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

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

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»

№ 3

Новосибирск
СГУГиТ
2025

УДК 528
С26

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. Эпов

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. Буритейн

С26 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». – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. № 3. – 223 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

УДК 528

© СГУГиТ, 2025

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК [551.73:[56.017.2:565.2]](571.5)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-3-10

А. В. Тимохин[1]✉, *И. В. Коровников*[1]

Нижнепалеозойские трилобиты внутреннего шельфа Сибирской платформы

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

Аннотация. Проанализирована динамика и структура трилобитовых сообществ, их приуроченность к фациальным регионам для внутренних эпиконтинентальных морей Сибирской платформы по трем системам кембрий, ордовик, силур.

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

A. V. Timokhin[1]✉ *I. V. Korovnikov*[1]

Lower Paleozoic trilobites of the inner shelf of the Siberian Platform

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

Abstract. The dynamics and structure of trilobite communities and their association with the facies regions for the inner epicontinental seas of the Siberian Platform are analyzed in three systems: Cambrian, Ordovician, and Silurian.

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

Введение

Таксономическое разнообразие трилобитов известных на Сибирской платформе в течении кембрийского периода по разным оценкам насчитывает до 870 видов (375 родов и 113 семейств), что существенно больше разнообразия трилобитов в ордовикское (98 видов в составе 42 родов и 20 семейств) и силурийское время (23 вида в составе 10 родов и 7 семейств). Это в первую очередь связано с тем, что в кембрийском эпиконтинентальном бассейне отчетливо фиксируется три фациальных региона. Это внутренний шельф (Турухано-Иркутский-Олекминский фациальный регион), внешний шельф (Анабаро-Синский фациальный регион) и открытый бассейн (береговой склон) (Юдомо-Олекминский фациальный регион) [1, 2]. Каждый из них характеризуется присущим только ему комплексом трилобитов. Более того, для официальной стратиграфической схемы кембрия принято выделять три биозональных шкалы по трилобитам, кардинально отличающиеся для каждого фациального региона [2]. В ордовикский период фактически вся территория Сибирского эпиконтинентального бассейна стала относится ко внутреннему шельфу [3]. Отдельные элементы внешнего

шельфа и открытого бассейна этого стратиграфического интервала можно проследить на Таймыре, острове Котельном, в Селеняхском кряже, Омулевских горах, хр. Сетте-Дабан Северо-Востока РФ [4]. В силурийский же период площадь внутреннего эпиконтинентального бассейна резко сократилась и в целом представляла собой только краевую часть внутреннего шельфа (мелкий, полузакрытый и закрытый шельф) с выходом к внешнему (глубокому) шельфу в сторону п-ова Таймыр [5, 6].

Методы и материалы

В связи с выше изложенными фактами, специфические комплексы фауны характерные в первую очередь для внутреннего шельфа ордовика и силура, нельзя сравнивать с обобщенными комплексами внутреннего, внешнего шельфа и фаций открытого моря (береговой склон) кембрийского периода. Чтобы провести это сравнение, в первую очередь, следует вычленить те специфические комплексы трилобитов характерные для каждого фациального региона кембрия. Именно кембрия, так как разграничение на фациальные регионы в кембрийское время наиболее очевидно и обосновано. Во вторую очередь, следует провести анализ общности этих комплексов между собой и на этой основе попытаться, с одной стороны, проконтролировать правильность отнесения ордовикских отложений всей Сибирской платформы к внутреннему шельфу, а с другой стороны оценить степень взаимосвязанности внутреннего и внешнего шельфа в ордовикский и силурийский период по сравнению с кембрийским.

Для наиболее адекватного сравнения выделенных комплексов, они должны быть сгруппированы по стратиграфическим единицам на уровне горизонта, согласно принятым стратиграфическим схемам для каждой системы, что позволит наиболее точно оценить и сравнить динамику изменения трилобитовых сообществ как внутри, так и между системами.

При дифференциации комплексов трилобитов учитывались только те виды, которые имели точную стратиграфическую привязку, позволяющую отнести этот вид к определенному комплексу того или иного горизонта соответствующей системы. Так же из рассмотрения исключались виды, привязка которых не позволила отнести их к определенному фациальному региону. Это в первую очередь касается трилобитовых сообществ кембрия. В работе учитывались собственные неопубликованные, оригинальные материалы обоих авторов. Таксономические единицы в открытой номенклатуре и определенные со знаком вопроса исключались из рассмотрения.

Результаты

Туруханo-Иркутско-Олекминский фациальный регион (внутренний шельф) занимает обширную западную часть Сибирской платформы. В силу фациальных особенностей фаунистическая охарактеризованность разрезов по сравнению с восточными частями платформы довольно скудная [1]. В первую очередь это следствие того, что большая часть территории перекрыта более молодыми отложениями. Отложения кембрия вскрываются лишь в береговых обнажениях рек,

а также вскрыты многочисленными скважинами. Но далеко не все разрезы скважин представлены керновым материалом и изучены на предмет находок ископаемой фауны. Анализ имеющегося опубликованного материала показал, что большая часть местонахождения кембрийских трилобитов сосредоточена в непосредственной близости от Анабаро-Синского фациального региона, который охватывает территории внешнего шельфа и содержит богатое разнообразие комплексов трилобитов, вероятно это способствовало тому, что комплексы трилобитов внутреннего шельфа включают большое количество видов распространенных и этом регионе.

В результате калибровки списка трилобитов кембрия по точности привязки к конкретному горизонту и фациальному региону списочный состав видов трилобитов, учитываемых при анализе, уменьшился до 160 видов (86 родов и 36 семейств). Что всё равно существенно больше общего количества трилобитов в ордовике и силуре. Конкретное распределение этих видов в пределах каждого горизонта соответствующей системы представлен на (рис. 1).

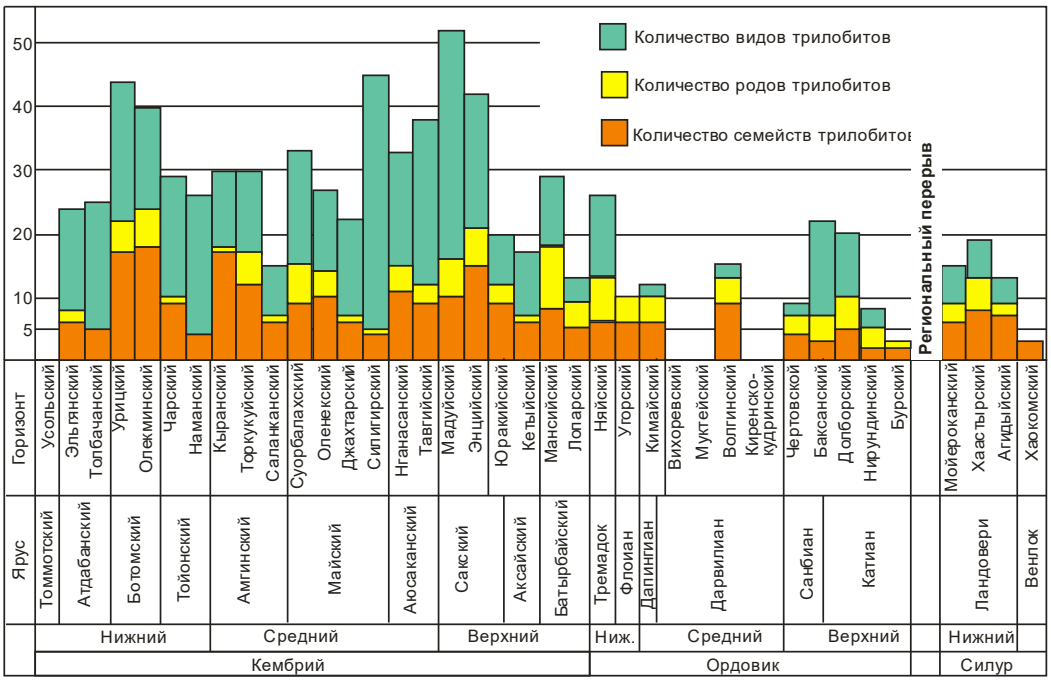


Рис. 1. Гистограмма разнообразия видов, родов и семейств трилобитов в кембрии, ордовике и силуре Сибирской платформы.

Кривая разнообразия имеет свои пики и минимумы, которые связаны как с собственно эволюцией трилобитовых сообществ, так и реакцией их на изменение абиотических и биотических факторов окружающей среды [7]. Степень стабильности обстановок в которых существовали трилобиты можно оценить путем фиксации видов трилобитов, которые известны в пределах более чем одного горизонта (рис. 2).

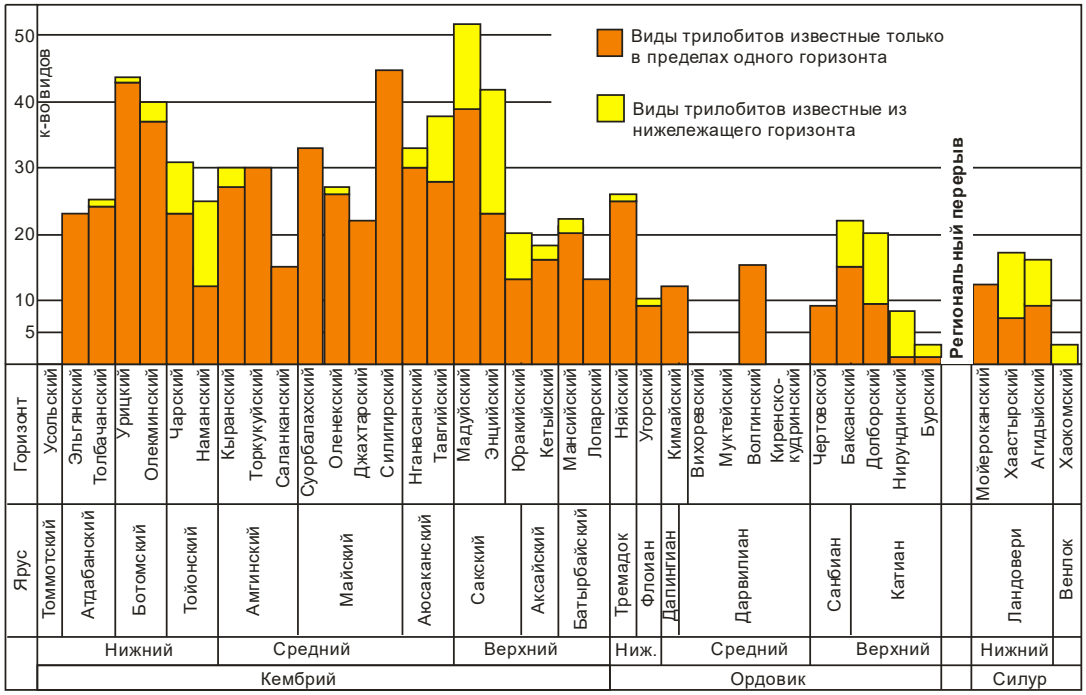


Рис. 2. Гистограмма «стабильности» сообществ видов трилобитов в кембрии, ордовике и силуре Сибирской платформы.

Стабильные обстановки для всех трех фациальных регионов фиксируются в тойонском веке нижнего кембрия, а также в интервале тавгийского-юракийского времени верхнего кембрия. В остальных временных интервалах кембрия трилобитовые сообщества были крайне дискретны, вплоть до полного отсутствия преемственности в большей части амгинского и майского веков. Дискретность трилобитовых сообществ сохранялся в раннем и среднем ордовике и только начиная с позднего ордовика установился режим «стабильности», продолжавшийся до конца силура. Отсутствие переходных форм в чертовском горизонте ордовика и мойероканском горизонте силура связано в первом случае с полным отсутствием находок трилобитов в предыдущем горизонте, а во втором - с временным разрывом между силурийскими и ордовикскими отложениями, в результате большого регионального перерыва в осадконакоплении в конце ордовикского периода, когда терминальная часть ордовикских отложений была размыта.

Дифференциация комплексов трилобитов, в первую очередь кембрийских, по приуроченности их к фациальным регионам показала (рис. 3), что в течении кембрия трилобиты в фациях открытого моря (береговой склон) не фиксировались в основании (эльгянский горизонт) и кровле (лопарский горизонт) этого периода.

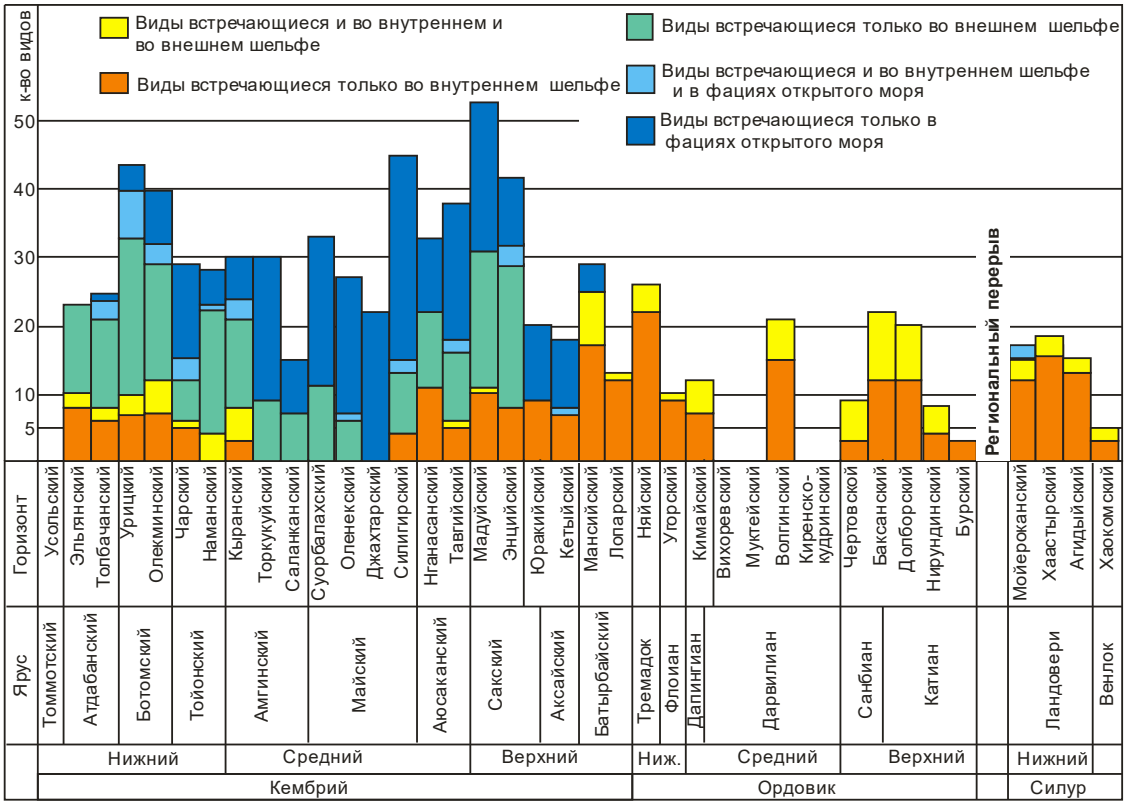


Рис. 3. Гистограмма дифференциации сообществ трилобитов (на уровне видов) по фациальным регионам в кембрии, ордовике и силуре Сибирской платформы.

Далее эти фации фиксируются только в начале силура (мойероканский горизонт). Трилобиты внутреннего шельфа полностью отсутствуют в усольском горизонте нижнего кембрия, в амгинском и майских ярусах (с торкукуйского и по джахтарский горизонт) среднего кембрия, вихоревском, муктейском и киренско-кудринском горизонте среднего ордовика. Фации внешнего шельфа отсутствуют в джахтарском горизонте среднего кембрия и начиная с юракийского горизонта верхнего кембрия и до конца силура.

Для внутреннего и внешнего шельфа фиксируется наличие переходных форм между ними от начала кембрия до торкукуйского горизонта среднего кембрия. В верхнем кембрии связь Турухано-Иркутско-Олекминского и Анабаро-Синского фациальных регионов фактически отсутствовала, исключая мансийский горизонт верхнего кембрия, когда количество переходных форм было максимальным для кембрия.

Также обращает на себя внимание факт большого количества переходных форм в большей части ордовикского периода, по сравнению с аналогичным количеством переходных форм между внутренним и внешним шельфом кембрийского периода. Следует также отметить, что количество видов известных во всех трех фациальных регионах кембрия или в фациях открытого моря (береговой склон) и внутреннего шельфа очень мало. Известно всего два таких случая: силигирский горизонт среднего кембрия и кетыйский горизонт верхнего кембрия.

Обсуждение

Попытка выявить закономерности дифференциации комплексов трилобитов внутреннего шельфа ордовикского бассейна не удалась. В первую очередь потому что палеозойские террейны, с которыми проводилось сравнение (о-в Котельный, Омулевские горы, Селеняхский кряж, хр. Сетте-Дабан), первоначально принадлежавшие к единому эпиконтинентальному морскому бассейну Сибирского палеоконтинента и входившие в состав его пассивной окраины, не приурочены жестко только к фациям внешнего шельфа [4]. По всей видимости, на разных стратиграфических уровнях в них можно условно зафиксировать все три фации (внутренний и внешний шельф, а также, фации открытого моря), что не позволяет интерполировать данные с кембрийского на ордовикский палеобассейн.

В развитии трилобитовых сообществ эпиконтинентального бассейна нижнего палеозоя Сибирской платформы отмечается факт отсутствия трилобитов в усольском горизонте нижнего кембрия, вихоревском, муктейском и киренско-кудринском горизонте среднего ордовика. Данный факт интересен тем, что, во-первых, осадочные отложения есть, во-вторых другая бентосная и пелагическая фауна в этих отложениях присутствует. По этой фауне выделяются зональные подразделения и в кембрии, и в ордовике. Если для усольского горизонта нижнего кембрия можно найти объяснения, ссылаясь на возникновение трилобитов как группы организмов в следующем горизонте, то отсутствие трилобитов в среднем ордовике требует более комплексного подхода для объяснения этого факта. Тем более, что одновременно с отсутствием трилобитов, также фиксируется отсутствие замковых брахиопод и увеличение численности беззамковых и групп неясного систематического положения (ангареллы) для вихоревского горизонта. В освободившуюся экологическую нишу, которую до этого занимали трилобиты, можно поставить такую группу как ракоскорпионы, довольно широко распространённые на отдельных стратиграфических уровнях вихоревского времени. Для муктейского и киренско-кудринского горизонтов явных альтернативных заместителей трилобитов не выявлено.

Отсутствие трилобитов внутреннего шельфа в амгинском и майских ярусах (с торкукуйского по джахтарский горизонт) среднего кембрия объясняется резким ухудшением условий для их обитания, в следствии обмеления бассейна (внутреннего шельфа) и образования на его месте низкой субаэральной равнины [1]. Пик данного обмеления приходится на джахтарский горизонт среднего кембрия, когда внешний шельф полностью обмелел. Отсутствие внешнего шельфа начиная с юракийского горизонта верхнего кембрия связано с расширением (проградацией) внутреннего шельфа на всю территорию Сибирской платформы, поэтому для аксайского и батырбайского яруса верхнего кембрия внешний шельф не фиксируется [1].

Фактически отсутствие переходных форм в позднем кембрии (за исключением пика в мансийское время), по сравнению со стабильным «видообменом» для раннего кембрия слабо увязывается с дискретностью или общностью трилобитовых сообществ этих временных интервалов. В связи с вышесказанным пред-

положение о том, что увеличение количества видов трилобитов известных из двух смежных фациальных регионов напрямую зависит от оптимальных условий для их существования, не соответствует действительности. Скорее всего эта общность связана с выделением большого количества переходных типов разрезов для внутреннего и внешнего шельфа данных стратиграфических интервалах, так как большинство находок приурочено к пограничным территориям с Анабаро-Синским фациальным регионом, в котором таксономическое разнообразие велико. Отсюда и много общих форм. Тем не менее, четко диагностируется комплекс видов, родов и семейств трилобитов характерных исключительно для каждого фациального региона в течении не только кембрия, но и ордовика и силура. Этот факт несомненно свидетельствует в пользу правомерности выделения таких фациальных регионов как внутренний и внешний шельф, фации открытого моря для кембрия и внутренний шельф для ордовика и силура.

Заключение

Количественный анализ трилобитовых сообществ, их структуры и взаимосвязей в течении нижнего палеозоя эпиконтинентального бассейна Сибирской платформы, при учете геологических данных, позволил сделать следующие выводы:

1. Выделение трех фациальных регионов (внешний и внутренний шельф в составе карбонатной платформы и фации открытого моря (береговой склон)) для кембрийской системы обосновано из-за наличия характерного для каждой фации комплекса трилобитов (на уровне семейств, рода, виды). Однако существует проблема так называемых переходных разрезов, как между внутренним и внешним шельфом, так и между внешним шельфом и фациями открытого моря (береговой склон) [1]. Отнесение конкретных разрезов к той или иной фациальной группе зачастую довольно условное, без четкого озвучивания критериев, по которым проводилось это разделение. Возможно частичным решением этой проблемы станет оконтуривание этих переходных разрезов и выделение их в некие переходные фациальные типы отложений.

2. Проводить прямые сопоставления внутреннего и внешнего шельфа кембрия (причем следует учитывать, о каком временном отрезке идет речь – нижний-средний кембрий или верхний) с внутренним шельфом ордовика или с мелким и полузакрытым шельфом силура фактически невозможно, т.к. принципы деления для каждой системы в силу различной геолого-тектонической ситуации существенно отличаются.

3. Зафиксированы три временных уровня (в усольском горизонте нижнего кембрия, вихоревском, муктейском и киренско-кудринском горизонте среднего ордовика), в течении которых на всей территории эпиконтинентального бассейна Сибирской платформы не фиксировались находки трилобитов, причем другая бентосная и пелагическая фауна представлена довольно широко.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания РАН по ФНИ (проект FW ZZ-2022-0003 «Закономерности глобальных и региональных эволюционных изменений

палеозойских осадочных бассейнов Сибири и Арктической зоны России в различных геодинамических и климатических обстановках; состав населявших их пелагических и бентосных палеобиот; палеогеографическое распространение фаунистических комплексов в разнофациальных отложениях; региональные стратиграфические схемы»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухов С.С., Шабанов Ю.Я., Пегель Т.В., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Коровников И.В., Сундуков В.М., Федоров А.Б., Варламов А.И., Ефимов А.С., Конторович В.А., Конторович А.Э. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы. В 2 т. Т. 1: Стратиграфия. ИНГГ СО РАН, Новосибирск, 2016. – 497 с.

2. Региональная стратиграфическая схема кембрийских отложений Сибирской платформы. Решения Всероссийского стратиграфического совещания по разработке региональных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Сибири Редакторы: Пегель Т.В., Сухов С.С., Шабанов Ю.Я. СНИИГГиМС, Новосибирск, 2021. – 138 с.

3. 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.

4. 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. – 2020. – том 61. – № 4. – С. 447–467.

5. Тесаков Ю.И., Предтеченский Н.Н., Лопушинская Т.В., Хромых В.Г., Базарова Л.С., Бергер А.Я., Ковалевская Е.О. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Силур Сибирской платформы. Изд-во СО РАН. Филиал "Гео", Новосибирск, 2000. – 403 с.

6. 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.

7. Коровников И.В. Комплексы трилобитов и ярусное расчленение кембрия Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 11с. – С. 3–12.

© А. В. Тимохин, И. В. Коровников, 2025

УДК 571.53:551.732+553.631
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-11-18

А. М. Фомин[1]✉, Е. В. Белова[1], С. А. Моисеев[1, 2]

Анализ нефтегазоносности и результатов испытаний межсолевых горизонтов кембрия на территории Ангаро-Ленской НГО

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: FominAM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На начало 2025 года на территории Ангаро-Ленской НГО было пробурено более 400 глубоких и около 200 колонковых скважин. Был выполнен анализ более 400 результатов испытания скважин в межсолевых отложениях кембрия. Показано, что в наибольшей степени был испытан осинский горизонт. Выполненные исследования позволили высказать предположение о возможности выделения новых межсолевых продуктивных горизонтов.

Ключевые слова: нижний кембрий, межсолевые горизонты, Ангаро-Ленская НГО

A. M. Fomin[1]✉, E. V. Belova[1], S. A. Moiseev[1, 2]

Analysis of oil and gas potential and test results of intersalt horizons of the cambrian within the Angara-Lena oil and gas area

[1] The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: FominAM@ipgg.sbras.ru

Abstract. As of early 2025, more than 400 reference, parametric, search and exploration wells were drilled within the Angara-Lena oil and gas area. In addition, about 200 structural-core wells were drilled here. It is shown that the Osinsky horizon was tested to the greatest extent. The studies performed allowed us to suggest the possibility of identifying new intersalt productive horizons.

Keywords: Lower Cambrian, intersalt horizons, Angara-Lena OGA

Введение

В последнее годы изучению геологического строения межсолевых горизонтов нижнего и среднего кембрия на территории Ангаро-Ленской ступени уделяется всё более пристальное внимание. Связано это прежде всего с тем, что эти горизонты рассматриваются как возвратные объекты по наращиванию минерально-сырьевой базы нефти и газа в Иркутской области. Кроме того, с межсолевыми горизонтами может быть связана принципиально новая задача по развитию промышленного освоения гидроминерального сырья на востоке Российской Федерации.

В этой связи детальное рассмотрение результатов испытания и опробования межсолевых горизонтов нижнего и среднего кембрия представляется весьма актуальной задачей.

В соленосный (галогенно-карбонатный) комплекс входят усольская, бельская, булайская, ангарская и литвинцевская свиты нижнего и среднего кембрия. Это пестроцветные переслаивающиеся породы – преимущественно эвапориты, известняки, доломиты, ангидриты. Внутри этой толщи выделяется ряд продуктивных горизонтов. В литвинцевской свите – это келорский продуктивный горизонт, ангарской свите – бильчирский, в булайской свите – бирскинский, в бельской – христофоровский, в усольской свите – осинский и балыхтинский продуктивные горизонты [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: здесь фиксируется большинство горизонтов скольжения [1, 2].

Традиционно на территории Сибирской платформы и, в частности на Ангаро-Ленской НГО, целевыми горизонтами для поисков и разведки залежей нефти и газа были терригенные и карбонатные горизонты подсолевых отложений венда. По этой причине с самого начала геологоразведочных работ изучению межсолевых горизонтов не уделяли должного внимания. Следует отметить, что нижне-среднекембрийские 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 нижне-среднекембрийские отложения чаще всего оставались неизученными [3].

Методы и материалы

В рамках настоящих исследований собран и проанализирован материал по испытаниям скважин в межсолевых отложениях как в колонне, так и в открытом стволе. Всего было собраны материалы по более чем 440 объектам опробования и испытания межсолевых горизонтов кембрия в опорных, параметрических, поисковых, разведочных и частично колонковых скважин. Основой для подготовки базы данных по испытанию стали дела скважин, а также геологические отчёты о результатах поискового и колонкового бурения скважин на территории Ангаро-Ленской ступени.

Результаты

В составе **литвинцевской свиты**, как уже было сказано выше традиционно выделяется келорский продуктивный горизонт. Из имеющейся у нас информации

опробование и испытание литвинцевской свиты были проведены в 10 объектов (рис. 1). Из них два объекта были опробованы совместно с нижележащими отложениями. В скважине Христофоровская 1П на глубине 377 метров при вскрытии пласта водорослёвых доломитов литвинцевской свиты произошел выброс бурового раствора и скважина зафонтанировала газом и нефтью. При исследовании интервала 340-377 метров дебит газа составил 2 тыс. м^3/сут., нефти 2-3 м/сут. (рис. 1). Характерно, что содержание метана в газе составило всего 40,44 %, а этана 42,17 %. Здесь так же следует отметить, что данный интервал исследования приурочен к центральной части литвинцевской свиты, который залегает примерно на 100 метров выше келорского продуктивного горизонта. Это позволяет предполагать наличие в межсолевой части литвинцевской свиты помимо келорского, еще одного продуктивного горизонта с условным названием – *келорский 0*.

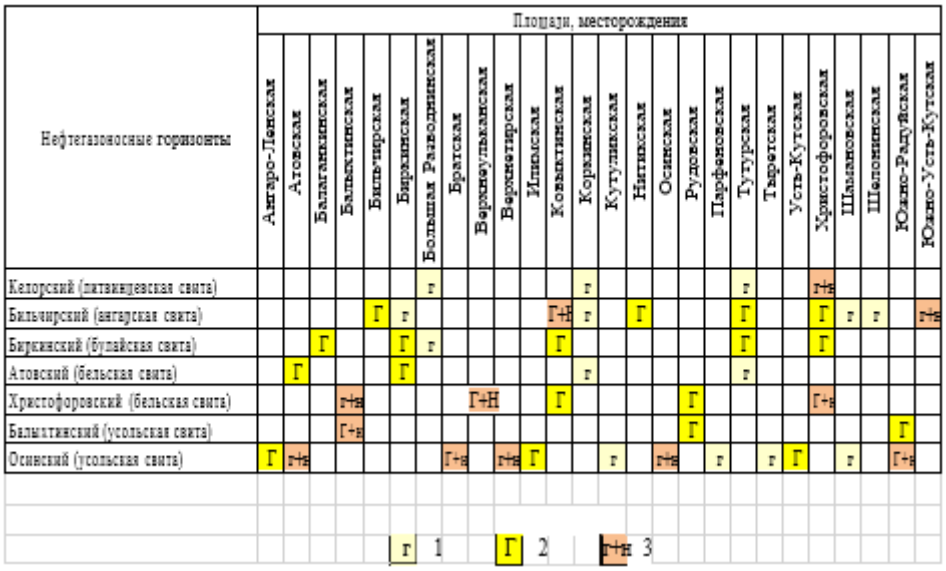


Рис. 1. Нефтегазоносность межсолевых горизонтов кембрия на территории Ангаро-Ленской НГО. Приток: г – газ непромышленный, Г – газ промышленый, г+н – газ+ нефть непромышленный.

В **ангарской свите** выделяется бильчирский продуктивный горизонт. Разными исследователями в горизонте выделяется от трёх до семи самостоятельных подгоризонтов. В частности, специалистами ПАО

«Газпром» выделено три подгоризонта. В дополнении к этим трём подгоризонтам нами предлагается выделять ещё один, который мы назвали *бильчирский 0*. Этот подгоризонт хорошо прослеживается почти во всех скважинах, пробуренных на территории Ангаро-Ленской НГО, и может рассматриваться, как самостоятельный объект геологоразведочных работ.

В 2020 году на Ковыктинском месторождении специалисты ИТЦ ООО

«Газпром геологоразведка» [5] в составе бильчирского горизонта изучили три перспективных пласта-коллектора:

Пласт бильчирский-1. Выделены две залежи – Южная в районе скважин Квт-26, Квт-27 и северная в районе скважин Квт-72, Квт-18, Квт-3, Квт-60. Условный ГВК по южной залежи был принят на абсолютной отметке (а.о.) -467.5 м, что соответствует подошве верхнего проницаемого пропластка в скв. Квт-26. Тип залежи пластово-сводовый. В северной залежи условный уровень газоводяного контакта (ГВК) принят по последнему проницаемому прослою в скважине Квт-72 на абсолютные отметки -442.9 м.

Пласт бильчирский-2. Залежь выделена в районе скважин Квт-3, Квт-18, по типу – пластово-сводовая. Условный уровень ГВК принят на а.о. -502.5 м по подошве последнего газонасыщенного прослоя в скважине Квт-18.

Пласт бильчирский-3. Залежь в пласте выделена в районе скважин Квт-52 и Квт-61. Условный ГВК был принят на а.о. -579.4 м.

Ангарская свита была испытана в 42 скважинах (рис. 2). Всего испытания и опробование было проведено в 68 объектах, из них один объект был опробован совместно с литвинцевской свитой, а еще один включал нижнюю часть литвинцевской, ангарскую и верхнюю часть булайской свит.

Одиннадцать объектов были опробованы совместно с нижележащей булайской свитой.

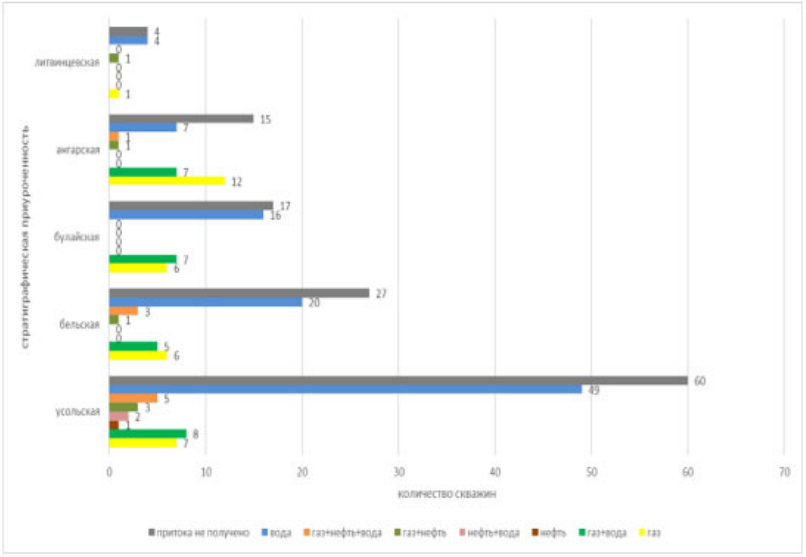


Рис. 2. Нефтегазоносность межсолевых горизонтов кембрия на территории Ангаро-Ленской НГО

Биркинский продуктивный горизонт **булайской свиты** испытан в 47 скважинах, включающих 71 интервал опробования и испытания. В 6 скважинах (8 интервалов) испытанные проводилось совместно с вышележащей ангарской свитой. В скважинах Тутурская № 5 и Христофоровская № 2 были получены промышленные притоки газа. В скважине Нукутская № 1 был получен приток пластовой воды, в остальных 3 скважинах притока пластового флюида из ангарской и булайской свит при опробовании не получено.

В 4 скважинах (Биркинская № 2, Коркинская №14, Мироновская № 1 и Турукская № 1) в открытом стволе испытан весь разрез кембрия (ангарская, булайская, бельская, усольская свиты, а в Мироновской скважине еще и литвинцевская), непромышленный приток газа получен только в Биркинской скважине № 2 (0,5 тыс. м^3/сут.), в остальных скважинах притока не получено. Собственно, булайская свита (биркинский продуктивный горизонт) была испытана в 38 скважинах (52 интервала). В 15 скважинах (18 интервалов) в результате испытания свита не дала притоков пластовых флюидов. В 17 скважинах (18 интервалов) получены притоки пластовой воды, наибольший дебит из этой свиты был получен в скважинах Нитикская № 8 (дебит 79,2 м^3/сут.), Желдонская № 260 (дебит 57,6 м^3/сут.), Христофоровская № 11 (дебит 47,6 м^3/сут.). В остальных 11 скважинах (16 интервалов) были получены притоки газа, из них промышленные притоки установлены в 7 скважинах (испытано 11 интервалов). Это пробуренные в 60-70 годы XIX столетия скважины Биркинская № 1 (дебит 8,2 тыс. м^3/сут.), и Биркинская № 1СП (дебит 80 тыс. м^3/сут.), Христофоровские № 2, № 6 и № 12 (дебиты до 80 тыс. м^3/сут. в колонне, 7,5 тыс. м^3/сут. с пластовой водой и 26,4 тыс. м^3/сут. при спуске ИП соответственно). Также промышленные притоки газа получены при перфорации биркинского горизонта Балаганкинской скважины № 36, пробуренной в 2021 г (дебит 91 тыс. м^3/сут.). В скважине Тутурская № 5, которая была пробурена ещё в 1987, при испытании ИП ангарской и булайской свит после ГКО (глинокислотная обработка) был получен приток газа до 82 тыс. м^3/сут. В 2009 скважина была расконсервирована. При испытании был получен газ дебитом от 43,7 тыс. м^3/сут. на 7 мм штуцере до 304 тыс. м^3/сут. на 25,4 мм штуцере.

В 2010 году было открыто Тутурское газоконденсатное месторождение, продуктивность которого связана с биркинским продуктивным горизонтом булайской свиты нижнего кембрия. Месторождение относится к категории разведываемых, добыча углеводородного сырья не производилась. На месторождении выделены 2 залежи [5].

Залежь 1 приурочена к южному куполу Коркинского поднятия и вскрыта поисковой скважиной Тутурская № 5-ТУТ. В скважине были перфорированы интервалы 1190-1198 м и 1111-1180 м. При исследовании скважины были получены вместе с газом признаки пластовой воды. Положение газоводяного контакта (ГВК) залежи 1 на абсолютной отметке -454 м.

Залежь 2 приурочена к северному куполу Коркинского поднятия и вскрыта скважинами № 54-К и № 2-ТУТ. Информации для определения ГВК залежи недостаточно, поэтому принят условный продуктивный уровень (УПУ) на отметке -500 м по замкнутой изогипсе.

Атовский и христофоровский горизонты бельской свиты испытаны в 61 скважине, в ста интервалах, в том числе совместно с выше- и нижележащими свитами. В 74 интервалах испытания проводились только в бельской свите (47 скважин). В 32 интервалах притока не получено, в 20 скважинах отложения бельской свиты оказались непродуктивными.

