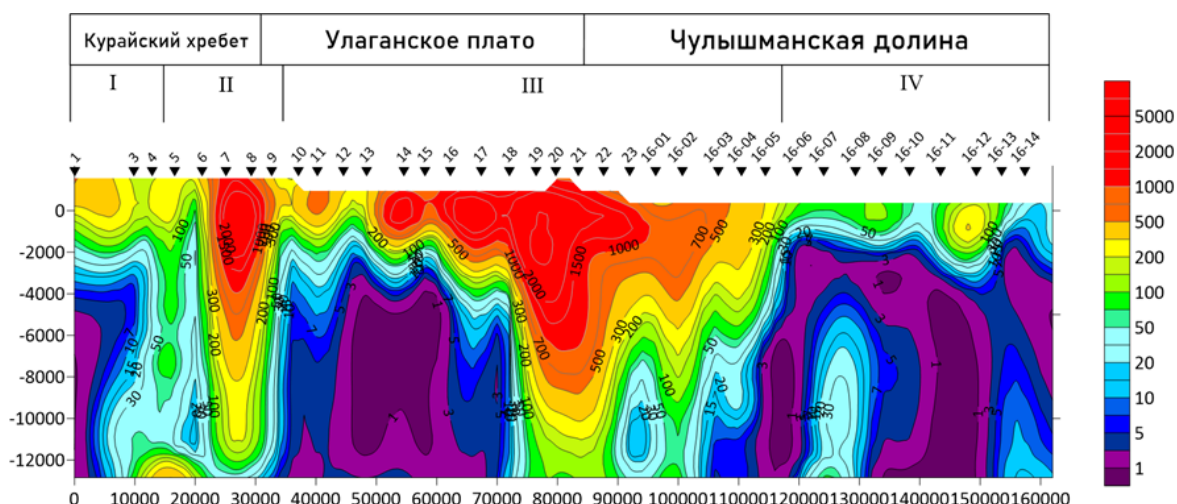


Рис. 2. Глубинный геоэлектрический разрез вдоль профиля п. Акташ – оз. Телецкое по результатам инверсии данных МТЗ.

Обсуждение

Данный профиль протягивается от п. Акташ до берегов оз. Телецкого с юго-запада на северо-восток до п. 20, после него направление меняется, и профиль проходит с северо-востока на северо-запад. Профиль пересекает различные тектонические блоки (рис. 3).

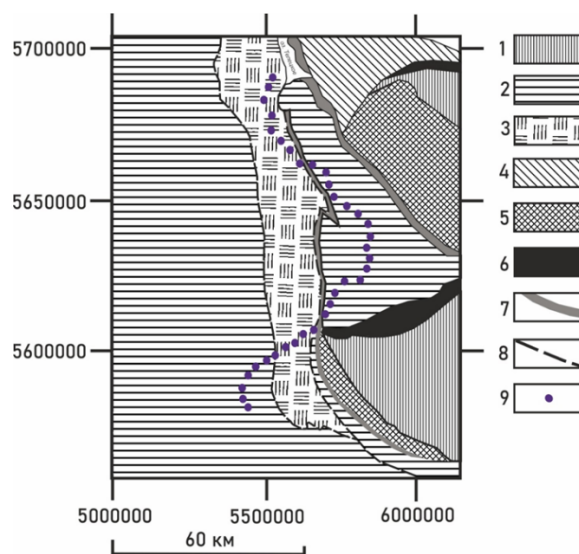


Рис. 3. Структурная схема восточной части Горного Алтая (по данным [7]):

1 – Алтае-Монгольский терреин гондванской группы; 2 – 4 – тектонические единицы окраины Сибирского континента: 2 – Горно-Алтайская, 3 – Телецкая, 4 – Западно-Саянская; 5 – пермская континентальная моласса; 6 – Улаганский сегмент Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны; 7 – позднедевонско-раннекарбоновые зоны сдвигов (Телецко-Башкаусская зона сдвига); 8 – позднекарбоново-пермские надвиги и сдвиго-надвиги; 9 – пункты МТ-зондирований.

Первый (п. п. 1 – 4) приурочен к Горно-Алтайской тектонической единице (рис. 1 (I)) и представляет собой фрагмент северо-западного обрамления Курайской впадины. Он представлен мощной толщей нижнекембрийских пород со значениями сопротивления 200 – 250 Ом·м и мощностью около 4000 м, которая перекрыта четвертичными отложениями, характеризующимися сопротивлением 60 – 80 Ом·м и мощностью порядка 200 м.

Следующий структурный блок (п. п. 5 – 9) соответствует Телецкой тектонической единице (рис. 1 (II)). Этот блок сложен породами зеленосланцевой фации метаморфизма (п. 5, п. 9), которые прорваны массивом гранитоидов среднепалеозойского возраста (п. п. 7 – 8). В пределах данного блока, под п. 6, выделяется субвертикальная разломная зона, которая на геоэлектрическом разрезе контрастно проявляется в виде аномалии с низкими значениями УЭС ($\rho = 1 - 3$ Ом·м), на фоне высокоомных магматических пород.

Далее располагается структурный блок (п. п. 10 – 16-05) полностью принадлежащий Горно-Алтайской единице (рис. 1 (III)). Его границы контролируются субвертикальными разломными нарушениями, четко выраженными на разрезе между п. п. 9 – 10 и п. п. 16-05 – 16-06. Эти нарушения являются элементами Телецко-Башкаусской зоны сдвига, которая дважды пересекается исследуемым профилем.

В строении основания данного блока выделяются два основных геологических комплекса, разделенные тектоническим контактом. Первая представлена отложениями среднего-верхнего кембрия с удельным сопротивлением 150 – 200 Ом·м (п. п. 10 – 13). Вторая (п. п. 15 – 18 и п. п. 23 – 16-05) – более древними вулканогенно-осадочными отложениями венда-кембрия со значениями УЭС – 600 – 800 Ом·м. Контакт между этими разновозрастными блоками, согласно данным МТЗ, представляет собой зону дробления, локализованную под п. 14. Общая латеральная целостность этих комплексов также нарушена зонами дробления, прослеженными под п. 11 и п. 17. Эти комплексы перекрыты нерасчлененными отложениями ордовикской системы, выходящими на дневную поверхность. Они выдержаны по мощности – около 500 м, а значения сопротивления составляют 300 – 400 Ом·м.

В центральной части рассматриваемого блока (п.п. 19 – 22), выделена высокоомная область со значениями удельного сопротивления 2800 – 3500 Ом·м. Она интерпретируется как гранитоидный массив среднепалеозойского возраста, которая отличается повышенной устойчивостью к денудации по сравнению к вмещающим породам.

Участок профиля между п. 16-06 и п. 16-14 пересекает Телецкую тектоническую единицу (рис. 1 (IV)). Верхнюю часть разреза составляют кайнозойские осадки, которые четко разделяются на два геоэлектрических горизонта: 1) верхний с сопротивлением 40 – 60 Ом·м и мощностью 200 м; 2) нижний с сопротивлением 50 – 120 Ом·м и мощностью 300 м. Эти современные отложения, согласно полученным данным, залегают на отложениях среднего-верхнего кембрия с сопротивлением 150 – 200 Ом·м и изменяющейся мощностью от 750 м до 2000 м в пределах изучаемого участка.

Нижняя часть разреза представляет собой область аномально низких сопротивлений ($\rho = 1 - 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), глубина залегания верхней кромки которой погружается от -500 м до -3000 м.

Полученный в результате инверсии данных магнитотеллурических зондирований глубинный геоэлектрический разрез (рис. 2) отражает масштабные структурные элементы земной коры в пределах исследуемого профиля.

Приповерхностная часть разреза (до глубин около -2500 м) отличается относительно высокими значениями удельного сопротивления (от 100 до 2000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$), что соответствует комплексу пород осадочного чехла.

На глубинном геоэлектрическом разрезе (рис. 2) четко прослеживаются все особенности строения, выделенные на разрезе осадочного чехла.

– Блок I (п. п. 1 – 4). Начиная с глубин -2500 м данный блок характеризуется пониженными значениями УЭС (1 – 20 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). В районе пункта 4 выделяется проводящая аномалия с явным наклоном боковых границ и сопротивлением 5 $\text{Ом}\cdot\text{м}$, которая маркирует зону разрывного нарушения.

– Блок II (п. п. 5 – 9) характеризуется высокими значениями УЭС (до 2000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). Этот блок, сложенный метаморфическими и магматическими породами, прослеживается до глубины порядка -12 км. Его целостность нарушается вертикальной разломной зоной, четко выраженной областью аномально пониженных значений удельного сопротивления (5 – 10 $\text{Ом}\cdot\text{м}$) под пунктом 6.

– Блок III (п. п. 10 – 16-05) отличается сложным строением.

1) Участок профиля в районе п.п. 10 - 18 характеризуется сильной раздробленностью земной коры в интервале глубин от -1000 м до -13 км. Это выражается в системе субвертикальных аномальных зон пониженных значений УЭС. Вследствие сглаживающей инверсии по методу Оссат, эти зоны сливаются в единую проводящую область, однако на разрезе осадочного чехла (рис. 1) они уверенно разделяются между собой. Разломная зона под пунктом 17 на глубине, вероятно, имеет слабый наклон на юго-запад, тогда как остальные зоны (между п.п. 9 – 10, 11, 14) сохраняют субвертикальную ориентацию. Данные зоны могут являться глубоко проникающими флюидопроводящими каналами, пронизывающими всю толщу земной коры.

2) Второй участок от п. 18 до п. 22 отличается аномально повышенными значениями УЭС (до 5000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). Этот высокоомный массив интерпретируется как интрузивное тело.

3) Для последнего участка рассматриваемого блока от п. 21 до п. 16-05 характерны повышенные значения сопротивлений в среднем $\sim 700 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

– Блок IV (п.п. 16-06 – 16-14) отделен от предыдущего разломной зоной (между п.п. 16-05 и 16-06), которая является элементом Телецко-Башкаусской зоны сдвига. На разрезе (рис. 2) отчетливо определяется ее наклонный характер. В строении этого блока (рис. 2 (IV)) от глубины -1000 м преобладают проводящие области (1 – 5 $\text{Ом}\cdot\text{м}$), которые чередуются с участками относительно повышенного сопротивления (до 70 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). Такая ситуация может указывать на

высокую степень тектонической раздробленности коры и, вероятно, ее повышенном флюидонасыщении.

Заключение

Полученные результаты интерпретации магнитотеллурических данных демонстрируют достаточно раздробленное строение территории как на глубинном разрезе, так и на разрезе осадочного чехла. Важным является выделение неотектонических нарушений, которые четко определяются на геоэлектрических разрезах как области с аномально низкими значениями удельного электрического сопротивления (менее 5 Ом·м). Они, вероятно, могут являться флюидопроводящими каналами, играющими важную роль в современных тектонических процессах. Выявленные особенности распределения электрического сопротивления позволяют сделать вывод о сложной глубинной геодинамике региона, контролируемой коллизионными процессами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонбаатор Д., Куликова А.В., Чен Минг, Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек Е.Э., Трофимова Д.А. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 10, с. 1600-1626.
2. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. – Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 312 с.
3. Дельво Д., Высоцкий Е.М., Клеркс Ж., Кузьмин А., Маттон К., Селегей В.В., Тениссен К., Фернандес-Алонсо М. Свидетельства активной тектоники Телецкого озера (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 10, с. 109-122.
4. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплексных электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая) // Физика Земли, 2011, № 11, с. 63—75.
5. Поспеева Е.В., Витте Л.В., Потапов В.В., Сахарова М.А. Магнитотеллурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности (на примере Горного Алтая) // Геофизика, 2014, № 4, с. 8—16.
6. Эпов М.И., Поспеева Е.В., Витте Л.В. Особенности состава и строения земной коры краевой части Сибирского кратона (в зоне влияния рифтогенных процессов) по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 380—398.
7. Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В., Фудживара И., Ивата К., И. де Граве, Семаков Н.Н., Травин А.В., Кирьянова А.П., Кох Д.А. Роль сдвигов в позднепалеозоо-каменноугольной тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика, 2003, т. 44, № 1-2, с. 49-75.

© Я.О. Бондарчук, 2026

Д. С. Братчиков¹✉, Д. М. Рыжков¹, К. Г. Гадьлышин¹

Повышение производительности полноволнового моделирования на GPU за счет использования MIG и асинхронных вычислений

¹Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: d.s.bratchikov@math.nsc.ru

Аннотация. Численное моделирование сейсмических волновых полей является вычислительно сложной задачей, требующей расчета тысяч независимых источников. Современные графические ускорители обеспечивают высокое ускорение конечно-разностных алгоритмов, однако моделирование одного источника часто не позволяет полностью загрузить вычислительные ресурсы видеокарт класса A100/H100. В настоящей работе предлагается стратегия пакетной обработки источников, при которой на одной GPU одновременно рассчитывается группа независимых источников. Рассмотрены две реализации: асинхронная с использованием CUDA Streams и с расширением сетки потоков фиктивной четвертой размерностью. Показано, что пакетная обработка позволяет добиться ускорения и повышает загрузженность графического ускорителя. Выполнено сравнение с технологией NVIDIA MIG. Оптимальный размер пакета составляет 4-8 источников в зависимости от размера сетки и доступного объема видеопамати. Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации по выбору стратегии распараллеливания при кластерном моделировании в разведочной геофизике.

Ключевые слова: сейсмическое моделирование, конечно-разностная схемы, графические ускорители, пакетная обработка, MIG, высокопроизводительные вычисления

D. S. Bratchikov¹✉, D. V. Ryzhkov¹, K. G. Gadylyshin¹

Improving the performance of wave modeling on GPUs using MIG and asynchronous computing

¹Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: d.s.bratchikov@math.nsc.ru

Abstract. Numerical modeling of seismic wave fields is a computationally complex problem requiring the calculation of thousands of independent sources. Modern GPU provide high acceleration of finite-difference algorithms; however, modeling a single source often does not fully utilize the computational resources of A100/H100 class video cards. In this paper, we propose a strategy for batch processing of sources, in which a group of independent sources is simultaneously calculated on a single GPU. Two implementations are considered: an asynchronous one using CUDA Streams and one with an expansion of the flow grid by a fictitious fourth dimension. It is shown that batch processing allows for acceleration and increases the utilization of the graphics accelerator. A comparison with NVIDIA MIG technology is performed. The optimal batch size is 4-8 sources, depending on the grid size and available video memory. The obtained results allow us to formulate practical recommendations for choosing a parallelization strategy for cluster modeling in exploration geophysics.

Keywords: seismic modeling, FDTD, GPU, batching, MIG, HPC

Введение

Численное моделирование распространения сейсмических волн является фундаментальным инструментом в задачах разведочной и промысловой геофизики. Оно лежит в основе современных методов сейсмической визуализации, таких как RTM (Reverse Time Migration) [1], FWI (Full Waveform Inversion) [2], AVO/AVA анализ [3], а также в задачах микросейсмического мониторинга и контроля разработки месторождений. Вычислительная сложность этих задач обусловлена необходимостью многократного решения трехмерного волнового уравнения на высокоразрешающих сетках для тысяч источников возбуждения, что требует значительных вычислительных ресурсов и оптимизированных алгоритмических подходов.