Промышленные притоки газа получены в 7 скважинах. В скважине Атовская № 7 (пробурена в 1961 году) дебит газа из атовского горизонта составил 18 тыс. м^3/сут., в скважине была проведена пробная эксплуатация в течении года, однако больше притока не получено. При бурении новых поисковых скважин 36 и 37 Балаганкинской площади были получены промышленные притоки газа с дебитами в атовском пласте 1 – 68 тыс. м^3/сут. при испытании в эксплуатационной колонне на диафрагме диаметром 7,95 мм и в пласте 2 – 33 тыс. м^3/сут при испытании в эксплуатационной колонне на диафрагме диаметром 7,40 м.

В скважине Биркинская № 1 в результате испытания бельской свиты в процессе бурения дебит газа составил 10 тыс. м^3/сут. с пластовой водой. Газовый пласт отбили в интервале 1123-1155 м. В скважине Биркинская 1-СП в процессе бурения при подъеме ИП из скважины выбросило газ через затрубное пространство, на шайбе 3 мм максимальный дебит газа в интервале 1180-1235 м составил 440 тыс. м^3/сут. При повторном испытании бельской свиты в интервале 1120-1205 м на колонне НКТ (насосно-компрессорные трубы) на глубине 1120 м получили непромышленный приток газа дебитом 4,9 тыс. м^3/сут. на шайбе 3 мм. Газовый пласт отбили в интервале 1124-1152 м.

Проведённые геолого-разведочные работы позволили в 2013 году открыть новую залежь в первом пласте атовского продуктивного горизонта, а также уточнить геолого-геофизическую модель залежи в втором пласте Атовского месторождения.

Балыхнинский и осинский горизонты **усольской свиты** испытаны в 135 скважинах (225 интервалов), при этом в 14 скважинах совместно с вышележащими свитами, в 1 – с выше и нижележащими (Нотайская № 271), в 15 скважинах совместно с нижележащими свитами. В скважине Братская №16 при двухкратном спуске ИП КИИ-146 из усольской, тэтэрской, собинской, катангской свит был получен приток газа дебитом 5 тыс. м^3/сут. В скважинах Балыхтинская № 1, Братская № 17, Еловская № 1, Христофоровская № 12 получены притоки пластовой воды из усольской и тэтэрской свит (осинский, усть-кутский горизонты). В остальных скважинах притоков не получено.

В остальных скважинах испытания были проведены непосредственно в усольской свите (193 интервала).

При бурении скважины Осинская № 1 из доломитов осинского горизонта впервые на изучаемой территории в июле 1954 г. был получен приток легкой нефти, начальный дебит которой составлял 100-120 л/сут. Постепенно дебит снижался и в январе 1955 г. приток нефти прекратился. Такой незначительный и неустойчивый приток нефти объясняется малой емкостью и слабой проницаемостью трещиноватых коллекторов осинского горизонта. В 50-х годах были проведены испытания в усольской свите в 25 скважинах на Атовской, Балыхтинской, Боханской, Еловской, Кутуликской, Осинской, Парфеновской, Тулунской, Тыретской площадях. Испытания проводились в основном в колонне, перфорацией, тартанием, свабированием.

В скважинах № 3 № 281 (Ковыктинская площадь) при бурении в интервале залегания осинского горизонта, отмечались повышенные газопоказания в забойной пачке бурового раствора. Проведено ОПК в скважине Квт-281, притока не

получено. На смежной Жарковской площади в скважине № 3 из осинского горизонта получен приток газа, обогащенного сероводородом дебитом до 15 м^3/сут.

Промышленный приток газа из балыхтинского горизонта впервые был получен в скважине Балыхтинская № 5 в 1958 году. При перфорации интервала 1122-1130 м сначала наблюдался свободный перелив через устье скважины минерализованной пластовой воды дебитом 90 м^3/сут., затем после снижения забойного давления скважина зафонтанировала газом и пластовой водой (дебит газа составил 170 тыс. м^3/сут., пластовой воды 840 м^3/сут.).

В последнее время промышленные притоки газа из усольской свиты установлены в ряде скважин на Ангаро-Ленском газоконденсатном месторождении, на Илимской, Касьяновской площадях. Непромышленные притоки газа из усольской свиты получены в 11 скважинах, газа и нефти в 8 скважинах, нефти – в 5 скважинах. Притоки пластовой воды получены в 50 скважинах (63 интервала), 89 интервалов из 67 скважин не дали притока пластового флюида.

Заключение и выводы

Выполненный анализ результатов испытания межсолевых отложений нижнего и среднего кембрия показывает, что в этих отложениях притоки нефти и газа были получены на 26 площадях. Хотя официально залежи УВ были открыты только на двух месторождениях (Атовском и Тутурском). В большинстве случаях при испытании межсолевых горизонтов притоков не получено. Но это в целом ряде случаев совсем не означает, что объекты опробования и испытания являются неприточными – «сухими». Как показала практика испытаний скважин на том же Ковыктинском месторождении современные методы испытания и интенсификации позволяет в разы увеличить дебиты скважин, а также получать нефть, газ или воду даже из тех скважин, в которых ранее притоков получать не удавалось. Здесь следует отметить, то что выполненный анализ проводился по скважинам, пробуренным в разные годы. За более чем 60-и летнею историю изучения Ангаро-Ленской НГО методические приёмы вскрытия и испытания карбонатных горизонтов межсолевого комплекса отложений существенно менялись. Поэтому выполненный анализ в целом ряде случаев носит качественный характер. В ходе проведённых работ было показано, в разрезе межсолевых отложениях можно ожидать появление новых горизонтов, которые ранее как перспективные не рассматривались. Так в результате испытания литвинцевской свиты в скважине Христофоровская 1П примерно на 100 м выше келорского продуктивного горизонта, был получен приток газа, что позволяет нам говорить о наличии здесь нового продуктивного горизонта. В ангарской свите был прослежен пласт, который мы назвали бильчирский 0. Горизонт хорошо выражен на каротажных диаграммах, а предварительный анализ материалов интепретации ГИС позволят говорить о вполне удовлетворительных для карбонатных горизонтов емкостно-фильтрационных характеристиках пласта.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Сметанин А.В. Предбайкало-Патомский надвиговый пояс // Геология нефти и газа. – 200. № 1. – С. 14-20.

2 Ахияров А.В., Семёнова К.М. Бельско-булайский галогенно-карбонатный комплекс и его литолого-фациальные и стратиграфические аналоги в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции: перспективы нефтегазоносности // Вести газовой науки. – 2013. – № 5(16). – С. 253-264.

3. 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

4 Павленко В.В., Отчет Результаты поисков месторождений (залежей) газа на Тутурском лицензионном участке. – Иркутск, 2013, 173 с.

5 Фарышова И.А., Камеральные сейсморазведочные работы 3D на Хандинском лицензионном участке. Тюмень. 2020. 582 с.

© А. М. Фомин, Е. В. Белова, С. А. Моисеев, 2025

УДК 550.8.011+504.03+658.567.1.002.8:631.433.53(1-925.11)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-19-24

Я. В. Фомина[1]✉, Д. А. Новиков[1], И. И. Юрчик[1]

Перспективы реализации проектов CCS в меловых комплексах Тазовско-Пурского артезианского бассейна

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

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы реализации проектов по геологическому размещению углекислого газа в водоносных горизонтах апт-альб-сеноманского и неокомского комплексов в пределах Тазовско-Пурского артезианского бассейна. В первую очередь при оценке были учтены следующие группы критериев: общегидрогеологические и структурно-тектонические, литологические, гидродинамические и геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные. Выполненный анализ показал, что наиболее перспективными являются осевые зоны Западно-Сибирского бассейна, за исключением крупных сениклиз, для которых характерны аномально высокие пластовые давления в водоносных горизонтах неокомского комплекса. Полученные результаты позволяют перейти к дальнейшей локальной оценке наиболее перспективных участков с целью лицензирования недр и выделения структур в фонд потенциальных хранилищ углекислого газа.

Ключевые слова: проекты утилизации углекислого газа, технология CCS, осадочные бассейны, Западно-Сибирский артезианский бассейн, Тазовско-Пурский артезианский бассейн

Y. V. Fomina[1]✉, D. A. Novikov, I. I. Yurchik[1]

Prospects for the implementation of CCS projects in the Cretaceous complexes of the Taz-Pur artesian basin

[1]Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after. A. A. Trofimuk SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper considers the prospects for the implementation of projects on the geological placement of carbon dioxide in the aquifers of the Aptian-Albian-Cenomanian and Neocomian aquafers within the Taz-Pur artesian basin. First of all, the following groups of criteria were taken into account during the assessment: general hydrogeological and structural-tectonic, lithological, hydrodynamic and geothermal, hydrogeochemical, environmental and resource criteria. The analysis showed that the most promising are the axial zones of the West Siberian Basin, with the exception of large senicles, which are characterized by abnormally high formation pressures in the aquifers of the Neocomian aquafer. The results obtained allow us to proceed to further local assessment of the identified most promising areas for licensing and allocation of structures to the fund of potential carbon dioxide storage facilities.

Keywords: carbon dioxide utilization projects, CCS technology, sedimentary basins, West Siberian artesian basin, Taz-Pur artesian basin

Введение

В последнее десятилетие власти и бизнес активно разрабатывают и внедряют новые подходы к минимизации воздействия парниковых газов на атмосферу. Многие нефтегазовые компании добровольно взяли на себя обязательства

по утилизации выбросов углекислого газа путем их долговременного размещения в недрах. Для этих целей компаниями рассматриваются существующие лицензионные участки с лицензиями на геологическое изучение и разработку месторождений углеводородов.

Западно-Сибирский артезианский бассейн является хорошо изученным с точки зрения геологии регионом, а по результатам проведенного ранее регионального прогноза перспектив территории РФ для реализации проектов CCS в северных и центральных районах выявлены благоприятные условия для размещения больших объемов CO_2 [1]. Наличие регионально выдержанных водоносных горизонтов в меловой части разреза, надежно изолированных от зоны активного водообмена региональным туронско-датским водоупором, отсутствие активной тектоники и подходящие термобарические условия делают регион привлекательным объектом для реализации проектов долгосрочного хранения углекислого газа.

Не смотря на сравнительно хорошую изученность верхних горизонтов мезозойско-кайнозойского осадочного чехла, весьма актуальной остается задача поиска подходящих участков для долгосрочного размещения углекислого газа. Наибольший интерес в этом плане представляют апт-альб-сеноманский и неокомский водоносные комплексы, которые характеризуются отсутствием зон развития аномально высоких пластовых давлений и температур, кроме того пластовые условия позволяют разместить диоксид углерода в плотнофазном состоянии. В этой связи, целью настоящего исследования являлось проведение прогноза перспектив реализации проектов CCS в пределах меловых водоносных комплексов Тазовско-Пурского артезианского бассейна.

Методика

Методика оценки пригодности гидрогеологических бассейнов и их частей для реализации проектов CCS включает в себя три уровня детальности: региональный, зональный и локальный. Самый общий уровень – **региональный,** позволяет оценить территорию как благоприятную или неблагоприятную для реализации проектов в целом [1]. Второй уровень оценки перспектив территорий – **зональный,** на нем оцениваются части бассейнов, выделяются перспективные водоносные горизонты по площади и в разрезе [2]. Самый детальный уровень прогноза – **локальный,** на котором выполняется обоснование конкретных геологических структур для проектирования полигонов для размещения углекислого газа. Подробная характеристика критериев оценки приведена в методических работах [1, 2]. Ниже будут охарактеризованы наиболее значимые из них. Ранее авторским коллективом были оценены перспективы реализации проектов CCS в Московском артезианском бассейне и на о. Сахалин [3, 4].

Обсуждение

Район исследования приурочен к северной и центральной частям Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, где промышленные залежи нефти и газа выявлены в широком возрастном диапазоне: от нижнеюрских отложений до ту-

ронского яруса верхнего мела. В регионе отсутствуют складчатые области и щиты, для меловых комплексов комплекса характерно преобладание пластовых гидрогеологических тел и терригенных коллекторов с поровым типом пустотного пространства.

Анализ активных разломов и наведенной сейсмичности показал, что рассматриваемая территория относится к региону с интенсивностью сейсмических сотрясений ниже 5 баллов и может быть оценена как благоприятная.

В гидрогеологическом разрезе выделяется два этажа: нижний, относящийся к зоне затрудненного и застойного водообмена и верхний – активного. В пределах нижнего водоносного этажа выделяется пять водоносных комплексов, надежно изолированных от зоны активного водообмена туронско-датским региональным водоупором (сверху – вниз): апт-альб-сеноманский, неокомский, верхнеюрский, нижне-среднеюрский, палеозойский (совместно с триасовым). В верхней части разреза выделяется палеогеново-четвертичный комплекс.

В регионе можно выделить 6 типов гидрогеологических разрезов, которые отличаются по полноте выделяемых водоносных и водоупорных горизонтов, наиболее полные характерны для наиболее погруженной части Западно-Сибирского бассейна, где мощность осадочного чехла достигает 8-9 км, а в западной и восточной окраинных частях бассейна разрез заметно сокращается, из него выпадают как меловые, так и юрские осадки, суммарная мощность редко достигает 1 км.

Пористость песчаников/алевролитов в пределах нефтегазоносных отложений меняется в широком диапазоне от 0,70 до 42,55 %, закономерно уменьшаясь от меловых к доюрским резервуарам. Установлено, что доминируют в разрезе песчаники/алевролиты с величиной пористости 10-20 %. Самыми высокими коллекторскими свойствами обладают слабосцементированные пески и песчаники покурской свиты апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (пласты ПК). Их пористость изменяется от 10,54 до 42,55 %, гидропроводность составляет $3{,}81 \cdot 10\text{-}5\text{-}7{,}40 \cdot 10^3$ мкм^2·м/мПа·с, при среднем значении 109,9 мкм^2·м/мПа·с. Все это позволяет получать притоки до 1000 м^3/сут и более. Воды комплекса используются для системы поддержания пластового давления.

Водоносные горизонты неокомского водоносного комплекса, хоть и обладают высокими фильтрационно-емкостными свойствами, но в большей мере затронуты процессами уплотнения пород. К отложениям комплекса приурочены проницаемые пласты группы А и Б, пористость которых составляет 7,40-33,52 %, гидропроводность варьирует в интервале $2{,}23 \cdot 10\text{-}4\text{-}4{,}15 \cdot 10^3$ мкм^2·м/мПа·с, средние дебиты воды достигают 42,1 м^3/сут.

В апт-альб-сеноманском водоносном комплексе выявлены слабосоленые воды с величиной общей минерализации, изменяющейся от 1,5 до 25,3 г/дм^3. А в неокомском водоносном комплексе распространены как слабосолоноватые воды, так и слабые рассолы с величиной общей минерализации, изменяющейся от 2 до 53 г/дм^3. По химическому составу воды в обоих комплексах являются преимущественно хлоридными натриевыми.

Интервал изменения пластовых температур в кровле апт-альб-сеноманского водоносного комплекса составляет от 0 до 50 ºС. Околонулевые и отрицательные

температуры приурочены к прибортовым частям, и связаны с влиянием толщи многолетнемерзлых пород. Фоновыми значениями выступает интервал температур от 20 до 30-35 ºС. Аномалии с повышенными значениями пластовых температур (более 35 ºС) занимают две обширные области. Одна из них приурочена к Северо-Таймырскому наклонному мегавалу (I порядок), Южно-Карской мегавпадине (I порядок), осложняющей Карскую мегасинеклизу и Северо-Карскую моноклизу. Вторая расположена на самом юге исследуемой территории и приурочена, главным образом, к Нерутиской мегавпадине, осложняющей юго-западную часть Большехетской мегасинеклизы, и к Верхнетанловской мегавпадине, осложняющей северо-восточную часть Надымской гемисинеклизы.

На карте распределения пластовых температур в пределах кровли неокомского комплекса вариация пластовых температур достигает 100 ºС. Интервал температур от 0 до 25 °С зафиксирован в районах, прилегающих к обрамлению Западно-Сибирской геосинекизы, и кроме того фиксируется в пределах структуры II-ого порядка – Рассохинского мезовыступа. Область высоких значений пластовых температур – более 75 °С выделяется в пределах крупных и промежуточных и отрицательных структур - Северо-Карской моноклизы, Карской синеклизы, Большехетской мегасинеклизы и Надымской гемисинеклизы.

Основной гидродинамической особенностью Тазовско-Пурского артезианского бассейна является широкое развитие аномально высоких пластовых давлений (АВПД), начиная с неокомского комплекса [5]. С глубиной отчетливо выделяется две гидродинамические зоны (сверху-вниз): гидростатических и повышенных переходящих в АВПД. К первой приурочены большинство водоносных горизонтов апт-альб-сеноманского водоносного комплекса. Нормальные пластовые давления (3,5-28,4 Мпа) характерны для апт-альб-сеноманского комплекса, в неокомском комплексе напряженность гидростатического поля возрастает и давления переходят от гидростатических к аномально-высоким (от 6,3 до 77,9 МПа). Ниже по разрезу давления возрастают.

Комплекс выполненных региональных и зональных исследований позволил закартировать в пределах меловой части разреза (апт-альб-сеноманский и неокомский комплексы) области, благоприятные для размещения углекислого газа в водорастворенном и сверхкритическом состоянии. На основе критериев зонального прогноза было проведено ранжирование земель на четыре категории перспективности – бесперспективные, низкоперспективные, среднеперспективные и высокоперспективные.

В неокомском комплексе бесперспективные зоны приурочены к окраинным частям бассейна, где существенное влияние оказывают процессы инфильтрации атмосферных осадков (Рис. 1). К низкоперспективным зонам отнесены области развития АВПД и с глубинами залегания кровли неокомских отложений от 800 до 900 м. Среднеперспективные земли характеризуются повышенными пластовыми давлениями. Высокоперспективные зоны расположены в центральной (осевой) части бассейна и выделяются исключительно в неокомском комплексе. Здесь развиты условия максимально подходящие для размещения углекислого газа: в комплексе: температуры превышают 30 °С и давления близки к условно-

гидростатическим, минерализация подземных вод в среднем составляет 15-20 г/дм^3, в разрезе преобладает элизионный водообмен. Водоносные горизонты неокомского комплекса надежно изолированы от зоны активного водообмена, а содержащиеся в нем воды не используются для целей питьевого и хозяйственного водоснабжения населения.

Однако, необходимо так же обратить внимание на наличие особо охраняемых природных территорий в приделах Тазовско-Пурского артезианского бассейна – заповедников и заказников государственного значения, буферные зоны вокруг городов и контуры месторождений углеводородов, которые накладывают ограничение на использование земель для реализации проектов CCS

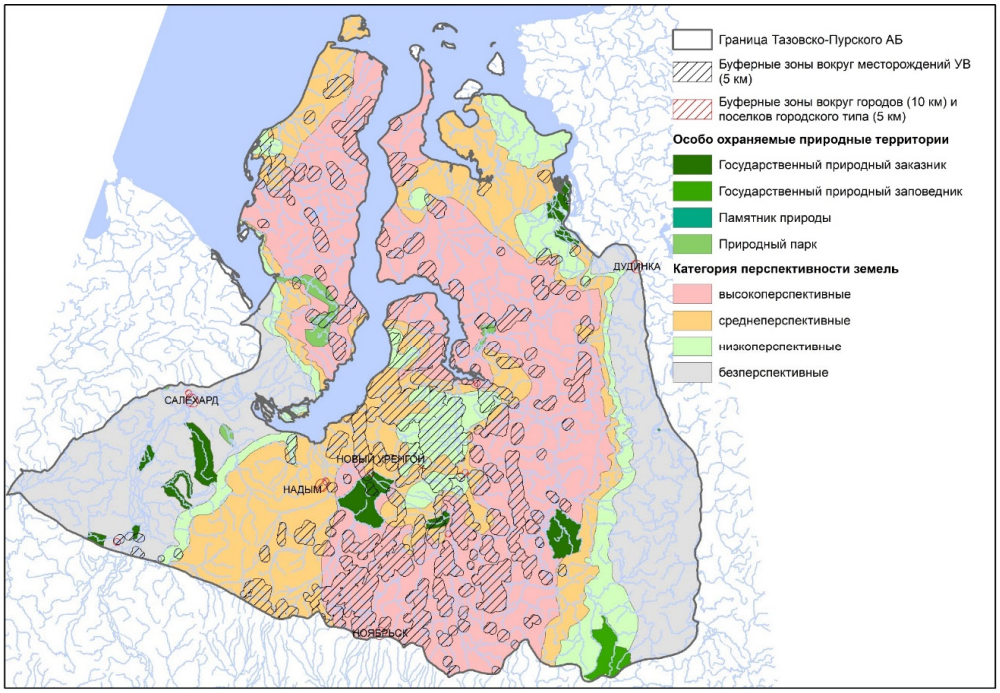


Рис.1. Карта зонального прогноза неокомского водоносного комплекса Тазовско-Пурского артезианского бассейна для целей размещения углекислого газа

Заключение

Комплекс выполненных региональных и зональных исследований позволил закартировать в пределах Тазовско-Пурского артезианского бассейна благоприятные области для размещения углекислого газа. Рассмотрены общегеологические, тектонические, сейсмические, литологические, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические критерии. Комплекс выполненных региональных и зональных исследований позволил закартировать в пределах неокомского и апт-альб-сеноманского комплексов области, благоприятные для размещения углекислого газа в сверхкритическом и водорастворенном состояниях.

Наибольшими перспективами обладает неокомский водоносный комплекс. Бесперспективными неокомские отложения будут только в пределах Большехетского НГР Пур-Тазовской НГО и Приобского НГР Фроловской НГО, поскольку

в их приделах расположены крупные отрицательные тектонические элементы (Большехетская мегасинеклиза и Надымская гемисинеклиза), для которых характерны повышенные значения пластовых давлений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков Д.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации /. Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. Жуковская // Нефтяное хозяйство. – 2022. – №3. – С.36-42.

2. Новиков Д.А. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях / Д.А. Новиков, Я.В. Фомина, И.И. Юрчик, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Головин // Экология и промышленность России. – 2023. – Т.27. – № 4. – С.44-49.

3. Новиков Д.А., Фомина Я.В., Юрчик И.И., Деркачев А.С., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Никитенков А.Н., Князев А.Г. Первый опыт зонального прогноза Московского артезианского бассейна для реализации проектов CCS // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – № 10. – С.119-139.

4. Юрчик И.И., Новиков Д.А., Жарков Р.В. Тектонические, геологические и гидрогеологические риски размещения CO_2 в водоносных горизонтах юга острова Сахалин // Экология и промышленность России – 2024.– том 28. – № 5. – С. 67-71.

5. Новиков Д.А. Роль элизионного водообмена в формировании гидродинамического поля Ямало-Карской депрессии / Д.А. Новиков // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 3. – С. 248-261.

© Я. В. Фомина, Д. А. Новиков, И. И. Юрчик, 2025

УДК 551, 550.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-25-32

М. Е. Шабурова[1]✉

Прогноз развития трещиноватости в карбонатных коллекторах с учётом особенностей тектонического развития региона

[1]Группа компаний Газпром нефть, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: maria_shaburova@mail.ru

Аннотация. В карбонатных коллекторах нефти и газа трещины могут обеспечивать фильтрацию флюида и, как следствие, влиять на проницаемость и продуктивность пласта. Для более качественного прогноза развития трещин необходимо понимать механизм их формирования. Исследуемое нефтяное месторождение расположено в северо-восточной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Продуктивные отложения представлены известняками гжельского яруса верхнего карбона и ассель-сакмарского яруса нижней перми. В настоящей статье приводятся результаты палеотектонических реконструкций и реконструкций палеополей напряжений, позволившие определить механизм формирования трещин в пределах продуктивных пластов исследуемого месторождения; а также классификация трещин по данным пластовых азимутальных микроимиджеров. Результатом проведённого исследования является модель плотности трещиноватости, послужившая основой для прогноза проницаемости в продуктивных отложениях верхнего карбона исследуемого месторождения.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, трещиноватость, палеотектонические реконструкции, реконструкции палеополей напряжений

M. E. Shaburova[1]✉

Prediction of carbonate reservoirs fracturing based on tectonic development features of the region

[1] Gazprom neft company group, Saint-Peterburg, Russian Federation
e-mail: maria_shaburova@mail.ru

Abstract. In carbonate oil and gas reservoirs, fractures can provide fluid filtration and, as a result, affect the reservoir permeability and productivity. For a better prediction of fractures development, it is necessary to understand the mechanism of their formation. Studied oil field is located in the north-eastern part of the Timan-Pechora oil and gas province. Limestones of the Upper Carboniferous and Lower Permian formation represent productive deposits. This article presents the results of paleotectonic reconstructions and reconstructions of stress paleofields, which made it possible to determine the mechanism of fractures formation within the productive strata; as well as the classification of fractures according to the data of azimuthal microimages. The result of the study is a model of fractures intencity, which served as the basis for predicting permeability in productive deposits of the Upper Carboniferous formation.

Keywords: carbonate reservoirs, fracturing, paleotectonic reconstructions, reconstructions of stress paleofields

Введение

Карбонатные коллекторы, как правило, характеризуются сложным строением пустотного пространства. На их фильтрационно-емкостные свойства вли-

яют не только условия осадконакопления, но и вторичные преобразования, такие как выщелачивание, кальцитизация, битуминизация, трещиноватость и другие [1]. Исследование трещиноватости имеет особое значение, так как трещины могут являться «каналами», обеспечивающими фильтрацию флюида в породе и, как следствие, влиять на проницаемость и продуктивность коллекторов. Для надёжного прогноза развития трещин в межскважинном пространстве важно определить механизм их формирования.

Целью исследования является определение механизма формирования трещин и прогноз их развития в пределах продуктивного пласта нефтяного месторождения Варандей-Адзьвинской нефтегазоносной области.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи: проведены палеотектонические реконструкции, а также реконструкции палеополей напряжений; установлена связь механизма формирования трещин с основными тектоническими событиями; проведена классификация трещин по данным пластовых азимутальных микроимиджеров с использованием модели Нельсона Р.А. [2]; построена модель плотности трещиноватости.

Исследуемое нефтяное месторождение расположено в пределах Варандей-Адзьвинской нефтегазоносной области Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. В пределах месторождения установлена промышленная нефтеносность в отложениях гжельского яруса верхнего карбона и ассель-сакмарского яруса нижней перми [3]. Коллекторы месторождения представлены известняками порового, а также кавернозно-трещинно-порового типа [4], характеризующимися неоднородным распределением фильтрационно-емкостных свойств по площади и по разрезу.

Методы и материалы

Основой для проведённого исследования послужили результаты интерпретации геофизических исследований 30 скважин, данные пластовых азимутальных микроимиджеров по 17 скважинам, а также результаты интепретации материалов сейсморазведочных работ МОГТ 3D площадью 662 км^2.

В ходе исследования были проведены палеотектонические реконструкции методом построения палеотектонических профилей (профилей выравнивания). Данный метод подразумевает построение серии профилей с выбором поверхности выравнивания и откладыванием от неё вниз соответствующих мощностей горизонтов или пластов [5]. В качестве поверхностей выравнивания были выбраны отражающие горизонты, соответствующие границам основных этапов тектонического развития района исследования. Были произведены построения палеотектонических профилей и палеоструктурных карт по 23 отражающим горизонтам на начало 7 наиболее важных тектонических периодов.

Дизъюнктивные и пликативные нарушения являются результатом влияния разнонаправленных напряжений на массив горных пород, возникающих в результате различных тектонических движений, поэтому могут служить индикатором для определения направлений главных осей напряжений. На основании

этого в ходе исследования была определена ориентировка палеополей напряжений.

Структурно-тектоническое и петрофизическое моделирование осуществлялось с использованием специальных программных комплексов.

Результаты

Палеотектонические реконструкции, проведённые в ходе исследования, доказывают, что с ордовикского по девонский период в пределах исследуемого месторождения была сформирована система сбросов, что обусловлено процессами растяжения, рифтогенеза и раскрытием Уральского палеоокеана.

Далее процесс растяжения компенсировался сжатием, в результате чего преобладают сдвиговые процессы.

В начале каменноугольного периода происходит тектоническая реактивация: по разлому, ограничивающему залежь, ранее представлявшему сброс, начинается движение вверх, и он трансформируется в взброс, начинается процесс структурной инверсии. Это связано с субдукцией Уральского палеоокеана и дальнейшей коллизией Восточно-Европейского и Сибирского палеоконтинентов. Таким образом, доминирующий режим тектонического растяжения сменяется сжатием. Соответственно накопление продуктивных карбонатных отложений шло практически одновременно со сменой тектонического режима. Процесс тектонической реактивации продолжался до начала триаса.

К концу триасового периода в пределах исследуемого месторождения сформировалась антиклинальная складка, что связано с продолжением роста Уральского орогена. Соответственно так же преобладает тектонический режим сжатия. При этом процессы структурной инверсии и складкообразования затрагивают стратиграфические уровни вплоть до нижнего девона.

Учитывая, что к моменту формирования складки, коллекторы верхнего карбона – нижней перми были перекрыты мощной выдержанной глинистой толщей кунгурского яруса нижней перми, окончательное формирование ловушки углеводородов связано именно с этим процессом (рис. 1).

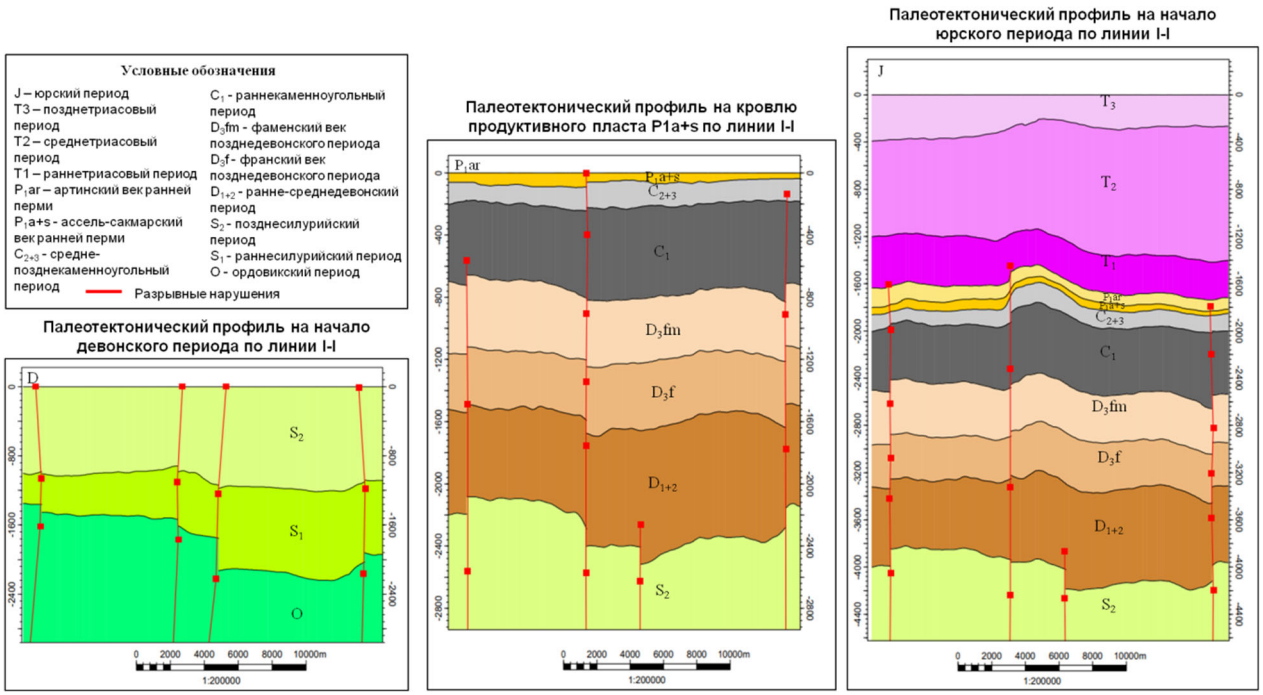


Рис. 1. Палеотектонические профили на начало основных периодов геологического развития в пределах месторождения в крест простирания основных структур

При хрупких деформациях основной разрыв сплошности среды происходит перпендикулярно направлению максимального сжатия; при пластических деформациях перпендикулярно максимальному сжатию происходит максимальное удлинение горных пород.

В среднем карбоне – ранней перми был окончательно сформирован парагенезис разрывных нарушений, поэтому направление максимального горизонтального напряжения в это время определено перпендикулярно простиранию разлома, ограничивающего залежь, в его северной части, где он представляет собой взброс, направление минимального горизонтального напряжения параллельно ему.

В триасовый период окончательно была сформирована антиклинальная складка, поэтому направление максимального горизонтального напряжения в это время определено перпендикулярно простиранию оси складки, направление минимального горизонтального напряжения параллельно ему (рис. 2).

В обстановках сжатия формируются трещины следующих типов: стилолитовые трещины, эшелонные трещины отрыва и трещины разгрузки (сжатия) [2]. При этом поверхности стилолитовых трещин и трещин разгрузки формируются перпендикулярно направлению максимального сжатия, а эшелонные трещины отрыва параллельно ему. Результаты анализа керна подтверждают, что в пределах исследуемого месторождения существенно преобладают стилолитовые трещины. Кроме того, установлено, что стилолитовые трещины в исследуемых коллекторах являются «каналами», обеспечивающими дополнительное выщелачи-

вание и улучшение фильтрационно-емкостных свойств за счёт увеличение проницаемости [1].

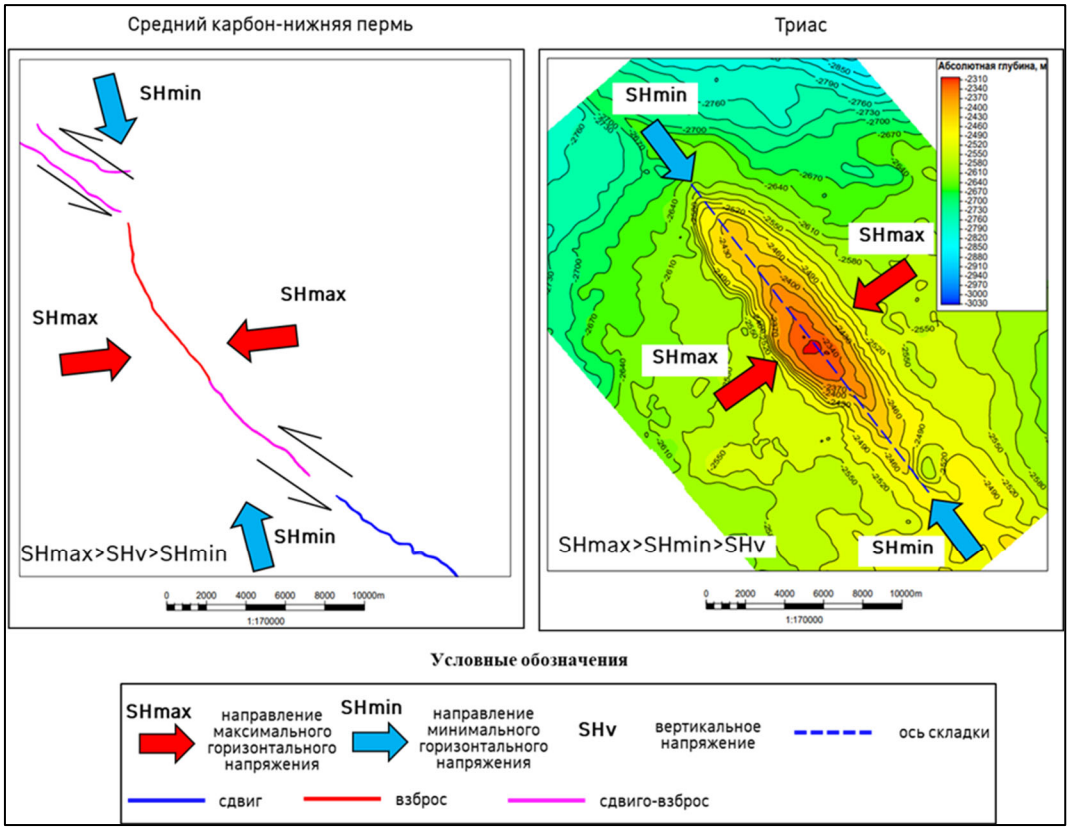
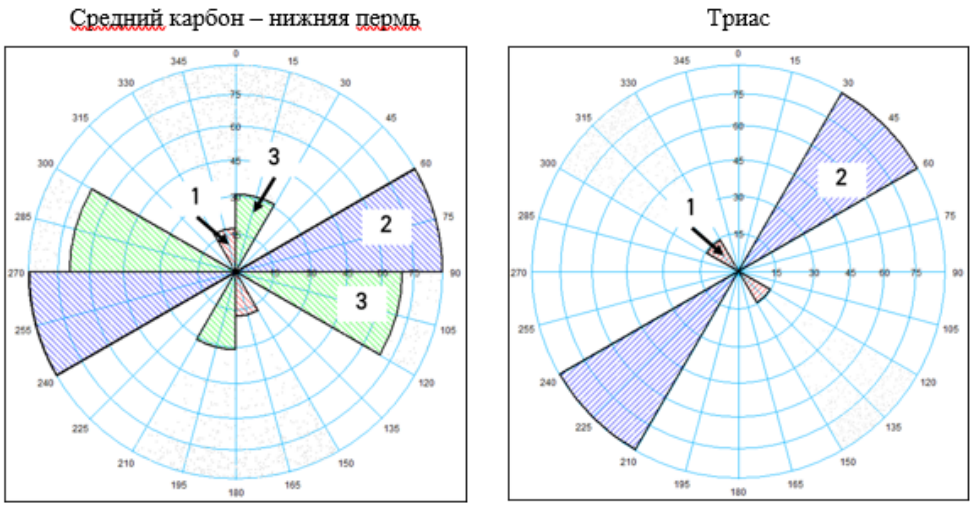


Рис. 2. Ориентировка палеополей напряжений в среднем карбоне – нижней перми и триасе

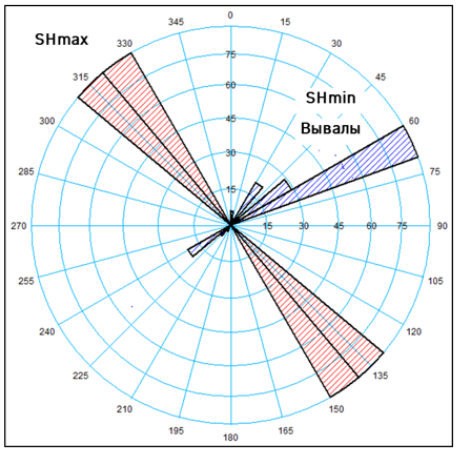
Учитывая, что в среднем карбоне – нижней перми так же имели место сдвиговые деформации, должны были формироваться сопряженные системы трещин скола, которые располагаются симметрично относительного одного из направлений сжатия. На основании выше изложенного, была проведена классификация трещин по данным пластовых микроимиджеров. Азимуты простирания парагенезисов трещин среднего карбона – нижней перми и триаса представлены на рис. 3.

Наибольшей раскрытостью должны обладать трещины, расположенные вдоль направления современного максимального горизонтального напряжения, так как при течении флюида по ним обеспечивается минимальное сопротивление фильтрации [6]. Ориентировка современного максимального и минимального горизонтального напряжения может быть определена по данным пластовых микроимиджеров: техногенные трещины в вертикальной скважине образуются параллельно к направлению максимального горизонтального напряжения, в то время как «вывалы» – перпендикулярно [6] (рис. 4). Вдоль современного максимального горизонтального напряжения простираются стилолитовые трещины и трещины разгрузки триасового парагенезиса, соответственно они обладают наибольшей ракрытостью.



Условные обозначения:
1 – стилолитовые трещины и трещины разгрузки, 2 – эшелонные трещины отрыва, 3 – трещины скола

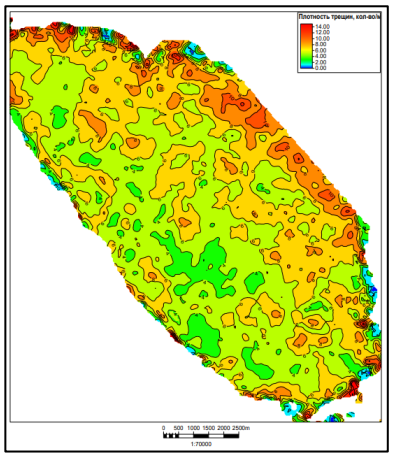
Рис. 3. Роза-диаграмма простирания выделенных парагенезисов трещин



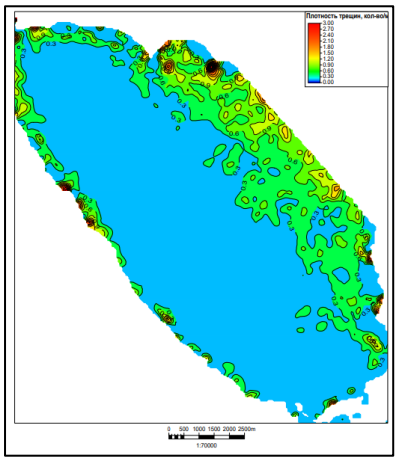
Условные обозначения:
SHmax – ориентация максимального горизонтального напряжения, SHmin– направление минимального горизонтального напряжения

Рис. 4. Роза-диаграмма простирания «вывалов» стволов скважин и современной ориентации главных осей горизонтальных напряжений

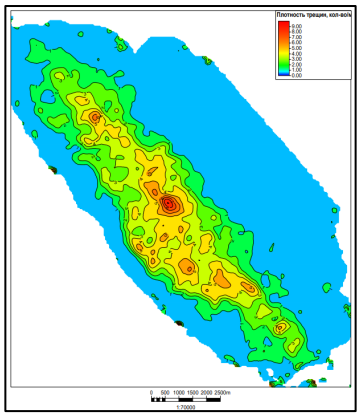
Используя полученные результаты, была построена модель плотности трещиноватости. Моделирование осуществлялось отдельно для трещин среднего карбона – нижней перми, для стилолитовых трещин и трещин разгрузки триаса, а также для трещин отрыва триаса. Финальная модель плотности трещиноватости была получена суммированием, при этом модели стилолитовых трещин и трещин разгрузки триасового парагенезиса присваивался больший вес, так как эти трещины характеризуются большей раскрытостью. Результаты моделирования представлены на рис. 5.



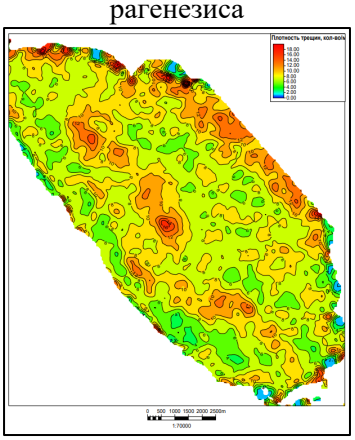
Средняя плотность трещиноватости среднекаменноугольно-нижнепермского парагенезиса



Средняя плотность трещиноватости интервалов со стилолитовыми трещинами и трещинами разгрузки триасового парагенезиса



Средняя плотность трещиноватости интервалов с трещинами отрыва триасового парагенезиса



Средняя плотность трещиноватости всего продуктивного интервала

Рис. 5. Карты средней плотности трещиноватости в отложениях верхнего карбона

Обсуждение

Результаты проведённых палеотектонических реконструкций соответствуют представлениям об истории тектонического развития региона, отражённым в научных трудах таких исследователей как Л.П. Зоненшайна, В.А. Дедеева, В.Г. Гецена, И.В. Запорожцевой, А.В. Журавлева, А.Г. Кузнецова, Н.А. Малышева, Н.И. Тимонина, В.В. Юдина и др. [7, 8, 9,10].

Формирование природного резервуара нефти в пределах исследуемого месторождения контролировалось процессами тектонического сжатия в среднем карбоне-триасе и неразрывно связано с эволюцией Уральского палеоокеана и Уральского орогена.

При этом закономерным является тот факт, что формирование трещин в коллекторах исследуемого месторождения происходило в результате хрупких деформаций под действием этих же тектонических процессов. Смена ориента-

ции палеополей напряжений, а также изменение их величин в триасовом периоде указывает на то, что в пределах продуктивных пластов исследуемого месторождения формировалось два парагенезиса трещин.

Заключение

В ходе проведённого исследования была установлена связь формирования трещин продуктивного пласта с процессами тектонического сжатия в регионе в среднем карбоне – триасе.

Палеотектонические реконструкции и реконструкции палеополей напряжений позволили произвести классификацию трещин по данным пластовых микроимиджеров.

В результате проведённого исследования была построена модель плотности трещиноватости, которая стала основой для прогноза проницаемости в продуктивных отложениях верхнего карбона исследуемого месторождения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шабурова М.Е. Влияние трещиноватости на фильтрационно-емкостные характеристики карбонатных коллекторов на примере нефтяного месторождения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Экспозиция Нефть Газ. 2024. №8. С.48-53

2. Nelson R. A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. United States of America, 2001. 332 p.

3. Журавлёв В.А., Кораго Е.А., Костин Д.А., Зуйкова О.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39,40 – о. Колгуев – прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 405 с.

4. Багринцева К.И., Дмитриевский А.Н., Бочко Р.А. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. М.: РГГУ, 2003. 264 с.

5. Нейман В.Б. Теория и методика палеотектонического анализа. М.: Недра, 1984, 80 с.

6. Зобак М. Д. Геомеханика нефтяных залежей / перевод с английского В. Л. Фрика; под редакцией специалистов ООО "Газпромнефть НТЦ". Ижевск: Институт компьютерных исследований, Газпромнефть, 2018. 479 с.

7. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. 328 с.

8. Дедеев В.А., Малышев Н.А., Юдин В.В. Тектоника платформенного чехла Печорской плиты // Тектоника платформенных областей. 1988. С. 137-150

9. Гецен В.Г., Дедеев В.А., Запорожцева И.В., Кузнецов А.Г., Малышев Н.А., Рыжов И.Н., Тимонин Н.И., Удот Г.Д., Юдин В.В. Структура платформенного чехла Европейского севера СССР. Ленинград: Наука, 1982. 200 с.

10. Пучков В.Н. Палеоокеанические структуры Урала // Геотектоника. 1993. №3. С.18-33

© М. Е. Шабурова, 2025

УДК 553.981/982 (571.1)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-33-41

П. А. Глазырин[1,2]✉, Г. Г. Шемин[1], В. В. Сапьяник[3], Е. В. Деев[1,2]

Фациальное районирование нижнеюрских нефтегазоносных отложений сибирского сектора Арктики

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Со РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
[3]Новосибирское отделение Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: p.glazyrin@g.nsu.ru

Аннотация. Перспективные на поиски залежей нефти и газа нижнеюрские отложения сибирского сектора Арктики характеризуются сложным строением и весьма низкой степенью изученности бурением. Автономное фациальное районирование их до настоящего времени не разработано. В статье изложено фациальное районирование этих отложений всей территории региона. Исходной информацией для его выполнения явились раннее разработанные литолого-палеогеографические карты, составленные на уровне стратиграфических горизонтов, охватывающих всю территорию исследуемого региона. Таких карт было составлено пять: зимнего, левинского, шараповского, китербютского и надояхского. На каждой из них были выделены литологические и палеогеографические области. Анализ этих карт позволил авторам составить литолого-палеогеографические карты нижнеюрских отложений в целом. Они явились основой для разработки изложенного в статье фациального районирования нижнеюрских отложений рассматриваемого региона.

Ключевые слова: фациальное районирование, нижнеюрские отложения, фациальная область, фациальный район

P. A. Glazyrin[1,2]✉, G. G. Shemin[1], V. V. Sapyanik[3], E. V. Deev[1,2]

Facies zoning of the lower jurassic oil and gas deposits of the Siberian sector of the Arctic

[1]Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics named after. A. A. Trofimuk Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation
[3]Novosibirsk branch of the All-Russian Research Geological Oil Institute, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: p.glazyrin@g.nsu.ru

Abstract. The Lower Jurassic deposits of the Siberian sector of the Arctic, which are promising for oil and gas exploration, are characterized by a complex structure and a very low degree of exploration by drilling. Their autonomous facies zoning has not yet been developed. The article presents the facies zoning of these deposits in the entire territory of the region. The initial information for its implementation was the previously developed lithological and paleogeographic maps compiled at the level of stratigraphic horizons covering the entire territory of the studied region. Five such maps were compiled: Zimniy, Levinsky, Sharapovsky, Kiterbyutsky and Nadoyakhsky. Lithological and paleogeographic areas were identified on each of them. The analysis of these maps allowed the authors to compile lithological and paleogeographic maps of the Lower Jurassic deposits as a whole. They formed the basis for the development of the facies zoning of the Lower Jurassic deposits of the region under consideration, described in the article.

Keywords: facies zoning, Lower Jurassic deposits, facies region, facies area

Введение

Перспективные на поиски залежей нефти и газа нижнеюрские отложения пользуются почти повсеместным распространением в районах сибирского сектора Арктики. На большей части территории они характеризуются низкой и неравномерной степенью изученности сейсморазведкой и особенно бурением, неоднородным строением, разнообразным литологическим составом, чрезвычайно изменчивым по площади и разрезу.

Фациальное районирование юрских отложений рассматриваемого региона в целом и его отдельных районов имеет длительную историю. Современные представления о них изложены в публикации Б.Н. Шурыгина с со авторами [1] и в Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири [2]. При этом следует отметить, что все схемы фациального районирования юрских отложений составлены только для двух стратиграфических уровней: нижне-среднеюрского и келловей-верхнеюрского.

В настоящей статье впервые осуществлено фациальное районирование нижнеюрских отложений всей территории рассматриваемого региона. Результаты исследований приведены ниже.

Краткие сведенья о понятии фациального районирования

Существуют многие представления о понятии фациального районирования, которые изложены в публикациях В.А. Печорина, А.В. Кузнецова, М.А. Белова, А.И. Ковалева, А.И. Лебедева, С.А. Федорова, И.Е. Громова, Н.П. Сидорова и других исследователей.

Во всех отмеченных понятиях фациального районирования фигурируют две его составляющих: литологический состав и условия формирования отложений. Кроме них обычно имеется и третья – стратиграфический объем рассматриваемых отложений. Поэтому под фациальным районированием авторы настоящей статьи понимают «Распределение по площади одновозрастных отложений, характеризующихся сходным литологическим составом, строением и условиями образования».

Методические аспекты фациального районирования нижнеюрских отложений

Как отмечалось выше, в качестве основных параметров осуществления фациального районирования нижнеюрских отложений рассматриваемого региона являются: литологический состав, строение и условия образования одновозрастных отложений. Исходной информацией для выполнения фациального районирования являются ранее опубликованные авторами статьи литолого-палеогеографические карты, составленные на уровне стратиграфических горизонтов, охватывающих всю территорию исследуемого региона [3]. Таких карт было со-

ставлено пять: зимнего (гетанг-начало позднего плинсбаха), левинского (поздний плинсбах), шараповского (конец позднего плинсбаха), китербютского (начало раннего тоара) и надояхского (конец раннего тоара – начало аалена). На каждой из них выделены палеогеографические и литологические области.

Проведенные исследования позволили авторам статьи на базе выше отмеченных пяти литолого-палеогеографических карт по каждому из пяти отмеченных временных интервалов подготовить по две карты: палеогеографическую и литологического состава. На них выделены соответственно палеогеографические и литологические области (рис. 1, 2).

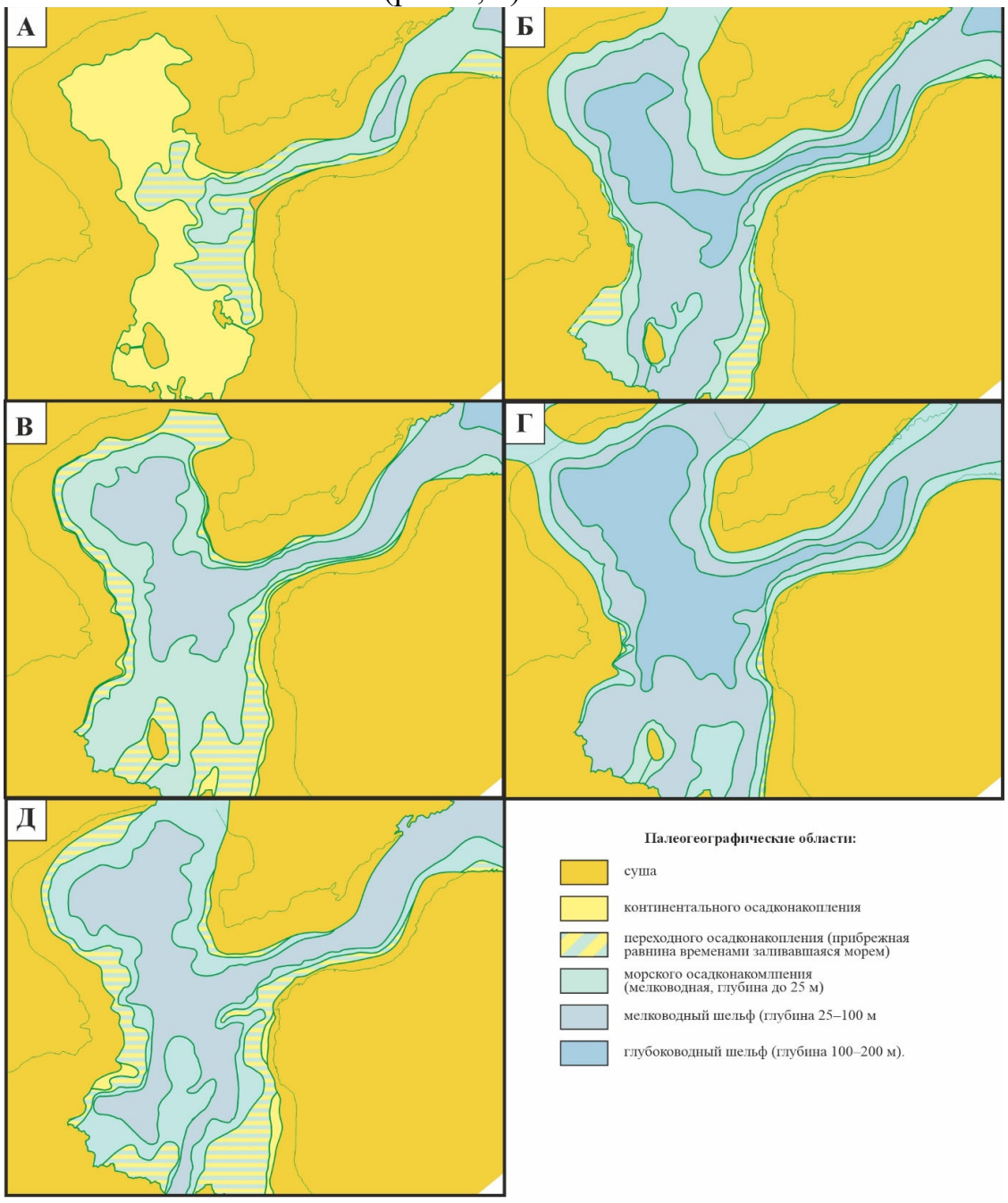


Рис. 1. Палеогеографические карты: А - зимнего, Б - левинского, В - шараповского, Г - китербютского и Д - надояхского времен раннеюрской эпохи сибирского сектора Арктики

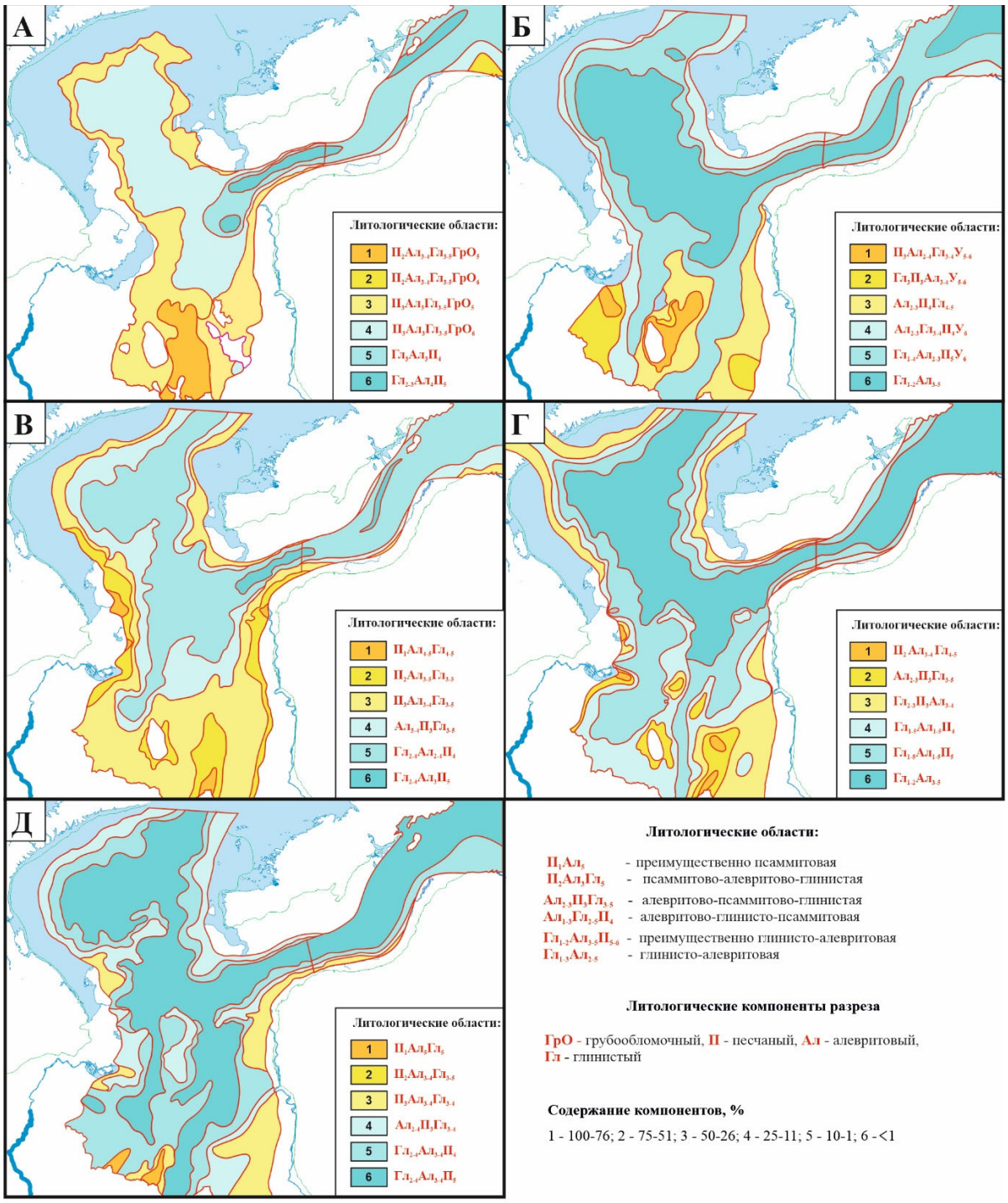


Рис. 2. Карты литологического состава региональных горизонтов: А - зимнего, Б - левинского, В - шараповского, Г - китербютского и Д – надояхского сибирского сектора Арктики.

Результаты отмеченных исследований, базирующиеся на итогах детальной корреляции отложений [4], позволили авторам статьи впервые выполнить фаци-

альное районирование нижнеюрских нефтегазоносных отложений сибирского сектора Арктики.

Фациальное районирование нижнеюрских отложений

На территории рассматриваемого региона в зависимости от стратиграфической полноты, особенностям литологического состава, строения и условиям формирования нижнеюрских отложений выделены три фациальные области: Обь-Тазовская, Лено-Енисейская и Ямало-Карская, каждая из которых, в свою очередь, подразделяется на несколько фациальных районов (рис.3). Ниже приведена их краткая характеристика.

Обь-Тазовская фациальная область включает наиболее изученную южную часть территории исследуемого региона. Она характеризуется наиболее песчаными разрезами нижнеюрских отложений, образованных преимущественно в условиях мелководного шельфа и мелководья, а в зимнее время – в условиях континентального осадконакопления. Для этой фациальной области также характерны большое разнообразие литологического состава, строения отложений и условий их образования. В зависимости от стратиграфического объема рассматриваемых отложений, литологического состава и условий образований на территории этой области выделяются девять фациальных районов: Уренгойский, Губкинский, Надымский, Полуйский, Приуральский, Мангазейский, Туруханский, Часельский и Приенисейский (см. рис. 3).

Уренгойский фациальный район включает обширную центральную часть рассматриваемого региона, где обычно представлен алевролито-глинисто-песчаными отложениями, образованными преимущественно в условиях мелководья и мелководного шельфа. Исключение составляют лишь отложения зимнего горизонта, залегающего в подошве нижней юры, которые сложены преимущественно песчаниками и алевролитами, образованными в континентальных условиях осадконакопления.

Губкинский фациальный район расположен юго-западе Уренгойского. На его территории нижнеюрские отложения имеют весьма ограниченное распространение, причем лишь образованиями надояхского горизонта. Сложены они в основном песчаниками и алевролитами, сформировавшимися в прибрежно-морских и континентальных условиях.

Надымский фациальный район расположен западнее Уренгойского. На его территории рассматриваемые отложения сложенные преимущественно глинисто-алевролитовыми породами, сформировались в условиях мелководного шельфа.

Полуйский фациальный район находится западнее выше описанного, где простирается в виде субмеридиональной полосы. На его территории разрез сложен алевролитами, глинами и песчаниками, образованных в зонах мелководья и мелководного шельфа.

Приуральский фациальный район расположен в окрайнной западной части рассматриваемой фациальной области. Сложен преимущественно алевролито-

песчаными отложениями, которые образовались преимущественно в континентальных условиях.

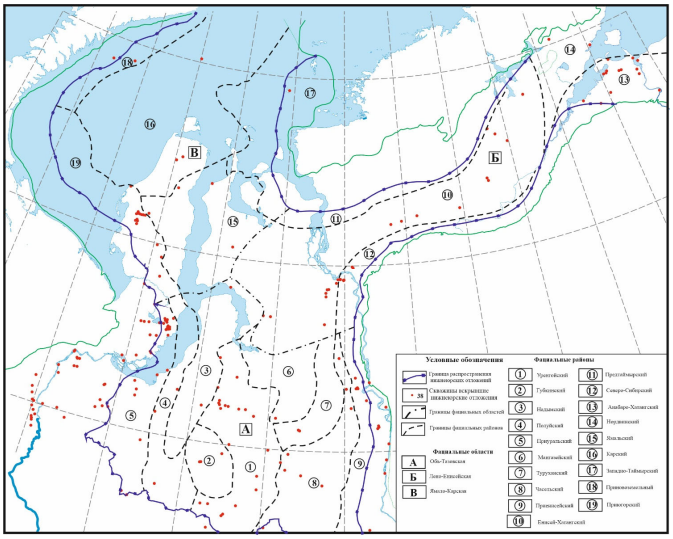


Рис. 3. Схема фациального районирования нижнеюрских отложений сибирского сектора Арктики.

Мангазейский фациальный район расположен в северо-восточной части рассматриваемой области. На его территории нижнеюрские отложения представлены преимущественно глинами, аргиллитами и алевролитами, сформировавшихся преимущественно в условиях мелководного шельфа.

Туруханский фациальный район ограничивает с запада выше отмеченный район. Нижнеюрские отложения на его территории сложены аргиллитами, алевролитами и песчаниками, образованных в условиях мелководья и мелководного шельфа.

Часельский фациальный район включает большую часть востока рассматриваемой области и представлен преимущественно песчаниками и алевролитами, сформировавшихся в условиях континентального осадконакопления.

Приенисейский фациальный район расположен в окраине восточной части Обь-Тазовской области, где представлен только отложениями верхней части нижнеюрских отложений – китербютским и надояхским горизонтами. Представлен преимущественно песчаниками и алевролитами, сформировавшимися в континентальных условиях.

Лено-Енисейская фациальная область

Лено-Енисейская фациальная область включает одноименный региональный прогиб и смежные с ним участки Западной Сибири и Анабаро-Хатангской седловины. Эта область характеризуется низкой и неравномерной степенью изученности бурением, весьма сложным строением и наибольшей степенью погружения нижнеюрских образований. Она характеризуется почти повсеместным распространением всего рассматриваемого стратиграфического разреза, представленного в основном алевролито-глинистыми отложениями. Только в краевых участках фациальной области, примыкающих к Таймыру и Сибирской плат-

форме, а также на ее востоке прогнозируется сокращение стратиграфического объема и опесчанивание разреза.

В зависимости от стратиграфического объема исследуемых отложений, их литологического состава, строения и условий формирования на территории рассматриваемой фациальной области выделяются пять районов: Енисей-Хатангский, Предтаймырский, Северо-Сибирский, Анабаро-Хатангский и Нордвикский.

Енисей-Хатангский район включает центральную наиболее прогнутую часть области и смежную территорию Западной Сибири, на территории которых прогнозируется распространение всего разреза нижнеюрских отложений. Состав его в западной части района в основном алевролито-глинистый. Лишь в отложениях зимнего, шараповского и надояхского горизонтов в отмеченных разрезах имеются прослои песчаников и алевролитов. В восточном направлении разрез постепенно глинизируется и на крайнем его востоке весь разрез нижней юры имеет алевролито-глинистый состав. Глубины залегания подошвы нижнеюрских отложений, прогнозируемые по геофизическим данным, значительно разнятся у разных исследователей. На территории Енисей-Хатангского прогиба они изменяются от 10-12 до 20 км, в пределах Западно-Сибирского участка – 7-10 км.

Предтаймырский и Северо-Сибирский фациальные районы распространены в виде узких полос вдоль соответственно Таймырской складчатой области и Сибирской платформы. Они практически не изучены бурением. На их территории прогнозируются сходный состав, строение и условия формирования нижнеюрских отложений. В окраинных участках районов снизу-вверх по разрезу стратиграфический объем уменьшается, а его состав по-видимому, относительно постепенно опесчанивается. В этом же направлении предполагается стратиграфическое выклинивание отложений снизу-вверх по разрезу.

Анабаро-Хатангский район включает северную и центральную части одноименной седловины и характеризуется низкой степенью изученности. Его характеристика приведена по материалам двух скважин: Тулай-Кирякской скв.1 и Анабаро-Хатангской скв. 3 и нескольких обнажений: Восточный Таймыр, полуостров Юрюнг-Тумус и других. Скважинами, расположенными в северной части района, вскрыт песчано-алевролито-глинистый тип разреза нижней юры, толщиной 300-500 м.

В *Нордвикском фациальном районе*, расположенном в южной части Анабаро-Хатангской седловины, отложения изучены только в обнажениях (р. Анабар, западный берег Анабарского залива и другие). Нижнеюрские отложения на его территории характеризуются более песчаным составом, чем в Анабаро-Хатангском районе.

Ямало-Карская фациальная область расположена в северной части Западно-Сибирской плиты, включающей Ямальский район и Карское море. Она характеризуется низкой степенью изученности бурением нижнеюрских отложений, пользующихся почти повсеместным распространением. Для нее характерны преимущественно алеврито-глинистые разрезы рассматриваемых отложений, образовавшихся преимущественно в условиях глубоководного и мелководного

шельфа. Исключение составляют лишь широко развитые окраины участки области, в которых в прибрежно-морских и континентальных условиях, по-видимому образованы преимущественно песчано-алевритовые отложения.

В этой области выделены пять фациальных районов: Ямальский, Карский, Западно-Таймырский, Приновоземельный и Приюгорский.

Ямальский-фациальный район включает южную, наиболее изученную бурением часть области. На ее территории, снизу-вверх по разрезу увеличивается степень мористости отложений. Образования зимнего горизонта, образованные в континентальных и прибрежно-морских условиях, представлены в основном гравелитами, песчаниками и алевролитами, а надояхского - соответственно, в морских условиях, сложенных в основном глинами и алевролитами. При этом следует отметить, что восточная часть района характеризуется более песчаным материалом, чем западная.

Карский фациальный район охватывает большую часть территории одноименного моря и характеризуется весьма низкой степенью изученности бурением. На ее территории пробурено несколько скважин, лишь одна из них (Ленинградская скв. 1), расположенная в крайней северной части моря, вскрыла песчано-алевролито-глинистые отложения шараповского, китербютского и надояхского региональных горизонтов нижней юры. На территории этого фациального района прогнозируются примерно такие же по вещественному составу и условиям формирования отложения как Ямальского.

Западно-Таймырский, Приновоземельный и *Приюгорский фациальные районывключают* краевые части области. На их территориях в континентальных и прибрежно-морских условиях формировались преимущественно песчано-алевролитовые отложения.

Заключение

Нижнеюрские нефтегазоносные отложения сибирского сектора Арктики обычно залегают на больших глубинах и характеризуются весьма низкой степенью изученности, особенно бурением. До настоящего времени автономное фациальное районирование этих отложений не разработано. В настоящей статье впервые изложено их фациальное районирование на всей территории рассматриваемого региона. Оно разработано не традиционным методом. Исходной информацией для его подготовки являются раннее опубликованные авторами настоящей статьи литолого-палеогеографические карты, составленные на уровне пяти стратиграфических горизонтов, пользующиеся распространением на всей территории исследуемого региона. На каждой из них выделены литологические и палеогеографические области. Анализ этих карт позволил авторам статьи составить литолого-палеогеографические карты нижнеюрских отложений в целом. Они явились основой для разработки автономного фациального районирования нижнеюрских отложений рассматриваемого региона.

Согласно разработанного фациального районирования нижнеюрских отложений на территории рассматриваемого региона выделяются три фациальные области: Объ-Тазовская, Лено-Енисейская и Ямало-Карская, каждая из которых

в свою очередь, подразделяется соответственно на девять, пять и пять фациальных районов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы № FWZZ-2022-0009 Государственной программы фундаментальных научных исследований

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. Н.: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. 480 с.

2. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири, Новосибирск, 2003 г. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. – 114 с. 83

3. Шемин Г.Г. и др. Условия образования юрских отложений севера Западно-Сибирской нефтегазовой провинции. Атлас литолого-палеогеографических карт юрского периода севера Западной Сибири и акватории Карского моря в масштабе 1: 2000 000 и объяснительная записка // Атлас литолого-палеогеографических карт юрского периода севера Западной Сибири и акватории Карского моря. Новосибирск: СО РАН. – 2015.

4. Шемин Г.Г., Бейзель А.Л., Нехаев А.Ю. Высокоразрешающая корреляция нефтегазоносных отложений юры северных районов западной Сибири // Горные ведомости, 2012, №1, С. 60-83.

© П. А. Глазырин, Г. Г. Шемин, В. В. Сапьяник, Е. В. Деев, 2025

УДК 553.98
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-42-46

С. А. Язикова[1]✉

Оценка плотности эффективного палеотеплового потока северо-восточных районов Западно-Сибирского бассейна

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

Аннотация. На исследуемой территории построены одномерные модели осадочного чехла с уточнением литологичского состава. Выполнена калибровка тепловой истории в 15 скважинах и определены величины плотности эффективного палеотеплового потока в основании осадочного чехла. Интервал изменения значений составляет от 38 до 53 мВт/м^2.

Ключевые слова: палеотепловой поток, Западно-Сибирский бассейн, бассейновое моделирование

S. A. Yazikova[1]✉

Estimation of the effective paleo heat flow density of the northern areas of the West Siberian basin

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

Abstract. One-dimensional models of the sedimentary cover with refined lithological composition were constructed for the study area. Thermal history calibration was performed in 15 wells, and the values of the effective paleo heat flow density at the base of the sedimentary cover were determined. The values range from 38 to 53 mW/m².

Keywords: paleo heat flow, West Siberian Basin, basin modeling

Введение

Тепловой режим осадочных бассейнов является одним из ключевых факторов, контролирующих процессы генерации углеводородов. Он также служит основой для бассейнового моделирования при прогнозировании и поиске месторождений [1,12]. Западно-Сибирский осадочный бассейн представляет собой один из крупнейших нефтегазоносных бассейнов мира и остается объектом пристального внимания исследователей. Особый интерес представляют северные районы бассейна, где сложное сочетание факторов, включая увеличенную мощность осадочного чехла и особенности палеоклиматических условий [5,6], формируют уникальный тепловой режим, требующий детального изучения.

Наиболее полно современный тепловой поток на территории Западной Сибири исследован в работах [2,3,8,9]. Однако для расчета бассейновых моделей необходимо учитывать палеотепловой поток, количественная оценка которого

на северо-востоке Западно-Сибирского бассейна проводилась лишь фрагментарно.

В данной работе проводится оценка плотности эффективного палеотеплового потока в основании осадочного чехла для северных районов Западно-Сибирского бассейна на основе реконструкций температурной истории в разрезах 15 скважин.

Под плотностью эффективного палеотеплового потока авторы понимают количество тепловой энергии, проходящей через единицу поверхности основания осадочного чехла в единицу времени в разные моменты геологической истории (далее по тексту - тепловой поток).

Методы и материалы

Исследование включает в себя несколько этапов:

1) сбор и анализ геолого-геофизических данных по скважинам;
2) интерпретацию каротажа с целью уточнения литологии разреза;
3) реконструкцию теплового потока посредством 1D моделирования.