С появлением графических ускорителей (GPU) проблема производительности конечно-разностного (FDTD) и конечно-элементного моделирования была существенно смягчена. Архитектура GPU, характеризующаяся высокой пропускной способностью памяти (до 3-4 ТБ/с) и тысячами вычислительных потоков, позволяет достичь ускорения в 10-50 раз по сравнению с многопроцессорными CPU-системами, особенно для трехмерных задач моделирования [4, 5]. Тем не менее, эффективность использования GPU сильно зависит от стратегии распараллеливания и конфигурации геометрии сбора данных.

Типичная поверхностная система наблюдения сбора 3D-данных сейсморазведки может включать от нескольких тысяч до десятков тысяч источников. Поскольку моделирование каждого источника представляет собой независимую задачу во временной области, естественным подходом является распределение источников по вычислительным узлам с использованием интерфейса передачи сообщений (MPI). Однако физическая область моделирования для отдельного источника ограничена максимальными выносами и глубиной целевых горизонтов. В результате локальная вычислительная сетка, достаточная для моделирования одного источника, зачастую оказывается недостаточно большой для полной загрузки современных высокопроизводительных GPU (например, NVIDIA A100, H100). При такой конфигурации коэффициент загрузки вычислительных блоков (occupancy) остается низким, а накладные расходы на запуск ядер и синхронизацию перестают быть пренебрежимыми.

В данной работе предлагается стратегия пакетной обработки источников, при которой на одной видеокарте одновременно моделируется группа источников. Данный подход требует выделения большего объема памяти для хранения волновых полей всех источников в пакете, однако позволяет существенно повысить загрузку потоковых процессоров GPU, снизить частоту передач данных по шине PCIe за счет уменьшения числа копирований и разделить вспомогательные буферы данных (параметры скорости, коэффициенты поглощающих слоев). Выполнено сравнение программной пакетной обработки с аппаратной технологией виртуализации NVIDIA Multi-Instance GPU (MIG).

Методы и материалы

1. Конечно-разностный FDTD-алгоритм моделирования на GPU одного источника

Рассмотрим простейшее скалярное акустическое волновое уравнение в изотропной среде, описывающее процесс распространения сейсмических волн

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta_{\vec{x}} u + S(t) \delta(\vec{x} - \vec{x}_s), \quad (1)$$

где $u(\vec{x}, t)$ – волновое поле; $v(\vec{x}, t)$ – скорость распространения волн; $S(t)$ – импульс зондирующего сигнала; $\vec{x}_s$ – координата источника.

Для численного решения уравнения (1) применяется явная конечно-разностная схема 2-го порядка по времени и 8-го по пространству

$$u_{ijk}^{n+1} = 2u_{ijk}^n - u_{ijk}^{n-1} + v^2 \Delta t^2 D_h u_{ijk}^n \quad (2)$$

где n – номер шага по времени; Δt – шаг по времени; h – шаг по пространству; D_h – дискретный оператор Лапласа.

Подавление нефизичных отражений от искусственных границ расчетной области выполнено с помощью поглощающих краевых условия CPML (Convolutional Perfectly Matched Layer) [6]. Высокопроизводительная реализация алгоритма выполнена с использованием среды программирования NVIDIA CUDA. Трехмерная вычислительная область отображается на трехмерную сетку потоков, где каждый поток обновляет одну ячейку сетки.

2. Пакетная обработка источников на GPU

При пакетной обработке на одной видеокарте одновременно рассчитывается N_s источников, что обеспечивает повышение коэффициента загрузки потоковых процессоров (осцирапсу) за счет увеличения параллельных вычислительных потоков. Основной вычислительный граф при этом не изменяется, однако архитектура управления памятью и запуска ядер претерпевает некоторые модификации. В частности, внедряются общие буферы для параметров среды и краевых условий.

Ключевым аспектом пакетной обработки является формирование объединенной вычислительной области. Поскольку каждый источник имеет собственный максимальный вынос, локальные сетки перекрываются. Для пакета формируется единая прямоугольная область, являющаяся объединением всех локальных сеток. Это приводит к росту потребляемой памяти и времени вычисления по сравнению с суммой изолированных расчетов. Поэтому необходимо группировать близко расположенные источники, чтобы увеличение области моделирования. Выделяют два подхода к реализации пакетной обработки:

- Стратегия с использованием CUDA Streams:

В данной реализации каждый источник в пакете выполняется в отдельном асинхронном потоке (CUDA Stream). Потоки планируются аппаратным планировщиком GPU, что позволяет перекрывать вычисления. Для каждого источника

выделяются независимые буферы в глобальной памяти с использованием SoA (Structure-of-Arrays), содержащие волновые поля, а также вспомогательные переменные CPML. Параметр скорости и коэффициенты поглощающих слоев являются общими, так как они не зависят от номера источника. Данный подход не требует модификации кода самого CUDA-ядра, поскольку изменения затрагивают исключительно логику его асинхронного запуска с использованием механизма CUDA Streams.

- Стратегия с добавлением фиктивной четвертой размерности:

В данном случае вводится дополнительная индексация источников $s \in [0, N_s - 1]$, и трехмерная сетка потоков расширяется до четырехмерной: (i_x, i_y, i_z, i_s) . На уровне CUDA это реализуется путем отображения четвертой размерности на `blockIdx.z`. Все источники в пакете обрабатываются в рамках одного запуска ядра, что минимизирует задержки планировщика и накладные расходы на запуск ядра. Общие переменные загружаются один раз и используются всеми источниками пакета, что позволяет их эффективно кэшировать. Память организуется в виде многомерных массивов $u[N_x][N_y][N_z][N_s]$. Реализация этой стратегии предполагает корректировку кода CUDA-ядер.

На практике оптимальный размер пакета N_s определяется из баланса между загрузкой GPU и доступным объемом видеопамяти. Для современных карт класса A100 (80 ГБ) типичные значения составляют от 2 до 32 в зависимости от размера сетки (от 128^3 до 1024^3 узлов).

Так же стоит упомянуть технологию NVIDIA Multi-Instance GPU (MIG), доступную в архитектуре Ampere (A100) и Hopper (H100). Каждый MIG-инстанс обладает выделенными вычислительными ресурсами, включая потоковые мультипроцессоры, кэш-память и подсистему памяти, что обеспечивает аппаратную изоляцию вычислений и предсказуемость производительности. Использование MIG представляет практический интерес для задач, характеризующихся неполной загрузкой вычислительных ресурсов GPU. В настоящей работе рассматривается задача трехмерного конечно-разностного моделирования волновых полей, используемого при численном расчете большого числа независимых сейсмических источников. Для подобных вычислительных схем характерно преобладание операций обмена с глобальной памятью над арифметическими вычислениями, вследствие чего производительность алгоритма в значительной степени определяется пропускной способностью подсистемы памяти графического ускорителя. Выполненные вычислительные эксперименты показывают, что для рассматриваемых размеров расчетной области используемый алгоритм обладает выраженным memory-bound поведением, в результате чего использование полной вычислительной мощности GPU в рамках одного расчета оказывается недостаточно эффективным.

Результаты

Для сравнения стратегий пакетной обработки была проведена серия численных экспериментов. Тестирование проводилось на высокопроизводительной вычислительной системе "СЕРГЕЙ ГОДУНОВ" (Институт математики им. С.Л.

Соболева СО РАН), оснащенной узлом с графическими ускорителями NVIDIA Tesla A100 (4 x 80 ГБ GDDR6X, 2 x Intel Xeon Gold 6342, 1 ТБ DDR4).

Параметры моделирования выбраны в соответствии со значениями, типичными для реальных геофизических приложений. Размер области моделирования $10 \times 10 \times 1.4$ км. Область моделирования дискретизирована грубой $G_1 = 50 \times 50 \times 40$ м и мелкой $G_2 = 25 \times 25 \times 20$ м и сеткой. Скоростная модель однородная со значением 3000 м/с. Геометрия наблюдения включает 1024 источников, равномерно распределенных на поверхности. Максимальные выносы приемников для каждого источника 2 км. Число временных шагов 1001 с шагом 1 мс. Ширина поглощающих слоев 20 узлов сетки.

Тестирование выполнено для двух стратегий пакетной обработки (4D-сетка потоков и асинхронные CUDA Streams) при размере пакета $N_s = 1 \dots 32$ на одном графическом ускорителе. Результаты замеров приведены в табл. 1 – табл. 4.

Таблица 1. Полное время моделирования всех источников, с

Стратегия	Сетка	$N_s = 1$	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 8$	$N_s = 16$	$N_s = 32$
4D-сетка	G_1	76	65	59	56	54	53
	G_2	222	216	211	202	204	198
Stream	G_1	70	59	57	56	56	59
	G_2	208	199	195	195	198	201

Таблица 2. Ускорение полного времени расчета

Стратегия	Сетка	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 8$	$N_s = 16$	$N_s = 32$
4D-сетка	G_1	1.17	1.29	1.36	1.41	1.43
	G_2	1.03	1.05	1.1	1.09	1.12
Stream	G_1	1.19	1.23	1.25	1.25	1.19
	G_2	1.05	1.07	1.07	1.05	1.03

Таблица 3. Среднее время расчета одного пакета / N_s , мс

Стратегия	Сетка	$N_s = 1$	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 8$	$N_s = 16$	$N_s = 32$
4D-сетка	G_1	66	60	55	52	50	49
	G_2	194	183	176	172	173	171
Stream	G_1	62	52	51	50	51	53
	G_2	182	168	164	165	166	170

Таблица 4. Ускорение времени расчета одного источника в пакете

Стратегия	Сетка	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 8$	$N_s = 16$	$N_s = 32$
4D-сетка	G_1	1.1	1.2	1.27	1.32	1.35
	G_2	1.06	1.1	1.13	1.12	1.13
Stream	G_1	1.19	1.21	1.24	1.21	1.17
	G_2	1.08	1.11	1.1	1.09	1.07

Пакетная обработка обеспечивает сокращение общего времени моделирования для обеих стратегий. На грубой сетке G_1 ускорение достигает 20-30 %, на мелкой G_2 5-10 %. Это указывает на то, что при высокой вычислительной нагрузке (мелкая сетка) ресурсы GPU используются более полно и потенциал для дополнительного ускорения за счет пакетирования ограничен.

Стратегия с использованием CUDA Streams демонстрирует максимальное ускорение при малых размерах пакета ($N_s = 4, 8$), после чего наблюдается стабилизация или незначительная деградация производительности. Вероятной причиной является рост накладных расходов на управление потоками и синхронизацию, которые начинают компенсировать выгоду от асинхронного выполнения. Стратегия с 4D-сеткой потоков показывает монотонный рост ускорения с увеличением N_s . При $N_s = 32$ достигается максимальное сокращение времени расчета одного источника. Абсолютные значения времени (табл. 1, 3) свидетельствуют, что при $N_s \leq 8$ стратегия Streams обеспечивает несколько меньшее время выполнения для сетки G_1 . При больших размерах пакета преимущество переходит к 4D-подходу. Для сетки G_2 разница между стратегиями менее выражена, что, по-видимому, связано с доминированием вычислительной нагрузки над накладными расходами пакетной обработки.

Приведем сравнение расчета на 4-х графических ускорителях NVIDIA Tesla A100 на мелкой сетке G_2 без технологии MIG, и с применением технологии MIG. Был произведен расчет плотной системы наблюдения, состоящей из 100000 источников, максимальный вынос 2км, время записи 1с. Время расчета составило 10.8 часа. Во втором эксперименте был произведен такой же расчет 100000 источников, когда на каждом ускорителе была активирована технология MIG с разделением GPU на два независимых логических устройства конфигураций 4g.40gb и 3g.40gb. Таким образом, суммарно вычислительный узел содержал восемь независимых MIG-инстансов, предназначенных для одновременного выполнения вычислений. Время счета составило 14.7 часа. Таким образом ускорение расчета после включения MIG составило 1.36.

Заключение

В настоящей работе исследованы подходы к повышению производительности трехмерного конечно-разностного моделирования сейсмических волновых полей на графических ускорителях за счет пакетной обработки независимых источников. Рассмотрены две стратегии реализации пакетных вычислений: асинхронное выполнение с использованием CUDA Streams и подход с расширением сетки потоков фиктивной четвертой размерностью. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что пакетная обработка позволяет существенно повысить эффективность использования вычислительных ресурсов GPU и сократить общее время моделирования. Для задач с относительно небольшими размерами расчетной области достигнуто ускорение порядка 20–30 %, тогда как для более крупных сеток эффект снижается вследствие более полной загрузки вычислительных ресурсов графического ускорителя.

Дополнительно выполнено исследование технологии NVIDIA MIG применительно к задачам массового расчета независимых сейсмических источников. Полученные результаты показывают, что для рассматриваемого класса задач, характеризующегося выраженным memory-bound поведением, разделение GPU на несколько независимых логических устройств позволяет повысить эффективность загрузки вычислительных ресурсов. Для эксперимента с расчетом 100000 источников на четырех графических ускорителях NVIDIA A100 использование MIG обеспечило ускорение вычислений примерно в 1.36 раза по сравнению с режимом без разделения GPU. Полученные результаты подтверждают перспективность применения технологий пакетной обработки, асинхронных вычислений и аппаратного разделения GPU для задач крупномасштабного сейсмического моделирования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИМ СО РАН (тема №FWNF-2026-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baysal E., Kosloff D. D., Sherwood J. W. C. Reverse time migration // *Geophysics*. – 1983. – Vol. 48, No. 11. – P. 1514–1524.
2. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // *Geophysics*. – 2009. – Vol. 74, No. 6. – P. WCC1–WCC26.
3. Ostrander W. J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49, No. 10. – P. 1637–1648.
4. Micikevicius P. 3D finite difference computation on GPUs using CUDA // *Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units (GPGPU-2)*. – New York: Association for Computing Machinery, 2009. – P. 79–84.
5. Michéa D., Komatitsch D. Accelerating 3D seismic wave propagation using GPU computing // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2010. – Vol. 29, No. 1. – P. 2898–2902.
6. Komatitsch D., Martin R. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*. – 2007. – Vol. 72, No. 5. – P. SM155–SM167.

© Д. С. Братчиков, Д. В. Рыжков, К. Г. Гадильшин, 2026

А. Ю. Бурковский^{1,3✉}, В. В. Карстен^{2,3}

Исследование пятимерной целевой функции квадратичного уклонения коэффициентов отражения плоской продольной волны на границе изотропного и трансверсально-изотропного полупространства с вертикальной осью симметрии

¹Институт математики имени С.Л. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука Сибирского
отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: burkovskii2001@mail.ru

Аннотация. Применение хорошо зарекомендовавшего себя для изотропных геологических сред метода амплитудных вариаций отражений (AVO) для восстановления параметров трансверсально-изотропной среды (VTI-среды), соответствующей в частности слоистым коллекторам углеводородов, требует не только наличия точного решения системы уравнений на нахождение коэффициентов отражения, но и глубокого понимания структуры и поведения пятимерной целевой функции. Целью настоящей работы являлось изучение структуры и поведения пятимерной целевой функции квадратичного уклонения коэффициентов отражения плоской продольной волны на границе изотропного и трансверсально-изотропного полупространства с вертикальной осью симметрии. Для достижения поставленной цели была осуществлена серия численных экспериментов по восстановлению упругих параметров нижележащего VTI-полупространства и проведен детальный анализ зависимости результатов минимизации от начального приближения искомых параметров и структуры попарных сечений функционала. В результате серии численных экспериментов обнаружена устойчивая зависимость результатов многомерной минимизации от начального приближения и прежде всего от параметра ϵ . В соответствии с унимодальной эллиптической структурой большинства возможных сечений пятимерной целевой функции при наложении шума в исходные коэффициенты отражения величиной вплоть до 10% найденные в результате двумерной минимизации значения были сосредоточены в окрестности модельного значения (в том числе в сечении ϵ , V_{P02}). Наибольший интерес представляет сечение δ , V_{S02} , резко отличающееся от всех прочих наличием овражной структуры и локального минимума, что приводит к существенному ухудшению результатов двумерной минимизации по δ , V_{S02} , относительно прочих пар параметров. Поскольку данное сечение является частью пятимерной целевой функции, и поскольку в результате пятимерной минимизации параметр δ определяется равным своему начальному приближению, восстановление параметров анизотропной VTI-среды не представляется возможным без глубокого понимания структуры пятимерного пространства решений и оценки чувствительности целевой функции к вариациям параметров анизотропной среды.