Для определения теплового потока были выбраны наиболее глубокие скважины, содержащие достаточное количество геолого-геохимический информации (рис.1)

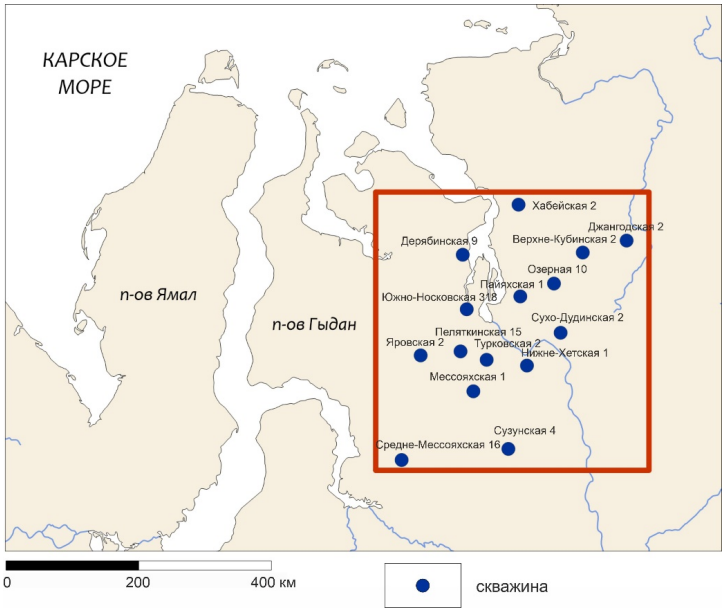


Рис. 1 Расположение скважин

Литология осадочного чехла определена по данным геофизических исследований скважин с использованием программного комплекса GISWell. Теплопроводность, плотность, содержание радиоактивных элементов, реологические константы, определяющие законы уплотнения, и эмпирические зависимости изменения пористости с глубиной принимались на основании обобщении петро-

физических данных для разных литологических типов Западно-Сибирского бассейна.

Для расчета плотности теплового потока в пакетах бассейнового моделирования необходимо задание граничных условий. Контроль корректности построений выполняется при калибровки расчетной тепловой модели фактическими данными (отражательная спобность витринита, пластовые температуры). В качестве верхней границы были заданы средние значения среднегодовой температуры на границе вода-осадок (SWIT – Surface Water Interface Temperature) [11]. Нижней границей модели являлась плотность теплового потока на нижней границе литосферы. В программном комплексе Genex были построены одномерные модели осадочного чехла территории исследования. Тепловой поток на нижней границе принимался постоянным по времени, поскольку начиная с юрского периода, глубинный тепловой поток характеризуется квазистационарным состоянием [3, 7]. Калибровка проводилась по значениям отражательной способности витринита (R_o) [10]. В результате вычислительных экспериментов было получено удовлетворительное соответствие рассчетных значений (модель Easy%R_o [13]) и фактических замеров R_o (рис. 2)

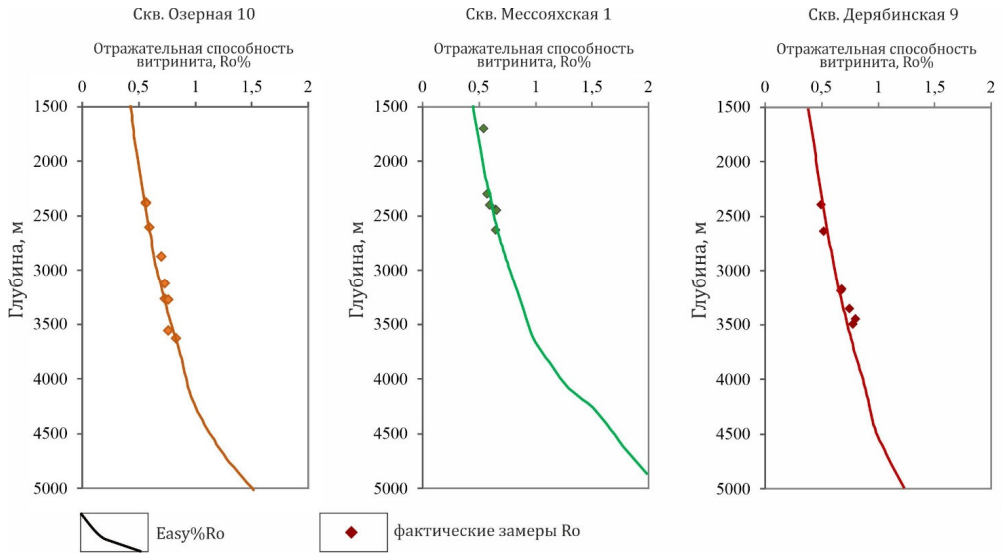


Рис. 2 Пример калибровки теплового потока

Результаты

В результате моделирования определена плотность теплового потока в 15 скважинах (рис. 3). В пределах изучаемой территории значения варьируют от 38 до 53 мВт/м². Средняя величина теплового потока составляет 46 мВт/м^2. Наблюдается снижение значений в скважинах, расположенных в прибортовой части осадочного чехла (Хабейская 2, Дерябинская 9, Сузунская 4). Повышенные значения теплового потока (выше 50 мВт/м^2) достигаются в скважинах Мессояхская 1, Турковская 2, Сухо-Дудинская 2, Нижне-Хетская 1, Джангодская 2. Несущественные колебания величины теплового потока в основании осадочного чехла в мезозойско-кайнозойскую эру связаны с историей погружения осадочных

толщ. В таблице 1 приведены значения рассчетного эффективного палеотеплового потока, аппроксимированного на возраст осадочного чехла. Результаты работы удовлетворительно соотносятся с ранее опубликованными данными [4,9].

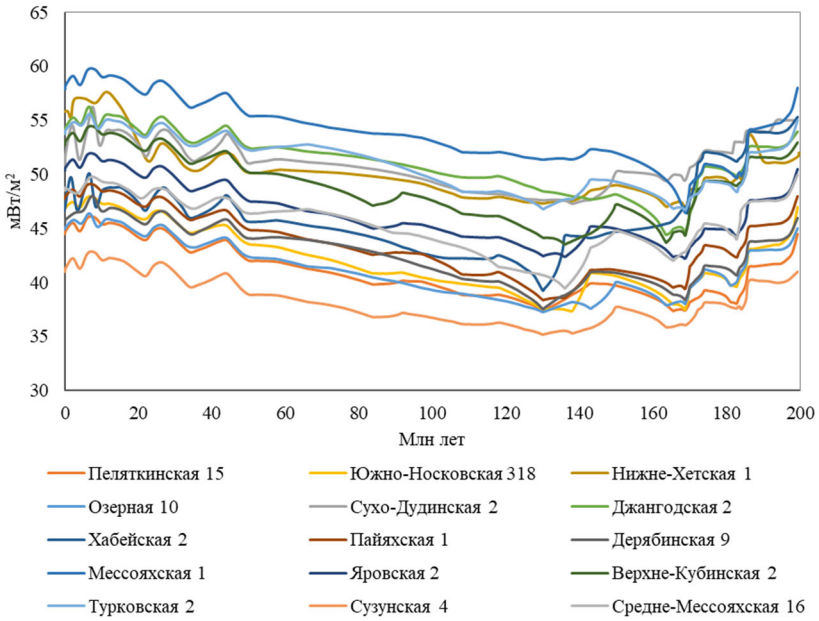


Рис. 3 График изменения плотности эффективного палеотеплового потока в осадочном чехле

Таблица 1

Средняя плотность эффективного палеотеплового потока в скважинах

Скважина	№	Плотность эффективного палеотеплового потока, мВт/м^2
Сухо-Дудинская	2	50,6
Нижне-Хетская	1	50,4
Джангодская	2	50,0
Хабейская	2	42,5
Пайяхская	1	42,3
Дерябинская	9	41,5
Мессояхская	1	53,1
Яровская	2	45,4
Верхне-Кубинская	2	47,7
Турковская	2	50,1
Сузунская	4	38,6
Средне-Мессояхская	16	43,9
Южно-Носковская	318	41,0
Озерная	10	40,2
Пеляткинская	15	40,1

Работа выполнена в рамках государственной программы FWZZ-2022-0007 «Цифровая модель Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, седиментогенез и литостратиграфия, закономерности размещения нефтяных и газовых месторождений, детализированная количественная оценка ресурсов углеводородов в традиционных и нетрадиционных скоплениях, как основа прогноза развития нефтегазового комплекса».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галушкин Ю. И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтеносности. — Москва: Научный мир, 2007. — 456 с.

2. Дучков А. Д., Соколова Л. С. Температура литосферы Сибири по геотермическим данным // Геология и геофизика. — 1985. — № 12. — С. 60–71.

3. Дучков А. Д., Балобаев В. Т., Лысак С. В., Соколова Л. С., Девяткин В. Н., Володько Б. В., Левченко А. Н. Тепловой поток Сибири // Геология и геофизика. — 1982. — № 1. — С. 42–51.

4. 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. — 2009–2012. — URL: http://maps.nrcgit.ru/geoterm/ (дата обращения: 10.04.2025).

5. Искоркина А. А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. — 2016. — Т. 327. — № 8. — С. 59-73.

6. 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 нафтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54. — № 8. — С. 1179–1226.

7. Курчиков А. Р. Геотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 11–12. — С. 1846–1853.

8. Курчиков А. Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. — Москва: Недра, 1992. — 231 с.

9. Курчиков А. Р., Ставицкий Б. П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. — Москва: Недра, 1987. — 134 с.

10. Фомин А. Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских (юра, триас) и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. — Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. — 331 с.

11. Beardsmore G. R., Cull J. P. Crustal Heat Flow. — Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

12. Hantschel T., Kauerauf A. I. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. — Berlin: Springer, 2009. — 476 p.

13. Sweeney J. J., Burnham A. K. Evolution of a sample model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics // AAPG Bulletin. — 1990. — Vol. 74. — № 10. — P. 1559–1570.

© С. А. Язикова, 2025

УДК 628.1.033
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-47-52

Н. И. Яндола[1]✉

Мышьяк в природных водах восточной части Новосибирской области

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

Аннотация. Проблема загрязнения подземных вод мышьяком является общемировой. Его неорганическая форма является крайне токсичной и может привести к серьезным негативным последствиям для здоровья населения. Работа посвящена исследованию распределения мышьяка в природных водах правобережья р. Оби и оценке рисков употребления этих вод в качестве питьевых. Лабораторные исследования проводились методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Оценка риска для здоровья населения определялась с помощью коэффициентов рисков развития неканцерогенных (HQ) и канцерогенных эффектов (CR). Концентрации мышьяка в природных водах правого берега реки Оби изменяются в диапазоне от $2 \cdot 10^{-5}$ до 0,27 мг/дм^3 со средним значением 0,08 мг/дм3 . В 45% проб обнаружено превышение ПДК. Рассчитанные значения коэффициента опасности для перорального воздействия (HQ) изменяются от 0,0011 до 18,12 для женщин и от 0,001 до 15 для мужчин. Значения коэффициента выше 1 зафиксированы в 67 (14%) из 482 проб. Длительное употребление этих вод приводит к развитию заболеваний кожи, иммунной, сердечно-сосудистой, эндокринной, центральной нервной систем и желудочно-кишечного тракта. Значения коэффициента канцерогенного риска (CR) составляют от $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ для женщин и от $2{,}9 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ для мужчин. В 21 пробе значения превышают 10^{-3}, в 297 пробах значение коэффициента превышает 10^{-7}, что свидетельствует о значительных рисках для здоровья и возможном развитии онкологических заболеваний. Результаты выполненных исследований подчеркивают острую необходимость принятия управленческих решений на государственном уровне по снижению загрязнения мышьяком водных ресурсов региона.

Ключевые слова: гидрогеохимия, мышьяк, канцерогенный риск, коэффициент опасности, онкологические заболевания, Новосибирская область

N. I. Yandola[1]✉

Arsenic in natural waters of the eastern part of the Novosibirsk Region

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

Abstract. The issue of arsenic contamination in groundwater is a global concern. Its inorganic form is highly toxic and can lead to severe adverse health effects for populations. This study investigates the distribution of arsenic concentrations in natural waters on the right bank of the Ob River and evaluates the risks associated with using these waters for drinking purposes. Laboratory analyses were conducted using titration, ion chromatography, and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Water Chemistry Laboratory of the Engineering School for Natural Resources

at the Tomsk National Research Polytechnic University. Health risks were assessed using hazard quotients (HQ) for non-carcinogenic effects and cancer risk coefficients (CR) for carcinogenic effects. Arsenic concentrations in natural waters of the Ob River's right bank ranged from $2 \cdot 10^{-5}$ to 0.27 mg/L, with an average of 0.08 mg/L. Exceedances of the maximum permissible concentration (MPC) were detected in 45% samples. Calculated oral hazard quotients (HQ) ranged from 0.0011 to 18.12 for women and 0.001 to 15 for men. HQ values above 1, indicating significant risk, were recorded in 67 (14%) out of 482 samples. Long-term consumption of these waters may lead to diseases of the skin, immune, cardiovascular, endocrine, central nervous systems, and gastrointestinal tract. Cancer risk coefficients (CR) ranged from $3.5 \cdot 10^{-7}$ to $6 \cdot 10^{-3}$ for women and $2.9 \cdot 10^{-7}$ to $5 \cdot 10^{-3}$ for men. CR values exceeded 10^{-3} in 21 samples and 10^{-7} in 297 samples, highlighting substantial health risks and potential cancer development. The findings underscore the urgent need for state-level interventions to reduce arsenic contamination.

Keywords: groundwater, arsenic, cancer risk, hazard quotient, oncological diseases, Novosibirsk region

Введение

По данным ВОЗ, как минимум 140 миллионов человек в 70 странах мира употребляют воду, содержащую мышьяк в концентрациях, превышающих предельно допустимую (10 мкг/л), и Россия не является исключением [1-3]. Его природная неорганическая форма высокотоксична, она является естественным загрязнителем окружающей среды и концентрируется в подземных водах. Это связано с процессами взаимодействия в системе «вода-порода» и благоприятными физическими и геохимическими условиями водоносных горизонтов для его аккумуляции [4]. Настоящая работа опирается на уже накопленный в ходе предыдущих исследований опыт по изучению взаимодействия вод и вмещающих горных пород [5-9].

Регулярное употребление воды, содержащей мышьяк, увеличивает вероятность развития сердечно-сосудистых, неврологических и репродуктивных нарушений [10-11], сахарного диабета [12], поражений печени, легких, кровеносной системы, а также онкологических заболеваний [10-11].

Территория исследований включает восточную часть Новосибирской области. В нее входит сам город Новосибирск, а также Новосибирский, Искитимский, Черепановский, Маслянинский, Сузунский, Болотнинский и Мошковский районы. В геологическом строении региона принимают участие отложения палеогена и неогена, которые перекрывают различные по составу и генезису породы складчатого фундамента раннедевонско-раннетриасового возраста. Также, широкое распространение имеют гранитоиды Приобского и Барлакского комплекса, прорывающие дислоцированные вулканогенно-осадочные толщи. В ландшафтном отношении – это возвышенность Сокур, Буготакские сопки и Присалаирская предгорная равнина.

Методы и материалы

Материалами для настоящего исследования послужили результаты химико-аналитических исследований 482 проб вод из скважин, источников и колодцев, которые используются местными жителями в питьевых целях. Пробы были отобраны в ходе экспедиционных работ 2022-2024 гг. Непосредственно

на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O2, с помощью оборудования (мультипараметровый измеритель pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметр Hanna HI98198) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Последующее лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ.

В ходе исследования была определена оценка риска для здоровья населения согласно Руководству по оценке риска для здоровья населения при воздействии химический веществ, загрязняющих окружающую среду [13]. Расчет индивидуального канцерогенного риска (CR) для мужчин (м) и женщин (ж) производился по формуле:

$$\mathrm{CR}_{As} = \mathrm{LADD} \cdot \mathrm{SFo}$$

где LADD – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·сут.); SFo – фактор наклона (мг/(кг·сут.))$^{-1}$, характеризующий степень увеличения вероятности развития рака при воздействии канцерогена. Фактор наклона составляет 1,5 (мг/(кг·сут.))$^{-1}$ для мышьяка.

Риск развития неканцерогенных эффектов (HQ) для мужчин (м) и женщин (ж) производился по формуле:

$$\mathrm{HQ}_{As} = \mathrm{LADD}/\ \mathrm{RfD}$$

где RfD – референтная (безопасная) суточная доза. Для мышьяка RfD составляет 0,0003 мг/(кг·сут.).

Среднесуточная доза в течение жизни (LADD) рассчитывалась по формуле:

$$\mathrm{LADD} = (\mathrm{C} \cdot \mathrm{WI} \cdot \mathrm{EF} \cdot \mathrm{ED})/(\mathrm{BW} \cdot \mathrm{AT} \cdot 365)$$

где C – концентрация вещества в воде, мг/дм^3; WI – потребление воды, л/день, принимаемое как 2 л/день; EF – частота воздействия, дней/год, принимаемая как 350 дней в год; ED – продолжительность воздействия, лет, принимая как 30 лет; BW – масса тела, кг, принимаемая как 70 кг для мужчин и 58 кг для женщин; AT – период усреднения экспозиции, принимаемый за 30 лет; 365 – число дней в году.

Результаты и обсуждение

Диапазон изменения концентраций мышьяка в природных водах исследуемого региона составляет от $2 \cdot 10^{-5}$ до 0,27 мг/дм^3 со средним и фоновым значением в 0,08 мг/дм^3 и 0,00073 мг/дм^3 соответственно (рис. 1). В 218 пробах обнаружено превышение ПДК по мышьяку, составляющую 0,01 мг/дм^3 [14]. Самые высокие концентрации зафиксированы в поселках и садовых товариществах Советского района города Новосибирска, где они варьируют в пределах от 0,012 до 0,27 мг/дм^3.

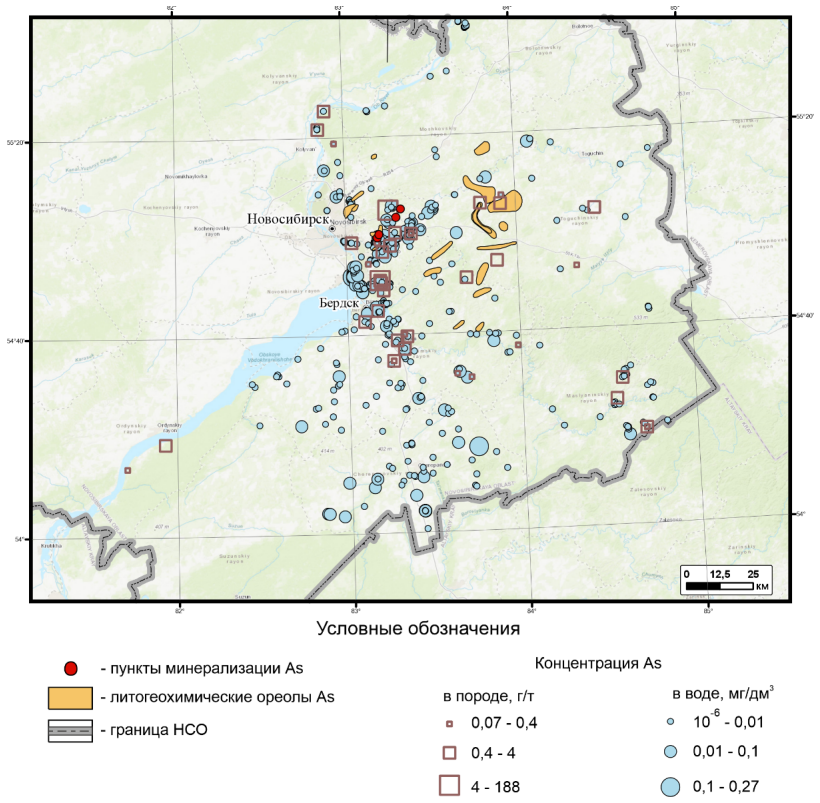


Рис. 1. Обзорная карта района исследований

Содержание мышьяка во вмещающих горных породах изменяется от 0,07 до 188,8 г/т (кларковое число в верхнем слое континентальной коры составляет 4,8 г/т [15]). Наибольшие концентрации (более 10 г/т) выявлены в глинистых сланцах юргинской и пачинской свит, а также в гранитоидах барлакского комплекса. Также на рис. 1 указаны пункты минерализации (точки, где обнаружены выходы рудных минералов) и литогеохимические ареолы (зоны, обогащенные химическим элементом) мышьяка.

Рассчитанные значения коэффициента опасности для перорального воздействия (HQ) изменяются от 0,0011 до 18,12 для женщин и от 0,001 до 15 для мужчин (рис. 2). Значения коэффициента выше 1 зафиксированы в 67 из 482 проб, сохранение уровня поступления мышьяка с водой в организм может привести к развитию заболеваний кожи, иммунной, сердечно-сосудистой, эндокринной, центральной нервной системы и желудочно-кишечного тракта.

Значения коэффициента канцерогенного риска (CR) составляют от $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ для женщин и от $2{,}9 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ для мужчин. В 21 пробе из Советского района г. Новосибирска и Новосибирского, Черепановского, Искитимского и Тогучинского районов Новосибирской области установленные значения превышают 10^{-3}, в 297 пробах значение коэффициента превышает 10^{-7}. При условии длительного употребления этих вод формируются высокие уровни риска развития онкологических заболеваний среди населения и поэтому они могут быть признаны непригодными для целей питьевого водоснабжения.

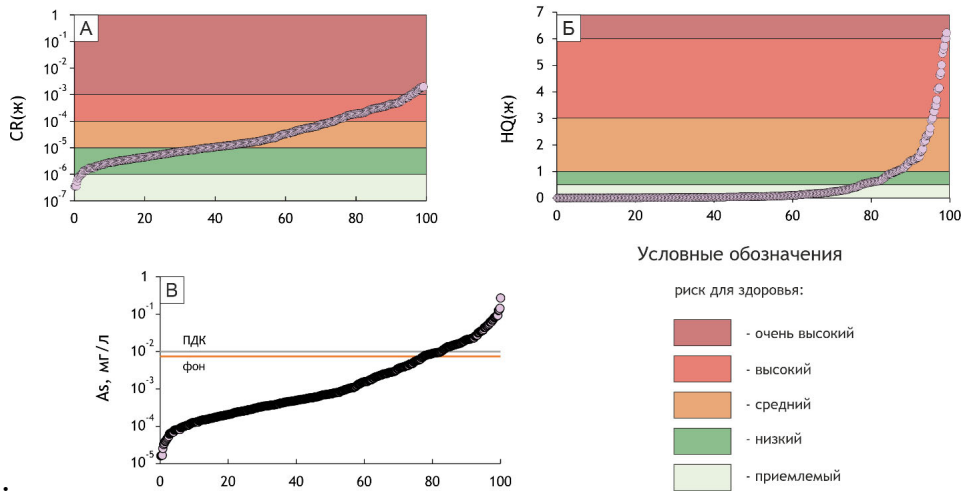


Рис. 2. А-В: Кумулятивные кривые для коэффициентов канцерогенного (А) и неканцерогенного (Б) рисков и содержания мышьяка в питьевых водах (В)

Заключение

Таким образом, в 20% изученных проб изучаемого региона наблюдаются превышения предельно допустимой концентрации мышьяка, которые в единичных случаях могут достигать до 27 раз. Оценка риска указывает на возможные негативные последствия для здоровья населения при регулярном употреблении воды имеющегося качества. На действующих скважинах с ненадлежащим качеством вод рекомендуется применять системы обратного осмоса и нанофильтрации в сочетании с непрерывным мониторингом качества воды. Результаты подтверждают необходимость детального изучения геохимических особенностей территории исследования, механизмов миграции мышьяка, его источников и процессов взаимодействия с другими токсичными металлами.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 25-17-20024 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Podgorski J. Global threat of arsenic in groundwater / J. Podgorski, M. Berg // Science. – 2020. – Vol. 368. – № 6493. – P. 845–850. DOI: 10.1126/science.aba1510.

2. Абдулмуталимова Т.О. Мышьяк в питьевых артезианских водах Северного Дагестана и риски здоровью населения / Т.О. Абдулмуталимова, Б.А. Ревич, И.М. Газалиев // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 1. – С. 37–40.

3. Максимова А.А. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области / А.А. Максимова, А.В. Черных, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Никитенков, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 17–26.

4. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. – Lyon, 2004.

5. Новиков Д.А. Радиоактивность водовмещающих пород Обь-Зайсанской складчатой области / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, Л.Г. Вакуленко, Сухоруков В.П., Я.В. Фомина, Н.И. Яндола, А.А. Максимова, А.В. Черных, А.Ф. Сухорукова, А.С. Деркачев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2024. – № 1(57). – С. 110–120. DOI: 10.20403/2078-0575-2024-1-110-120.

6. Новиков Д.А. Распределение урана в системе вода-горная порода в пределах Обь-Зайсанской складчатой области / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28. – № 12. – С. 34–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-12-34-39.

7. Новиков Д.А. Распределение химических элементов в системе вода-порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, А.А. Максимова, О.Д. Николенко, А.С. Деркачев, Я.В. Фомина (Садыкова), А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 201–214.

8. Novikov D.A. Role of the Water–Rock System in the Formation of the Composition of Radon Water of the Tulinskoe Field (Novosibirsk) / D.A. Novikov, A.N. Pyryaev, V.P. Sukhorukov, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, N.A. Medeshova // Russian Geology and Geophysics. – 2024. – Vol. 65. – № 12. – P. 1503–1518. DOI: https://doi.org/10.2113/RGG20244716.

9. Sukhorukov V.P. Composition and mineralogy of granitoids of the Ob-Zaisan folded region in the context of the prediction of groundwater radioactivity / V.P. Sukhorukov, A.F. Sukhorukova, D.A. Novikov, A.S. Derkachev // Mining Science and Technology (Russia). – 2024. – Vol. 9. – № 2. – P. 105–115. DOI: https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-208.

10. Arsenic (addendum) safety evaluation of certain contaminants in food // WHO Food additives series: 63. FAO JECFA Monographs 8. – Geneva: World Health Organization, 2011. – P. 153–316.

11. Arcella D. Chronic dietary exposure to inorganic arsenic / D. Arcella, C. Cascio, J.A.G. Ruiz // EFSA J. – 2021. – Vol. 19. – № 1. – Art. 6380. DOI: https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6380.

12. Liu S. Arsenic induces diabetic effects through beta-cell dysfunction and increased gluconeogenesis in mice / S. Liu, X. Guo, B. Wu, H. Yu, X. Zhang, M. Li // Sci. Rep. – 2014. – Vol. 4. – Art. 6894. DOI: https://doi.org/10.1038/srep06894.

13. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – Введ. 2004.

14. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum / World Health Organization. – Geneva: WHO, 2017. – 631 p.

15. Rudnick R.L. Composition of the Continental Crust / R.L. Rudnick, S. Gao // Treatise on Geochemistry. – 2003. – Vol. 3. – P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4

© Н. И. Яндола, 2025

УДК 550.379
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-53-59

С. П. Мишенина[1]✉, С. Б. Бортникова[1], Ю. А. Манштейн[2], Г. Л. Панин[1]

Комплексные геофизико-геохимические исследования термального поля кальдеры вулкана Узон, Камчатка

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]ООО «Балтсибгео», г. Калининград, Российская Федерация
e-mail: KokhanovaSP@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе описаны комплексные геофизико-геохимические исследования на термальном поле в кальдере вулкана Узон. При сопоставлении результатов электротомографии, частотного зондирования и геохимического анализа обнаружена структурированная зональность термального поля, подтверждена зависимость между минерализацией и УЭС вещества. Описанный в настоящей работе комплекс методик исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения и повышения эффективности поисков гидротермальных месторождений, мониторинга эксплуатации геотермальных электростанций. Результатом работы является визуализация приповерхностного пространства термального поля до глубины 10 м, позволяющая наблюдать контраст между высокопроводящими термопроявлениями и зонами относительно повышенного сопротивления, представляющими собой гидротермально изменённые породы. Визуализированная геоэлектрическая зональность определяется преимущественно соотношением жидкости к твёрдому веществу. В зависимости от количества флюида и его путей движения из глубинного источника к поверхности меняется его состав, кислотность, общий уровень минерализации. От уровня взаимодействия флюида с вмещающими породами меняется его состав и степень изменения пород, давая контрастность геохимических параметров рядом с расположенным термопроявлениям.

Ключевые слова: электротомография, грязевые котлы, частотное зондирование, активные вулканы

S. P. Mishenina[1]✉, S. B. Bortnikova[1], Yu. A. Manshtein[2], G. L. Panin[1]

Complex geophysical and geochemical studies of the thermal fieldat the Uzon volcano caldera, Kamchatka

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]LLC «Baltsibgeo», Kaliningrad, Russian Federation
e-mail: KokhanovaSP@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper describes complex geophysical and geochemical studies of the thermal field at the Uzon volcano caldera. When comparing the results of electrical resistivity tomography, frequency sounding and geochemical analysis, a structured zoning of the thermal field was detected, and the relationship between mineralization and resistivity of the substance was confirmed. The set of methods for studying the subsurface space by non-destructive methods described in this paper can be used to detect and improve the efficiency of prospecting for hydrothermal deposits and monitor the operation of geothermal power plants. The result of the work is visualization of the near-surface space of the thermal field to a depth of 10 m, which allows observing the contrast between highly conductive

thermal manifestations and zones of relatively increased resistance, which are hydrothermally altered rocks. The visualized geoelectric zoning is determined mainly by the water / rock interaction. Depending on the amount of fluid and its movement paths from a deep source to the surface, its composition, acidity, and general level of mineralization changes. The composition and degree of rock alteration change depending on the level of interaction of the fluid with the host rocks, giving a contrast in geochemical parameters to nearby thermal manifestations.

Keywords: electrical resistivity tomography, mud pots, frequency sounding, active volcanoes

Введение

В мировой практике не раз поднимался вопрос о возобновляемых источниках энергии, в частности, геотермальной. Несмотря на значительное количество активных вулканов в России данная тема не столь популярна и изучена [2-4, 11], как за рубежом [6, 7, 9]. Об исследовании источников геотермальной энергии с помощью электротомографии не так много публикаций, но в последние годы электроразведка на термальных полях интересует учёных по всему миру [5, 10]. Однако, остаются недообследованными многие термальные поля для потенциальной разработки недр.

Целью данной работы являлось выявление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки поверхностных гидротерм на термальном поле вулкана Узон. В процессе определена геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства двумя методами: частотным зондированием (ЧЗ) и электротомографией (ЭТ); выполнено геохимическое опробование с последующим химическим анализом жидкости и вещества стенок термопроявлений; выведены и подтверждены зависимости между геохимическими и геофизическими параметрами.

Описанный в настоящей работе комплекс методик исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения и повышения эффективности поисков гидротермальных месторождений, мониторинга эксплуатации геотермальных электростанций.

Методы и материалы

Малоглубинные зондирования выполнены с помощью: ЭТ – Syscal Pro Switch-48 (IRIS Instruments, Франция), ЧЗ – ЭМС (ООО «КБ Электрометрии», Россия). Произведено геохимическое опробование с последующими лабораторными анализами. Также в работе приведены расчёты по формуле Муанфара [8] для выведения количественной связи между геофизическими и геохимическими параметрами среды термальных полей. Формула связывает минерализацию, температуру и удельное электрическое сопротивление:

$$\sigma_w = \left[\left(0.0123 + \frac{3647{,}5}{C_w^{0{,}955}}\right) \times \frac{81{,}77}{T+6{,}77}\right]^{-1}, \quad (1)$$

где C_w – концентрация соли NaCl, ppm; T – температура, ºF; σ_w – электропроводность пластовой воды, См/м.

Схема работ на термальном поле кальдеры Узон приведена на рис. 1.

Рис. 1. Расположение профилей ЭТ (выделены оранжевым) и площадки исследований методом ЧЗ (жёлтым) на термальном поле кальдеры влк. Узон на космоснимке с высоты 600 м

Выполнено 2 профиля ЭТ длиной 48 м с межэлектродным расстоянием 1 м и над ними – 14 параллельных профилей ЧЗ той же длины с расстоянием между профилями 1 м. При этом, площадка ЧЗ проходит непосредственно по профилям ЭТ. Этот объект интересен обилием термальных источников, находящихся на небольшой площадке.

Результаты

Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Растворы котлов кислые, значения pH колеблются от 2.2 до 4.3, Eh варьирует от слабо- до сильноокислительных условий (табл. 1). Воды сульфатного и сульфатно-хлоридного типа.

Таблица 1

Измеренные и расчётные параметры для термальных котлов

Измеренные и расчётные параметры	Уз-1/08	Уз-2/08	Уз-3/08	Уз-4/08	Уз-5/08	Уз-6/08	Уз-7/08	Уз-8/08
pH		2,33	2,5	2,36	2.64	3.62	2.74	2.45
Eh, мВ	442	274	164	350	585	440	255	587
M, г/л	1,3	1,3	1,7	1,1	1,1	1,2	1,4	0,9
M, ppm	1266	1350	1707	1053	1123	1225	1415	923
T, °C	96,7	89,3	66,6	97,7	94	95	96	32,5
T, °F	206	193	152	208	201	203	205	91
σ_w	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,2
$\rho_{рассч}$, Ом·м	1,5	1,5	1,5	1,8	1,8	1,6	1,4	4,5
$\rho_{эт}$, Ом·м	6	6	6	10	12	12	6	10
$\rho_{чз}$, Ом·м	20	6	10	6	4	6	12	4
Измеренные и расчётные параметры	Уз-9/08	Уз-10/08	Уз-11/08	Уз-12/08	Уз-14/08	Уз-15/08	Уз-16/08	Уз-17/08
pH	2,2	2,3	2,36	4,27	3,18	2,36	2,13	2,59
Eh	246	245	238	438		240	496	487
M, г/л	1,5	1,7	1,3	1,2	1,7	0,9	0,9	0,9
M, ppm	1472	1669	1268	1205	1664	935	900	860
T, °C	85,8	88,7	87,1	99,3		78	82	65
T, °F	186	192	189	211	32	172	180	149
σ_w	0,7	0,8	0,6	0,6	0,2	0,4	0,4	0,3
$\rho_{рассч}$, Ом·м	1,5	1,3	1,7	1,6	6,5	2,4	2,4	3,0
$\rho_{эт}$, Ом·м	10	8	10	10	12	8	10	
$\rho_{чз}$, Ом·м	10	8	6	10	8	6	8	
Измеренные и расчётные параметры	Уз-18/08	Уз-20/08	Уз-21/08	Уз-22/08	Уз-23/08	Уз-24/08	Уз-25/08	
pH	2,17	2,01	5,03	2,8	7,38	9,23	2,93	
Eh	224	458	260	337	-36	183	218	
M, г/л	2,0	1,5	0,6	0,6	0,4	0,6	0,4	
M, ppm	2012	1482	561	647	449	578	442	
T, °C	68	70	70	70	70	70	92,7	
T, °F	154	158	158	158	158	158	199	
σ_w	0,8	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	
$\rho_{рассч}$, Ом·м	1,3	1,7	4,3	3,7	5,3	4,2	4,3	

Результаты геофизических исследований

Зондирования разными методами показали неплохую сходимость результатов (рис. 2, табл. 1).

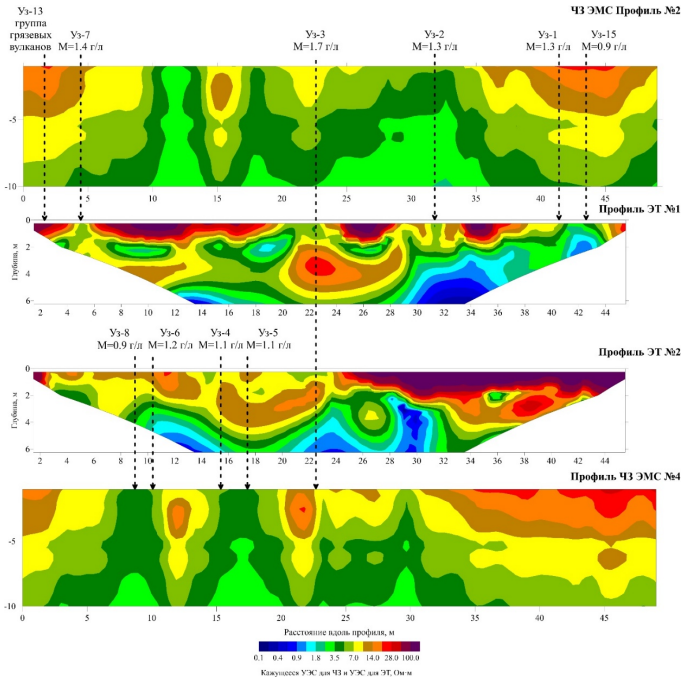


Рис. 2. Профили ЭТ и ЧЗ на термальном поле

Все разрезы приведены к единой шкале, являются высокопроводящими (УЭС ≤ 100 Ом·м). На профиле ЭТ № 1 идентифицируются низкоомные зоны (УЭС~2 Ом·м), прослеживающиеся до поверхности, и далее соединяются друг с другом на глубине 2 м. Зоны имеют общее основание (0,1-4 Ом·м). Максимальное УЭС соответствующего ему профиля ЧЗ №2 едва достигает 30 Ом·м. Начинаются профили с площадки повышенного сопротивления, в том месте находятся небольшие парящие грязевые вулканы. Скорее всего, повышение сопротивления связано с низкой обводнённостью вулканов, насыщением поверхности газом. Далее находится котёл №7, нашедший отображение на профиле ЭТ, и визуально отсутствующий на профиле ЧЗ. Это может быть связано с разной разрешающей способностью методов.

На профиле ЭТ №2 с середины профиля и до конца на поверхности проявлена относительно высокоомная зона (до 100 Ом·м), она же повторяется на профиле ЧЗ. Это связано с окончанием термальной площадки, далее за профилями течёт небольшой ручей. На втором профиле ЭТ подводящие каналы источников менее заметны, зато на профиле ЧЗ выделены достаточно. На рис. 3 представлена изоома, отвечающая кажущемуся сопротивлению 4,9 Ом·м.

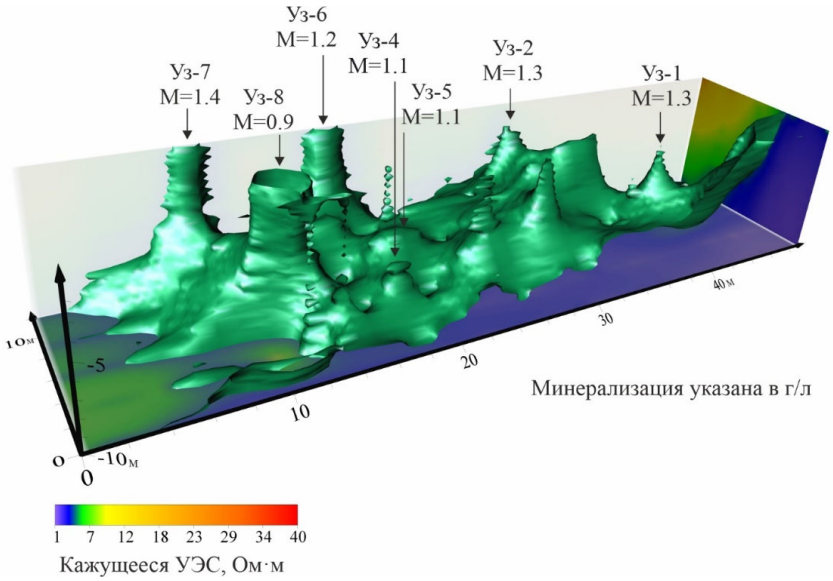


Рис. 3. Трёхмерная визуализация результатов исследований методом ЧЗ над грязевыми котлами термальной площадки

Связь геофизических и геохимических параметров среды

В табл. 1 приведены значения трёх вариантов УЭС: расчётного, измеренного методом ЭТ, измеренного методом ЧЗ. Корректность трехмерных моделей по данным ЭМС описана в статье Балкова Е.В., где приведено сравнение трансформации сигналов электромагнитного сканера ЭМС в УЭС в виде псевдоразреза и разрез по данным ЭТ, а также проведена одномерная инверсия данных ЭМСа [1]. Расхождения в значениях рассчётного и измеренных УЭС имеются, и, на первый взгляд, достаточно значительные. Однако, весь разрез по данным двух методов – чрезвычайно проводящий, и найти в нём контрасты сложно. Во-вторых, при расчёте по формуле Муанфара минерализация должна быть взята в пересчёте на NaCl, что проблематично для богатого состава термальных источников и поровых вод. Соответственно, эти значения могут рассматриваться как не достоверные, но опорные, так как обратнопропорциональная зависимость минерализации и УЭС прослежена.

Обсуждение

При сопоставлении методов ЭТ и ЧЗ важно понимать разницу между инвертированными данными ЭТ и кажущейся глубиной по данным ЧЗ: они могут совпадать и нет, в зависимости от среды. Но источники на профилях ЧЗ отображаются чётко, вне зависимости от глубины – зоны пониженного сопротивления. Отсутствие чётких каналов на профилях ЭТ объясняется общей высокой проводимостью всего разреза (не более 30 Ом·м) и разницей измерений в двух выбранных методах: непрерывные измерения при ЧЗ и ограничения разрешения верхней части разреа межэлектродным расстоянием в ЭТ.

Различия измеренного и рассчётного УЭС объясняются несовершенством формулы Муанфара, учитывающей лишь два параметра среды, и общей высокой проводимостью разреза.

Заключение

Результатом работы является визуализация приповерхностного пространства термального поля до глубины 10 м, позволяющая наблюдать контраст между высокопроводящими термопроявлениями и зонами относительно повышенного сопротивления, представляющими собой гидротермально изменённые породы. Визуализированная геоэлектрическая зональность определяется преимущественно соотношением жидкости к твёрдому веществу. В зависимости от количества флюида и его путей движения из глубинного источника к поверхности меняется его состав, кислотность, общий уровень минерализации. От уровня взаимодействия флюида с вмещающими породами меняется его состав и степень изменения пород, давая контрастность геохимических параметров рядом с расположенным термопроявлениям.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ФНИ (проект № FWZZ -2022-0029).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е. В. Технология малоглубинного частотного зондирования // Геофизика. – 2011. – № 6. – С. 42-47.

2. Вилор Н. В. Мироманов А. В., Давыденко Ю. А., Шкиря М. С., Вилор А. М. Применение комплекса поисковых методов для прогноза термальных вод в Прибайкалье, Восточная Сибирь // Росгеология. В поисках новых открытий. – 2018. – С. 18-21.

3. Каймонова О. О., Шкиря М. С., Бадминов П. С., Давыденко Ю. А. перспективы развития геотермальной энергетики // Печатается по решению редакционно-издательского совета ИРНИТУ. – 2018. – С. 287.

4. Кугаенко Ю. А., Мельников Д. В. О некоторых аспектах техногенного воздействия Мутновского геоэнергетического комплекса (Южная Камчатка, Россия) на окружающую среду // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 5. – С. 56-63.

5. Ненюкова А. И., Спичак В. В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро-и теплофизических свойств пород // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – № 1 (82). – С. 6-19.

6. Hermans T., Vandenbohede A., Lebbe L., Nguyen F. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography // Geophysics. – 2012. – V. 77. – № 1. – P. B11-B21.

7. Munoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // Surveys in geophysics. – 2014. – V. 35. – P. 101-122.

8. Moinfar A., Mallan R. K., Torres-Verdin C., Anges R. Time-lapse variations of multi-component electrical resistivity measurements acquired in high-angle wells // Petrophysics. – 2010. – V. 51. – P. 408-427.

9. Nieto I. M., Martín A. F., Blázquez C. S., Aguilera D. G., García P. C., Vasco E. F., García J. C. Use of 3D electrical resistivity tomography to improve the design of low enthalpy geothermal systems // Geothermics. – 2019. – V. 79. – P. 1-13.

10. Sáez Blázquez C., Martín Nieto I., Carrasco J., Carrasco P., Porras D., Maté-González M. Á., González-Aguilera D. Applying Deep Electrical-Resistivity Tomography Techniques for the Exploration of Medium-and Low-Geothermal Energy Resources // Energies. – 2024. – V. 17. – № 8. – P. 1836.

11. Spichak V. V. Geophysical methods of geothermal resources exploration // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 2. – P. 25-29.

© С. П. Мишенина, С. Б. Бортникова, Ю. А. Манштейн, Г. Л. Панин, 2025

УДК 519.246.87+519.6, 550.372, 550.837 (575.2)(04)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-60-67

К. С. Непеина[1]✉, Е. А. Баталева[1]

Первичные оценки сингулярных спектров компонент магнитотеллурического зондирования 1D вейвлет-лидером

[1]Научная станция РАН, г. Бишкек, Республика Кыргызстан
e-mail: nepeina.k@mail.ru

Аннотация. В работе тестируются результаты мультифрактального анализа (МФА) на данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ) на примере записей до и после Камбаратинского взрыва 2009 г. (Кыргызстан). Тест для получения первых оценок проводился в среде Matlab с применением Кайзеровского окна и вейвлет-преобразования (метод 1D вейвлет-лидеров) для вычисления МФА спектра.

Ключевые слова: мультифрактальный анализ, спектр, электромагнитные сигналы, напряженно-деформированное состояние среды, вейвлет-лидер

K. S. Nepeina[1]✉, E. A. Bataleva[1]

Preliminary estimation of singular spectra for components of magnetotelluric soundings with 1D wavelet-leader

[1]Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyzstan
e-mail: nepeina.k@mail.ru

Abstract. In the paper the results of multifractal analysis (MFA) applied to the magnetotelluric soundings (MTS) on the example before and after Kambarata carrier blast 2009 (Kyrgyzstan) are tested. Test is performed in Matlab with Kaiser window and wavelet transform (method 1D wavelet-leader) for multifractal spectrum calculation.

Keywords: multifractal analysis, spectrum, electromagnetic signals, stress-strain state of media, wavelet-leader

Введение

Многие исследователи сходятся во мнении, что использование Фурье-анализа для сложных нестационарных сигналов слишком упрощает обработку и в итоге не предоставляет достаточно полной информации о сигналах [1-4]. Также, как верно замечено Верзуновым и Лыченко, «для магнитовариационного сигнала непрерывное Вейвлет-преобразование более удобно; его некоторая избыточность, связанная с непрерывным изменением масштабного коэффициента и параметра сдвига, является при этом положительным качеством, так как позволяет более полно и чётко представить и проанализировать содержащуюся в данных информацию» [1]. Использование вейвлетов для частотно-временного анализа временных рядов МТЗ уже применялось как в Научной станции РАН, так и сторонними организациями [2, 3]. Тем самым удобно применять для таких сигналов мультифрактальный анализ (МФА), базирующийся на непрерывном Вейвлет-

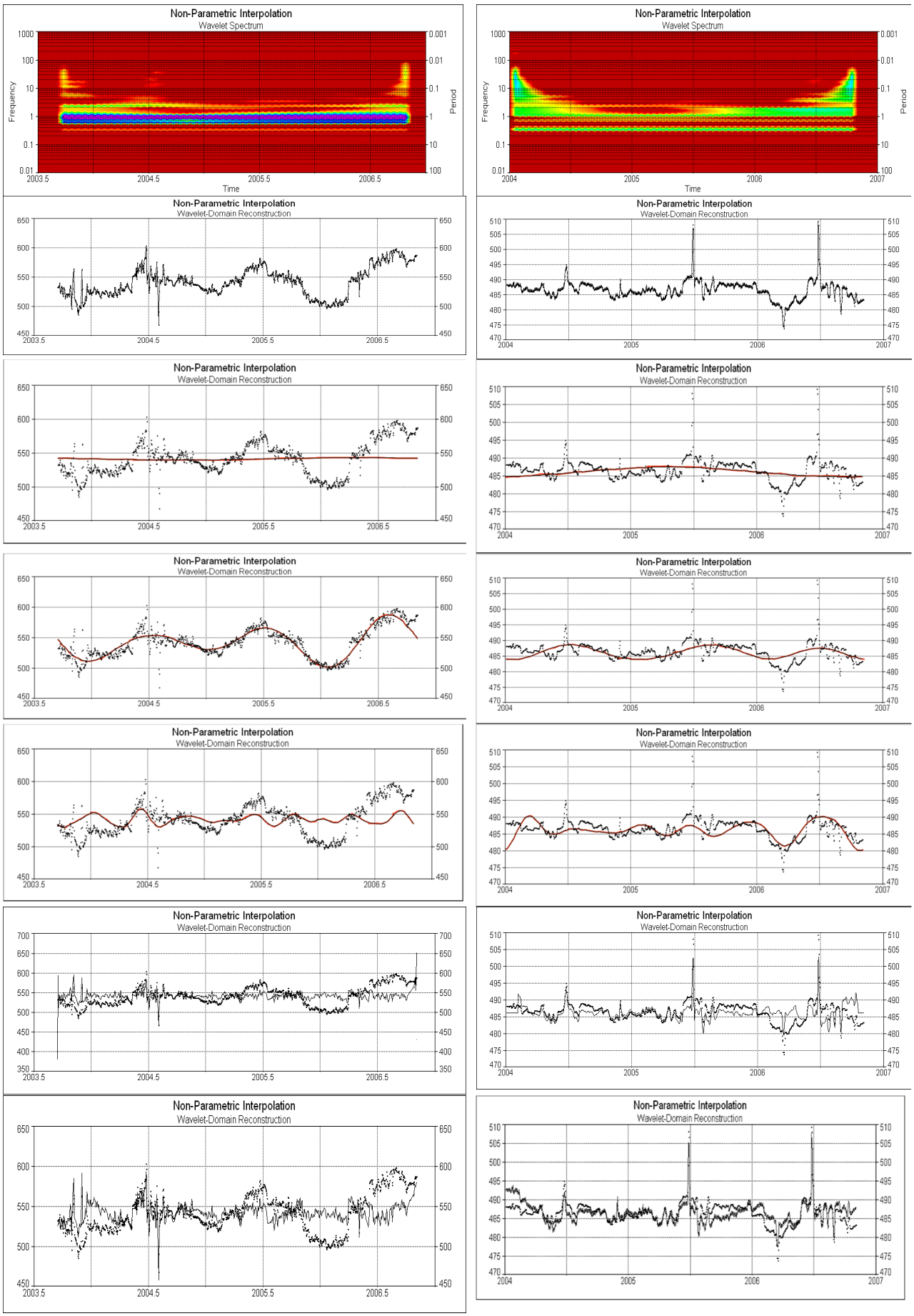
преобразовании. В противоположность Фурье-анализа, Вейвлет-анализ основан на использовании локализованных во времени ядер преобразования, размеры которых согласованы с масштабом изучаемых компонентов ряда. При этом, в отличие от Фурье-анализа, вейвлеты показывают картину эволюции спектра мощности (скалограммы) во времени. Основная идея Вейвлет-преобразования отвечает специфике многих временных рядов, демонстрирующих эволюцию во времени своих основных характеристик среднего значения, дисперсии, периодов, амплитуд и фаз гармонических компонентов. Нет сомнений, что изучаемые нами процессы обладают такими свойствами, в связи с чем, Вейвлет-анализ был применен для обработки данных электромагнитного мониторинга.

Основы Вейвлет-анализа были разработаны в середине 1980-х годов как альтернатива преобразованию Фурье для исследования временных (пространственных) рядов с выраженной неоднородностью [4]. Вейвлет-преобразование, обладающее самонастраивающимся подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. По этой причине Вейвлет-анализ часто сравнивают с «математическим микроскопом», вскрывающим внутреннюю структуру существенно неоднородных объектов.

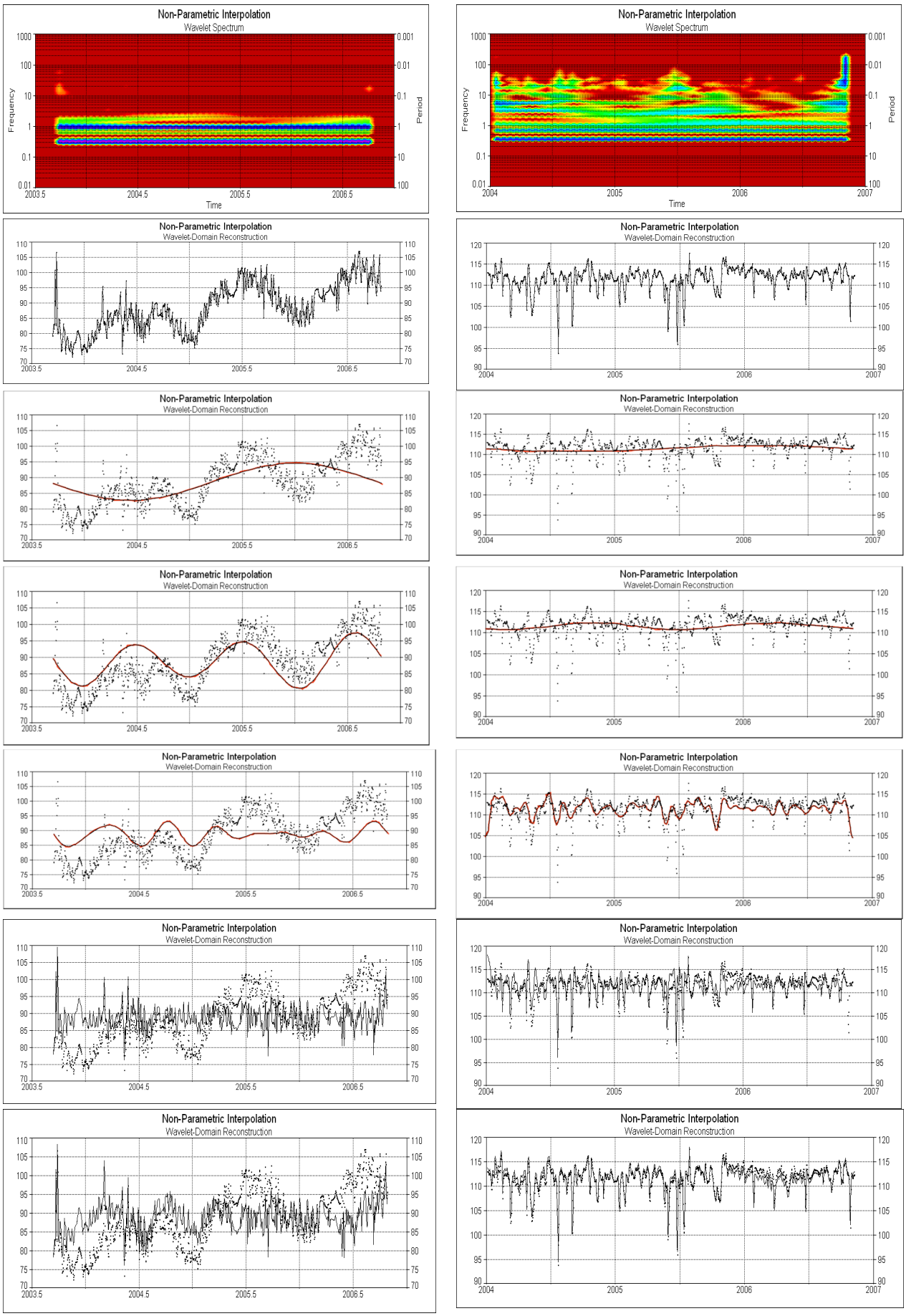
Практика показала, что мультифрактальный анализ (МФА), базирующийся на непрерывном Вейвлет-преобразовании, представляет собой удобный инструмент для анализа частотно-временных рядов мониторинговых данных. Использование мультифракталов больше подходит для природоподобных систем и сигналов, чем монофракталы, представляющие собой идеализированную модель [4-6]. Всё больше появляется работ по использованию МФА на данных (аудио-) магнитотеллурического зондирования (АМТЗ, МТЗ) [3, 7-10].

Методы и материалы

В качестве примера анализа временных рядов электромагнитного мониторинга с использованием вейвлета Морле рассмотрим результаты, полученные Рыбиным А.К. и Брагиным В.Д., в рамках выполнения программы 6 ОНЗ РАН [11]. В верхней части каждой панели рис. 1 представлены скалограммы соответствующих рядов среднесуточных значений кажущегося сопротивления ($\rho_к$), полученные вейвлет разложением. Скалограмма описывает распределение энергии гармонических компонент исследуемого процесса во времени. Темные синие тона скалограммы отражают наиболее интенсивные компоненты спектра. Ниже показаны гармонические составляющие исследуемых рядов $\rho_к$, реконструированные с помощью Вейвлет-преобразования и показанные на фоне вариаций исходного ряда.



а) Чун-Курчак (север-юг)



б) Аксу (север-юг)

Рис. 1. Пример результатов Вейвлет-анализа для временных рядов кажущегося сопротивления, представленные тремя панелями в следующем порядке: а) Чун-Курчак (запад-восток) T = 0.5 с, t = 3.14 с; (север-юг) T = 0.5 с, t = 3.14 с; б) Аксу (север-юг) T = 5 с, t = 1.38 с . Каждая панель содержит: слева – результаты МТЗ, справа – результаты ЗС. Сверху-вниз показаны: скалограммы Морле; интерполированный исходный ряд наблюдений; фильтрованные вариации с периодом T>3 года; фильтрованные вариации с периодом 1 год<T<3 года; фильтрованные вариации с периодом 2 месяца<T<1 год; фильтрованные вариации с периодом T<2 месяца

При сопоставлении результаты фильтрации рядов кажущегося сопротивления, полученных по методам МТЗ и зондирование становления поля (ЗС) для пунктов мониторинга Аксу и Чун-Курчак. Для обоих пунктов очень выразительно выявились вариации кажущегося сопротивления с периодом около года как МТЗ сопротивлений, так и для ЗС, хотя амплитуды их гармоник несколько отличаются. При этом наблюдается некоторое опережение годовой цикличности в данных МТЗ (в нижней части коры) по отношению к данным ЗС, составляющее по величине приблизительно 2-3 месяца.

Представленные результаты сравнительного анализа материалов непрерывных МТЗ и ЗС наблюдений подтверждают информативность использования электромагнитных полей естественного происхождения для наблюдения за развитием геодинамических процессов в нижней части коры (глубины более 20 км) и полей искусственного происхождения для наблюдения за развитием геодинамических процессов в верхней части коры (глубины менее 25 км).

Для проверки возможностей МФА на данных МТЗ с известным событием были выбраны записи до и после Камбаратинского взрыва (22 декабря 2009 г. мощностью 2.8 Кт в тротиловом эквиваленте), Токтогульский район Джалал-Абадской области Кыргызстана. Запись проводилась 5-канальной аппаратурой Phoenix MTU-5/5A (Торонто, Канада) [12] с частотой измерений 15 Гц. Соответственно, имеются три индукционных датчика МТС-50, записывающих магнитные компоненты (*Hx, Hy, Hz*), и два электрических канала (*Ex, Ey*). Комплекс наблюдений включал в себя сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения [13-15]. Стандартная обработка происходит в пакете MT-Corrector [16] на основе теории преобразования электромагнитных компонент [17].

Для начала обработки исходные данные были преобразованы в текстовый формат *.csv. Затем, были вычтены средние значения и нормированы, из-за крайне низких значений, что характеризует высокую чувствительность регистрирующей аппаратуры. Затем были получены преобразованные значения в виде временных рядов в диапазоне [-1, 1] по каждому из 5 каналов. После чего, подобно работам [7-10], в среде *Matlab* были рассчитаны спектральные плотности мощности (*power spectral density - PSD*) или иначе периодограммы с помощью функции *pwelch* в окне Кайзера. Это одно из распространенных окон для синтеза цифровых КИХ-фильтров и является приближением к вытянутому сфероидальному окну. Параметры длины окна $n = 10^3$, относительное затухание бокового лепестка $\beta = 10$.

Для получения МФА спектра была применена функция 1D вейвлет-лидера *dwtleader*, позволяющая оценить фрактальные параметры *dh*, *h*, *cp*, *tauq*. Вейвлет-

лидеры относятся к МФА бестрендовых колебаний (флуктуаций) *MFDFA – Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*. Вейвлет-лидеры вида $d_{jk}=sup\{|c_{lh}|:I_{lh} \subset 3I_{jk}\}$ – это способ оценки мультифрактальных спектров сингулярностей [18]. «Вейвлет-лидер $L(j,k)$ представляет собой наибольший коэффициент дискретного Вейвлет-преобразования $d(j',k')$, вычисленный в узком временном интервале $(k-1)\cdot 2^j \le k'\cdot 2^{j'} \le (k+1)\cdot 2^j$ на всех масштабах, меньших заданного $w^{j'} \le 2^j$. Вейвлет-лидеры отражают локальные коэффициенты Гёльдера, которые можно рассчитать стандартным для МФА способом: построить обобщенную функцию распределения вида $Z(j,q) \propto \Sigma_k L(j,k)^q \propto 2^{j\cdot\tau(q)}$, найти из нее скейлинговые экспоненты $\tau(q)$, из которых рассчитать спектр сингулярностей $D(h)$ при помощи преобразования Лежандра» [19].

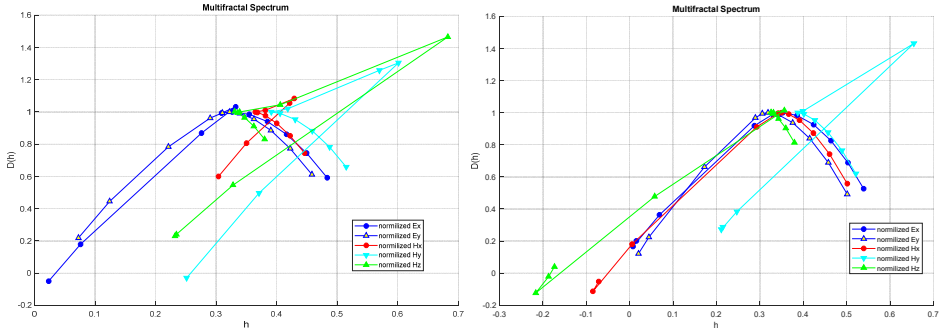
Параметр *dh* считает спектр сингулярности в виде вектор-матрицы размерности 1×11. Спектр сингулярности оценивает использование функций структуры, определенных в течение линейно распределенных моментов от –5 до 5. Функции структуры вычисляются на основе вейвлет-лидеров, полученных с помощью биоортогонального сплайна в виде вейвлет фильтра.

Показатель Гёльдера *h* представляет собой скалярный вектор размерности 1×11. Показатели Гёльдера характеризуют регулярность сигнала. Чем ближе этот показатель к 1, тем ближе функция к дифференцируемой. И наоборот, чем ближе показатель *h* к нулю, тем ближе функция к разрывной.

Показатели степени (ПС) (*cp* – cumulants), относятся к линейно разнесенным моментам от –5 до +5. ПС скалярный вектор размерности 1×3. Вектор содержит первые три логарифмических степени показателей масштабирования. Первый ПС характеризует линейное поведение масштабных показателей. Второй и третий ПС характеризуют отклонение от линейности. Первое значение ПС и почти нулевые значения второго и третьего ПС указывают на то, что локальные компоненты масштабирования (ЛКМ) являются линейной функцией моментов. В этом случае ненулевой второй ПС доказывает, что процесс является мультифрактальным. Вектор-столбцы размерности 1×11 *tauq* = $\tau(q)$ называют скейлинговыми экспонентами.

Результаты

Результаты расчета МФА спектра в среде *Matlab* представлены на рис. 2, где $D(h)$ спектр сингулярности.



а) б)

Рис. 2. Результат МФА спектра сингулярности записи Камбаратинского взрыва: а) до взрыва; б) самого взрыва и после него

Заключение

Изучены возможности 1D вейвлет-лидеров для оценки мультифрактальности пяти компонент магнитотеллурического зондирования. Обнаружено, что обе компоненты электрического поля, а также горизонтальная компонента *Hx* – представляют собой классический вид мультифрактального процесса. Однако поведение показателя Гёльдера *h* компонент *Hy* и *Hz* имеют вершины, образованные ломаными линиями, образующими угловатую петлю, что для записи до взрыва, что после. Вероятно, некоторые точки не стоит брать в рассмотрение, т.к. они не обладают свойством мультифрактальности. Стоит отметить, что значение показателя *h* стало меньше после взрыва – от –0.2 до ~0.5, в то время как до взрыва этот диапазон был от 0 до 0.7. Вероятнее всего, этот параметр связан с напряженно-деформированным состоянием среды. Как только произошла разгрузка напряжений – показатель Гёльдера *h* снизился для всех компонент кроме *Hy*. Это инверсивное поведение *h*(*Hy*) требует отдельного рассмотрения.

Благодарности

Исследование выполняется по теме государственного задания НС РАН Минобрнауки России 1021052806445-4-1.5.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Разработка автоматизированной системы для анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий // Математические структуры и моделирование. – 2014. – №4 (32). – С. 185-197.

2. Печенкин М.М. Частотно-временной анализ временных рядов магнитотеллурического зондирования // Записки Горного института. – 2008. – Т. 176. – С. 163-167.

3. Nigmatullin R.R., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Matiukov V.E. Quality control of the initial magnetotelluric data: analysis of calibration curves using a fitting function represented by the ratio of 4th-order polynomials // Measurement. – 2023. – Vol. 216. – P. 112914.

4. Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM journal on mathematical analysis. – 1984. – Vol. 15. – № 4. – P. 723-736.

5. Рыбин А.К., Нигматуллин Р.Р., Непеина К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. Аналитическое описание сейсмических сигналов методом фрактального неортогонального амплитудно-частотного анализа // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2019. – № 1 (41). – С. 15-24.

6. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – № 8. – С. 859-876.

7. Долгополов Б.К., Сычев В.Н., Имашев С.А. Динамика мультифрактальных показателей сейсмосигнала во время мощных электромагнитных воздействий на среду, порождающую сигнал // Наука и инновационные технологии. – 2017. – № 1 (3). – С. 149-154.

8. Li J., Zhang X., Tang J., Cai J., Liu X. Audio magnetotelluric signal-noise identification and separation based on multifractal spectrum and matching pursuit // Fractals. – 2019. – Vol. 27. – № 1. – P. 1940007.

9. Лаврухин А.А., Лобов К.В., Туканова А.С., Онуфриев А.С. Поиск оптимального способа получения оценок для автоматизированной системы обработки сигналов магнитотеллурического зондирования // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 56-62.

10. Вагин С.А. Алгоритм обработки данных магнитотеллурических зондирований в среде МАТЛАБ // Вопросы геофизики. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. – № 42. – С. 100–114.

11. Отчет о выполнении работ по Программе 6 ОНЗ РАН «Глубинное строение Земли, геодинамика, магматизм, взаимодействие геосфер». Направление 6. «Современная и новейшая геодинамика и движение земной коры по комплексу геолого –геофизических методов». Тема: «Изучение пространственно-временного распределения деформаций в земной коре на территории Бишкекского полигона электромагнитными методами». НС РАН. – 2007. – 58 с.

12. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System / U.S. Patent. – 2001. – № 6 191 587 B1. – 20.02.2001.

13. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 181-184.

14. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 46-53.

15. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.

16. Колосов Н.А. Программа просмотра, редактирования и построения гладких сплайн-аппроксимаций частотных зависимостей компонент тензора импеданса ("MT-Corrector") / Свидетельство на программу для ЭВМ. – RU № 2005612195. – 2005.

17. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.

18. Serrano E., Figliola A. Wavelet Leaders: A new method to estimate the multifractal singularity spectra // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2009. – Vol. 388. – P. 2793-2805.

19. Гиляров В.Л. Выявление динамических закономерностей эпилептических приступов у детей методами нелинейной механики // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – Вып. 3. – С. 508-514.

© К. С. Непеина, Е. А. Баталева, 2025

УДК 532.546+550.832.7
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-68-72

Г. В. Нестерова[1]✉, К. В. Сухорукова[1], И. В. Суродина[1]

Построение электрогидродинамических моделей ачимовских коллекторов Сургутского свода по данным скважинных и керновых измерений

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Одним из перспективных видов трудноизвлекаемых запасов является ачимовская толща. Сложность для моделирования коллекторов ачимовской толщи представляет вертикальная и латеральная неоднородность пластов, их низкие фильтрационно-емкостные свойства. На примере скважины Имилорского месторождения на основе моделирования фильтрации бурового раствора в пласт и использования каротажных данных, программ расчёта синтетических диаграмм, данных измерений на керне построены электрогидродинамические модели ачимовских коллекторов. Дальнейшее развитие схемы построения таких моделей связано с пополнением комплекса скважинных измерений данными микрокаротажа, эмпирического обоснования фазовых проницаемостей для коллекторов ачимовских отложений, программ нелинейной фильтрации при гидродинамическом моделировании.

Ключевые слова: ачимовская толща, коллектор, моделирование, каротаж, фильтрационно-емкостные свойства

G. V. Nesterova[1]✉, K. V. Sukhorukova[1], I. V. Surodiva[1]

Ectrohydrodynamic models of Achimov reservoirs of Surgut arch based on borehole and core measurements

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

Abstract. One of the perspective hard-to-recover reserves is the Achimov arch. The difficalty of the Achimov reservoirs simulation is represented by the vertical and lateral heterogeneity of the formations, their low filtration-capacity properties. Using the example of a well at the Imilor field, based on modeling the filtration of drilling mud into the formation and the use of well logging data, programs for calculating synthetic diagrams, and core measurement data, electrohydrodynamic models of Achimov reservoirs were constructed. Further refinement of models is connected with replenishment of the complex of borehole measurements with micro-logging data, empirical substantiation of phase permeabilities for Achimov deposits collectors, nonlinear filtration programs in hydrodynamic modeling

Further development of the scheme for constructing such models is associated with the replenishment of the complex of well measurements with micro-logging data, empirical substantiation of phase permeabilities for Achimov deposit collectors, nonlinear filtration programs in hydrodynamic modeling.

Keywords: Achimov arch, reservoir, simulation, logging, filtration and capacity properties

Одним из перспективных видов трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) является ачимовская толща. Компании «Газпром нефть», «ЛУКОЙЛ–Инжиниринг» уже ведут свои проекты по изучению и разработке месторождений, расположенных в ачимовской толще [1]. Целью проектов является обоснование и точная оценка содержания нефтенасыщенного объема залежи в низкопроницаемых коллекторах для подтверждения рентабельности их добычи [2, 3, 4]. Сложность для моделирования коллекторов ачимовской толщи представляют вертикальная и латеральная неоднородность пластов, низкие фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) [2, 5, 6].

Настоящее исследование продолжает цикл работ, посвящённых построению совместных гидродинамических и геоэлектрических моделей прискважинной зоны пласта по данным каротажа и результатам измерений на керне [7-11]. В электрогидродинамических моделях (ЭГДМ) ачимовских коллекторов Имилорского месторождения учитывается низкая проницаемость коллекторов и анизотропия УЭС, вызванная тонкослоистостью ачимовских разрезов. Это потребовало разработки новых вариантов программ расчёта синтетических сигналов ВИКИЗ и БКЗ.

Первый этап построения ЭГДМ пласта заключается в выделении слоистых пластов-коллекторов с учетом всего комплекса геофизических исследований в скважине (ГИС). Далее при совместной интерпретации ВИКИЗ и БКЗ для выделенных коллекторов строятся геоэлектрические модели (ГЭМ) пласта (рис.1) Если при построении ГЭМ в комплекс измеренных данных входит метод БКЗ, для непроницаемых глинистых отложений учитывается их электрическая анизотропия, обусловленная микрослоистостью. Проницаемые отложения при достаточно детальной разбивке можно считать изотропными ввиду эквивалености вклада их небольшой анизотропии и повышающей зоны проникновения в сигналы градиент-зондов [12-13].

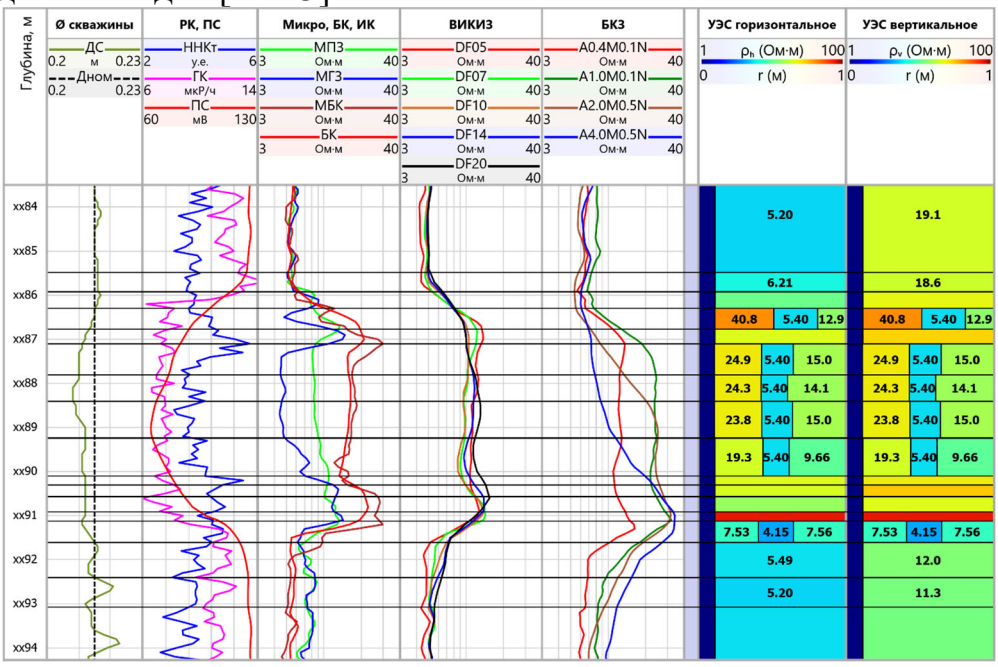


Рис.1. Практические данные ГИС и геоэлектрическая модель пласта

Для проницаемых пропластков строятся их 1D гидродинамические модели, включающие радиальные распределения водонасыщенности и минерализации пластового флюида [14]. Для пересчета результатов гидродинамического моделирования в удельное электрическое сопротивление используется модификация формулы Дахнова-Арчи [10, 15].

Из набора ЭГДМ, построенных для конкретного пропластка, выбирается модель, в которой радиальный профиль УЭС наиболее соответствующая ступенчатому профилю УЭС (рис. 2). Распределение УЭС по глубине и радиальному расстоянию от скважины (2D модель всего пласта) собирается из горизонтального и вертикального УЭС непроницаемых пропластков и радиальных распределений УЭС, полученных при гидродинамическом моделировании проницаемых пропластков.