Ключевые слова: VTI, AVO, метод Нелдера-Мида, сейсморазведка

The study of the five-dimensional objective function of the standard deviation of the reflection coefficients of a plane longitudinal wave at the boundary of an isotropic and transversely isotropic half-space with a vertical axis of symmetry

¹Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: burkovskii2001@mail.ru

Abstract. The usage of the Amplitude Versus Offset method (AVO), which has proven itself well for isotropic geological media, to restore the parameters of a transversely isotropic medium (VTI medium), corresponding in particular to layered hydrocarbon reservoirs, requires not only an accurate solution to a system of equations for finding reflection coefficients, but also a deep understanding of the structure and behavior of a five-dimensional objective function. The purpose of this work was to study the structure and behavior of the five-dimensional objective function of the quadratic deviation of the reflection coefficients of a plane longitudinal wave at the boundary of an isotropic and transversely isotropic half-space with a vertical axis of symmetry. To achieve this goal, a series of numerical experiments were carried out to restore the elastic parameters of the underlying VTI half-space and a detailed analysis of the dependence of the minimization results on the initial approximation of the desired parameters and the structure of the pairwise sections of the functional was carried out. As a result of a series of numerical experiments, a stable dependence of the results of multidimensional minimization on the initial approximation and, above all, on the parameter ε was found. In accordance with the unimodal elliptical structure of most possible cross-sections of the five-dimensional objective function, when noise was applied to the initial reflection coefficients of up to 10%, the values found as a result of two-dimensional minimization were concentrated in the vicinity of the model value (including in the section ε , V_{p02}). Of greatest interest is the section δ , V_{s02} , which differs sharply from all others by the presence of a gully structure and a local minimum, which leads to a significant deterioration in the results of two-dimensional minimization in δ , V_{s02} , relative to other pairs of parameters. Since this cross-section is part of a five-dimensional objective function, and since, as a result of five-dimensional minimization, the parameter δ is determined to be equal to its initial approximation, it is not possible to restore the parameters of the anisotropic VTI medium without a deep understanding of the structure of the five-dimensional solution space and an assessment of the sensitivity of the objective function to variations in the parameters of the anisotropic medium.

Keywords: VTI, AVO, Nelder-Mead method, seismic exploration

Введение

Восстановление упругих параметров анизотропных сред анизотропных сред представляется актуальной и востребованной задачей в связи с наличием различных типов анизотропии в слоистых и трещиноватых коллекторах углеводородов. Для изотропных геологических сред хорошо зарекомендовал себя метод амплитудных вариаций отражений (AVO), основанный на исследовании зависимости амплитуды отраженной волны от угла ее падения-отражения, в значительной степени зависящей от состава пластовых флюидов и может существенно разниться для водо- и газонасыщенных пластов-коллекторов, что используют в поисковых

целях [1]. В случае моделирования распространения в изотропной среде плоской волны амплитуда заменяется на коэффициент отражения, а удаление - на угол падения соответственно [6]. Как показано в работе [8], при наличии в подстилающем слое анизотропии упругих свойств использование приближенных решений системы уравнений на нахождение коэффициентов отражения продольной волны не позволяет восстанавливать как упругие параметры среды (V_{p02} , V_{s02} и ρ_2), так и безразмерные коэффициенты Томсена [9], характеризующие степень анизотропности исследуемого пространства.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры и поведения пятимерной целевой функции квадратичного отклонения коэффициентов отражения плоской продольной волны на границе изотропного и трансверсально-изотропного полупространства с вертикальной осью симметрии.

Для достижения поставленной цели была осуществлена серия численных экспериментов по восстановлению упругих параметров нижележащего VTI-полупространства и проведен детальный анализ зависимости результатов минимизации от начального приближения искомых параметров и структуры попарных сечений функционала.

Методы и материалы

Применение уравнений динамической теории упругости к анизотропной VTI-среде позволило получить точную систему линейных алгебраических уравнений по аналогии с представленной ранее для изотропной среды [2,3]. Как показано в работе [7], благодаря использованию векторов рефракции и тривиальному решению для чисто поперечной преломленной волны, можно легко найти два других решения, отвечающих преломленным квазипродольной и квазипоперечной волнам соответственно и построить СЛАУ для нахождения коэффициентов отражения Р-волны [5]:

Для численного эксперимента была задана модель с изотропным верхним и анизотропным нижним слоем (Таблица 1). Были рассчитаны точные коэффициенты отражения продольной волны для 41 приемника с углами падения на границу от 0° до 40° с шагом в 1° . Расчеты производились в ПО «MATLAB».

Таблица 1. Модель для тестирования алгоритма.

	V_{p0} , м/с	V_{s0} , м/с	ρ , кг/м ³	ϵ	δ
Параметры верхнего слоя	2000	1155	2000	0	0
Параметры нижнего слоя	3000	1443	3000	5%	7%
Относительное отклонение начального приближения	33%	20%	33%	5%	7%

Определение параметров производилось минимизацией целевой функции – среднеквадратического отклонения модельных и расчетных коэффициентов отражения продольной волны – по методу Нелдера-Мида. При этом в качестве начального приближения брались параметры верхнего слоя.

Результаты

При минимизации по всем пяти параметрам была выявлена зависимость результата от начального приближения. Для ее анализа были рассмотрены различные комбинации начальных приближений параметров: модельное, значения верхнего слоя, и промежуточное между ними. Анализ показал следующее:

- Параметр δ в результате определяется равным своему начальному приближению.

- Точность определения параметров V_{P02} , V_{S02} и ρ_2 зависит от начального значения параметра ϵ . Ошибка определения этих параметров тем больше, чем больше отклоняется начальное приближение ϵ , и максимально достигает 6% для V_{P02} , и ρ_2 , и 4% для V_{S02} .

- При начальном приближении ϵ , равному модельному значению, ошибка определения V_{P02} , V_{S02} и ρ_2 уменьшается до 2%.

- При задании начального приближения всех параметров равным истинным значениям, они находятся точно.

Для дальнейшего анализа целевой функции был выполнен поиск минимума по двум параметрам при точно заданных остальных, для разных комбинаций параметров. Во всех двумерных сечениях, кроме одного, линии уровня целевой функции имеют вид эллипсов, и такая минимизация позволяла найти определяемые параметры. Даже при наложении шума в исходные коэффициенты отражения величиной до 10% найденные в результате двумерной минимизации значения были сосредоточены в окрестности модельного значения, в том числе для связанных в аппроксимации Рюгера параметров ϵ и V_{P02} (рис. 1). Их распределение соответствует унимодальной эллиптической структуре данного сечения пятимерной целевой функции.

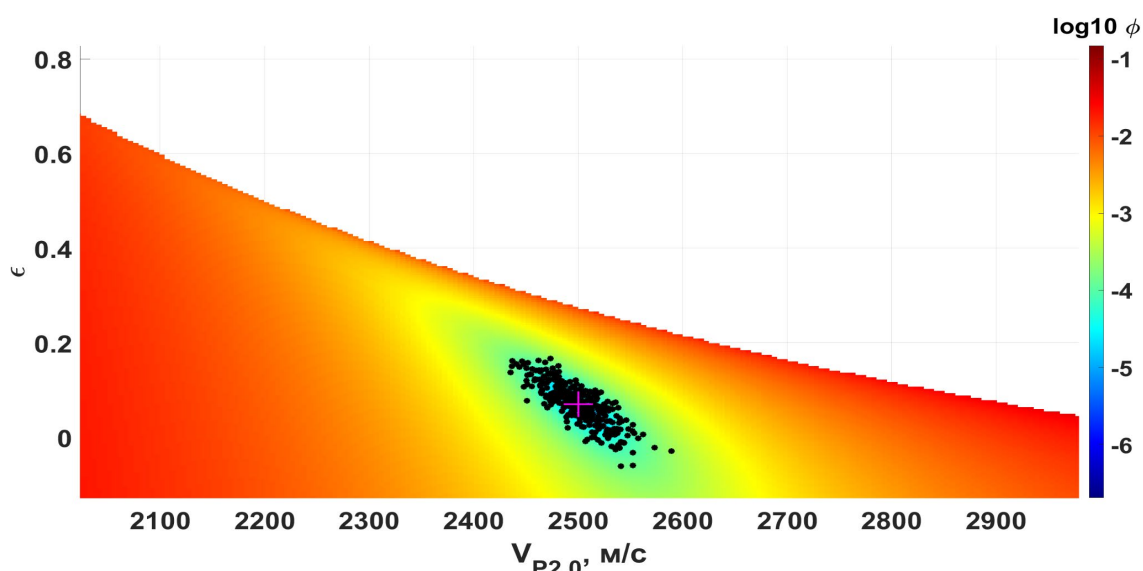


Рис. 1. Результаты 2D-минимизации на карте линий уровня квадратичного уклонения (срез по параметру Томсена ϵ , вертикальной скорости Р-волны V_{P02}), малиновый крест - истинные параметры, черные точки - найденные значения

Однако двумерная минимизация по параметрам δ , V_{S02} (при 10% шуме в исходных данных - коэффициентах отражения) показала, что значения δ , V_{S02} распределены по некоторой овражной структуре целевой функции (рис. 2):

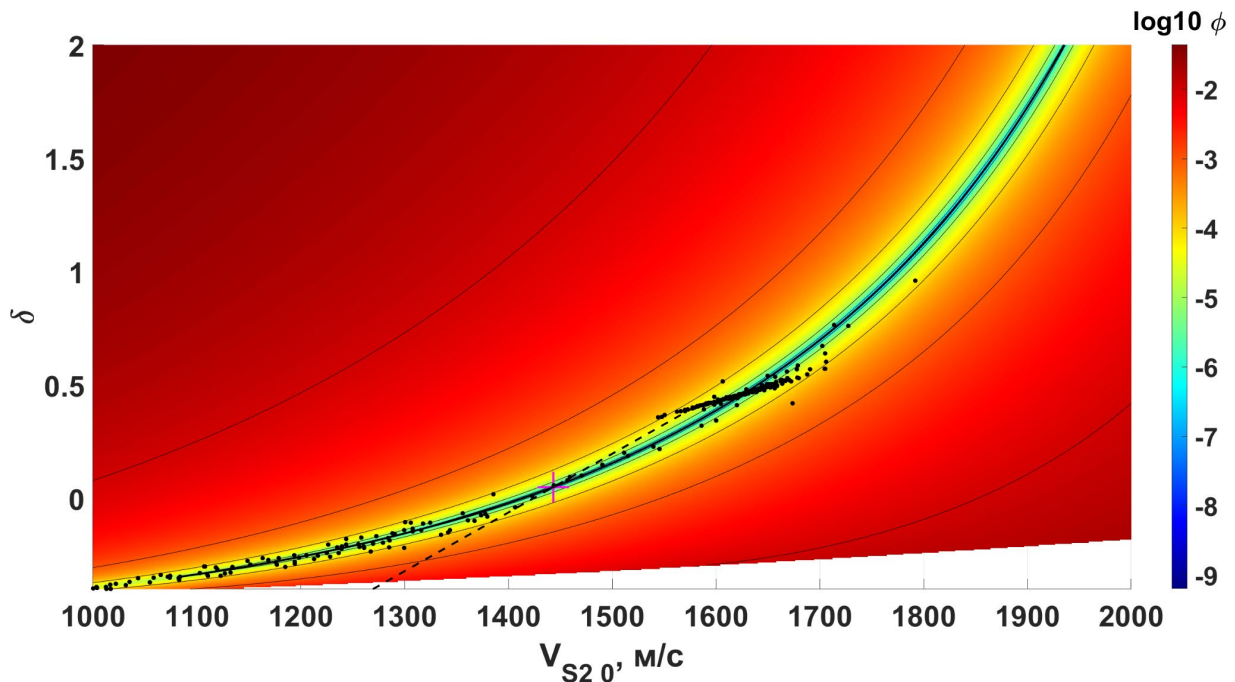


Рис. 2. Результаты 2D-минимизации на карте линий уровня квадратичного уклонения (срез по параметру Томсена δ , вертикальной скорости Р-волны V_{S02}), малиновый крест - истинные параметры, черные точки - найденные значения, черные пунктир - аппроксимация Рюгера, черная линия - одномерная минимизация

Неудовлетворительные результаты минимизации и несоблюдение эллиптичности линий уровня квадратичного уклонения в сечении δ , V_{S02} явным образом указали на необходимость дальнейшего анализа структуры пятимерной целевой функции. Одномерный поиск V_{S02} (в соответствующем “оврагу” интервале δ) продемонстрировал бимодальную структуру целевой функции в выбранном сечении (рис. 3):

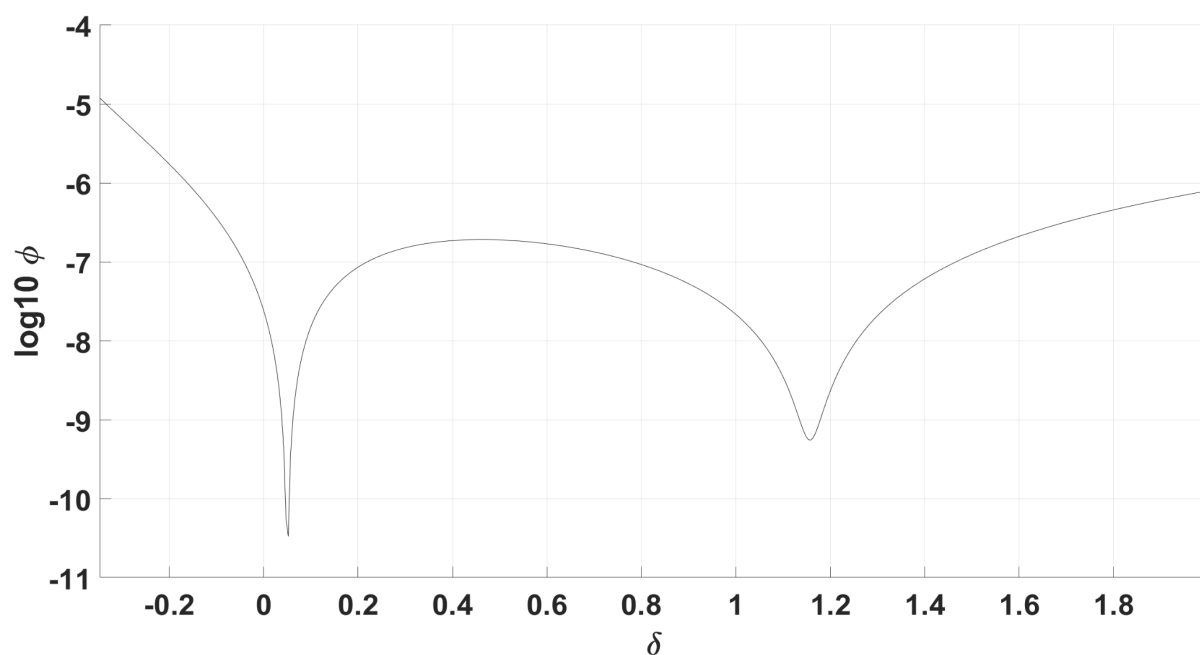


Рис. 3. Результаты 1D-минимизации целевой функции
(срез по параметру Томсена δ)

Далее была проведена 3D-минимизация по параметрам ϵ , V_{P02} , ρ_2 , подтвердившая наличие по крайней мере одного локального минимума в сечении δ , V_{S02} (рис. 4):

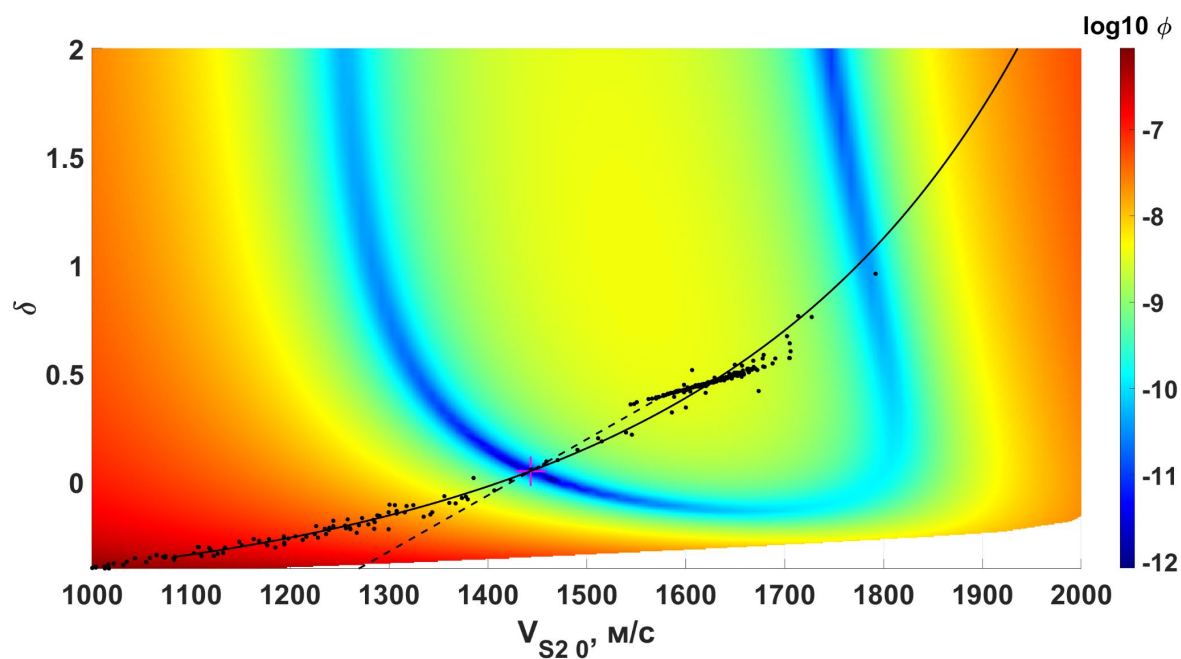


Рис. 4. Результаты 3D-минимизация квадратичного уклонения по параметрам
 ϵ , V_{P02} , ρ_2 ,

Обсуждение

Первоначальное предположение об унимодальности пятимерной целевой функции квадратичного уклонения [4], основанное на опыте исследования изотропной среды [2], не подтвердилось. Нарушение унимодальности пятимерного функционала квадратичного уклонения предположительно является причиной неудовлетворительных результатов пятимерной минимизации. Требуется дальнейший анализ чувствительности целевой функции к изменению параметров анизотропной среды в различных направлениях, для чего планируется построить гессиан целевой функции и исследовать его собственные вектора.

Заключение

Обнаружена устойчивая зависимость результатов многомерной минимизации от начального приближения и прежде всего от анизотропного параметра ε . В соответствии с унимодальной эллиптической структурой большинства возможных сечений пятимерной целевой функции при наложении шума в исходные коэффициенты отражения величиной вплоть до 10% найденные в результате двумерной минимизации значения были сосредоточены в окрестности модельного значения (в том числе в сечении ε , V_{p02}). Наибольший интерес представляет сечение δ , V_{s02} , резко отличающееся от всех прочих наличием овражной структуры и локального минимума, что приводит к существенному ухудшению результатов двумерной минимизации по δ , V_{s02} , относительно прочих пар параметров. Поскольку данное сечение является частью пятимерной целевой функции, и поскольку в результате пятимерной минимизации параметр δ определяется равным своему начальному приближению, восстановление параметров анизотропной VTI-среды не представляется возможным без глубокого понимания структуры пятимерного пространства решений и оценки чувствительности целевой функции к вариациям параметров анизотропной среды.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, проект FWNF-2024-0002.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
2. Бурковский А.Ю. Линейная оценка чувствительности сейсмических данных к параметрам горизонтально-слоистой среды // Материалы 10-й Юбилейной научно-практической конференции «Санкт-Петербург 2023. Геонауки: Время перемен, время перспектив» (Санкт-Петербург, Россия, 17-20 апреля 2023), 2023.
3. Бурковский А.Ю., Чеверда В.А., Исследование линейной чувствительности сейсмических данных к вариациям параметров горизонтально-слоистой изотропной и трансверсально-анизотропной сред // Материалы Всерос. молодежной науч. конф. с участием иностр. ученых «Трофимуковские чтения – 2023»/ Ин-т нефтегаз. геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2023. 320 с. С.: 48-50.
4. Бурковский А.Ю., Чеверда В.А., Метод AVO для вертикальных трансверсально-анизотропных сред, XI Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле // Материалы

конференции. Новосибирск, 23–29 сент. 2024 г. // Сибирское отделение РАН, Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2024. 312 с.

5. Гольдин С. В. Сейсмические волны в анизотропных средах : [монография] / С. В. Гольдин ; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука ; отв. ред. А. Э. Конторович, М. И. Эпов. — Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской акад. наук, 2008. 372 с.

6. Протасов М.И., Чеверда В.А. Теория сейсмических волн: методическое пособие. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. 70 с.

7. Grechka V. Applications of Seismic Anisotropy in the Oil and Gas Industry // EAGE Publications. Education tour series CIS 3, 2009. 171 p.

8. Rüger, Andreas. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media // Society of Exploration Geophysicists, Geophysical monograph series, №10, 2002. 202 p.

9. Thomsen, L. Weak elastic anisotropy // Geophysics, 51(10), 1986. P. 1954–1966.

© А. Ю. Бурковский, В. В. Карстен, 2026

Р. Г. Горова¹✉, А. Н. Василевский^{1,2}, Е. И. Есин^{1,2}

Вычисление и анализ компонент тензора напряжений из изостатических аномалий для региона Эллинской субдукционной зоны

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука; ИНГГ СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: r.gorova@g.nsu.ru

Аннотация. Рассмотренный подход к интерпретации гравитационного поля подтвердил ранее заявленную возможность использования изостатических аномалий для расчета нормальных компонент тензора напряжений в активных субдукционных зонах. Показано, что изостатические аномалии Эллинской субдукционной зоны контролируются погружающейся литосферой, а не только рельефом или вариациями мощности коры. Расчет с помощью метода DEXP (Depth from Extreme Points) величин и положения аномальных масс согласуется с моделью погружающейся плиты Slab2. Вычисленные нормальные компоненты напряжений на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы растяжения/сжатия. Области согласия подтверждают надежность расчетов, тогда как выявленные несогласия предварительно объясняются изгибом Нубийской плиты (Средиземноморский хребет), переходом в мантию из-за тонкой коры (Критское море) либо отсутствием учета касательных напряжений.

Ключевые слова: изостатические аномалии, нормальные напряжения, Эллинская субдукционная зона, метод DEXP

R. G. Gorova¹✉, A. N. Vasilevsky^{1,2}, E. I. Esin^{1,2}

Calculation and analysis of stress tensor components from isostatic anomalies for the Hellenic subduction zone

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: r.gorova@g.nsu.ru

Abstract. The considered approach to interpreting the gravity field confirmed the previously stated possibility of using isostatic anomalies to calculate the normal components of the stress tensor in active subduction zones. It is shown that the isostatic anomalies of the Hellenic subduction zone are controlled by the subducting lithosphere, rather than by topography or crustal thickness variations alone. DEXP-based (Depth from Extreme Points) calculations of the magnitude and location of anomalous masses are consistent with the Slab2 subducting plate model. The calculated normal stress components at 15 km depth generally reflect the known extensional/compressional tectonic regimes. The areas of agreement confirm the reliability of the calculations, while the observed discrepancies can be preliminarily explained by bending of the Nubian slab (Mediterranean Ridge), transition into the mantle due to thin crust (Cretan Sea), or the omission of shear stresses.

Keywords: isostatic anomalies, normal stresses, Hellenic subduction zone, DEXP method

Введение

Эллинская субдукционная зона формируется в результате пододвигания Нубийской плиты под Эгейскую микроплиту. Современная кинематика детально охарактеризована GPS-наблюдениями. Нубийская плита движется на север-северо-запад со скоростью около 5 мм/год относительно Евразии, однако скорость субдукции достигает 35 мм/год за счет движения Эгейской плиты на юго-запад со скоростью около 33 мм/год [1]. Для региона характерно низкое сцепление: сейсмический момент объясняет лишь около 10% реальной конвергенции по GPS-данным [2]. Мощность коры варьирует от 16 до 40 км [3]. Погружающаяся Нубийская плита по модели Slab2 прослеживается до глубин более 440 км [4].

Несмотря на многолетние исследования, не проводилось оценок напряженного состояния земной коры, сопряженного с отклонениями от изостатического равновесия, и не проводилось рассмотрение вопроса - могут ли изостатические аномалии быть использованы для расчета нормальных компонент тензора напряжений?

Целью данной работы является комплексный количественный анализ нормальных компонент тензора напряжений, обусловленных изостатическими аномалиями Эллинской субдукционной зоны, и установление их связи с геометрией погружающейся плиты. Для достижения цели решаются следующие задачи: (1) анализ изостатических аномалий по глобальной модели XGM2019e 2159 [5]; (2) проверка гипотезы о том, что наблюдаемые изостатические аномалии обусловлены погружающейся плитой, путем продолжения аномалий вверх и сравнения с телами, аппроксимирующими геометрию Slab2; (3) вычисление нормальных компонент тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на основе решения Миндлина [6] по методике [7]; (4) сопоставление полученных полей нормальных напряжений с современными оценками по данным GPS о движениях плит.

Методы и материалы

В работе использована глобальная модель гравитационного поля XGM2019e 2159 [5], построенная по спутниковым, наземным и аэрогравиметрическим данным. Для анализа привлекались два типа аномалий: изостатические аномалии (рис. 1) и аномалии силы тяжести в свободном воздухе.

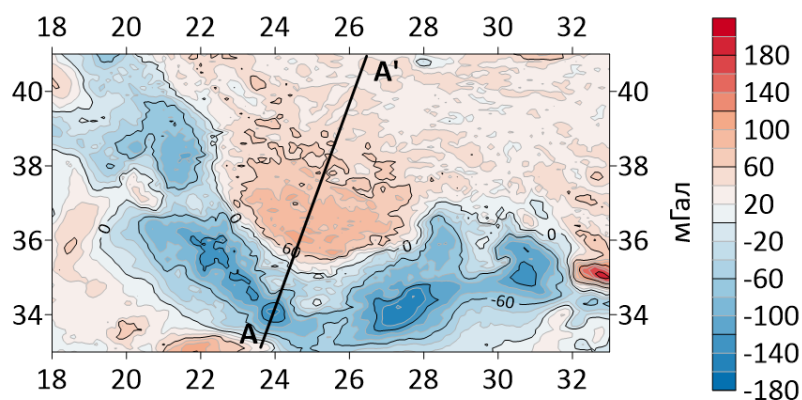


Рис. 1. Карта изостатических аномалий модели XGM2019e 2159 [5] с обозначением профиля AA' (рис. 1).

Для проверки гипотезы о связи изостатических аномалий с погружающейся Нубийской плитой был применен метод DEXP (Depth from Extreme Points), основанный на анализе поля потенциала и его производных. Метод позволяет оценить глубину залегания источников аномалий при самых общих предположениях об их форме. Расчет выполнялся для поля изостатических аномалий модели XGM2019e 2159. Полученные оценки глубин и пространственного положения источников были сопоставлены с геометрией погружающейся плиты по модели Slab2 [4], представляющей собой трехмерную поверхность верхней границы сейсмоактивной зоны субдукции. Совпадение пространственного распределения, в том числе оцененных глубин, интерпретировалось как подтверждение того, что изостатические аномалии в значительной степени обусловлены плотностной неоднородностью, связанной с погружающейся литосферой.

Расчет нормальных компонент тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) выполнялся на основе решения Р. Д. Миндлина для силы, приложенной в точке внутри полубесконечного упругого изотропного тела (рис. 2) [6] по методике, адаптированной для гравитационных изостатических аномалий [7]. Предполагается, что изостатическая аномалия Δg_i (мГал) вызвана наличием на глубине компенсации плитообразного тела переменной мощности H с постоянной плотностью $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$. Связь между H и Δg выражается формулой (1), где G – гравитационная постоянная ($6,67430 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$), g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$). Положительным изостатическим аномалиям соответствует избыток массы (положительная H), а отрицательным – дефицит массы (отрицательная H). Элементарная сила (нагрузка) P , действующая на площадку dA , вычисляется формулой (2). Ось z направлена вниз, поэтому положительные значения P соответствуют силе, направленной вниз, а отрицательные – силе, направленной вверх. Для каждой элементарной нагрузки P , приложенной на глубине компенсации $s = 30 \text{ км}$, вычисляются компоненты тензора напряжений в точке наблюдения на выбранной глубине $z = 15 \text{ км}$. В декартовой системе координат (x – на восток, y – на север, z – вертикально вниз) расстояния между источником и точкой наблюдения определяются формулами (3),

$$-\frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)}\left(1-\frac{y^2}{R_2(R_2+z+c)}-\frac{y^2}{R_2^2}\right)\Bigg] \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_2^3} + \frac{3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)y^2(z-c) - 6c(z+c)[(1-2\mu)z - 2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cy^2z(z+c)}{R_2^7} \right] \quad (8)$$

Результаты

Результаты применения метода DEXP показывают, что изостатические аномалии вероятно вызваны погружающимся с юга на север телом, чья плотность повышается с глубиной (рис. 3). Аномальные массы определяются на глубинах 30 – 50 км (дефицит масс) и на глубинах 70 - 90 км (избыток масс). Нормальные компоненты тензора напряжений, вычисленные из изостатических аномалий, полностью противоположны тектонической обстановки региона: в районе желоба и его окрестностей наблюдаются горизонтальные напряжения растяжения (рис. 4 А; рис 4 Б). Горизонтальные компоненты σ_{xx} и σ_{yy} характеризуются большей амплитудой, чем вертикальная σ_{zz} (рис. 4 В). Компонента σ_{xx} характеризуется сжатием в области Эгейского моря, Анатолии, о-ва Кипр и на запад-юго-запад от глубоководного желоба, а области растяжения формируют полосу окаймляющую субдукционную зону. Компонента σ_{yy} имеет примерно такое же пространственное распределение, но области растяжения встречаются в основном в южной части. Максимальное сжатие по оси z тоже наблюдается в полосе, окаймляющей субдукционную зону. Локальные зоны вертикального растяжения наблюдаются в регионе острова Кипр и в Критском море.