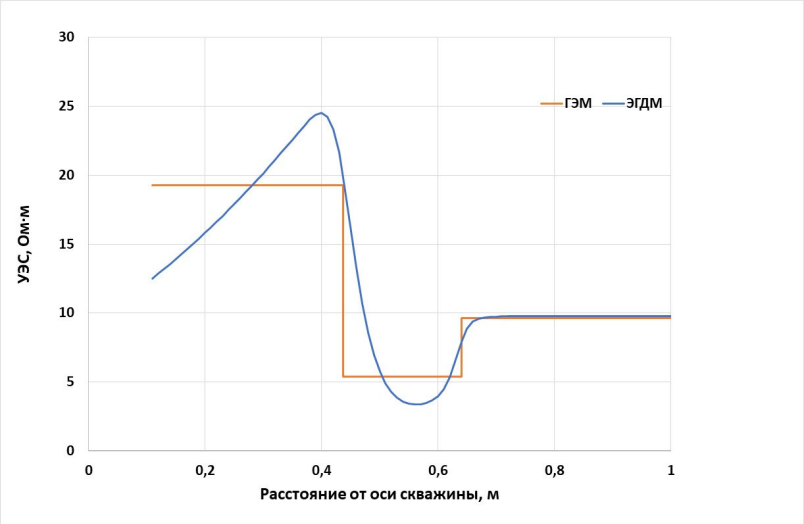


Рис. 2. Пример подбора электрогидродинамической модели проницаемого пропластка

Диаграммы БКЗ рассчитываются по программе BKZ3d_ANIZ_EHDM [16], учитывающей анизотропию УЭС среды, окружающей вертикальную скважину. В программе реализован конечно-разностный подход к аппроксимации уравнений Максвелла. Тензор анизотропии диагональный (рассматриваются модели с вертикальной скважиной). Использован итерационный метод решения, реализованный на графическом процессоре. Для расчёта диаграмм ВИКИЗ применялась программа VIKIZ3D_GPU_IZO [17] с изотропной моделью пласта, поскольку при измерении в вертикальной скважине анизотропия УЭС не имеет такого влияния для этого метода, как для метода БКЗ. В программе также используется конечно-разностный подход и реализация алгоритма на графическом процессоре, что позволяет существенно ускорить расчёт синтетических диаграмм.

Синтетические диаграммы ВИКИЗ и БКЗ сравниваются с практическими и оценивается их расхождение. В случае необходимости делается коррекция исходной геоэлектрической модели отдельных пропластков и параметров гидроди-

намической модели до совпадения синтетических и практических сигналов электрокаротажа с практической точностью.

При построении ЭГДМ пласта использовались методы ВИКИЗ и БКЗ. Параметры глинистой корки оценивались по экспериментальным данным из БД ИНГГ СО РАН [18]. Дополнение совокупности методов программами моделирования микрокаротажа позволит уточнять толщину глинистой корки и зоны кольматации, значения остаточной водонасыщенности по данным скважинных измерений. Использование эмпирического обоснования фазовых проницаемостей для коллекторов ачимовских отложений [19], программ нелинейной фильтрации при гидродинамическом моделировании [20] позволит более точно строить модели пластов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0026.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Запасы будущего: Ачимовские горизонты [электронный ресурс] // URL: https://achimovka.neftegaz.ru/.

2. Егорова А.Д., Исакова Т.Г., Бата Л.К., Гоев А.Ю., Хотылев О.В., Чуркина В.В., Коточкова Ю.А., Дьяконова Т.Ф., Козаков С.В., Кожевникова Н.В., Москаленко Н.Ю., Белов Н.В., Мозговой А.С., Калмыков Г.А. Оценка характера насыщенности коллекторов ачимовских отложений по каротажу в условиях низкой проницаемости и фациальной неоднородности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2023. – № 2. – С. 128–138.

3. Мусихин А.Д., Мингазова Д.И., Байков Р.П., Викторова Е.М., Киселев П.Ю., Тельнова К.С. Подход к вероятностной оценке ресурсного потенциала ачимовской толщи в условиях низкой изученности // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – № 9. – С. 27–33.

4. Мухаметдинова А.З., Доржи Д.Б., Бакулин Д.А., Юнусов Т.И., Аминев Т.Р., Черемисин А.Н., Гришин П.А. Определение относительных фазовых проницаемостей для системы нефть газ в низкопроницаемых коллекторах ачимовских отложений // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 7. – С. 98-103.

5. Жарков А.М. Особенности геологического строения и прогноз распространения залежей углеводородов в ачимовской тоще Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – Т. 11. – № 4.

6. Вершинина И.В., Виноградов К.Э., Гильманова Н.В., Коваленко М.А., Шаламова В.И. Обзор применяемых подходов к гидродинамическому моделированию низкопроницаемых коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 9. – С. 41-47.

7. Кашеваров А.А., Ельцов И. Н., Эпов М.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважины // ПМТФ. – 2003. – № 6. – С. 148–157.

8. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика. – 2004. – № 8. – С. 1031–1042.

9. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 978–990.

10. Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование гидродинамических процессов в напряжённо-деформированной прискважинной зоне и

геофизические приложения // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. – Сборник статей. –М.: «ЕАГЕ Геомодель». – 2014. – С. 327-344.

11. Киндюк В.А., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Оценка проницаемости на основе многофизичной модели пласта // Каротажник. – 2017. – № 5. – С. 60-69.

12. Petrov A.M., Leonenko A.R., Danilovskiy K.N., Nechaev O.V. Fast 2D forward modeling of electromagnetic propagation well logs using finite element method and data-driven deep learning // Artificial Intelligence in Geosciences. – 2025. – V. 6. – Is. 1 URL: https://doi.org/10.1016/j.aiig.2025.100112.

13. Сухорукова К.В., Петров А.М., Лапковская А.А., Ананьев С.В. // Методические аспекты комплексирования данных электрокаротажа при инверсии в классе двумерных осесимметричных моделей // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 4. – С. 513–522.

14. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ельцов И.Н., Нестерова Г.В. GEHM2D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613634. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2018 г.

15. Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи // Каротажник. – 2008. – № 10. – С. 81–101.

16. Нестерова Г.В., Суродина И.Н. BKZ3d_ANIZ_EHDM: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619057. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14 апреля 2025 г.

17. Суродина И.В. VIKIZ3D_GPU_IZO Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667630. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 1 ноября 2021 г.

18. Голиков Н.А., Евменова Д.М., Ельцов И.Н., Нестерова Г.В. База параметров глинистой корки, определенных экспериментально в ИНГГ СО РАН: Свидетельство о государственной регистрации базы данных No 2023624864. Дата государственной регистрациив Реестре баз данных 21 декабря 2023 г.

19. Тухватуллина Ю.В., Каган М.В., Шнайдер А.В., Коваленко Р.В. Эмпирическое обоснование относительных фазовых проницаемостей нефти и воды для коллекторов ачимовских отложений // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 4(628). – С. 32-36.

20. Невмержицкий Я.В., Кузьмина Т.В., Вершинина И.В., Виноградов К.Э. Использование нелинейной фильтрации при гидродинамическом моделировании низкопроницаемых коллекторов ачимовской толщи // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2023. – № 6. – С. 53–58.

© Г. В. Нестерова, К. В. Сухорукова, И. В. Суродина, 2025

УДК 550.379
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-73-79

В. В. Оленченко[1]✉, А. А. Заплавнова[1]

Объёмная геоэлектрическая модель канала питания гидрогеогенной наледи

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

Аннотация. Наледи оказывают негативное влияние на мосты и насыпи автомобильных дорог, вызывают подтопление территории жилых зданий и инженерных сооружений. Для того чтобы спланировать местоположение устьев водопонижающих или перехватывающих скважин при планировании противоналедных мероприятий необходимо установить положение их источника. Эта задача решается с помощью метода электротомографии и построения объемной геоэлектрической модели. Мы провели исследования на участке развития гидрогеогенной наледи в Горном Алтае с целью построения объемной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод. В результате была получена 3D модель распределения электрического сопротивления и выделены аномалии, связанные с мёрзлыми породами и каналами фильтрации. Но еще более однозначное выделение канала питания гидрогеогенной наледи стало возможным по аномалии нормированной заряжаемости. Мы предположили, что природа интенсивных аномалий нормированной заряжаемости связана с её квадратичной зависимостью от электрической извилистости пор, которая уменьшается вследствие выноса мелких частиц из трещин и пор потоком воды.

Ключевые слова: гидрогеогенная наледь, разгрузка подземных вод, электротомография, нормированная заряжаемость

V. V. Olenchenko[1]✉, A. A. Zaplavnova[1]

The feeding channel 3D geoelectric model of a hydrogeogenic icing

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Icing adversely affects bridges, road embankments, and infrastructure, leading to waterlogging in residential areas and engineering facilities. Effective anti-icing measures require careful planning to identify the icing source and determine optimal locations for dewatering or interception wells. This can be achieved using electrical resistivity tomography to construct a volumetric geoelectric model of the site. We conducted a study in the Mountain Altai region, where hydrogeogenic icing develops, to create a 3D geoelectric model of the icing water discharge zone. Our results yielded a detailed 3D resistivity distribution model, revealing anomalies linked to permafrost and filtration channels. Additionally, by analyzing normalized chargeability anomalies, we more precisely traced the pathway of the icing water feeding channel. We hypothesize that the pronounced anomalies observed in the normalized chargeability distribution arise from its quadratic dependence on electrical tortuosity. This tortuosity decreases as flowing water displaces fine particles from cracks and pores, altering the subsurface properties.

Keywords: hydrogeogenic icing, groundwater discharge, electrical resistivity tomography, normalized chargability

Введение

В условиях многолетней мерзлоты гидрогеогенные наледи образуются в местах выхода трещинно-жильных вод из подземных напорно-фильтрационных таликов, которые могут располагаться как в руслах рек, так и на поверхности земли. Наледеобразование является опасным инженерно-геологическим процессом, который негативно влияет на автомобильные и железные дороги [1, 2] и вызывает подтопление жилых зданий [3, 4].

При инженерном освоении ландшафтов одним из путей обеспечения безопасности является полное устранение наледной опасности. Это достигается за счёт ликвидации источников, способствующих образованию наледи [5]. Однако для того, чтобы ликвидировать источник, необходимо сначала выявить его положение и спланировать места для бурения водозаборных скважин, как это предусмотрено в [6].

Для локализации положения источника наледи необходимо использовать геофизические методы, которые широко применяются при изучении строения участков образования наледей [7, 8, 9]. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих оценить строение геологической среды в объёме, является электротомография. С её помощью возможна локализация каналов фильтрации подземных вод, которые выделяются трубообразными аномалиями пониженного сопротивления [10, 11].

Целью этой работы было построение объемной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод в Чуйской впадине Горного Алтая для локализации канала фильтрации подземных вод.

Методы и материалы

Участок исследований находится у подножья горы Мишельдык, высота которой составляет 1831 метр. Ближайший населенный пункт — посёлок Тобелер — расположен в трёх километрах к северо-востоку от него. Гора Мишлельдык представляет собой выход девонских рассланцованных песчаников и алевролитов, к которым с северной стороны примыкает толща четвертичных флювиогляциальных отложений Чуйской впадины. У подножья горы наблюдается множество рассредоточенных и восходящих источников [12]. Зимой из этих источников формируется наледь с наледными буграми, которая достигает автодороги «Чуйский тракт» и осложняет движение автотранспорта.

Район работ относится к зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП) островного типа. По результатам бурения 70-х годов мощность многолетнемёрзлой толщи в 3,5 км от участка исследований достигала 56 м.

Исследования проводились с использованием метода электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП) на двух площадках с помощью аппаратуры «Скала-64к15». На первой площадке было разбито пять профилей длиной по 155 метров, которые располагались на расстоянии 5 метров друг от друга вкрест простирания наледного бугра. На второй площадке профили были направлены вкрест простирания контакта палеозойских и четвертичных пород. Здесь сеть наблюдений включала также пять профилей длиной по 315 метров, которые находились на расстоянии 20 метров друг от друга. Шаг измерений вдоль про-

филей составил 5 метров. Последовательность подключения электродов соответствовала трёхэлектродной прямой и встречной установкам.

Объемная геоэлектрическая модель была получена с помощью программы Res3Dinvx64. Трёхмерная инверсия выполнена для полного набора данных с двух площадок в глобальных координатах сети измерений. После девяти итераций ошибка подбора модели удельного электрического сопротивления (УЭС) составила 3,24 %, модели поляризуемости – 1,69 %. В результате инверсии строились трёхмерные модели распределения УЭС, заряжаемости (m) и нормированной заряжаемости (m_n).

Заряжаемость рассчитывалась как площадь под кривой спада кривой поляризуемости η(t):

$$m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \eta(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время начала и конца измерений кривой спада поляризуемости, мс.

Нормированная заряжаемость m_n равна:

$$m_n = \frac{m}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – УЭС пород, полученное в результате инверсии, Ом·м или $См^{-1}/м^{-1}$;

m – заряжаемость, мВ/В.

В ионопроводящих средах показатель m_n имеет связь с поверхностной проводимостью в двойном электрическом слое [13, 14]. Аномалии нормированной заряжаемости наблюдаются в местах, где происходит фильтрация подземных вод в местах утечек через плотины или геомембрану [15, 16, 17].

Результаты

По результатам трёхмерной инверсии была построена объемная геоэлектрическая модель распределения УЭС до глубины 100 м (рис. 1). Высокие сопротивления (более 500 Ом·м) в модели соответствуют ММП, а пониженные и низкие сопротивления отмечаются в таликах и каналах восходящей фильтрации подземных вод в гидрогеогенном талике.

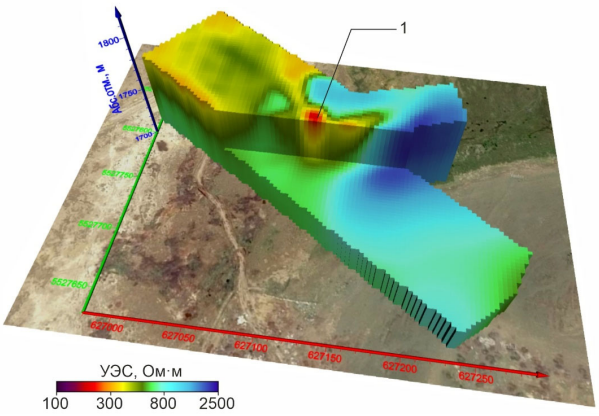


Рис. 1. Объёмная модель распределения УЭС: 1 – аномалия низкого УЭС в канале фильтрации подземных вод по гигрогеогенному талику.

Неожиданно информативной оказалась объемная модель нормированной заряжаемости (рис. 2). Максимальные значения этого параметра отмечаются в каналах восходящей фильтрации. Всего выделено три канала – центральный (основной) и два боковых. Над центральным каналом в зимнее время растёт сезонный бугор пучения (гидролакколит), на котором формируется наледный бугор и разгружаются наледные воды.

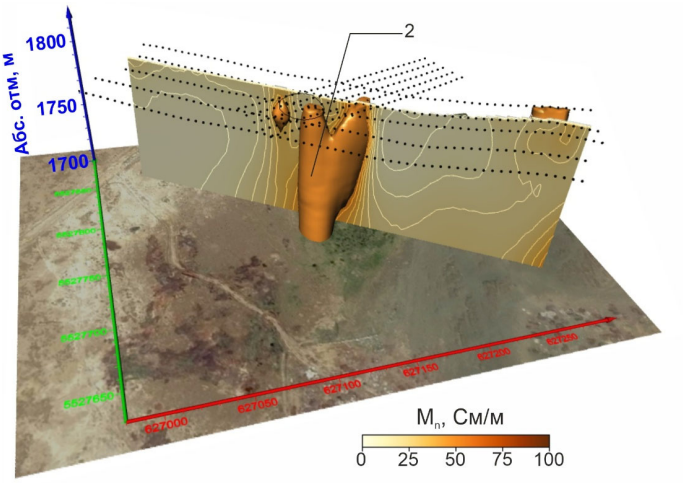


Рис. 2. Объёмная модель распределения нормированной заряжаемости (m_n). Изоповерхность 50 См/м: 2 – аномалия m_n в восходящих каналах фильтрации.

Обсуждение

В литературе, посвящённой изучению наледей с помощью геофизических методов, почти не уделяется внимание определению путей фильтрации подземных вод, которые питают наледь. Основное внимание сосредоточено на разделении мёрзлых и талых пород (таликов) в разрезе, а пути движения подземных вод изображаются на моделях разрезов интуитивно [8; 18; 19].

Однако современные технологии позволяют получать объёмное распределение электрических параметров геологической среды, что даёт возможность судить о её внутреннем строении.

Мы установили, что восходящий канал фильтрации подземных вод проявляется чёткой трубообразной аномалией нормированной заряжаемости m_n (рис. 2) которая разветвляется к поверхности, и разгрузка подземных вод происходит в нескольких местах, образуя групповой источник. И если в объёмной модели распределения УЭС низкими значениями сопротивления выделяются и обводнённые четвертичные отложения, и обводнённые трещиноватые палеозойские породы, то аномалия m_n оконтуривает только области фильтрации воды.

Обычно аномалии поляризуемости и нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых вод связывают с повышенным содержанием глины, органики и металлов в заполнителе порового пространства [16, 20, 21]. В тех случаях, когда содержание глины в порах мало, повышенная нормированная заряжаемость горных пород объясняется увеличением солёности поровой влаги [22]. Од-

нако мы считаем, что в канале фильтрации не может быть высокой глинистости вследствие выноса мелких частиц потоком воды. Минерализация воды здесь также относительно невысокая, а минералы с электронной проводимостью отсутствуют вовсе.

Мы считаем, что возникновение аномалий нормированной заряжаемости в области фильтрации подземных вод связано с тем, что при выносе мелких частиц уменьшается гидродинамическая извилистость пор, которая в первом приближении равна электрической извилистости пор ($\tau_{el.}$). Согласно [23], УЭС породы ρ_r пропорционально квадрату электрической извилистости пор. При нормировании заряжаемости (m) на УЭС получается, что нормированная заряжаемость обратно пропорциональна квадрату электрической извилистости пор:

$$m_n = \frac{m}{\rho_r} = \frac{m \cdot \phi}{\tau_{el.}^2 \cdot \rho_f}, \quad (3)$$

где m – заряжаемость, мВ/В;

ϕ – коэффициент пористости, безразмерный;

ρ_r – удельное электрическое сопротивление породы, Ом·м;

ρ_f – удельное электрическое сопротивление поровой воды, Ом·м;

$\tau_{el.}$ – электрическая извилистость, равная отношению длины капилляра к кратчайшему расстоянию между соответствующими гранями куба породы.

По всей видимости, параметр m_n является хорошим инструментом для выявления каналов фильтрации подземных вод и может быть использован для решения широкого круга задач, в том числе и для локализации источников наледных вод гидрогеогенных наледей.

Заключение

Наледи оказывают негативное влияние на мосты и насыпи автомобильных дорог, вызывают подтопление территории жилых зданий и инженерных сооружений. Для борьбы с наледями необходимо установить положение их источника для того, чтобы спланировать местоположение устьев водопонижающих или перехватывающих скважин.

Технология электротомографии даёт возможность получать объёмные геоэлектрические модели распределения УЭС, интерпретация которых позволяет оконтурить мёрзлые и талые породы и определить положение гидрогеогенного талика, по которому происходит фильтрация подземных вод к зоне разгрузки.

Однако еще более информативной оказалась модель распределения нормированной заряжаемости, в которой практически на нулевом фоне чётко выделается трубообразная интенсивная аномалия m_n, указывающая на положение канала восходящей фильтрации подземных вод.

Мы объясняем природу интенсивных аномалий нормированной заряжаемости её обратной квадратичной зависимостью от электрической извилистости пор, которая в свою очередь уменьшается из-за выноса мелких частиц потоком воды из трещин и пор в горных породах.

Мы продолжим исследования на подобных объектах для создания представительной выборки данных для статистического анализа.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024 «Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 10. – С. 30-40.

2. Баишев Н. Е., Шепёлев В. В., Гагарин Л. А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360" Лена" по данным мультиспектральных космических снимков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 60-69.

3. Верхотуров А. Г. Многолетняя динамика наледей центрального и Южного Забайкалья // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21-28 июня 2024 г. / Институт горного дела УрО РАН [отв. ред.: док. геол.-минер. наук С. В. Алексеев, док. геол.-минер. наук Л. С. Рыбникова]., Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. – 556 с.

4. Черных В. Н. Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье // Известия Русского географического общества. – 2025. – Т. 156. – № 2. – С. 155-168.

5. Алексеев В. Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера земли. – 2017. – Т. 21. – № 6. – С. 65-75.

6. Свод правил. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003.

7. Оленченко В. В., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Данилов К. П., Осташов А. А., Калганов А. С., Нестерова Н. В., Христофоров И. И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) //Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – № 3. – С. 0702.

8. Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J. M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafrost and Periglacial Processes. – 2021. – V. 32. – № 3. – P. 468-483.

9. Terry N. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2020. – V. 125. – № 3. – P. e2019JF005345.

10. Оленченко В. В., Гагарин Л. А., Христофоров И. И., Колесников А. Б., Ефремов В. С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 16-26.

11. Оленченко В. В., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Осташов А. А., Калганов А. С., Чекрыжов А. В. Геокриологические условия формирования гигантской наледи подземных вод р. Анмангында (Магаданская область) по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2024. – 15(2):0753.

12. Достовалова М. С., Шитов А. В. Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая // ГеоРиск. – 2011. – № 4. – С. 36-43.

13. Lesmes D. P., Frye K. M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2001. – V. 106. – № B3. – P. 4079-4090.

14. Slater L. D., Lesmes D. IP interpretation in environmental investigations // Geophysics. – 2002. – Т. 67. – № 1. – P. 77-88.

15. Калганов А. С., Оленченко В. В., Осипова П. С. Оценка влагонасыщенности рудной массы и поиск нарушений гидроизоляции при кучном выщелачивании золота // Инженерная и рудная геофизика 2022: Сборник материалов 18-й научно-практической конференции и выставки (г. Геленджик, Россия, 5-8 сентября 2022 г.). – М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2022. – С. 293-301.

16. Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A. S., Coperey A., Karaoulis M., Nicaise S., Peyras L. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments // Engineering Geology. – 2019. – V. 254. – P. 89-101.

17. Ustra, A. T., Elis, V. R., Mondelli, G., Zuquette, L. V., Giacheti, H. L. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 66. – P. 763-772.

18. You Y., Yang M., Yu Q., Wang X., Li X., Yue Y. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – V. 121. – P. 250-257.

19. Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin Kh., Ulanbayar G., Kamp U. Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon // Environmental Research Letters. – 2019. – V. 14. – № 1. – P. 015003.

20. Viezzoli A., Cull J. P., Massie D. Mapping fly-ash water pond leakage with TEM and IP data at Loy Yang coal-mine (Australia) // Near Surface Geophysics. – 2006. – V. 4. – № 5. – P. 305-311.

21. Fedorova O. I., Gorshkov V. Y. Geoelectric Geoelectric Monitoring of Earthen Hydraulic Structure State by Resistivity and Induced Polarization Methods: Mine Water Settling Pond Dam Case Study // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – V. 23. – № 4. – P. 4011.

22. Elis V. R. et al. Application of induced polarization and resistivity to the environmental investigation of an old waste disposal area // Environmental Earth Sciences. – 2016. – Т. 75. – С. 1-13.

23. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 310 с.

© В. В. Оленченко, А. А. Заплавнова, 2025

УДК 550.837.013(571.5)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-80-87

Е. В. Поспеева[1]✉, М. В. Панарина[2]

Геоэлектрическое строение Ленской ветви Предверхоянского краевого прогиба по магнитотеллурическим данным

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Акционерное общество «ЕМ-РАЗВЕДКА», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Представлены результаты профильных магнитотеллурических исследований, выполненных в пределах северо-восточного окончания Вилюйской синеклизы. Показаны основные особенности геоэлектрического строения осадочного чехла, в котором выделяются девять геоэлектрических горизонтов. Для района исследования характерно широкое развитие дизъюнктивных нарушений, которые определяют специфику проницаемости осадочных толщ платформенного чехла. На глубинах 1000-2000 м в осадочных отложениях выделяется серия субвертикальных проводящих зон со значениями удельного электрического сопротивления 10 Ом·м. В плане они располагаются параллельно фасу надвигания структур Верхоянской складчатой области на мезозойский чехол платформы. Они могут быть проинтерпретированы как принадвиговые структурные ловушки.

Ключевые слова: магнитотеллурические исследования, Вилюйская синеклиза, геоэлектрические горизонты, удельное электрическое сопротивление, проводящие неоднородности

E. V. Pospeeva[1]✉, M. V. Panarina[2]

Geoelectric structure of the Lena branch of the Predverkhoyan marginal trough according to magnetotelluric data

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Joint Stock Company "EM-EXPLORATION", Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

Abstract. The results of profile magnetotelluric studies performed within the northeastern end of the Vilyui syneclise are presented. The main features of the geoelectric structure of the sedimentary cover, in which nine geoelectric horizons are distinguished, are shown. The study area is characterized by widespread development of disjunctive faults, which determine the specificity of permeability of sedimentary strata of the platform cover. At depths of 1000-2000 m, a series of subvertical conductive zones with resistivity values of 10 Ohm-m are identified in sedimentary sediments. In plan they are located parallel to the thrusting phase of the Verkhoyansk folded region structures on the Mesozoic cover of the platform. They can be interpreted as anthropogenic structural traps.

Keywords: magnetotelluric research, Vilyui syneclise, geoelectric horizons, specific electrical resistivity, conductive inhomogeneities

Введение

Площадь исследований располагается в пределах Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции (НГП), расположенной в восточной части Сибирской

платформы (Западная Якутия). В тектоническом плане она приурочена к Вилюйской синеклизе и Предверхоянскому краевому прогибу (рис. 1).

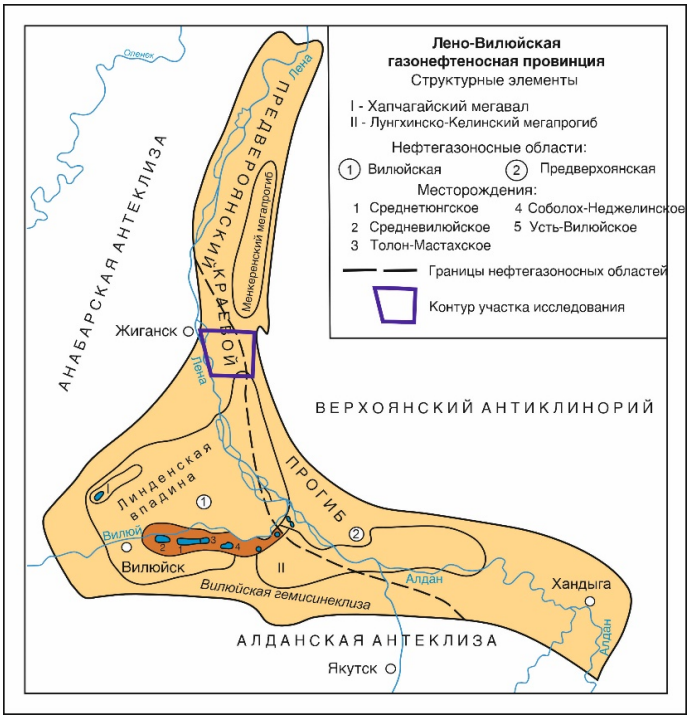


Рис.1. Структурная схема Лено-Вилюйской газонефтеносной провинции

По высокой концентрации углеводородных природных ресурсов Лено-Вилюйская НГП принадлежит к числу важнейших регионов России и включает Вилюйскую газоносную и Предверхоянскую перспективную нефтегазоносную области (НГО). Продуктивными являются верхнепермские, триасовые, юрские и меловые отложения. В пределах Вилюйской синеклизы промышленная газоносность установлена в верхнепермских, нижнетриасовых и нижнеюрских отложениях. Здесь выявлено шесть газоконденсатных месторождений, залежи которых приурочены к крупным положительным структурам – Логлорскому и Хапчагайскому мегавалам [3] В настоящее время на территории Лено-Вилюйской НГП фонд положительных структур и пластовых сводовых залежей практически исчерпан, в связи с чем на передний план выступают исследования на обнаружение структурных принадвиговых ловушек [7], а также выявления областей с неглубоким залеганием нижнеюрских пород. В связи с этим особую актуальность приобретают геофизические исследования по изучению глубинного строения Лено-Вилюйской НГП, в общем комплексе которых, одно из ведущих мест занимают магнитотеллурические зондирования.

Методы и материалы

В качестве основного метода при изучении глубинного строения осадочного чехла Ленской ветви Предверхоянского краевого прогиба применялся метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ), основанный на изучении естествен-

ного переменного электромагнитного поля Земли (мт-поля). Работы выполнены в пределах Ундулюгской площади (Жиганский район) Республики Саха (Якутия) по серии широтных и субмеридиональных профилей (рис. 1). Полевые исследования выполнялись по стандартной методике [5] аппаратурой «MTU-5» канадской компании «Phoenix Geophysics», осуществляющей регистрацию пяти компонент магнитотеллурического поля в диапазоне периодов 0.003 – 1000 с. Шаг наблюдений по профилям составил 2,5 км, длительность записи не менее 19 ч. Для обработки полевых данных использовалось программное обеспечение «Phoenix Geophysics» - SSMT-2000 (Канада) и «МТ-корректор» (Россия). Методика обработки подробно изложена в [6]. Тем не менее следует отметить, что основная особенность обработки полевых данных, полученных на Ундулюгской площади состояла в том, что операция приведения симметричного тензора к его главным осям проводилась от 1 до 3 раз. Это связано с тем, что характерной чертой Вилюйской синеклизы является несовпадение ее контуров и строения по нижним и верхним горизонтам осадочного чехла и поверхности кристаллического фундамента. Слагающие синеклизу мезозойские отложения залегают относительно полого, и по ним она представляется в виде обширной изометричной в плане впадины с простым строением. По поверхности фундамента, орогенному комплексу и нижним горизонтам осадочного чехла Вилюйская синеклиза имеет более сложное дифференцированное строение [4]. В ориентировке структурных элементов выделяют три основных направления: северо-восточное, северо-западное и широтное. Широтное направление имеют структуры первого порядка (в том числе Линденская впадина), северо-западную и северо-восточную ориентировку имеют структуры второго порядка. Кроме того, граница между Вилюйской синеклизой и Предверхоянским краевым прогибом довольно условна и проводится по смене простирания основных структурных элементов с субмеридионального на севере и субширотного на юге, характерных для Предверхоянского прогиба, на диагональное, свойственное Вилюйской синеклизе [9]. Поэтому для определения параметров геоэлектрического разреза (удельного электрического сопротивления и мощности) составлялись кривые кажущегося сопротивления продольные и поперечные к региональной структуре во всем диапазоне частот.

Результаты

В результате проведенных исследований получена новая информация о геоэлектрическом строении платформенного чехла Ленской ветви Предверхоянского краевого прогиба, сложенного верхнепалеозойскими и мезозойскими породами. Наиболее полно разрез осадочных отложений представлен на профилях 22 и 13, выполненных в широтном и субмеридиональном направлениях соответственно (рис.2).

Профиль 22. Здесь выделяется восемь геоэлектрических горизонтов: семь из них формируют отложения платформенного чехла, восьмой – породы фундамента (рис. 3А).

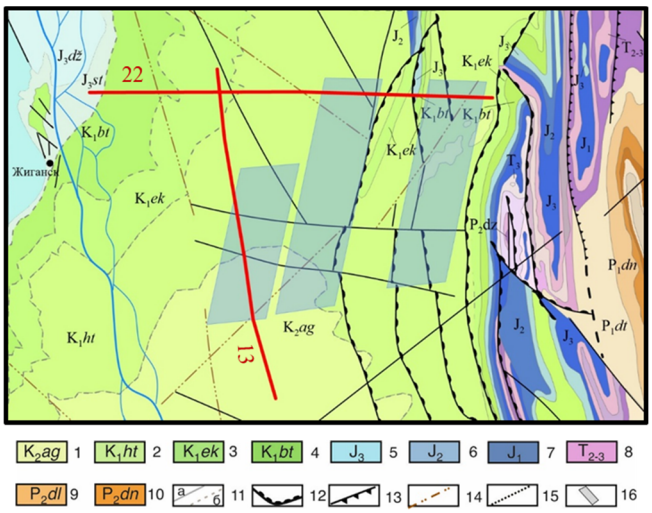


Рис.2. Выкопировка из Государственной геологической карты СССР. Масштаб 1:1 000 000. Листы Q-50-51.1 – отложения аграфеновской свиты верхнего мела; Отложения нижнего мела: 2 – хатырыкская свита, 3 – эксеняхская свита, 4 – батылыхская свита; Отложения юры: 5 – нерасчлененные верхней юры, 6 – нерасчлененные средней юры, 7 – нерасчлененные нижней юры; 8 – нерасчлененные отложения среднего-верхнего триаса; Пермские отложения: 9 – дулгалахский горизонт, 10 – деленжинский горизонт, 11 – тектонические контакты: а – достоверные, б –предполагаемые; 12 – разломы, ограничивающие надвиговые структуры; 13 – разломы с указанием направления падения поверхности сместителя; 14 – предполагаемые разломы, скрытые под более молодыми образованиями; 15 – границы между фациально разными образованиями одного и тоже возраста; 16 – проводящие зоны.

Первый геоэлектрический горизонт приурочен к кайнозойским отложениям (KZ), представленным песками, суглинками, супесями и глинами с обломками выветрелых пород. Максимальная мощность составляет 200 м, а значения удельного электрического сопротивления (УЭС) изменяются от 50 Ом·м в западной до 20-25 Ом·м в центральных частях. В восточной части профиля современные отложения входят в состав второго и третьего геоэлектрических горизонтов. *Второй* геоэлектрический горизонт представлен отложениями хатырыкской свиты нижнего мела (K_{1ht}) и прослеживается только в центральной части профиля (рис. 3А). Свита сложена рыхлыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Мощность горизонта составляет около 150 м, а значения УЭС - 50-60 Ом·м. *Третий* геоэлектрический горизонт приурочен к угленосным нижнемеловым отложениям эксеняхской свиты (K_{1ek}), представленной песчаниками с прослоями аргиллитов и углей. Горизонт выдержан по мощности и значениями УЭС, которые составляют 350 м и 50-60 Ом·м соответственно. В западной части профиля, в районе пунктов 221-222 горизонт полностью выклинивается.

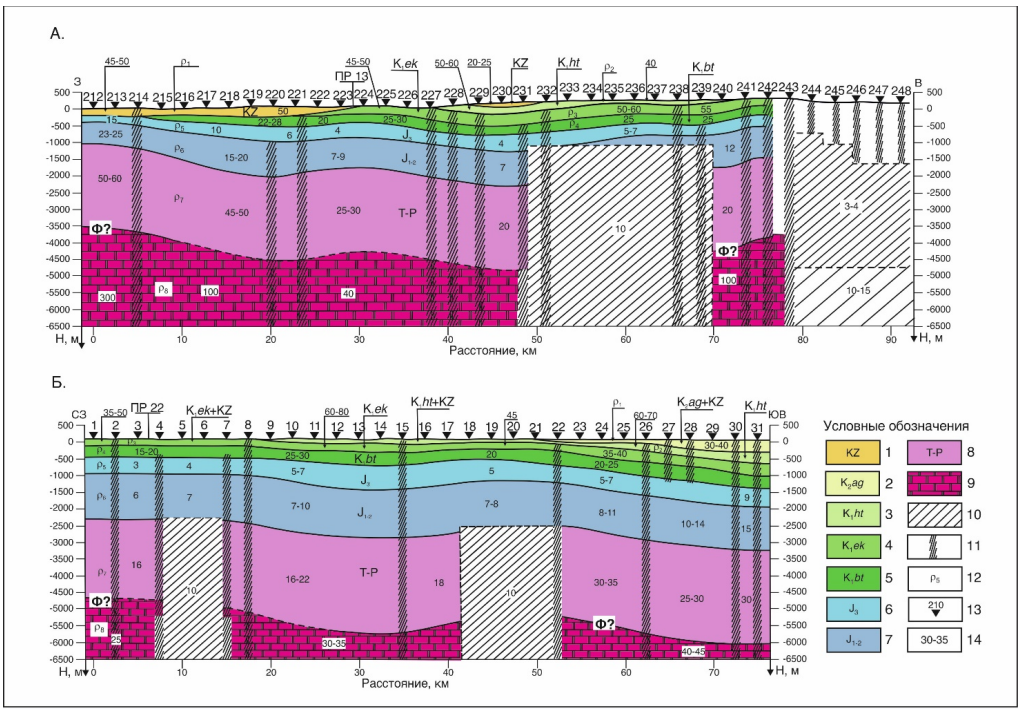


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы осадочного чехла: А – вдоль профиля 22, Б – вдоль профиля 13. 1 – современные кайнозойские осадки; 2 – отложения аграфеновской свиты верхнего мела; Отложения нижнего мела: 3 – хатырыкская свита, 4 – эксеняхская свита, 5 – батылыкская свита; 6 – отложения верхней юры; 7 – нерасчлененные отложения средней-нижней юры; 8 – объединенные отложения триаса и перми; 9 – породы фундамента; 10 – проводящие зоны; 11 – зоны дробления, выделенные по данным МТЗ; 12 – геоэлектрические горизонты, 13 – пункты зондирования; 14 – значения УЭС в Ом·м.