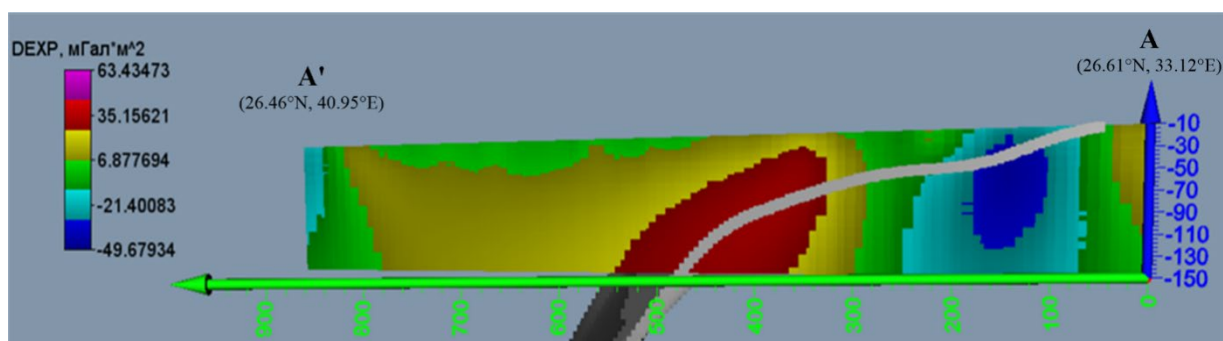


Рис. 3. Источники изостатических аномалий по профилю AA' (рис. 1), полученные методом DEXP и сопоставленные с моделью погружающейся плиты Slab2 [4] (толстая серая линия).

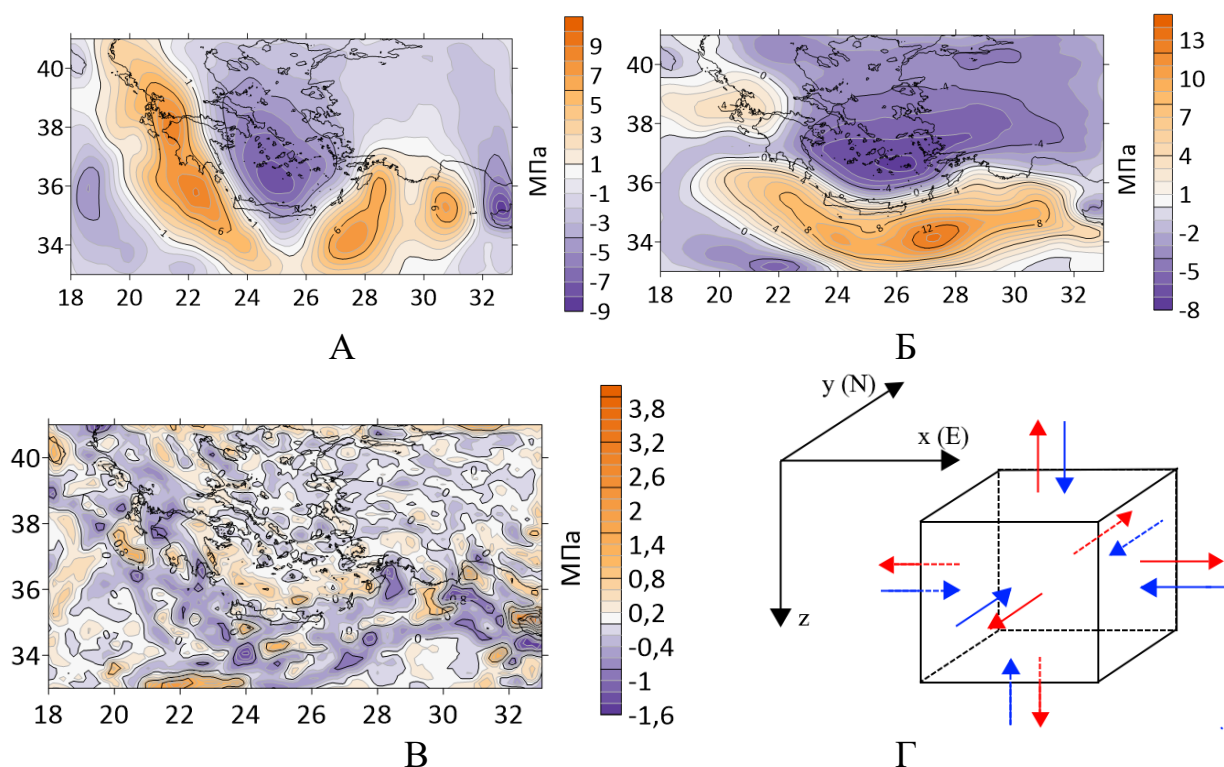


Рис. 4. Нормальные компоненты тензора напряжений на глубине 15 км, А - σ_{xx} ; Б - σ_{yy} ; В - σ_{zz} ; Г- схема нормальных напряжений, где синим цветом обозначены сжимающие напряжения (отрицательные), а красным- растягивающие (положительные)

Обсуждение

Результаты, полученные методом DEXP, были сопоставлены с моделью погружающейся плиты Slab2. Из сопоставления явствует, что изостатические аномалии вероятно обусловлены погружением плиты. При этом изменение плотности пород плиты с глубиной, как было установлено [8, 9], связано с метаморфическими преобразованиями при увеличении температуры и давления с глубиной: серпентинизацией на глубинах 30 – 50 км (с уменьшением плотности) и эклогитизацией на глубинах более 50 км, приводящей к существенному увеличению плотности.

Вычисленные нормальные компоненты тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы, описанные в работах [10,11,12]. В частности, области растяжения в проливе Коринф, проливе Китира-Антикитира, районах островов Карпатос и Родос, а также в Эллинских желобах согласуются с данными других авторов. Наблюдаемые несогласия (Средиземноморский хребет, Критское море) могут быть предварительно объяснены изгибом Нубийской плиты и переходом в мантию из-за аномально тонкой коры, или это может быть связано с тем, что не учтены касательные напряжения. Величины вычисленных нормальных компонент тензора напряжений достаточно большие, составляя более 20 – 30 % от оценок амплитуд напряжений,

обуславливающими спрединг [13, 14], для медленных событий скольжения в проливе Бунго [15] эффективные нормальные напряжения оценены в 18–45 МПа.

Заключение

Предложенный подход и полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности использования изостатических аномалий для расчета нормальных компонент тензора напряжений в активных субдукционных зонах. Основные выводы работы:

1) Изостатические аномалии Эллинской субдукционной зоны контролируются погружающейся литосферой, а не только рельефом или вариациями мощности коры.

2) Вычисленные нормальные компоненты напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы растяжения/сжатия, описанные в работах [10,11,12].

3) Области согласия (Коринф, Китира-Антикитира, Карпатос, Родос, Эллинские желоба) подтверждают надежность расчетов, тогда как выявленные несогласия предварительно объясняются изгибом Нубийской плиты (Средиземноморский хребет) и переходом в мантию из-за тонкой коры (Критское море) либо отсутствием учета касательных напряжений..

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований рекомендуется: (1) учет касательных напряжений и полного тензора напряжений; (2) сравнение полученных полей с сейсмичностью и механизмами очагов землетрясений; (3) применение методики к другим субдукционным зонам; (4) усложнение использованной модели.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ FWZZ-2026-0051.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S. V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – B05411.
2. Shaw B. Active Tectonics of the Hellenic Subduction Zone. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 169 p.
3. Makris J., Papoulia J., Yegorova T. A 3-D density model of Greece constrained by gravity and seismic data // Geophys. J. Int. – 2013. – Vol. 194. – P. 1–17.
4. Hayes G. Slab2 - A Comprehensive Subduction Zone Geometry Model // U.S. Geological Survey : data release. 2018. DOI: 10.5066/F7PV6JNV.
5. Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., Schuh, H. ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. // Earth System Science Data – 2019 – Vol. 11 – PP. 647-674 – DOI: 10.5194/essd-11-647-2019.

6. Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid // *Physics* – 1936 – Vol. 7 – PP. 195-202.
7. Zhang, Cj., Fang, J. & Ma, Zj. Preliminary study on isostatic anomaly and recent tectonic stress field // *Acta Seimol. Sin.* – 2003 – Vol. 16 – PP. 34–41 – DOI: 10.1007/s11589-003-0004-y
8. Wada I., Wang K. Common depth of slab-mantle decoupling: Reconciling diversity and uniformity of subduction zones // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* – 2009 – Vol. 10 – No. 10 – Q10009–DOI: 10.1029/2009GC002570.
9. Wu H., Lei J., Jia Z., Sheng J., Zhu Y., Wang J. Numerical modeling the process of deep slab dehydration and magmatism // *Scientific Reports* – 2024 – Vol. 14 – 26684 – DOI: 10.1038/s41598-024-78193-w.
10. Lallemand S., Truffert C., Jolivet L., Henry P., Chamot-Rooke N., de Voogd B. Spatial transition from compression to extension in the Western Mediterranean Ridge accretionary complex // *Tectonophysics*. — 1994. — Vol. 234. — P. 33-52.
11. Veliz-Borel V., Mouslopoulou V., Nicol A., Begg J., Oncken O. Normal Faulting Along the Kythira-Antikythira Strait, Southwest Hellenic Forearc, Greece // *Frontiers in Earth Science*. — 2022. — Vol. 9. — 730806.
12. Chousianitis K., Sboras S., Mouslopoulou V., Choularias G., Hristopoulos D.T. The Upper Crustal Deformation Field of Greece Inferred From GPS Data and Its Correlation With Earthquake Occurrence // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2024. — Vol. 129. — e2023JB028004.
13. Ребецкий Ю.Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // *Геотектоника* – 2020 – № 6 – С. 3–24. – DOI: 10.31857/S0016853X20060119
14. Сафонов Д.А. Реконструкция поля тектонических напряжений глубокой части южного сегмента Курило-Камчатской и северного сегмента Японской зоны субдукции // *Geodynamics & Tectonophysics* – 2020 – Т. 11 – № 4. – С. 743–755 – DOI: 10.5800/GT-2020-11-4-0504
15. Sasagawa, Y., Sato, T. & Kobayashi, T. Estimating absolute values of effective normal stress during slow slip events in the Bungo Channel from slip velocities and shear stress variations. // *Earth Planets Space* – 2026 – DOI: 10.1186/s40623-026-02435-6

© *Р. Г. Горова, А. Н. Василевский, Е. И. Есин, 2026*

К. Н. Даниловский¹✉, А. В. Глинских¹

Численное моделирование данных каротажа потенциала самопроизвольной поляризации в гидродинамически согласованных моделях глинизированных флюидонасыщенных отложений

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: danilovskiikn@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Метод каротажа потенциала самопроизвольной поляризации (ПС) уже почти столетие занимает важное место в комплексе геофизических исследований скважин (ГИС). Он применяется для литологического расчленения разреза, выделения коллекторов, оценки их глинистости и, в отдельных случаях, для определения минерализации пластовых вод. Однако традиционно интерпретация данных ПС опирается на эмпирические зависимости и поправочные палетки, рассчитанные для идеализированных условий, что может приводить к существенным погрешностям, особенно в терригенных разрезах с высоким содержанием глинистого материала. Целью представленного исследования является разработка более физически обоснованного подхода к моделированию сигнала ПС, учитывающего сложное строение околоскважинной зоны и влияние глинизации. Предложен новый алгоритм численного решения прямой задачи каротажа ПС на основе метода конечных элементов (МКЭ) в осесимметричной цилиндрической постановке. Алгоритм позволяет учитывать детальное распределение свойств среды в неоднородной прискважинной области. Особое внимание в работе уделено оптимальной параметризации моделей среды с плавным изменением свойств в зоне проникновения фильтра бурового раствора. На примере гидродинамически-согласованных профилей, полученных для типичных терригенных коллекторов Западной Сибири, показаны результаты применения процедуры оптимальной кусочно-постоянной аппроксимации плавного профиля удельного электрического сопротивления (УЭС), позволяющей существенно сократить число параметров модели при сохранении физической согласованности. По результатам анализа сходимости решения, в рассматриваемых условиях аппроксимация профиля проникновения девятью кольцевыми зонами обеспечивает совпадение сигнала с рассчитанным для «эталонного» (детального) профиля в пределах 1 мВ независимо от мощности пласта-коллектора.

Ключевые слова: геофизические исследования в скважинах (ГИС); каротаж потенциала самопроизвольной поляризации (ПС), численное моделирование, метод конечных элементов (МКЭ), гидродинамически согласованные модели

K. N. Danilovskiy¹✉, A. V. Glinskikh¹

Numerical simulation of spontaneous potential well logs in hydrodynamically consistent models of shale-rich fluid-saturated formations

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: danilovskiikn@ipgg.sbras.ru

Abstract. The spontaneous potential (SP) logging method has maintained its important role in the suite of well logging techniques for nearly a century. It is widely used for lithological differentiation,

identification of payzones, evaluation of their shale content, and, in some cases, for determining formation water salinity. However, conventional interpretation of SP data still relies on empirical relationships and correction charts derived for idealized conditions. This often leads to significant errors, particularly in clastic sections with high shale content. The aim of this study is to develop a more physically grounded approach to modeling the SP response that accounts for the complex structure of the near-wellbore zone and the influence of shale content. A new algorithm is proposed for the numerical solution of the forward SP logging problem based on the finite element method (FEM) in an axisymmetric cylindrical formulation. The algorithm enables detailed representation of property distributions within the heterogeneous near-wellbore region. Particular attention is paid to the optimal parameterization of formation models with smoothly varying properties in the mud filtrate invasion zone. Using hydrodynamically consistent profiles obtained for typical clastic reservoirs of Western Siberia, the study demonstrates the application of an optimal piecewise-constant approximation of the smooth resistivity profile. This approach significantly reduces the number of model parameters while maintaining physical consistency between the properties. Convergence analysis shows that, under the considered conditions, approximating the invasion profile with nine concentric cylindrical zones ensures that the computed SP response deviates from the “reference” (high-resolution) solution by no more than 1 mV, regardless of reservoir thickness.

Keywords: well logging, spontaneous potential logging, numerical modelling, finite element method, hydrodynamically consistent models

Введение

Несмотря на почти столетнюю историю применения, метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) по-прежнему занимает важное место в комплексе геофизических исследований скважин (ГИС). Он используется для литологического расчленения разрезов, выделения коллекторов и оценки их глинистости, а в ряде случаев, может быть использован для получения информации о минерализации пластовых вод.

Вместе с тем традиционные подходы к интерпретации данных метода ПС в значительной степени основаны на упрощенных физических моделях. На практике до сих пор широко применяются поправочные палетки и аналитические решения, полученные для идеализированных условий. Эти упрощенные постановки позволяют учитывать влияние вмещающих пород, зон проникновения фильтрата бурового раствора и др., однако они не обеспечивают согласованного описания физических и электрохимических процессов, лежащих в основе формирования сигнала ПС. Это особенно ярко проявляется в терригенных разрезах с высоким содержанием глинистого материала, где могут возникать существенные погрешности интерпретации [1]. Так, даже в современных работах часто используется приближение статического потенциала, в рамках которого источники ПС представляются в виде идеализированных дипольных слоев на границах сред. Такой подход не вполне корректно устанавливает связь между наблюдаемым сигналом и петрофизическими параметрами исследуемых отложений пласта, в частности в глинистых коллекторах. Ключевым фактором, определяющим поведение ПС в подобных условиях, является влияние глинистого материала на электрохимические свойства пористой среды.