Четвертый геоэлектрический горизонт представлен песчаниками, алевролитами, аргиллитами и углями батылыкской свиты нижнего мела (K_{1bt}). Горизонт выдержан как мощности, так и по значениям УЭС (h ≈ 400 м, ρ = 25-30 Ом·м), а в районе п. 214 полностью выклинивается (рис. 3А). *Пятый и шестой* горизонты представлены отложениями юры (J_3, J_{1-2}). Пятый горизонт характеризуется самыми низкими значениями УЭС, которые уменьшаются в восточном направлении с 15 Ом·м до 4 Ом·м. В этом же направлении увеличивается мощность с 200 м до 400-500 м. Значения мощности и УЭС нерасчлененных отложений нижней-средней юры шестого геоэлектрического горизонта так же увеличиваются в восточном направлении (рис. 3А). *Седьмой* геоэлектрический горизонт представлен нерасчлененными отложениями триаса и перми (Т-Р), которые в основном сложены конгломератами, аргиллитами, туфами и песчаниками. Мощность горизонта около 2500 м, а значения УЭС уменьшаются в восточном направлении с 50-60 Ом·м до 20 Ом·м.

На глубине порядка 3500 м выделяется восьмой геоэлектрический горизонт, который представлен карбонатными отложениями, метаморфизованными слан-

цами и песчаниками раннего протерозоя. Его верхняя кромка, вероятно, является границей фундамента, что соответствует геологическим данным и данным глубокого бурения (рис. 4). Непосредственно информация о составе и возрасте фундамента Вилюйской синеклизы практически отсутствует. Единичные скважины, вскрывшие его в бортовых частях синеклизы в совокупности с характером распределения магнитных аномалий, позволили предположить, что до бортов Вилюйской синеклизы протягиваются архейские кристаллические образования. Они прослеживаются со стороны Анабарской антеклизы и Алданского щита (рис. 4). В пределах самой Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции и ее окрестностях, фундамент перекрыт неогейскими (рифейскими и позднепалеозойскими) образованиями залегает на различной, иногда довольно большой глубине [1]. В центральной части Вилюйской синеклизы предполагается наличие раннепротерозойской складчатой зоны [8]. Совокупность этих данных свидетельствует о резкой дифференциации рельефа фундамента (рис. 4).

Профиль 13 пересекает профиль 22 в районе пунктов 224-225 (рис. 3) и имеет несколько характерных отличий от геоэлектрических разрезов вдоль широтных профилей:

- в состав первого геоэлектрического горизонта входят отложения аграфеновской свиты верхнего мела (K_2ag), представленные песками, аргиллитами и галечниками (рис. 3Б);

- современные осадки (KZ) входят в состав второго и третьего геоэлектрических горизонтов, которые выклиниваются в северо-западном направлении;

- все геоэлектрические горизонты, включая восьмой плавно погружаются на юго-восток - в направлении Линденской впадины;

- кровля восьмого геоэлектрического горизонта картируется на глубине порядка 4500 м и погружается в юго-восточном направлении до 6000 м. В центральной части профиля (п.п. 18-22) отмечается подъем кровли всех восьми горизонтов.

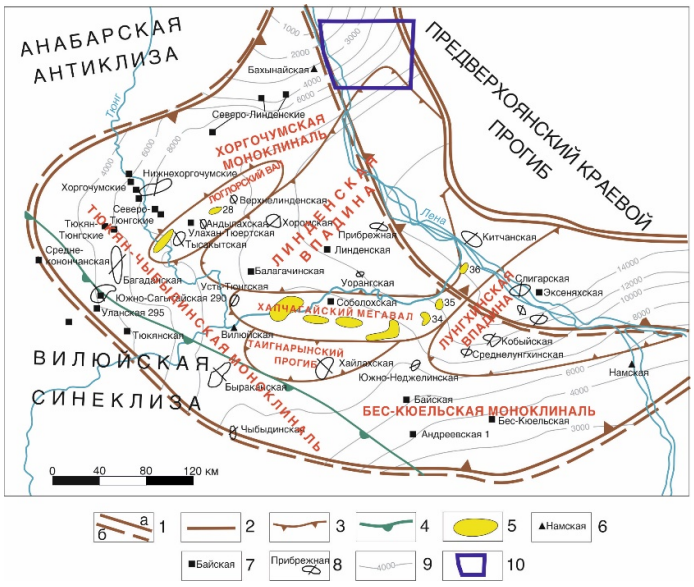


Рис. 4. Перспективные территории, связанные с вендским и венд-кембрийским перспективными нефтегазоносными комплексами [2].

Границы: 1 – нефтегазоносных провинций (а) и областей (б), 2 – важнейших надпорядковых структур (антеклиз, синеклиз, краевых прогибов, седловин), 3 – структур I и II порядка (сводов, выступов, мегавалов, впадин), 4 – Западно-Якутского барьерного рифа; 5 – месторождения газовые и газоконденсатные, 6 – опорные скважины и их название; 7 – параметрические и поисковые скважины и их название, 8 – площади, выведенные из бурения; 9 – изогипсы поверхности фундамента; 10 – контур участка работ.

На всех профилях, на глубинах порядка 1000-1220 м выделяется серия субвертикальных поводящих зон. В плане, они располагаются параллельно разломам, ограничивающим надвиговые структуры, и могут представлять собой принадвиговые структурные ловушки. Для района исследований так же характерно широкое развитие дизъюнктивных нарушений, которые по данным МТЗ представляют собой зоны дробления как с относительно повышенными, так и пониженными значениями УЭС.

Заключение

Результаты магнитотеллурических исследований позволили определить основные особенности геоэлектрического строения Ленской ветви Предверхоянского краевого прогиба.

1. В разрезе осадочного чехла изученной территории выделяются восемь обобщенных геоэлектрических горизонтов, приуроченных к отложениям мезозоя и верхнего палеозоя. Характер распределения значений УЭС показывает, что восьмой геоэлектрический горизонт, скорее всего представлен карбонатными и метаморфическими породами верхнего протерозоя, а его верхняя кромка, является кровлей фундамента. В центральной части площади отмечается подъем кровли всех восьми геоэлектрических горизонтов.

2. Для района исследования характерно широкое развитие разрывных нарушений, которые по данным МТЗ выделяются в виде зон дробления с относительно повышенными (или пониженными) значениями УЭС относительно вмещающих пород.

3. В районе исследований выделяется серия субвертикальных проводящих зон, которые в плане располагаются параллельно фасу надвигания структур Верхоянской складчатой области на мезозойский чехол платформы и могут представлять собой принадвиговые структурные ловушки.

Благодарности

Тезисы подготовлены в рамках Государственного задания ФНИ N FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башарин А.К. Фрадкин Г.С. Лено-Вилюйский нефтегазоносный бассейн: строение и тектоническая эволюция // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 1. – С. 22-33.

2. Васильев С.А., Соболев П.Н., Таффарель Е.С. и др. Нефтегазоносность Вилюйской синеклизы и перспективы поисков залежей углеводородов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 12. – С. 14-26.

3. История нефтегазообразования и нефтегазонакопления на востоке Сибирской платформы. – М.: Наука, 1986. – 165 с.

4. Лено-Вилюйская нефтегазоносная провинция. – М.: Наука, 1969. – 284 с.

5. Новиков И.С., Поспеева Е.В. Неотектоника восточной части Горного Алтая по данным магнитотеллурического зондирования // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 7. – С. 959.

6. Поспеева Е.В. Лапин П.С. Санчаа А.М. Выявление ослабленных зон в земной коре юго-восточного окончания Западной Сибири вдоль профиля п. Пихтовка – п. Половинка // Геофизика. – 2023. – № 3. – С. 64-71.

7. Сафонов А.Ф., Горбачев В.Ф. Строение зоны сочленения Предверхоянского прогиба со складчатой областью // Геология нефти и газа. – 1991. – № 6. – С. 7-16.

8. Фрадкин Г.С., Болдырев М.В., Гайдук В.В. и др. Тектоническое положение и природа Вилюйской синеклизы // Геология и геофизика. – 1984. – В. 1. – Т. 25. – С. 38-50.

9. Фролов С.В., Корнюшина Е.Е., Коробова Н.И и др. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилюйского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 5. – С. 13-30.

© Е. В. Поспеева, М. В. Панарина, 2025

УДК 550.386 + 551.594
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-88-93

В. В. Плоткин[1]✉, Е. В. Поспеева[1], В. В. Потапов[1], А. А. Заплавнова[1]

Оценки достоверности результатов магнитотеллурического зондирования

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

Аннотация. Обратная задача МТЗ неустойчива, даже весьма малым изменениям входных экспериментальных данных – амплитудных и фазовых кривых МТЗ соответствует широкий набор эквивалентных моделей сред. Поэтому для характеристики достоверности результатов МТЗ необходимо определять и приводить разбросы параметров эквивалентных моделей сред. Предлагается алгоритм оценки достоверности результатов МТЗ.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, неустойчивость обратной задачи, достоверность результатов

V. V. Plotkin[1]✉, E. V. Pospeeva[1], V. V. Potapov[1], A. A. Zaplavnova[1]

Estimates of Reliability of Magnetotelluric Sounding Results

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

Abstract. The inverse problem of magnetotelluric sounding (MTS) is unstable, even very small changes in the input experimental data - amplitude and phase curves of MTS correspond to a wide range of equivalent media models. Therefore, to characterize the reliability of MTS results, it is necessary to determine and cite the variations in the parameters of equivalent media models. An algorithm for evaluating the reliability of MTS results is proposed.

Keywords: magnetotelluric sounding, inverse problem instability, reliability of results

Введение

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для определения пространственного распределения и величин электропроводности внутри среды [1, 2]. В эксперименте регистрируются кривые МТЗ – зависимости кажущихся сопротивлений и фаз импеданса от частоты зондирования. При наличии помех значения всех характеристик определяются лишь приблизительно с некоторой погрешностью, зависящей от уровня этих помех. Искомая глубинная структура электропроводности в среде определяется в ходе решения обратной задачи. Но такая задача является неустойчивой. Даже весьма малым изменениям входных экспериментальных данных – амплитудных и фазовых кривых МТЗ может соответствовать широкий набор эквивалентных моделей сред. Следовательно,для характеристики достоверности результатов МТЗ необходимо связать уровень экс-

периментальных погрешностей с разбросами искомых параметров эквивалентных моделей сред.

В данной работе предлагается способ оценки достоверности результатов МТЗ, позволяющий получить и отобразить набор эквивалентных моделей в зависимости от погрешностей экспериментальных данных.

Алгоритм оценок достоверности результатов МТЗ

Обратная задача МТЗ заключается в поисках модели среды, наилучшим образом соответствующей экспериментальным данным. В процессе поиска для каждой из таких моделей сред решается прямая задача вычисления кривых МТЗ. В зависимости от размерности предполагаемой модели среды используют различные методы решения прямой задачи. В случае 1D среды вычисления проводились по аналитическим формулам для горизонтально слоистой модели [2]. Для 2D и 3D сред расчеты выполнялись по методу Треффца [3, 4]. Модели среды в этих случаях представляются набором параллелепипедов, в которых электропроводность однородна.

Обратные задачи решались нелинейным методом наименьших квадратов с вычислениями матрицы чувствительности [5]. Решение находилось по данным пунктов МТЗ с помощью минимизации следующего целевого функционала:

$$\Phi = \frac{1}{4K}\sum_{k=1}^{K}\left(\left|\frac{\ln\rho_{xy}-\ln\rho_{xy}^{0}}{\ln\rho_{xy}^{0}}\right|_k^2+\left|\frac{\ln\rho_{yx}-\ln\rho_{yx}^{0}}{\ln\rho_{yx}^{0}}\right|_k^2+\left|\frac{\varphi_{xy}-\varphi_{xy}^{0}}{\varphi_{xy}^{0}}\right|_k^2+\left|\frac{\varphi_{yx}-\varphi_{yx}^{0}}{\varphi_{yx}^{0}}\right|_k^2,\right)$$

где K – количество учитываемых временных периодов и имеющихся пунктов МТЗ, $\rho_{xy,yx}, \rho^0_{xy,yx}, \varphi_{xy,yx}, \varphi^0_{xy,yx}$ - кажущиеся сопротивления и фазы для текущей и исходной модели среды соответственно.

Предлагаемый алгоритм оценок достоверности результатов МТЗ применен к тестовым моделям сред и состоит из следующих этапов. Для всех выбранных тестовых моделей сред решения обратной задачи находились несколько раз с разными стартовыми моделями и ограниченным количеством итераций. По результатам всех решений обратных задач определялись средняя модель среды, с.к.о. параметров эквивалентных моделей и соответствующих кривых МТЗ.

Оценки достоверности результатов МТЗ

Предлагаемым алгоритмом получены оценки достоверности результатов МТЗ для случаев 1D сред. В качестве одного примера на рис. 1 отображена исходная модель среды (сплошная черного цвета). Она состоит из 5 слоев толщиной 3 км каждый с сопротивлениями 40, 10, 10^2, 10^3, 10^5 Ом·м (сверху вниз) и подстилающим пространством с сопротивлением 10^6 Ом·м.

Обратная задача решалась 50 раз с различными стартовыми моделями. Все стартовые модели также представлены 5 слоями, но со случайным выбором тол-

щин слоев (от 2.8 до 3.2 км) и их сопротивлений в диапазоне 1-10^3 Ом·м. Такие коридоры изменения параметров определяют соответствующие наборы эквивалентных моделей искомой среды. Решение каждой обратной задачи ограничивалось 15 итерациями, практически во всех вариантах невязки кривых МТЗ по относительной величине не превышали 10^{-4}. На рис. 1 (внизу) даны кривые МТЗ для исходной модели (сплошные линии) и для всех эквивалентных моделей (пунктир). Однако даже столь малым невязкам кривых МТЗ для всех эквивалентных моделей 1D среды соответствуют широкие коридоры их параметров. На рис.1 (вверху) сплошной линией красного цвета приведена усредненная по всем эквивалентным модель среды и пунктиром коридоры (с.к.о.) параметров этих моделей. Стоит отметить, что надежнее определяются верхние слои исходной модели, а более глубокие слои - с большим разбросом эквивалентности моделей даже при очень малых с.к.о. кривых МТЗ. Это вызвано диффузным характером распространения электромагнитного поля и увеличением толщины скин-слоя на более низких частотах.

В качестве другого примера на рис. 2 и 3 отображены результаты расчетов для модели 2D среды, состоящей из пяти неоднородных вдоль оси *OX* слоев и однородного подстилающего полупространства. Моделировался наклонный разлом, справа от него сопротивление среды задавалось равным 10^3 Ом·м, слева сопротивления слоев равны 100, 200, 400, 600, 800 Ом·м (сверху вниз), все слои толщиной 6 км. Подстилающее полупространство 10^3 Ом·м. В каждом слое модель представлялась набором одинаковых параллелепипедов, в которых электропроводность однородна. Их количество 11, размер полигона вдоль оси *OX* равен 44 км. На поверхности среды имеется 9 пунктов МТЗ, расположенных через 5 км (они показаны на поверхности крестиками и цифрами черного цветы).

Обратная задача решалась 10 раз с различными стартовыми моделями. Все стартовые модели задавались как однородное полупространство с различным сопротивлением (вблизи 500 Ом·м, случайные отклонения сопротивлений определяли разброс эквивалентных моделей искомой среды). Толщины слоев также задавались случайным образом (вблизи 7 км). Решение каждой обратной задачи ограничивалось 50 итерациями. Для регуляризации также вводились априорные данные в виде ограничений на коридоры искомых параметров модели среды (диапазон сопротивлений 50-2000 Ом·м, толщин слоев 5-10 км). По результатам 10 решений обратных задач определялись средняя модель среды, с.к.о. ее параметров, а также разбросы кривых МТЗ. Во всех вариантах решений невязки кривых МТЗ по относительной величине не превышали 10^{-6}. На рис. 3 показаны кривые МТЗ во всех пунктах для исходной тестовой модели (сплошными линиями). Пунктиром показаны те же кривые для усредненной модели по всем эквивалентным моделям. Вертикальными отрезками черного цвета отображены с.к.о. кривых, вычисленные по всем эквивалентным моделям (по сопротивлениям они <3.5 Ом·м, по фазам < 0.5º).

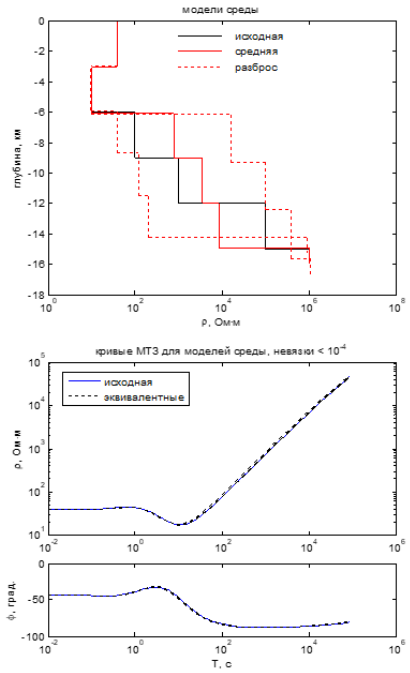


Рис. 1. Разбросы параметров эквивалентных моделей для случая 1D среды (вверху) и разбросы параметров соответствующих кривых МТЗ (внизу).

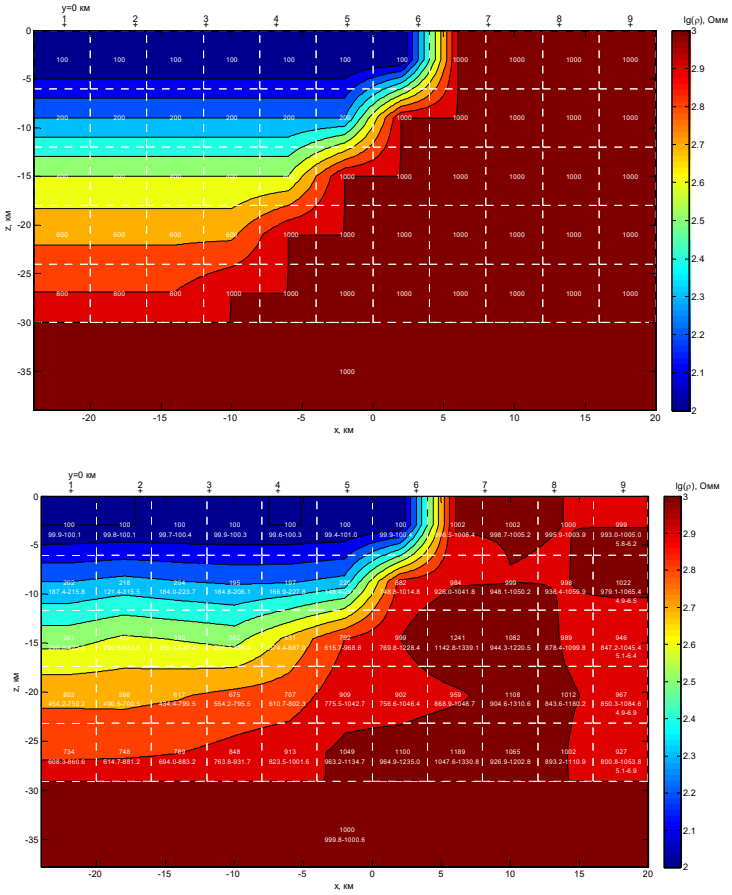


Рис. 2. Исходная (вверху) и усредненная по всем эквивалентным модель 2D среды (внизу).

Цифрами белого цвета указаны сопротивления, их разбросы, дополнительно в правой колонке - разбросы толщин слоев в эквивалентных моделях для всех параллелепипедов, отображающих среду в расчетах методом Треффца, на поверхности указаны пункты МТЗ. Пунктирами белого цвета показаны границы параллелепипедов, представляющих среднюю и исходную модели среды.

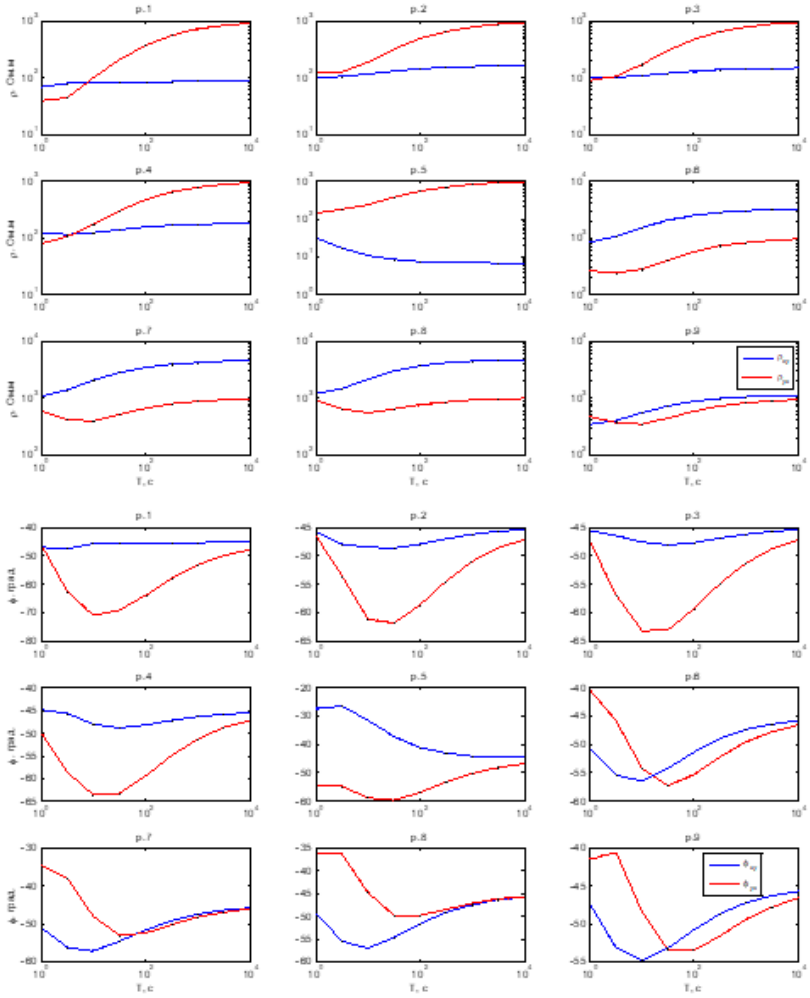


Рис. 3. Кривые кажущихся сопротивлений (вверху) и фаз импедансов (внизу) в пунктах МТЗ. Для исходной модели кривые показаны сплошными линиями, для усредненной по всем эквивалентным моделям 2D среды они даны пунктиром. Вертикальными отрезками черного цвета отображены с.к.о. кривых, вычисленные по всем эквивалентным моделям (по сопротивлениям они <3.5 Ом·м, по фазам < 0.5º).

Как видно, все кривые в одной и той же ситуации практически совпадают. Однако при малых различиях кривых МТЗ эквивалентные модели отличаются по параметрам более заметно, и разбросы параметров увеличиваются с ростом глубины (рис. 2). Как и в 1D случае, это связано с возрастанием толщины скин-слоя на низких частотах зондирования и вызванным данным обстоятельством паде-

нием степени разрешения метода МТЗ по определению распределения электропроводности на больших глубинах. Поэтому надежнее определяются лишь верхние слои исходной тестовой модели среды.

Заключение

Предложен алгоритм получения оценок достоверности результатов МТЗ. Он позволяет определить и отобразить набор эквивалентных моделей сред в зависимости от погрешностей экспериментальных данных.

Показано, что методом МТЗ надежнее определяются верхние слои моделей сред, а более глубокие слои - с увеличенным разбросом эквивалентных моделей даже при очень малых с.к.о. кривых МТЗ. Это вызвано диффузным характером распространения электромагнитного поля и увеличением толщины скин-слоя на более низких частотах.

На тестовых моделях сред продемонстрировано, как можно определить степень достоверности результатов МТЗ для рассматриваемой модели среды. Аналогичным способом вполне можно определить разбросы эквивалентных моделей среды, обусловленные погрешностями в кривых МТЗ при работах с экспериментальными данными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. - 668 с.

2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. – 320 с.

3. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. - 2011. - Т. 47. - № 2. - С. 15-26.

4. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56. - № 7. - С. 1381-1390.

5. Плоткин В.В. Алгоритм устойчивого решения обратной задачи магнитотеллурического зондирования // Геофизические технологии. – 2023. – № 1. – С. 13-24.

© В. В. Плоткин, Е. В. Поспеева, В. В. Потапов, А. А. Заплавнова, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-94-98

С. Н. Понасенко[1,2]✉, С. В. Яскевич[1,2], А. А. Дучков[1,2], Р. А. Бакеев[3], Ю. П. Стефанов[1,2,3]

Оценка сейсмичности инициации разлома при закачке CO_2 с помощью геомеханического моделирования

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: PonasenkoSN@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе исследуются механизмы инициации разломов, вызванные закачкой CO_2 в отработанные нефте- и газосодержащие пласты, с использованием геомеханического моделирования. Основное внимание уделено анализу изменений напряженно-деформированного состояния среды и генерации упругих волн при активации разломов. Для моделирования применялось решение системы уравнений динамики поро-упругопластической среды, а также анализ синтетических сейсмограмм с использованием метода инверсии тензора момента. Результаты показали, что инициация разломов сопровождается сейсмическими событиями, соответствующими механизму источника типа двойной пары сил. Установлено, что угол наклона разлома не влияет на диаграмму направленности излучения. Однако выделение времен вступлений P- и S-волн остается сложной задачей даже для синтетических данных. Полученные данные важны для разработки методов мониторинга и прогнозирования сейсмической активности при захоронении CO_2.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, инверсия тензора сейсмического момента, геомеханическое моделирование, захоронение CO_2

S. N. Ponasenko[1,2]✉, S. V. Yaskevich[1,2], A. A. Duchkov[1,2], R. A. Bakeev[3], Y. P. Stefanov[1,2,3]

Assessment of seismicity associated with fault activation due to CO_2 injection using geomechanical modeling

[1]Institute Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[3]Institute of Strength Physics and Materials Science CO PAH,
Tomsk, Russian Federation
e-mail: PonasenkoSN@ipgg.sbras.ru

Abstract. The study investigates the mechanisms of fault initiation caused by CO_2 injection into depleted oil and gas reservoirs using geomechanical modeling. The focus is on analyzing changes in the stress-strain state of the medium and the generation of elastic waves during fault activation. The modeling involved solving a system of equations for the dynamics of a poro-elastoplastic medium and analyzing synthetic seismograms using moment tensor inversion. The results demonstrated that fault initiation is accompanied by seismic events corresponding to a double-couple source mechanism. It was found that the fault dip angle does not affect the radiation pattern. However, identifying

P- and S-wave arrival times remains challenging even for synthetic data. The findings are significant for developing monitoring and forecasting methods for seismic activity during CO_2 storage.

Keywords: microseismic monitoring, seismic moment tensor inversion, geomechanical modeling, CO_2 sequestration

Введение

При планировании мероприятий по захоронению CO_2 в отработанные нефте- и газосодержащие пласты, необходимо учитывать тектонические разломы. При закачке газа происходят изменения напряженно-деформированного состояния среды, которые могут привести к деформациям [1-6]. Основным методом мониторинга инициации смещений по разлому является микросейсмический мониторинг, однако далеко не все смещения сопровождаются сейсмичностью [7-9].

Данная работа посвящена изучению механизмов инициации разлома, вызванной закачкой CO_2 в пласт с использованием геомеханического моделирования включающего волновое поле, распространяющееся в модели.

Методы и материалы

Для анализа колебаний с целью построения конфигурации источника и сопоставления с теоретическими источниками излучения осуществлялась специальная запись данных в виде, аналогичном записи сейсмоприемников. Моделирование процесса деформации связанного с нагнетанием жидкости и излучения упругих волн, вызванных активацией разлома, осуществлялось с помощью решения сопряженной системы уравнений динамики поро-упругопластической среды [10].

Расчеты проводились для системы наблюдений изображенной на рис. 1. К синтетическим сейсмограммам применялся классический граф обработки микросейсмических данных. Определение механизмов события было реализовано с помощью инверсии тензора момента **M**, представляющего собой симметричную матрицу 2 на 2 в двумерном случае. Его можно представить в виде вектора из трех независимых элементов $\boldsymbol{m} = (M_{11},\ M_{22},\ M_{33})$. Тензор момента описывает точечный источник, генерирующий следующее волновое поле:

$$u_i = M_{kl} G_{ik,l}, \qquad G_{ik,l} = \frac{g_i g_k n_l}{4\pi\rho v^3 r}, \tag{1}$$

где u_i – компоненты вектора смещения, соответствующие зарегистрированному волновому полю, n_l – компоненты единичного вектора **n**, направленного от источника к приемнику, $G_{ik,l}$ – компоненты тензора Грина, g_i – вектор поляризации, v – сейсмическая скорость, r – расстояние между источником и приемником.

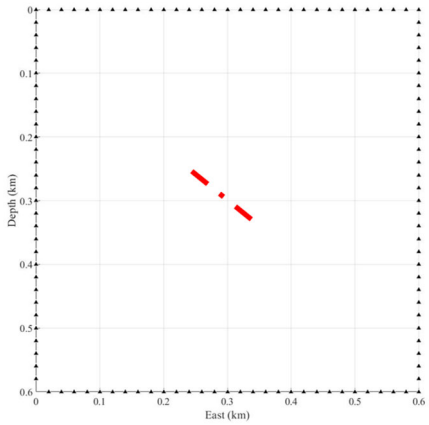


Рис. 1. Система наблюдения для анализа 2D расчетов. Треугольные маркеры показывают положение 2-х компонентных сейсмоприемников, которые окружают область разлома, схематично показанную пунктирной линией

Уравнение (2) определяет линейную связь между амплитудами наблюдаемых волн и описанием источника тензора момента:

$$\mathrm{u} = \mathrm{Am}, \tag{2}$$

где $\mathbf{u}$ – вектор амплитуд соответствующего типа волны, матрица $\mathbf{A}$ зависит от свойств среды и диаграммы направленности, неизвестный вектор $\mathbf{m}$ описывает источник тензора момента.

Таким образом, тензор сейсмического момента в источнике можно найти как регуляризованное решение системы (2). В данной работе для нахождения решения используется метод наименьших квадратов.

Результаты

Численное моделирование было проведено на 4 моделях, отличающихся друг от друга углом наклона разлома (от 20 до 40 градусов), размером расчетной области и скоростью закачки. На рис. 2 изображен пример синтетической сейсмограммы. Средняя длина волны 100 м.

Видно, что форма поляризации близка к механизму источника типа двойной пары сил (рис. 3). Данный механизм источника наблюдался во всех случаях в независимости от угла наклона разлома.

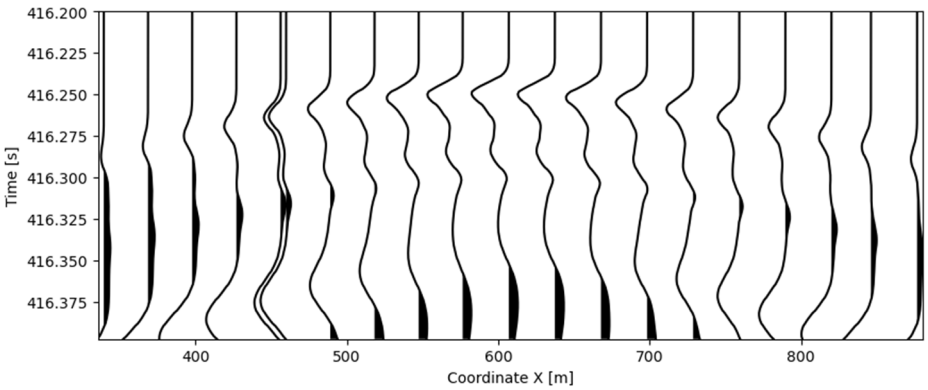


Рис. 2. Синтетическая сейсмограмма.

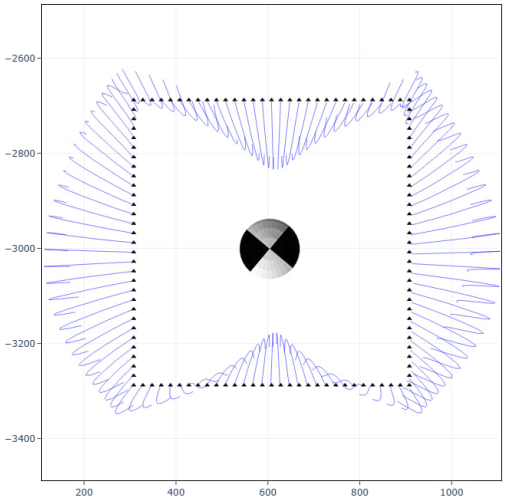


Рис. 3. Поляризации продольной волны.

Треугольники обозначают положения приемников, кривые синего цвета иллюстрируют направление и форму колебаний в точках приемников в окне вступления продольной волны. В центре изображен механизм события

Заключение

На результатах геомеханического моделирования были зафиксированные сейсмические события. Таким образом, предварительно можно считать инициацию разлома при захоронении CO_2 сейсмичным процессом. Однако выделение времен вступлений P- и S-волн даже на синтетических данных остается сложным.

В результате численного моделирования были получены механизмы событий соответствующие двойной паре сил. Изменение угла наклона разлома никак не повлияло на диаграмму направленности.

Благодарности

Авторы исследования выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации по гранту 075-15-2003-588.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zoback M., Gorelick S. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 109. – № 26. – P. 10164-10168.

2. Zoback M., Gorelick S. To prevent earthquake triggering, pressure changes due to CO_2 injection need to be limited // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 112. – № 33. – P. E4510-E4510.

3. Verdon J. P., Kendall J.-M., Stork A. L., Chadwick R. A., White D. J., Bissell, R. C. Comparison of geomechanical deformation induced by megaton-scale CO_2 storage at Sleipner, Weyburn, and in Salah // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 110. – № 30. – P. E2762-E2771.

4. Vilarrasa V., Carrera J. Geologic carbon storage is unlikely to trigger large earthquakes and reactivate faults through which CO_2 could leak // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 112. – № 19. – P. 5938-5943.

5. Vilarrasa V., Carrera J., Olivella S., Rutqvist J., Laloui L. Induced seismicity in geologic carbon storage // Solid Earth. – 2019. – Vol. 10. – № 3. – P. 871-892.

6. Adams B. M., Vogler D., Kuehn T. H., Bielicki J. M., Garapati N., Saar M. O. Heat depletion in sedimentary basins and its effect on the design and electric power output of CO_2 plume geothermal (CPG) systems // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 172. – P. 1393-1403.

7. Wilson M. P., Foulger G. R., Gluyas J. G., Davies R. J., Julian B. R. HiQuake: The human-induced earthquake database // Seismological Research Letters. – 2017. – Vol. 88. – № 6. – P. 1560-1565.

8. Amann F., Gischig V., Evans K., Doetsch J., Jalali R., Valley B., et al. The seismo-hydro-mechanical behaviour during deep geothermal reservoir stimulations: open questions tackled in a decameter-scale in-situ stimulation experiment // Solid Earth. – 2018. – Vol. 9. – № 1. – P. 115-137.

9. Gischig V. S., Giardini D., Amann F., Hertrich M., Krietsch H., Loew S., et al. Hydraulic stimulation and fluid circulation experiments in underground laboratories: Stepping up the scale towards engineered geothermal systems // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2020. – Vol. 24. – P. 100175.

10. Eremin M. O., Bakeev R. A., Stefanov Y. P., Chirkov A. O., Pazhin A. Finite-difference analysis of plane-parallel and plane-radial flows in the elastic mode of liquid and gas filtration // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2024. – №. 3. – P. 97-107.

© С. Н. Понасенко, С. В. Яскевич, А. А. Дучков, Р. А. Бакеев, Ю. П. Стефанов, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-99-102

М. И. Протасов[1]✉

Объектно-ориентированный алгоритм выделения рассеянных волн в сейсмических данных

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

Аннотация. Рассеянные волны используются для построения дифракционных сейсмических изображений и дальнейшей интерпретации. Существуют различные алгоритмы их извлечения, которые можно разделить на три класса по этапам обработки данных: процедуры в области данных, методы на основе миграции и обработка изображений. В работе представлен объектно-ориентированный алгоритм выделения рассеянных волн в области данных. Численные эксперименты выполнены с использованием реальных данных и синтетических данных, полученных для реалистичной модели с трещинами для месторождения в Восточной Сибири.

Ключевые слова: сейсмические данные, дифракционные изображения, объектно-ориентированный, рассеянные волны

M. I. Protasov[1]✉

Object-oriented algorithm for the extraction of diffracted/scattered waves in the data

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

Abstract. Diffracted/scattered waves are used to construct diffraction images and further seismic interpretation. Various algorithms exist for their extraction, which can be categorized into three classes based on the data processing steps: data domain procedures, migration-based methods, and image processing techniques. This paper presents an object-oriented data domain diffraction separation algorithm. Numerical experiments are conducted using synthetic data generated from a realistic model with fractures based on a field in Eastern Siberia, as well as real seismic data.