Развитие численных методов математического моделирования открывает возможности для создания более физически обоснованных способов интерпретации

данных каротажа ПС. Современные подходы к описанию сигналов ПС основываются на термодинамически корректном представлении процессов ионной диффузии в пористых средах, что позволяет связать амплитуду ПС с минералогическим составом породы, ее пористостью и емкостью катионного обмена. При этом корректный учет указанных факторов требует использования параметров, непосредственно отражающих физику процессов, таких как число переноса катионов, а также согласованного описания распределения электрофизических свойств в прискважинной зоне [2, 3].

Дополнительную сложность представляет параметризация модели среды. Традиционно радиальное строение пласта описывается малым количеством концентрических кольцевых зон с постоянными свойствами, что упрощает расчеты, но не отражает реального плавного изменения параметров, обусловленного проникновением фильтрата бурового раствора [4]. В действительности распределение сопротивления и минерализации носит непрерывный характер, и его адекватное описание становится особенно важным при совместной интерпретации различных методов каротажа. В связи с этим актуальной задачей является разработка подходов к моделированию ПС, сочетающих физическую обоснованность и достаточную гибкость параметризации.

В работе представлены результаты разработки нового алгоритма численного моделирования данных каротажа ПС на основе метода конечных элементов (МКЭ). Алгоритм позволяет учитывать сложное строение околоскважинной области и влияние глинизации отложений на сигнал ПС. Приводятся результаты расчетов в гидродинамически-согласованных моделях околоскважинного пространства, анализируются возможности оптимальной аппроксимации плавного радиального изменения свойств и изучается сходимость решения в зависимости от детальности аппроксимации.

Численное решение прямой задачи каротажа ПС.

Для решения прямой задачи ПС рассматривается геологическая модель в цилиндрической системе координат (рис. 1), где ось z совпадает с осью скважины, а зависимость от азимутального угла отсутствует (осесимметричная постановка). Прискважинная область может включать несколько коаксиально-цилиндрических зон. В этом случае уравнение Пуассона для потенциала φ записывается в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial z} \right) = \\ = \frac{k_b T}{e} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho(r, z)} (2T_+(z) - 1) \frac{\partial \ln \rho_w(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(r, z)} (2T_+(z) - 1) \frac{\partial \ln \rho_w(r, z)}{\partial z} \right) \right].$$

Число переноса катионов $T_+(z)$ изменяется только вдоль оси z , отражая литологическую неоднородность, тогда как $\rho(r, z)$ и $\rho_w(r, z)$ могут варьироваться как по радиусу, так и по глубине, причем в скважине они принимаются равными УЭС бурового раствора.

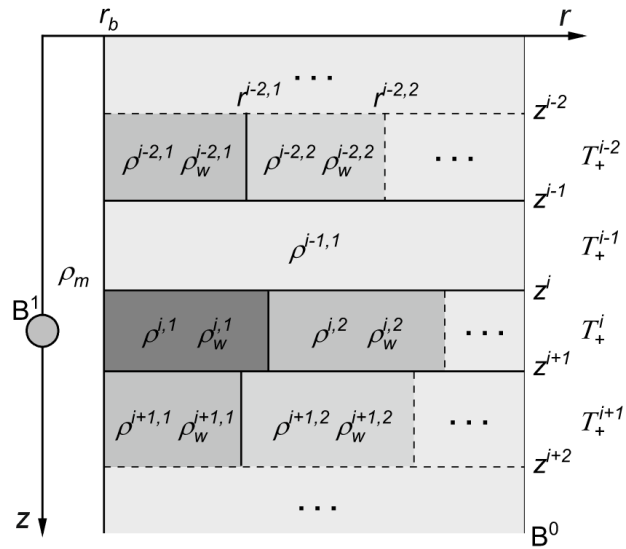


Рис. 1. Осесимметричная модель среды, включающая скважину и пачку пластов, состоящих их набора радиальных зон с различными свойствами

Для формулирования краевой задачи задаются граничные условия: на поверхности электрода нормальная компонента плотности тока равна нулю, а на внешней границе потенциал принимается равным нулю, что обеспечивает затухание поля. Задача решается при помощи МКЭ в вариационной постановке, что позволяет учитывать неоднородную проводимость и сложную геометрию источников. После аппроксимации потенциала по базисным функциям задача сводится к системе линейных уравнений вида $\hat{A}x = b$ с симметричной положительно определенной матрицей.

Электрофизические параметры $\rho(r, z)$, $\rho_w(r, z)$ и $T_+(z)$ задаются с учетом радиального разбиения на зоны. Для исключения сингулярностей скачкообразное изменение свойств на границах блоков среды заменяется сглаженными переходами с применением сигмоидальных функций, что позволяет корректно вычислять производные и задавать правую часть СЛАУ в аналитическом виде. Правая часть представляется как сумма локальных вкладов от границ зон, что обеспечивает устойчивость расчета и корректное описание зоны проникновения при произвольном числе радиальных и вертикальных областей.

Интегралы по элементам вычисляются с использованием численного квадратурного метода, основанного на последовательном уточнении сетки и экстраполяции Ричардсона (интегрирование типа Ромберга), что обеспечивает учет быстрых изменений правой части вблизи границ и устойчивость решения при изменении параметров модели.

Оптимальная параметризация моделей среды с гидродинамически согласованным плавным профилем электрофизических свойств.

Во флюидонасыщенных коллекторах электрофизические свойства от стенки скважины до неизменной части пласта изменяются плавно, что обусловлено постепенным проникновением фильтрата бурового раствора и его смешиванием с

пластовыми флюидами. Подход к параметризации, описанный в предыдущем разделе, позволяет учесть эти радиальные изменения за счет аппроксимации исходного профиля дискретным набором коаксиальных цилиндрических зон. С увеличением числа зон такое представление все точнее приближает истинный плавный профиль, обеспечивая более реалистичное представление среды.

В такой постановке возникает вопрос об оптимальной аппроксимации истинного плавного профиля свойств. Высокая вычислительная сложность алгоритмов численного моделирования ограничивает их применимость при решении практических задач, поэтому задавать распределение свойств с очень детальным шагом по радиусу представляется неэффективным подходом.

В рамках исследования поиск оптимальной параметризации выполняется на примере профилей электрофизических свойств, полученных в результате гидродинамического моделирования процесса фильтрации бурового раствора в терригенные коллекторы с характерными для месторождений Западной Сибири свойствами. Рассмотрим результаты таких расчетов в модели, типичной для продуктивных меловых коллекторов БС10 [5]. Пористость пласта составляет 0.17, содержание нефти в неизменной части – 80 %. Время, прошедшее после вскрытия пласта, – 24 часа, что также типично для интервала между бурением эксплуатационной секции скважины и каротажем на месторождениях этого региона.

Минерализация воды в пласте изменяется от 1 г/л, что соответствует минерализации бурового раствора, до 15 г/л, что соответствует минерализации воды в неизменной части пласта. При этом из-за одновременного наличия в пласте подвижной нефти и минерализованной пластовой воды образуется сложный профиль УЭС, включающий проводящую окаймляющую зону (рис. 2а). Значение числа переноса катионов T_+ принято равным 0.4 (чистый песчаник) для всех радиальных зон в пласте. Температура в эксперименте принята равной 68 °С, что соответствует исходным гидродинамическим расчетам. Значения УЭС воды ρ_w определяются на основе данных минерализации с использованием эмпирической формулы [6]:

$$\rho_w = \frac{82}{1.8T + 39} \left[0.0123 + \frac{3647.5}{(1000S)^{0.955}} \right] \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где T – температура, °С; S – минерализация, кррт (для растворов NaCl допускается принимать эквивалентной г/л).

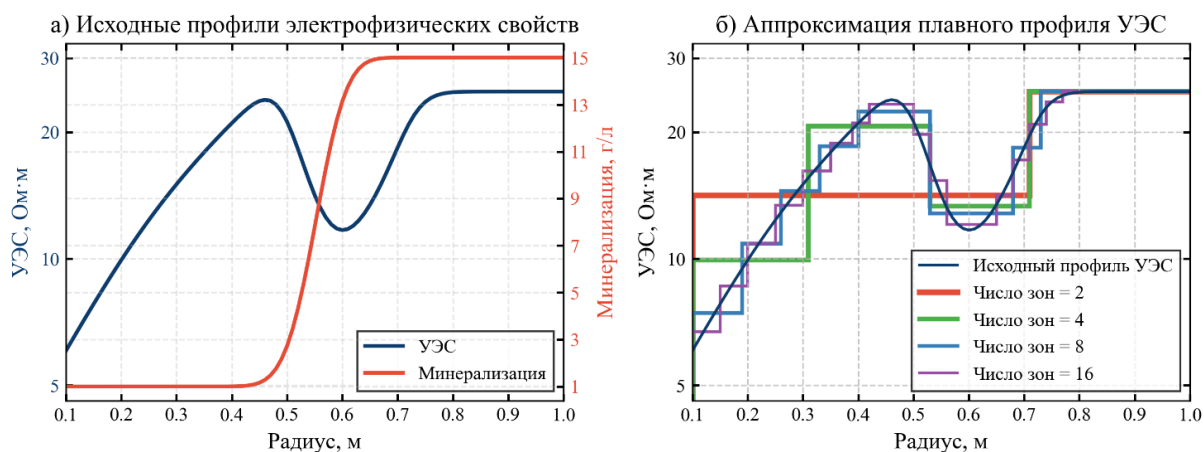


Рис. 2. а) Исходные плавные профили УЭС и минерализации воды;
б) результаты аппроксимации плавного профиля УЭС набором зон, характеризующихся постоянными значениями

Наиболее сложной немонотонной формой характеризуется именно профиль УЭС, поэтому целесообразно оценивать оптимальность аппроксимации относительно расхождений с ним. Для аппроксимации плавного радиального профиля свойств применяется кусочно-постоянная функция с фиксированным числом сегментов. Задача поиска оптимального разбиения формулируется как задача минимизации суммарной ошибки аппроксимации по всей длине профиля и решается в парадигме динамического программирования. Исходный профиль представляется в виде последовательности измеренных значений, заменяемых ступенчатой функцией с заданным числом ступенек. Для каждого возможного интервала вычисляется стоимость его замены постоянным значением, при этом значение последнего сегмента фиксируется на уровне, соответствующем правому краю исходной кривой. Формируется матрица, в которой для каждой точки профиля и числа сегментов определяется минимальная накопленная ошибка. На основе этих данных определяются оптимальные положения границ сегментов и строится итоговая кусочно-постоянная аппроксимация исходного профиля.

Полученное для профиля УЭС оптимальное геометрическое разбиение используется также для аппроксимации другого плавно изменяющегося параметра – УЭС пластовой воды. Переназначаются при этом только сами значения свойства внутри каждого из сегментов, тем самым обеспечивается согласованное геометрическое описание всех радиально изменяющихся параметров. Такой подход уменьшает число параметров модели и сохраняет физическую связь между различными свойствами, подверженными влиянию фильтрационных процессов.

Расчет сигналов ПС и анализ сходимости.

Для того чтобы более полно оценить сходимость решения при увеличении числа радиальных кольцевых зон, составляющих аппроксимацию плавного профиля, анализируется также влияние мощности пласта. Рассматривается постановка «пласт-коллектор в однородных вмещающих породах», в качестве вмещающих

пород выступают пласты с УЭС 5.0 Ом·м и числом переноса катионов 1.0 (чистые глины), минерализация воды соответствует минерализации воды в неизменной части пласта-коллектора. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Из рис. 3а видно, что поведение сигналов соответствует теоретическим ожиданиям: с увеличением мощности коллектора уменьшается значение сигнала ПС, то есть увеличивается его амплитуда относительно «линии глин». Также видно, что при увеличении детальности разбиения рассчитанный сигнал ПС сходится к некоторому постоянному значению и не меняется при дальнейшем увеличении детальности.

На рис. 3б для каждой из моделей представлены изменения сигнала относительно значения, полученного в результате расчета в модели с детальным профилем. Можно отметить, что, в среднем, в мощных пластах сигнал быстрее сходится к целевому значению. При этом для любого из рассмотренных случаев при задании профиля девятью кольцевыми зонами с постоянными значениями свойств отклонение сигнала не превышает 1 мВ.

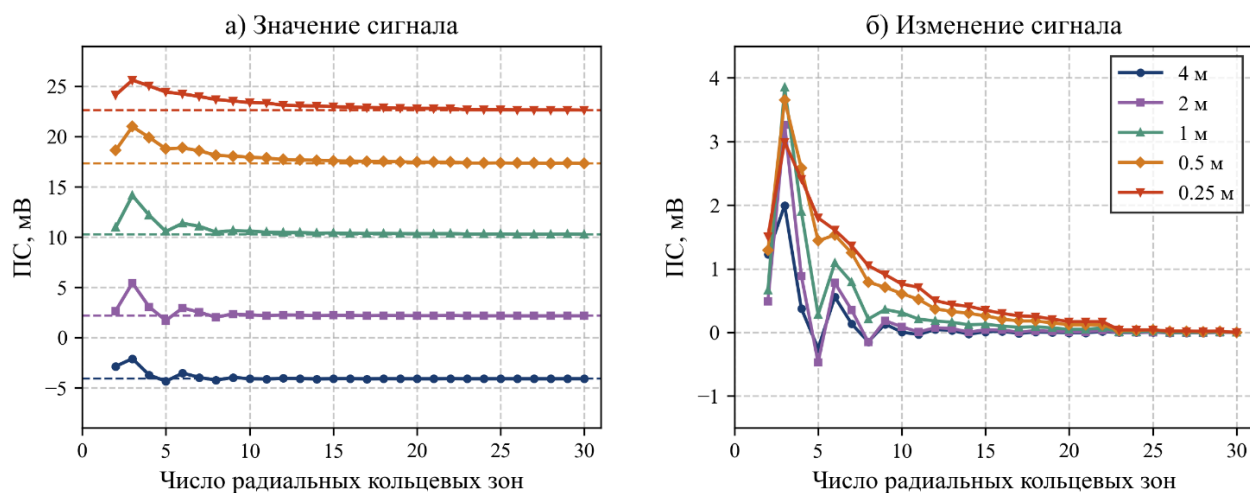


Рис. 3. а) Значения и б) изменения сигнала ПС в зависимости от числа радиальных кольцевых зон в пласте, рассчитанные в моделях «пласт-коллектор в однородных вмещающих породах» для различной мощности пласта

Несмотря на то, что рассмотренный пример представляет собой частный случай, он позволяет выявить общие закономерности поведения решения и его сходимости при детализации плавного профиля. Сформированные представления о влиянии детальности разбиения и мощности пласта могут служить ориентиром при расчетах в более сложных и реалистичных моделях среды.

Заключение

Предложен новый алгоритм численного моделирования данных каротажа ПС на основе МКЭ. В отличие от традиционных методов интерпретации, опирающихся на упрощенные аналитические решения и поправочные палетки для идеализированных условий, предложенный инструментарий явно учитывает плавное радиальное

изменение удельного электрического сопротивления и минерализации порового флюида. По результатам анализа поведения сигнала ПС в моделях среды, построенных на основе профилей проникновения, характерных для терригенных коллекторов Западной Сибири, аппроксимация плавного радиального профиля девятью коаксиальными цилиндрическими зонами с постоянными свойствами позволяет ограничить отклонение рассчитанного сигнала ПС от эталонного значения величиной не более 1 мВ. При этом сходимость решения улучшается с увеличением мощности пласта-коллектора.

Результаты исследования открывают перспективы для более точной количественной интерпретации данных метода ПС в сложных глинистых разрезах. Вместе с тем, предложенный подход не снимает проблему неоднозначности интерпретации данных ПС и в практических условиях требует привлечения дополнительной информации из других методов ГИС. Важным остается и вопрос вычислительной эффективности алгоритма, особенно при моделировании протяженных интервалов. В рамках дальнейших исследований планируется построение быстрого аналога численного алгоритма с применением методов глубокого машинного обучения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00054, <https://rscf.ru/project/25-77-00054/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao P. [и др.] Joint inversion of saturation and Q_v in low-permeability sandstones using spontaneous potential and resistivity logs // *Petrophysics*. – 2023. – Vol. 64. – P. 741-752.
2. Woodruff W. F. [и др.] Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements // *Geophys. J. Int.* – 2010. – Vol. 183. – № 2. – P. 748-764.
3. Bautista-Anguiano J., Torres-Verdín C., Strobel J. Mechanistic 3D finite-difference simulation of borehole spontaneous potential measurements // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85. – № 4. – P. D105-D119.
4. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. М. : Гостоптехиздат, 1959. 697 с.
5. Сухорукова К. В., Нестерова Г. В., Примаков С. А. Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2022. – № S11. – С. 77-86.
6. Dresser Atlas. Well logging and interpretation techniques / Dresser Ind. Inc. [Б. м.], 1982.

© К. Н. Даниловский, А. В. Глинских, 2026

Д. К. Дмитричков^{1✉}, М. И. Протасов¹

**Алгоритм совместной глубинной миграции
и акустической инверсии
с применением эмпирических зависимостей
для устойчивого определения упругих свойств среды**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: dmitrachkovdk@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Современная тенденция к увеличению объемов данных сейсморазведки требует разработки вычислительно эффективных алгоритмов построения глубинной скоростной модели среды. При совместном использовании глубинной миграции и сейсмической инверсии в итерационном процессе удастся уточнять глубинную скоростную модель среды, сохраняя вычислительную эффективность алгоритма. В практически значимом случае неизвестной плотности среды требуется осуществить переход от модели акустического импеданса к скоростной модели среды, чего нельзя сделать без априорной информации о плотности. Для преодоления этой трудности в данной работе в итерационный процесс алгоритма миграции-инверсии вводится эмпирическая зависимость между скоростью волны и плотностью среды, что делает алгоритм миграции-инверсии применимым для случая неизвестной плотности среды. Эмпирическая зависимость вносит в решение априорную геологическую информацию, что повышает устойчивость решения обратной задачи восстановления глубинной скоростной модели среды. В работе рассматривается применение эмпирической зависимости Нафе – Дрейка как связи между скоростью и плотностью в алгоритме совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии для обновления глубинной скоростной модели в итерационном процессе при неизвестной плотности среды. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных и реалистичной модели Marmousi.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, глубинная миграция, глубинная скоростная модель

D. K. Dmitrachkov^{1✉}, M. I. Protasov¹

**Algorithm of joint depth migration and acoustic inversion
using empirical relations
for stable determination of elastic properties of the medium**

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: dmitrachkovdk@ipgg.sbras.ru

Abstract. The contemporary trend toward increasing volumes of seismic data necessitates the development of computationally efficient algorithms for constructing a depth velocity model of the medium. By jointly using depth migration and seismic inversion within an iterative process it becomes possible to refine the depth velocity model of the medium while preserving the computational efficiency of the algorithm. In the practically significant case of an unknown density of the medium, it is necessary to make a transition from the acoustic impedance model to the velocity model of the medium, which cannot be done without a priori information about the density. To overcome this difficulty, in this paper an empirical relation between the wave velocity and the density of the medium is introduced into the iterative process of the migration-inversion algorithm, which makes the migration-

inversion algorithm applicable to the case of unknown medium density. Empirical relation introduces a priori geological information into the solution, which increases the stability of solving the inverse problem of restoring the depth velocity model of the medium. This study examines the application of the Nafe – Drake empirical relation as a velocity-density connection in an algorithm combining depth migration and acoustic seismic inversion to update the depth velocity model in an iterative process under conditions of unknown density of the medium. Numerical experiments were performed using synthetic data and the realistic Marmousi model.

Keywords: seismic inversion, depth migration, depth velocity model

Введение

Сейсмическая инверсия представляет собой стандартную процедуру для прогнозирования коллекторских свойств горных пород. Традиционно инверсия применяется к результатам временной обработки сейсмических данных [1, 2]. В то время как применение инверсии после процедуры миграции распространено на практике, последовательное применение глубинной миграции и сейсмической инверсии в итерационном процессе уточняет глубинную скоростную модель среды, что особенно актуально для сложнопостроенных геологических сред. В отличие от требовательных к вычислительным ресурсам алгоритмов обращения полного волнового поля (FWI) [3], в разработанном алгоритме используется глубинная миграция на гауссовых пучках [4] и одномерная процедура акустической сейсмической инверсии, благодаря чему разработанный алгоритм является вычислительно эффективным.

Применение разработанного алгоритма в практически значимом случае неизвестного распределения плотности в среде вызывало затруднения, поскольку с помощью алгоритма акустической инверсии восстанавливается модель акустического импеданса, а для процедуры глубинной миграции на вход требуется скоростная модель, и при неизвестной плотности осуществить переход от импеданса к скорости проблематично [5]. В данной работе алгоритм совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии дополнен шагом оценки значений скорости продольной волны по модели акустического импеданса, восстановленной с помощью акустической инверсии, с использованием эмпирической зависимости Нафе – Дрейка [6]. Такая зависимость устанавливает функциональную связь между скоростью продольной волны и плотностью для горных пород. Она применима для широкого диапазона горных пород, за исключением мафических и обогащенных кальцием пород, а также для широкого диапазона скоростей продольной волны V_p от 1500 м/с до 8500 м/с. Широкие границы применимости выбранной эмпирической зависимости вносят априорную геологическую информацию о решении в итерационный алгоритм миграции-инверсии в отсутствии информации о плотности среды.

По результатам численных экспериментов сделан вывод, что использование эмпирических зависимостей приводит к устойчивому обновлению скоростной модели на каждом шаге итерационного процесса совместной глубинной миграции и сейсмической инверсии. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных и реалистичной модели Marmousi.

Совместная глубинная миграция и акустическая инверсия.

Рассматриваемый в работе совместный алгоритм состоит из алгоритма акустической сейсмической инверсии и алгоритма глубинной миграции, которые следуют друг за другом в итерационном процессе.

В основе используемого алгоритма акустической сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель сейсмической трассы [7], в рамках которой однократно-отраженное волновое поле во временной области представляется в виде свертки трассы коэффициентов отражения с сейсмическим импульсом в предположении горизонтально-слоистого строения среды. Обратная задача по определению акустического импеданса по зашумленным сейсмическим трассам является некорректно поставленной. В качестве априорной информации о решении предполагается блочное строение среды, наличие в решении заданного низкочастотного тренда акустического импеданса, а также латеральная связность восстановленной модели импеданса. Инверсия выполняется в два этапа. На первом этапе по зашумленным сейсмическим трассам восстанавливаются разреженные трассы коэффициентов отражения, что достигается с помощью стабилизирующего слагаемого в норме L_1 , которое обеспечивает наименьшее число ненулевых компонент в решении. Ненулевые коэффициенты отражения фокусируются около границ пластов, и восстановленная модель акустического импеданса имеет блочное строение. В то же время задача оптимизации становится нелинейной, и для ее устойчивого решения используется метод FISTA [8]. Его отличительной особенностью является теоретически обоснованная высокая скорость сходимости, благодаря которой с помощью метода FISTA удастся за небольшое количество итераций минимизировать целевую функцию. При практических расчетах в рамках данной работы не возникало ситуаций, чтобы метод расходился. Выбор параметра регуляризации осуществляется по принципу невязки, благодаря чему удастся построить регуляризующий алгоритм решения некорректной задачи [9]. На втором этапе по найденным коэффициентам отражения для всего набора трасс коэффициентов отражения, восстановленных на первом этапе инверсии, определяется модель акустического импеданса со стабилизирующим слагаемым, обеспечивающим учет низкочастотного тренда в модели. Целевая функция на втором этапе инверсии является квадратичной, а матрицы разреженными, поэтому для решения задачи оптимизации применяется прямой метод решения систем линейных уравнений, а именно метод Гаусса с выбором ведущего элемента, который находит единственный минимум квадратичной целевой функции. Таким образом, на втором этапе инверсии также не возникает трудностей с решением задачи оптимизации и расходимостью численного метода. Для выбора параметра регуляризации на втором этапе также используется принцип невязки. Нелинейное уравнение одной переменной на параметр регуляризации, возникающее из принципа невязки, решается численно с помощью метода ИТР [10], который сочетает в себе высокую скорость сходимости метода секущих и гарантии сходимости к решению метода бисекции. Выбранные численные

методы в применении к задаче акустической сейсмической инверсии обеспечивают высокую надежность и скорость работы алгоритма.

В совместном алгоритме используется глубинная миграция в истинных амплитудах, основанная на гауссовых пучках. Миграция на гауссовых пучках сочетает в себе быстроедействие миграции Кирхгофа [11], что отличает ее от вычислительно затратной миграции в обратном времени (RTM) [12], при этом обеспечивая высокое качество сейсмических изображений для сложнопостроенных геологических сред.

На входе итерационного алгоритма совместной миграции-инверсии имеется глубинная миграционная скоростная модель и сейсмические данные. Одна итерация алгоритма состоит из следующих шагов:

1. с помощью миграции в скоростной модели строится глубинное сейсмическое изображение;
2. преобразованием «глубина-время» с помощью той же скоростной модели из глубинного масштаба во временной переводятся сейсмическое изображение и сама скоростная модель;
3. с помощью эмпирической зависимости рассчитывается низкочастотный тренд акустического импеданса для инверсии;
4. восстановленная детальная модель акустического импеданса переводится в глубинный масштаб тем же преобразованием «глубина-время»;
5. с помощью эмпирической зависимости оценивается детальная глубинная скоростная модель по восстановленной модели акустического импеданса;
6. из детальной глубинной скоростной модели выделяется гладкая компонента при помощи сглаживания.

В результате одной итерации обновляется глубинная скоростная модель среды. Дальнейшие итерации происходят аналогично, но уже с обновленной скоростной моделью для миграции и для преобразования «глубина-время». Итерации повторяются до тех пор, пока изменения скоростной модели не станут достаточно малыми. В численных экспериментах для сходимости совместного алгоритма чаще всего достаточно 5-6 итераций.

Результаты

Рассмотрим реалистичную модель Marmousi (рис. 1в). Для моделирования синтетических сейсмических данных использовался импульс производной от импульса Рикера с доминирующей частотой 15 Гц. В результате глубинной миграции в начальной скоростной модели (рис. 1б) было построено сейсмическое изображение (рис. 1а). Детальная скоростная модель, полученная после применения сейсмической инверсии к изображению (рис. 1г) хорошо согласуется с истинной. Дальнейшие итерации алгоритма будут еще более уточнять скоростную модель среды.

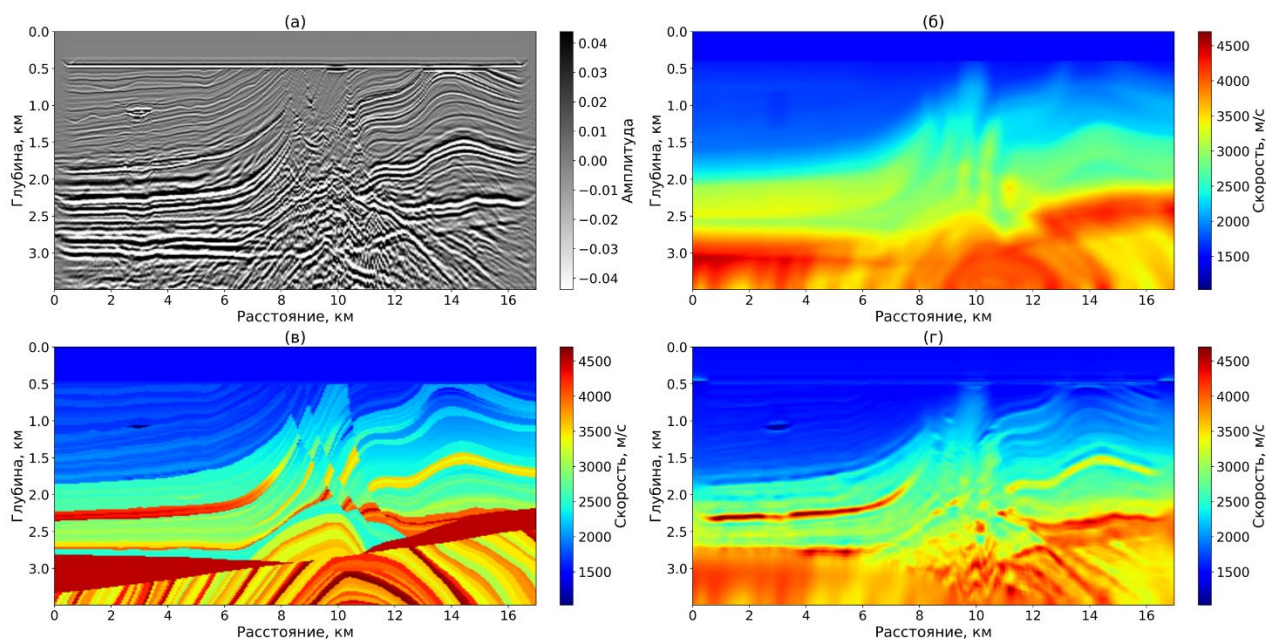


Рис. 1. Изображение после миграции (а), миграционная скоростная модель (б), истинная скоростная модель (в) и восстановленная детальная скорость после одной итерации совместного алгоритма (г)

Артефакты в нижней части обновленной скоростной модели связаны с преобразованием из глубинного масштаба во временной и обратно, поскольку во временном масштабе ось времени меняется вместе с пространственной координатой. Тем не менее, наблюдается уточнение скоростной модели, как в смысле значений скорости, так и в смысле уточнения положения границ в глубинном масштабе.

Заключение

Модификация итерационного алгоритма совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии на основе внедрения процедуры оценки значения скорости по акустическому импедансу при помощи эмпирической зависимости между скоростью и плотностью в горных породах обеспечивает устойчивое обновление скоростной модели на итерациях, что особенно важно в практически значимом случае неизвестного распределения плотности в среде. Вычислительная эффективность алгоритма обеспечивает возможность построения глубинных скоростных моделей среды в задачах обработки сейсмических данных при низких требованиях к вычислительным ресурсам. Дальнейшие усилия следует направить на улучшение алгоритмов миграции и инверсии для адаптации алгоритма совместной миграции-инверсии к задачам экспресс-обработки при построении глубинных скоростных моделей по данным 3D-сейсморазведки.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-71-20002-П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hampson D. P., Russell B. H., Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637.
2. Russell B. H., Hampson D. P. Comparison of poststack seismic inversion methods // SEG Expanded Abstracts. – 1991. – P. 876–878.
3. Chen G. [et al.] Salt Structure Elastic Full Waveform Inversion Based on the Multi-scale Signed Envelope // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2022.
4. Protasov M. I., Tcheverda V. A. True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function // Geophysical Prospecting. – 2011. – Vol. 59. – P. 197–209.
5. Protasov M., Dmitrachkov D. Acoustic Seismic Inversion and Migration for Depth Velocity Model Reconstruction // Geosciences. – 2025. – Vol. 15, no. 8. – P. 321.
6. Brocher T. Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95. – P. 2081–2092. – DOI: 10.1785/0120050077.
7. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods // Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – P. 80–101.
8. Beck A., Teboulle M. A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems // SIAM Journal on Imaging Sciences. – 2009. – Vol. 2, no. 1. – P. 183–202.
9. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. – М. : Наука, 1990. – 232 с.
10. Fagundes David de Oliveira I., Takahashi R. An Enhancement of the Bisection Method Average Performance Preserving Minmax Optimality // ACM Transactions on Mathematical Software. – 2020. – Vol. 47, iss. 1. – P. 1–24.
11. Beylkin G. Imaging of discontinuities in the inverse scattering problem by inversion of a causal generalized Radon transform // Journal of Mathematical Physics. – 1985. – Vol. 26. – P. 99–108.
12. Yan Z., Yang Y., Liu S. True amplitude angle gathers from reverse time migration by wavefield decomposition at excitation amplitude time // Energies. – 2020. – Vol. 13, no. 23. – P. 6204.

© Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. М. М. Буслов, Ю. А. Бишаев, А. В. Травин, С. Ф. Голицина. Тектоническая эволюция Сибирского кратона и складчатого обрамления в мезозой и ее влияние на формирование Западно-Сибирского бассейна.....	3
2. Т. В. Власова, К. И. Канакова. Сейсмогеологическая модель и нефтегазоносность Крапивинского месторождения	12
3. Т. В. Гонта. Первые находки древнейших эндопсаммонных остракод песчанистого мелководья в ордовике Сибирской платформы.....	16
4. Д. С. Горайнов, И. В. Вараксина, И. Г. Закирьянов. Фациальная интерпретация отложений парфеновского продуктивного горизонта Ангара-Ленского месторождения.....	25
5. Ф. Ф. Дульцев, В. А. Завалей, Н. Э. Медешова, Қ. О. Жинақ, Б. Т. Тұрдалі. Неравновесное состояние нуклидов радиевого ряда в природных водах южных районов Республики Казахстан	31
6. В. А. Казаненков. Ресурсный потенциал нефти группы пластов Ю ₂ -Ю ₄ в Западно-Сибирской НГП	38
7. К. А. Канзычаков, К. И. Канакова, В. Д. Корчуганов, А. Ю. Калинин. Особенности строения тюменской свиты Пудинского мезоподнятия по результатам сейсмической интерпретации.....	46
8. Л. Н. Константинова, С. А. Моисеев, Е. В. Бобкова, П. С. Лапин. Изучение закономерностей распределения емкостно-фильтрационных свойств пород в карбонатном комплексе венда и нижнего кембрия центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции	50
9. С. Б. Коротков, Д. В. Изюмченко, С. В. Кожевников. Глубокозалегающие зоны сосуществования поликомпонентных кристаллогидратов и маточной рапы в кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Иркутского амфитеатра Сибирской платформы.....	59
10. Е. В. Лыкова, Н. В. Сенников. Граница нижнего и среднего ордовика в терригенной последовательности Салаира.....	68
11. Р. В. Маринов. Особенности геологического строения западного склона Алданской антеклизы и зоны сочленения с Березовской впадиной по результатам интерпретации современных сейсмических материалов в связи с оценкой нефтегазоносности венд-кембрийских отложений.....	74
12. Д. А. Новиков. Роль водорастворенного органического вещества в загрязнении подземных вод питьевого водоснабжения населения (на примере восточных районов Новосибирской области)	80

13. Д. А. Новиков, Н. А. Медешова, Қ. О. Жинақ. Радиоактивность подземных вод юго-восточных районов Казахстана.....	86
14. Д. А. Новиков. Водород в составе газов Арктического сектора Западной Сибири	93
15. Е. Б. Пещевицкая, Б. Л. Никитенко. Предварительные данные по микрофауне и палиноморфам в разрезе средней юры и нижнего мела по скв. Штормовая 125 (Западная Сибирь, Гыданский п-ов).....	99
16. Е. В. Пономарева, С. В. Рыжкова, А. А. Дешин. Оценка плотности эффективного палеотеплового потока в Колтогорско-Нюрольской зоне.....	111
17. А. Н. Пыряев, Д. А. Новиков. Изотопный состав углерода, кислорода и водорода в природных водах южного Крыма: к обоснованию локальной линии метеорных вод.....	118
18. С. В. Рыжкова, О. С. Дзюба, А. Г. Замирайлова. К вопросу о стратиграфической изученности георгиевской и баженовской свит зоны сочленения Хантейской гемиянтеклизы и Куржинской гряды (Западная Сибирь).....	126
19. А. С. Сальников, В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Е. Шенмайер. Глубинные сейсмические исследования на восточной окраине архейского Сибирского кратона (в створе опорного профиля 3-ДВ).....	133
20. А. И. Седых, Л. В. Маркович, А. Н. Козырев. Обоснование параметров оценки локализованных ресурсов терригенного комплекса центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции	141
21. А. Ф. Сухорукова, Н. И. Яндола. Мониторинг радона в подземных водах Новосибирской городской агломерации.....	149
22. А. В. Тимохин. Широтная зональность трилобитов в верхнем кембрии и ордовике Сибирской платформы.....	155
23. Д. А. Токарев, Н. В. Сенников, И. А. Ботов, А. А. Терлеев. Новые сведения по стратотипу сарасинской свиты раннего кембрия Северной части Горного Алтая.....	163
24. М. О. Федорович, А. Ю. Космачева. Особенности геологического строения глинистых покрывок в мезозойских отложениях Вилуйской гемисинеклизы.....	170
25. Ю. Ф. Филиппов. Худосейский грабен-рифт – миф или реальность?	177
26. А. М. Фомин, Д. С. Потапова, С. А. Моисеев. Закономерности распределения соленасыщенных горизонтов кембрия на территории Мирнинского выступа Непско-Ботуобинской антеклизы	183
27. Я. В. Фомина, А. А. Муравьева. Гидрогеохимические особенности карбонатного комплекса кембрия Сибирской платформы	190

28. Р. А. Хабибулина. Табуляты разреза «Клубничный» из стратотипической местности куимовской свиты Горного Алтая	197
29. А. В. Ядренкин. Первые находки микрофауны в триасовых отложениях кряжа Прончищева (север Средней Сибири)	203
30. Е. С. Ярославцева, Т. М. Парфенова, Л. М. Бурштейн, А. Н. Козырев. Распределение содержания органического вещества в отложениях куонамской свиты и ее аналогов (кембрий Сибирской платформы)	211
31. Д. С. Мельник. Геохимия органического вещества рифейских отложений из скв. Бурская-3410 и Хастахская-930 (Лено-Анабарский прогиб)	216
32. Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков. Тепловой поток и температура земной коры Алтае-Саянской складчатой области	224
33. А. Ю. Белинская, А. А. Боровко, А. В. Ойнац, М. В. Цедрик, А. В. Подлесный, П. А. Дергач. Сейсмо-ионосферные возмущения: данные трех землетрясений	232
34. Я. О. Бондарчук. Особенности геоэлектрического строения районов новейшей тектоники западной части АССО (на примере Горного Алтая)	242
35. Д. С. Братчиков, Д. М. Рыжков, К. Г. Гадыльшин. Повышение производительности полноволнового моделирования на GPU за счет использования MIG и асинхронных вычислений	249
36. А. Ю. Бурковский, В. В. Карстен. Исследование пятимерной целевой функции квадратичного уклонения коэффициентов отражения плоской продольной волны на границе изотропного и трансверсально-изотропного полупространства с вертикальной осью симметрии	256
37. Р. Г. Горова, А. Н. Василевский, Е. И. Есин. Вычисление и анализ компонент тензора напряжений из изостатических аномалий для региона Эллинской субдукционной зоны	264
38. К. Н. Даниловский, А. В. Глинских. Численное моделирование данных каротажа потенциала самопроизвольной поляризации в гидродинамически согласованных моделях глинизированных флюидонасыщенных отложений	272
39. Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов. Алгоритм совместной глубинной миграции и акустической инверсии с применением эмпирических зависимостей для устойчивого определения упругих свойств среды	280

CONTENTS

1. M. M. Buslov, Yu. A. Bishaev, A. V. Travin, S. F. Golitsina. Tectonic evolution of the Siberian craton and its folded framework in the mesozoic and its influence on the formation of the West Siberian sedimentary basin.....	3
2. T. V. Vlasova, K. I. Kanakova. Seismogeological model and petroleum potential of the Krapivinskoye Field.....	12
3. T. V. Gonta. Earliest record of endopsammic infaunal ostracods from ordovician sandy shallow-marine deposits of the Siberian platform.....	16
4. D. S. Goryaynov, I. V. Varaksina, I. G. Zakiryanov. Facies interpretation of the parfenovo producing horizon of the Angaro-Lenskoye field	25
5. F. F. Dultsev, V. A. Zavaley, N. A. Medeshova, K. O. Zhynak, B. T. Turdali. Nonequilibrium state of the nuclides of radium decay series in the natural waters of southern regions of the Republic of Kazakhstan	31
6. V. A. Kazanenkov. Oil resource potential of the Yu ₂ -Yu ₄ reservoir units in the West Siberian oil and gas provinces	38
7. K. A. Kanzychakov, K. I. Kanakova, V. D. Korchuganov, A.Yu. Kalinin. Structural features and distribution of sand bodies in the tyumen formation within the Pudino mezouplift based on seismic interpretation data.....	46
8. L. N. Konstantinova, S. A. Moiseev, E. V. Bobkova, P. S. Lapin. Study of the distribution patterns of reservoir properties of rocks in the Vendian and Lower Cambrian carbonate complex of the central and southern regions of the Lena-Tunguska petroleum province.....	50
9. S. B. Korotkov, D. V. Izumchenko, S. V. Kozhevnikov. Deep-Seated zones of coexisting multicomponent crystalline hydrates and mother brines in the cambrian halogen-carbonate complex of the Irkutsk amphitheater of the Siberian platform ...	59
10. E. V. Lykova, N. V. Sennikov. Lower–Middle Ordovician boundary in the terrigenous sequence of the Salair.....	68
11. R. V. Marinov. Structural features of the western slope of the Aldan antecline and the junction zone with the Berezovskaya trench based on the results of interpretation of modern seismic materials in connection with the assessment of the oil and gas potential of the Vendian-Cambrian deposits	74
12. D. A. Novikov. Role of water-soluble organic matter in polluting groundwater intended for drinking water supply to the population (for eastern districts of the Novosibirsk Region).....	80
13. D. A. Novikov, N. A. Medeshova, K. O. Zhynak. Radioactivity of groundwater in southeastern regions of Kazakhstan	86

14. D. A. Novikov. Hydrogen in the gases the Arctic sector of West Siberia....	93
15. E. B. Pestchevitskaya, B. L. Nikitenko. Preliminary data on microfauna and palynomorphs from the middle jurassic and lower cretaceous of the shtormovaya borehole (Western Siberia, Gydan peninsula).....	99
16. E. V. Ponomareva, S. V. Ryzhkova, A. A. Deshin. Estimation of the effective paleo-heat flow density in the Koltogor-Nyurol'ka zone	111
17. A. N. Pyrayev, D. A. Novikov. Isotopic composition of carbon, oxygen and hydrogen in natural waters of southern Crimea: validation of a local meteoric water line	118
18. S. V. Ryzhkova, O. S. Dzyuba, A. G. Zamirailova. On the issue of stratigraphic study of the Georgievka and Bazhenovo formations of the junction zone of the Khantei hemianteclise and the Kurzino ridge (Western Siberia)	126
19. A. S. Salnikov, V. M. Soloviev, V. S. Seleznev, A. E. Shenmayer. Deep seismic research on the eastern edge of the Archean Siberian craton (in the 3-DV reference profile)	133
20. A. I. Sedykh, L. V. Markovich, A. N. Kozyrev. Assessment parameters for localized resources of the terrigenous complex in the central and southern regions of the Lena-Tunguska oil and gas province.....	141
21. A. F. Sukhorukova, N. I. Yandola. Radon monitoring in groundwater in the Novosibirsk urban agglomeration	149
22. A. V. Timokhin. Latitudinal zonation of trilobites in the Upper Cambrian and Ordovician of the Siberian platform.....	155
23. D. A. Tokarev, N. V. Sennikov, I. A. Botov, A. A. Terleev. New information on the stratotype of the Sarasinsk formation of the Early Cambrian in the Northern part of Gorny Altai.....	163
24. M. O. Fedorovich, A. U. Kosmacheva. Geological structure of seal rocks in the Mesozoic deposits of the Vilyui hemisyncline	170
25. Yu. F. Filippov. The Khudoseysky Graben-Rift: Myth or Reality?.....	177
26. A. M. Fomin, D. S. Potapova, S. A. Moiseev. Patterns of distribution of salt-saturated Cambrian horizons in the territory of the Mirny protrusion of the Nepa-Botuoba antecline	183
27. Ya. V. Fomina, A. A. Muravyeva. Hydrogeochemical features of the cambrian carbonate complex of the Siberian platform.....	190
28. R. A. Khabibulina. Tabulate corals of the Klubnichnyi section from the stratotype locality of the kuimov formation of Gorny Altai	197
29. A. V. Yadrenkin. The first finds of microfauna from the Triassic deposits of the Pronchishchev Ridge (north of Middle Siberia)	203
30. E. S. Yaroslavtseva, T. M. Parfenova, L. M. Burshtein, A. N. Kozyrev. Distribution of organic matter content in the lower-middle cambrian kuonamka formation (Siberian platform)	211

31. D. S. Melnik. Geochemistry of the organic matter in riphean deposits from the Burskaya-3410 and Khastakhskaya-930 wells (Lena-Anabar trough)	216
32. D. E. Ayunov, A. D. Duchkov. Heat flow and the Earth's crust temperatures of the Altai-Sayan region	224
33. A. Yu. Belinskaya, A. A. Borovko, A. V. Oinats, M. V. Cedric, A. V. Podlesny, P. A. Dergach. Seismo-ionospheric effects: data of three earthquake events	232
34. Y. O. Bondarchuk. Features of the geoelectric structure of the regions of the latest tectonics of the western part of the Altai-Sayan Orogenic Area (using the example of the Altai Mountains).....	242
35. D. S. Bratchikov, D. V. Ryzhkov, K. G. Gadylshin. Improving the performance of wave modeling on GPUs using MIG and asynchronous computing	249
36. A. Y. Burkovskiy, V. V. Karsten. The study of the five-dimensional objective function of the standart deviation of the reflection coefficients of a plane longitudinal wave at the boundary of an isotropic and transversely isotropic half-space with a vertical axis of symmetry	257
37. R. G. Gorova, A. N. Vasilevsky, E. I. Esin. Calculation and analysis of stress tensor components from isostatic anomalies for the Hellenic subduction zone region	264
38. K. N. Danilovskiy, A. V. Glinskikh. Numerical simulation of spontaneous potential well logs in hydrodynamically consistent models of shale-rich fluid-saturated formations	272
39. D. K. Dmitrachkov, M. I. Protasov. Algorithm of joint depth migration and acoustic inversion using empirical relations for stable determination of elastic properties of the medium	280

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 1

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *А. Бочарникова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 05.08.2026. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 16,97. Тираж 25 экз. Заказ 139.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Издательско-полиграфический центр СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 8