Keywords: seismic data, diffraction imaging, object-oriented, scattered waves

Введение

Рассеянные волны используются для построения дифракционных сейсмических изображений. Существуют различные алгоритмы их выделения, которые можно разделить на три класса по отношению к процессу обработки: в области данных [1], в процессе миграции [2] и при обработке изображений [3].

Алгоритмы, которые выделяют рассеянные волны в процессе миграции, основаны на подавлении энергии отражённых волн, но при этом они подавляют часть энергии рассеянных волн. Таким же недостатком обладают алгоритмы обработки изображений. Не идеально, но наиболее полно рассеянные волны возможно сохранить при работе непосредственно в области сейсмических данных.

При этом возникает возможность более широкого использования как процедур миграции, так и процедур обработки изображений.

В рамках данной работы предложен и реализован объектно-ориентированный алгоритм выделения рассеянных волн в области сейсмических данных. Алгоритм основан на усилении энергии рассеянных волн, связанных с предполагаемыми объектами дифракции в целевой области. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных, полученных для реалистичной модели с трещинами для одного из месторождений в Восточной Сибири, а также представлены результаты применения на реальных сейсмических данных.

Алгоритм выделения рассеянных волн

Предполагается, что сейсмические данные содержат отраженные волны и дифрагированные/рассеянные волны. Данные рассматриваются в области средняя точка - вынос:

$$d(t, x_m, h) = ref(t, x_m, h) + dif(t, x_m, h), \quad (1)$$

где d – сейсмические данные, ref – отражённые волны, dif – дифрагированные/рассеянные волны, (t, x_m, h) – время, средняя точка, и вынос соответственно. Алгоритм выделения дифрагированных/рассеянных волн dif из сейсмических данных d основан на принципиально различном кинематическом поведении отраженных и дифрагированных/рассеянных волн на сейсмограммах общих удалений. Годограф отраженной волны в этой области $t_{ref}(x_m)$ «повторяет» соответствующие отражающие границы раздела, и обычно они представляют собой локально-плоские участки:

$$t_{ref}(x_m) \approx t_0 + a \cdot x_m. \quad (2)$$

Но годограф дифрагированной/рассеянной волны $t_{ref}(x_m)$ устроен так, что производные второго порядка имеют значительное влияние:

$$t_{dif}(x_m) \approx t_0 + a \cdot x_m + b \cdot x_m^2. \quad (3)$$

Такое поведение можно наблюдать на простом модельном примере с двумя горизонтальными слоями и четырьмя точечными рассеивателями (Рисунок 1). Отражённая волна представляет собой плоское событие, в то время как дифракция имеет значительную кривизну. Такие различия дают возможность создать широкий спектр алгоритмов [1].

Предлагаемый здесь алгоритм улучшает дифрагированные/рассеянные волны и подавляет избыточные отраженные события. Процедура основана на оценке кинематики дифрагированных/рассеянных волн (3) и их оператор-ориентированное суммировании при достаточно больших апертурах [4]. Кинематика рассеянных волн при этом оценивается путём расчёта возможных годографов рассеянных волн в построенной ранее скоростной модели только для целевой области, где предполагается строить дифракционные изображения. При этом выделяются только те волны, которые порождаются рассеивающими объектами, расположенными в этой области.

Численные эксперименты

Использованные для тестирования алгоритма реальные сейсмические данные получены после обработки, в ходе которой оценивается сохранность рассеянной компоненты. В результате подтверждается, что в этих данныхрассеянная компонента действительно сохраняется. Далее, разработанный объектно-ориентированный алгоритм применяется для извлечения рассеянных волн из сейсмических данных (Рис. 1) для выбранной целевой зоны изображения.

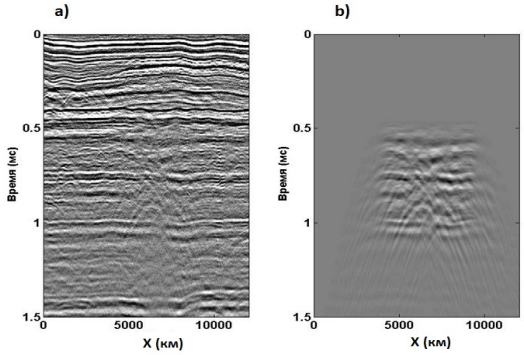


Рис. 1. а) Реальные сейсмические данные в области центральных точек, содержащие рассеянные волны. б) Сейсмические данные после применения объектно-ориентированного алгоритма выделения рассеянных волн на основе операторно-ориентированного суммирования.

Исследование показывает, что алгоритм эффективно усиливает рассеянные волны, одновременно ослабляя отраженные волны. Наконец, применение разработанного алгоритма для построения дифракционных изображений дает результаты (Рис. 2б), которые практически не содержат остаточных отражений, лучше сфокусированы и демонстрируют более высокое отношение сигнал/шум по сравнению с дифракционными изображениями, полученными с использованием асимметричного суммирования исходных данных (Рис. 2а).

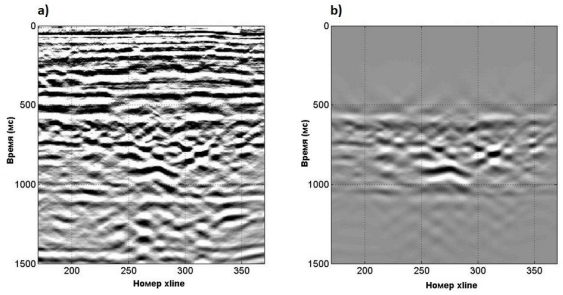


Рис. 2. а) Дифракционное изображения во временной области, построенное асимметричным суммированием исходных реалных сейсмических данных. б) Дифракционное изображения во временной области, построенное асимметричным суммированием сейсмических данных после применения объектно-ориентированного алгоритма выделения рассеянных волн на основе операторно-ориентированного суммирования.

Обсуждение и заключение

Разработан и протестирован новый объектно-ориентированный алгоритм выделения рассеянных волн в области данных. Алгоритм использует различие в кинематике отраженных и рассеянных волн в области общего выноса. Основным этапом процедуры является усиление рассеянных волн, порождённых объектами дифракции в выбранной целевой области. На простых и реалистичных наборах данных исследование показывает, что предложенный алгоритм выделения рассеянных волн в области данных обеспечивает приемлемую аппроксимацию рассеянных волн.

Результаты применения разработанного объектно-ориентированного алгоритма к реальным данным показывают, что с его помощью можно получать более качественные дифракционные изображения с меньшим количеством остаточных отражений и улучшенным отношением сигнал/шум по сравнению с дифракционными изображениями, полученными с использованием алгоритма асимметричнного суммирования исходных данных.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда грант №21-71-20002-П. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bansal R., Imhof M. Diffraction enhancement in prestack seismic data: Geophysics. – 2005. – v. 70. – p. 73-79.

2. Fomel S., Landa E., Taner T. Poststack velocity analysis by separation and imaging of seismic diffractions: Geophysics. – 2007. – v. 72. – p. 89–94.

3. Moser T.J., Howard C.B. Diffraction imaging in depth: Geophysical Prospecting. – 2008. – v. 56. – p. 627–642.

4. Bakulin A., Silvestrov I., Dmitriev M., Neklyudov D., Protasov M., Gadylshin K., Dolgov V. Nonlinear beamforming for enhancement of 3D prestack land seismic data: Geophysics. – 2020. – v. 85. – p. V283-V296.

© М. И. Протасов, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-103-109

А. С. Сердюков[1]✉, В. В Сказка[2], Н. Е. Бирючков[1]

Моделирование распространения поверхностных сейсмических волн в частотной области

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А.Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Аннотация. Методы малоглубиной сейсморазведки на основе наблюдения и обработки данных поверхностных сейсмических волн широко применяются при решении различных инженерных задач. Традиционными являются подходы интерпретации получаемых данных на основе дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн. Тем не менее, для более полного анализа данных требуется моделирование полных полей. В работе рассматривается алгоритм на основе конечных разностей в частотной области. Конечно-разностное моделирование в частотной области имеет ряд преимуществ (по сравнению с моделированием во временной области): простой способ введения поглощения, сохранение поля во всей расчетной области для дальнейшего применения в алгоритмах обработки типа метода полноволнового обращения и сейсмической миграции в обратном времени. Распространенным подходом моделирования свободной поверхности является чётное продолжение полей скоростей смещения и нечётное продолжение напряжений за границу свободной поверхности. В данной статье мы рассматриваем более аккуратный (теоретически обоснованный) способ введения свободной поверхности.

Ключевые слова: поверхностные сейсмических волны, конечно-разностное моделирование, эллиптичность волны Релея

A. S. Serdyukov[1]✉, V. V. Skazka[2], N. E. Biryuchkov[2]

Modeling of surface seismic wave propagation in the frequency domain

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Abstract. Methods of shallow-depth seismic exploration based on the observation and processing of surface seismic wave data are widely used in solving various engineering problems. Traditional approaches are to interpret the data, obtained based on the dispersion curves of the surface waves phase velocities. However, for a more complete analysis of the data, the full fields are combined. The paper considers an algorithm based on finite differences in the frequency domain. Finite difference modeling in the frequency domain has a number of advantages (compared to time domain modeling): a simple method for modeling absorption, the ability to preserve the field in the entire computational domain for further use in algorithms such as the full-wave inversion and reverse time migration. A common approach to modeling a free surface is an even continuation of the displacement velocity

fields and an odd continuation of stresses beyond the boundary with the free surface. In this paper, we consider a more accurate (theoretically justified) method of introducing a free surface.

Keywords: seismic surface waves, finite difference method, Releigh wave elliptisity

Введение

Многоканальный анализ поверхностных сейсмических волн в последнее время уже является стандартным методом инженерной сейсморазведки. Обработка данных осуществляется в рамках горизонтально-слоистой модели среды путем сравнения наблюдаемых и рассчитанных дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн. В ряде случаев такого стандартного подхода недостаточно, например, при решении задачи обнаружения малых по сравнению с длинами наблюдаемых волн, неоднородностей в массиве горных пород. Так же стандартный подход на основе дисперсионных кривых проблематично использовать в случае наличия высокоскоростных верхних слоев мерзлых пород. В этом случае наблюдается интерференция различных мод поверхностных волн и, в результате, наблюдаемые дисперсионные изображения не соответствуют рассчитанным кривым. Для решения этих проблем необходимо решать уравнения упругости в полной постановке. Так же и метод полноволнового обращения (FWI), может быть, по-видимому, с некоторыми модификациями, использован для изучения верхней части разреза. Наиболее оптимальным, как с точки зрения вычислительных ресурсов, так и простоты реализации, подходом к численному моделированию распространения сейсмических волн является метод конечных разностей. Самым распространённой является схема на сдвинутых сетках [1], а для подавления отражений на границах расчётной области используют идеально-согласованные слои [2]. Существует множество свободно-распространяемых программных пакетов, в которых эти методы применяются для решений уравнений упругости во временной области. Для моделирования поглощения сейсмических волн при этом используются уравнения вязкой упругости, что на наш взгляд, является слишком ограниченным в случае грунтов. Более перспективным, особенно применительно к верхней части разреза, является решение уравнений в частотной области. За счёт введения комплекснозначных скоростей возможно задавать добротности распространения продольных и поперечных сейсмических волн независимо на различных частотах. После решения уравнений в частотной области получаем комплекснозначные поля скоростей смещений сразу во всех точках расчётной области, что значительно облегчает расчёт градиента и Гессиана при реализации метода FWI, и вообще, позволяет визуально наблюдать и анализировать монохроматические волновые поля. Реализация свободной поверхности в рамках конечно-разностного подхода на сдвинутых сетках является отдельной проблемой [3]. Во многих программных пакетах, например, в известном SOFI 2D/3D, свободная поверхность реализована путем четного продолжения скоростей смещений и нечетного продолжения компонент тензора напряжений. Более строгим подходом является замена конечно-разностной аппроксимации уравнений упругости на выражения, связывающие производные

скоростей смещения на свободной поверхности. Такой способ не подходит для моделирования в частотной области – приводит к плохой обусловленности системы линейных уравнений. В данной статье мы продлеваем нечетным образом лишь компоненты касательных напряжений, а далее используя соотношения на свободной поверхности выражаем нормальные производные скоростей смещений через производные в горизонтальных направлениях.

Методы и материалы

Уравнения упругости в частотной области имеют вид (рассматривается двумерный случай):

$$\begin{cases} -i\omega V_x = \dfrac{1}{\rho(\mathbf{x})}\left(\dfrac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}\right) + F_x \\ -i\omega V_z = \dfrac{1}{\rho(\mathbf{x})}\left(\dfrac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) + F_z \\ -i\omega\sigma_{xx} = \left(\lambda(\mathbf{x}) + 2\mu(\mathbf{x})\right)\dfrac{\partial V_x}{\partial x} + \lambda(\mathbf{x})\dfrac{\partial V_z}{\partial z} - i\omega\sigma^0_{xx} \\ -i\omega\sigma_{zz} = \lambda(\mathbf{x})\dfrac{\partial V_x}{\partial x} + \left(\lambda(\mathbf{x}) + 2\mu(\mathbf{x})\right)\dfrac{\partial V_z}{\partial z} - i\omega\sigma^0_{zz} \\ -i\omega\sigma_{xz} = \mu(\mathbf{x})\left(\dfrac{\partial V_x}{\partial z} + \dfrac{\partial V_z}{\partial x}\right) - i\omega\sigma^0_{xz}, \end{cases} \quad (1)$$

где V_x, V_z – скорости смещений частиц среды; $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$ – напряжения; ρ, λ, μ – плотность и параметры Ламе, характеризующие свойства упругой среды; ω – круговая частота; F_x, F_z – компоненты источника типа направленной силы; $\sigma^0_{xx}, \sigma^0_{zz}, \sigma^0_{xz}$ – компоненты тензора сейсмических моментов.

Для аппроксимации производных в уравнении (1) используются центральные разности. В итоговую систему линейных алгебраических уравнений напряжения не входят – они выражаются из последних трёх уравнений и подставляются в первые два уравнения. Приводить здесь соотношения не будем, в силу их громоздкости. Моделирование проглощения производится путём введения комплекснозначных скоростей пробега продольных и поперечных волн (2):

$$\bar{c}(\omega) = c\left(1 - \frac{i}{2Q_{att}(\omega)}\right) \quad (2),$$

где c – скорость продольных или поперечных сейсмических волн; Q_{att} – соответсвующая добротность (чем меньше значения этой величины, тем

больше поглощение). Добротности могут задаваться различнами для продольных и поперчных волн, а также отдельно на каждой частоте.

Более подробно остановимся на моделировании свободной поверхности. Условие на свободной поверхности заключается в обращении в ноль компонент напряжений $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = 0$. Запишем эти два условия через скорости смещений (3):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_z}{\partial x} = -\dfrac{\partial V_x}{\partial z} \\ \dfrac{\partial V_x}{\partial x} = -\left(1 - 2\dfrac{\mu}{\lambda + 2\mu}\right)\dfrac{\partial V_z}{\partial z}. \end{cases} \tag{3}$$

Свободную поверхность положим проходящей через точки сетки, в которых заданы горизонтальные компоненты смещения (рис.1.). На этой же линии вычисляются и значения $\sigma_{zz} = 0$ (узлы отмеченны черными квадратами на рис. 1), на свободной поверхности эти нормальные напряжения равны нулю. Таким образом, можно сразу положить $\sigma_{zz} = 0$. Для вычисления производных $\dfrac{\partial V_z}{\partial z}$, необходимых для расчёта σ_{xx} на свободной поверхности (узлы показаны черными квадратами), с помощью центральных разностей не хватает (из-за свободной поверхзности) узлов сетки, показанных на схеме рис. 1. ромбами. Эта проблема решается с помощью выражения $\dfrac{\partial V_z}{\partial z}$ через $\dfrac{\partial V_x}{\partial x}$ из второго уравнения условий (3). Остается получить производные $\dfrac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$, с ними также вызникает проблема из-за нехватки узлов стеки (чёрные треугольники). В данном случае, соотношения (3) уже помочь не могут и приходится использовать экстраполяцию. В нашей работе мы применяем простейший прием – продлеваем компоненты напряжений σ_{xz} нечётным образом («фантомные» узлы сетки показана на рис. 1 пунктирными трегугольниками). По-видимому, данный прием снижает в итоге порядок апроксимации уравнений до первого. На данном этапе работы точность схемы аккуратным образом нами не исследовлась – были произведены лишь некоторые эксперименты по вычислению эллиптичности поверхностной волны Релея, которые приводятся ниже.

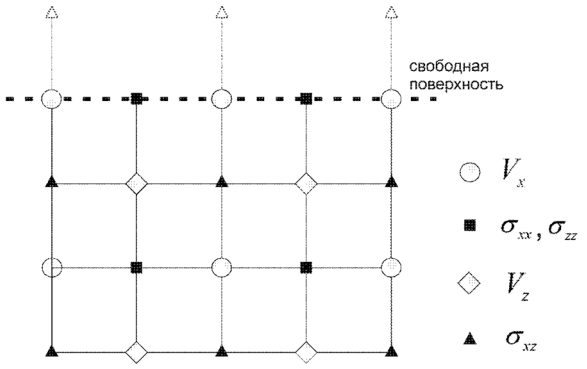


Рис. 1. Шаблон конечно-разностной схемы на сдвинутых сетках

Результаты

Приведем некоторые результаты численных экспериментов по моделированию волновых полей. На рис. 2. показаны компоненты (реальная часть) скоростей смещений от источников типа вертикальной и горизонтальных сил в однородной среде. Интересно, что в случае горизонтальной силы большая часть энергии уходит вглубь среды.

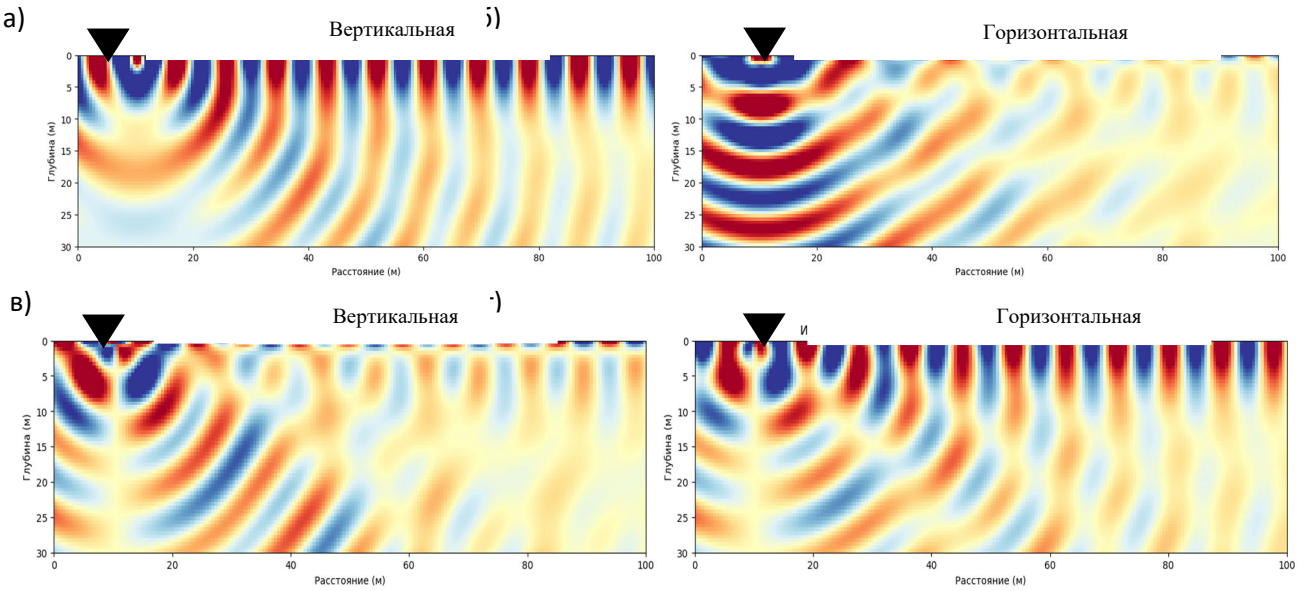


Рис. 2. Поля скоростей смещений в однородной среде

В табл. 1 приведены параметры трёхслойной модели верхней части разреза.

Таблица 1

Трёхслойная модель среды

	Мощность слоя, м	Vp, м/с	Vs, м/с	ρ, м/с
1	10	500	250	1600
2	10	1000	500	1700
∞		2000	1000	1800

На рис. 3 приведены, получающиеся в результате численного моделирования, поля скоростей смещений. Видно, что большая часть энергии колебаний остается в самом верхнем низкоскоростном слое.

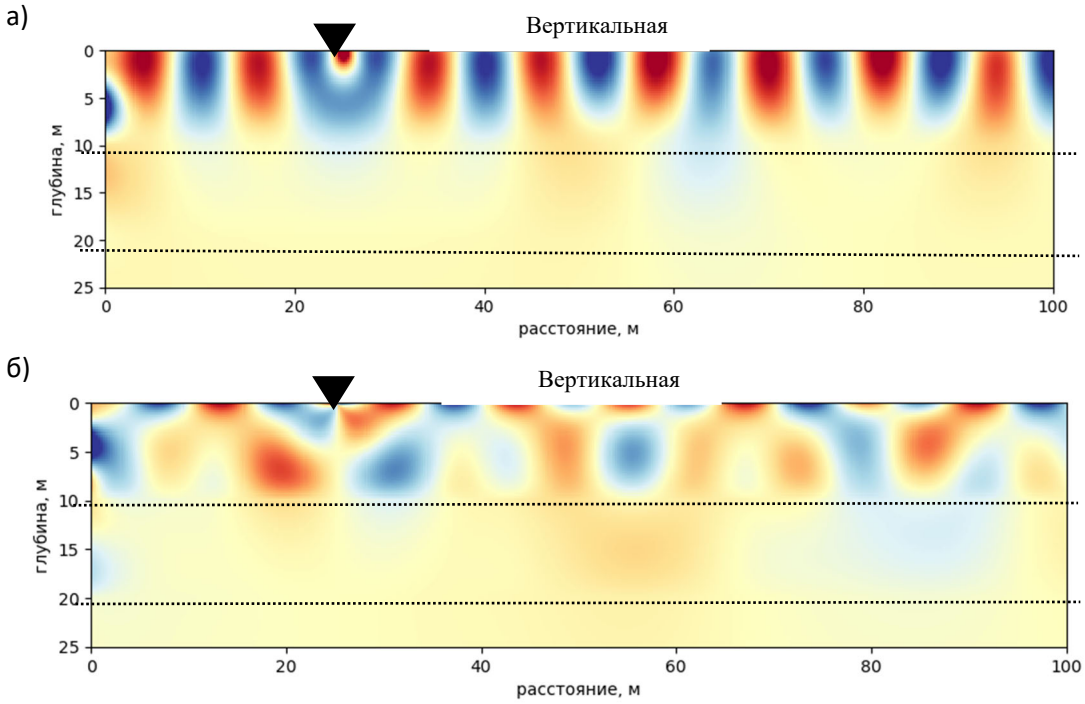


Рис. 3. Результаты численного моделирования
с трёхслойной модели верхней части разреза

Важным параметром, характеризующем процессы распространения волны Релея, является эллиптичность, представляющая собой отношение амплитуд горизонтальных к вертикальным колебаниям $\chi = H/V$. Эллиптичность выражается через коэффициент Пуассона $\nu = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}$, где $\gamma = \frac{V_P}{V_S}$. Приведем здесь соответствующие соотношения. Сначала найдем вспомогательные величины:

$$\overline{\nu} = 1 - \frac{\nu}{1-\nu},$$

$$A(\nu) = 17 + 3\sqrt{33 - 24\overline{\nu}^3 + \frac{321}{4}\overline{\nu}^2 - 93\overline{\nu}} - \frac{45}{2}\overline{\nu},$$

$$B(\nu) = \frac{1}{3}\left[4 + \frac{2(1-3\overline{\nu})}{\sqrt[3]{A(\nu)}} - \sqrt[3]{A(\nu)}\right]$$

После вычисления приведенных вспомогательных значений, находим, на их основе, эллиптичность:

$$\chi = \frac{\sqrt{1-2B(\nu)}}{1-B(\nu)}$$

Попытаемся посчитать эллиптичность на основе рассматриваемого конечно-разностного подхода. Заметим, что возникают некоторые трудности с тем, что вертикальные и горизонтальные компоненты скоростей смещения заданы в различных точках сдвинутых сеток (см. рис. 1). Тем не менее, даже несмотря на это, с помощью конечно-разностного моделирования удается получить близкие к аналитическим значения эллиптичности. Результаты, полученные с помощью численного моделирования показаны на рис. 4 точками, а сплошной линией показаны значения, рассчитанные на основе приведенных аналитических формул. Некоторые расхождения, возможно, объясняются наличием других типов волн.

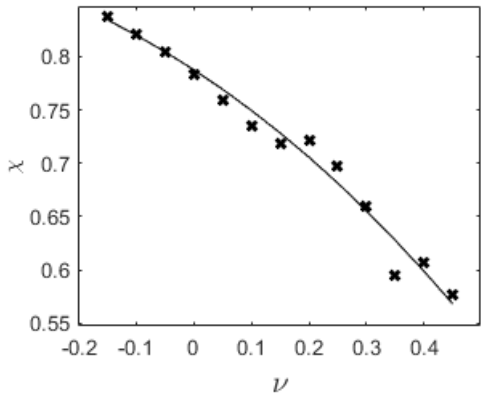


Рис. 4. Сравнение коэффициентов эллиптичности: на основе аналитических соотношений – сплошная линия; точками показаны значения, полученные конечно-разностным методом

Заключение

В работе рассмотрена важная (для дальнейшего развития методов малоглубинной сейсморазведки) задача аппроксимации свободной поверхности при конечно-разностном решении уравнений упругости в частотной области. Отдельно приведено сравнение полученных коэффициентов эллиптичности волны Релея с аналитическими формулами.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00192, https://rscf.ru/project/24-27-00192/.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // Geophysics. – 1986. – Vol. 51. – № 4. – P. 889-901.

2. Roden J. A., Gedney S. D. Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS–PML for arbitrary media // Microwave and optical technology letters. – 2000. – Vol. 27. – № 5. – P. 334-339.

3. Robertsson J. O. A. A numerical free-surface condition for elastic/viscoelastic finite-difference modeling in the presence of topography // Geophysics. – 1996. – Vol. 61. – № 6. – P. 1921-1934.

© А. С. Сердюков, В. В. Сказка, Н. Е. Бирючков, 2025

УДК 550.34.013.2
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-110-114

А. С. Сердюков[1]✉, А. В Азаров[2], А. В. Яблоков[1], М. Н. Корми [3], К. Б. Акулов[3]

Применение многоканального анализа поверхностных сейсмических волн для исследования железнодорожного тоннеля

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А.Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3]ООО НИЦ «Бамтоннель», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Аннотация. За последнее десятилетие широкое распространение получил метод малоглубинной сейсморазведки на основе наблюдения и обработки данных поверхностных сейсмических волн, известный под аббревиатурой MASW (multichannel analysis of surface waves). MASW применяется, как правило, для исследования строения и свойств грунтов при решении инженерных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией различных строений. В настоящей работе мы применяем MASW для решения новой задачи – для исследования свойств горных пород в окрестности железнодорожного тоннеля. Проведенные эксперименты показывают, что удается устойчиво выделить дисперсионные кривые поверхностных волн, распространяющихся вдоль тоннеля. В результате анализа полученных результатов удается выделить зоны пониженных скоростей, связанных, по-видимому, с разуплотнением пород, а также участки, на которых не наблюдается волны, распространяющейся за бетонной обсадкой тоннеля, вследствие плохого контакта с прилегающими породами (возможно из-за наличия пустот).

Ключевые слова: поверхностные сейсмических волны, многоканальный анализ, железнодорожные тоннели

A. S. Serdyukov[1]✉, A. V. Azarov[2], A. V. Yablokov[1], M. N. Kormin[3], K. B. Akulov[3]

Application of multi-channel analysis of surface seismic waves for railway tunnel research

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[3]LLC Research Center "Bamtonnel" Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Abstract. Over the past decade, the method of shallow seismic exploration based on the observation and processing of surface seismic waves data, known by the abbreviation MASW (multichannel analysis of surface waves), has become widespread. MASW is used, as a rule, to study the structure and properties of soils in solving engineering problems related to the design and operation of various structures. In this paper, we use MASW to solve a new problem – to study the properties of rocks in the vicinity of a railway tunnel. The experiments show that it is possible to consistently identify the dispersion curves of surface waves propagating along the tunnel. As a result of the analysis of the obtained results, it is possible to identify areas of reduced velocities, apparently associated with de-

compression of rocks, as well as areas where there is no wave spreading beyond the concrete lining of the tunnel due to poor contact with adjacent rocks (possibly due to the presence of voids).

Keywords: seismic surface waves, finite difference method, Releigh wave elliptisity

Введение

Геофизические исследования горного массива в окрестности подземных сооружений имеют большое прикладное значение. Важной задачей при эксплуатации тоннелей, выработок и других подземных сооружений является обеспечение безопасности. Проектирование подземных объектов основывается на результатах петрофизического и геофизического исследования скважин, пробуренных в пределах площади строительства. Пространственного разрешения таких данных может быть недостаточно для полного анализа геологической среды с целью выявления определения потенциально аварийных областей массива горных пород: с трещиноватостью и повышенной обводненностью и.т.п. Так, одной из проблем является определение точного расстояния тоннелепроходческого комплекса до опасных для проходки участков. Диагностика состояния обсадки туннелей и горного массива за этой обсадкой целесообразна, например, при планировании гидроизоляционных и других ремонтных работ. За последнее десятилетие широкое распространение получил метод малоглубиной сейсморазведки на основе наблюдения и обработки данных поверхностных сейсмических волн, известный под аббревиатурой MASW (multichannel analysis of surface waves) [1]. MASW применяется, как правило, для исследования строения и свойств грунтов при решении инженерных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией различных строений. В настоящей работе мы применяем MASW для решения новой задачи – для исследования свойств горных пород в окрестности железнодорожного тоннеля. Проведенные эксперименты показывают, что удается устойчиво выделить дисперсионные кривые поверхностных волн, распространяющихся вдоль тоннеля. В результате анализа полученных результатов удается выделить зоны пониженных скоростей, связанных, по-видимому, с разуплотнением пород, а также участки, на которых не наблюдается волны, распространяющейся за бетонной обсадкой тоннеля, вследствие плохого контакта с прилегающими породами (возможно из-за наличия пустот).

Методы и материалы

Полевые работы по наблюдению сейсмических волн проводились в тоннеле 105 – 106 км участка Артыша-Томусинская Западно-Сибирской железной дороги (Кемеровская область, Новокузнецкий район), построенном в 1967 г. Тоннель залегает в переслаивающихся слоях песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей. Ввиду проблем с обводнением в настоящее время объект не эксплуатируется и находится на консервации. На расстоянии 30 м от старого тоннеля расположен новый действующий тоннель.

Общая протяженность тоннеля 1160 м. Сейсморазведочные работы производились со стороны западного портала. В начале, первые 250 м, профиль наблюдений проходил по участку тоннеля круглого сечения с чугунной тюбинговой

обделкой, часто использовавшейся ранее при строительстве метрополитена (рис. 1а). Толщина тюбинга с учетом рёбер жесткости около 0,3 м, основание залито бетоном, высота тоннеля 5,5 м. Далее, ввиду того что тоннель уходит глубже в массив более плотных пород, профиль становится подковообразным (рис.1б). Используется бетонная обделка толщиной около 0,5 м; высота тоннеля здесь 7,5 м. Длина профиля наблюдений на участке с бетонной обсадкой также 250м.

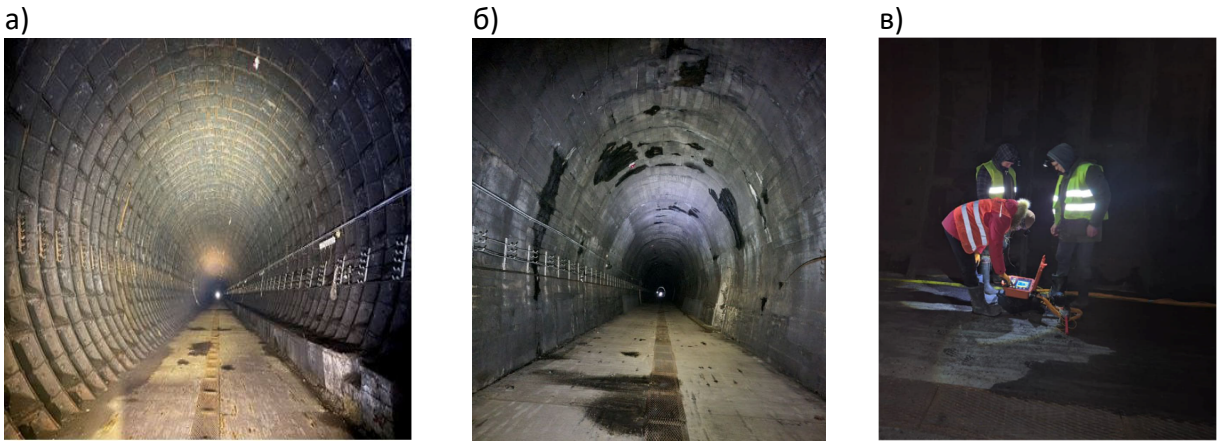


Рис. 1. Заброшенный железнодорожный тоннель: а) участок с чугунным тюбингом; б) участок с бетонной обделкой; в) процесс настройки сейсмостанцией для регистрации данных

Обработка полученных данных осуществлялась методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW). В качестве источников колебаний использовался вибрационный источник на основе двух низкочастотных акустических трансдьюсеров ButtKicker LFE [2] генерировался свип сигнал 5-500Гц. Далее получалась и обрабатывалась коррелограмма. Для каждого набора данных общего ПВ с помощью спектрального f-k анализа были получены дисперсионные кривые скоростей волн, распространяющихся вдоль тоннеля. Применялся метод наклонного f-k преобразования – *slant f-k transform* (SFK) [3], демонстрирующий хорошие результаты при обработке многоканальных данных поверхностных сейсмических волн

Результаты

На рис. 2 представлены спектры, получившиеся в результате применения SFK преобразования. Для всех сейсмограмм первой половины профиля с чугунным тюбингом в широком диапазоне частот прослеживается дисперсионная кривая, соответствующая волне, распространяющейся в массиве пород вдоль тоннеля. Спектральное дисперсионное изображение для одного из ПВ рассматриваемого участка профиля представлено на рис. 2а. В случае бетонной обсадки, для большинства ПВ, в нижней части спектра (приблизительно до 100 Гц) наблюдается дисперсионная кривая, схожая с наблюдаемой в случае чугунного тюбинга – см. область, отмеченную на рис. 2б. Мы считаем, что, именно, эта волна рас-

пространяется за обсадкой и позволяет судить о свойствах вмещающегося горного массива. Для двух ПВ (на расстоянии 450 и 480 м вдоль профиля) волны не наблюдается (рис. 2в), что может служить признаком отсутствия плотного контакта бетонной обсадки с горным массивом в следствие наличия пустот или зон разуплотнения.

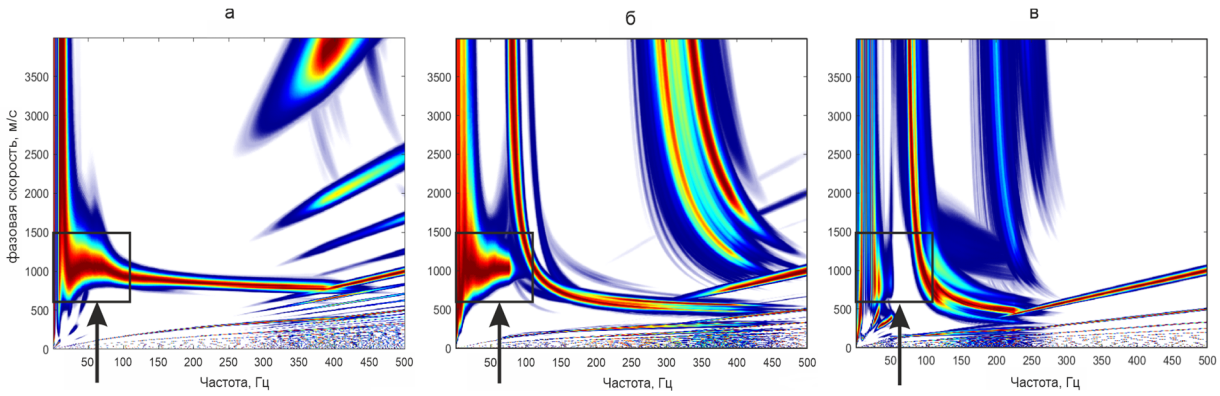


Рис. 2. Спектральные дисперсионные изображения, полученные в результате обработки данных. ПВ находится на участке профиля с чугунным тюбингом – наблюдается дисперсионная кривая (а); ПВ части профиля с бетонной обсадкой (б), на части изображения, отмеченной стрелкой, наблюдается волна за обсадкой; волны за бетонной обсадкой не наблюдается (в)

В целях дальнейшей интерпретации результатов на спектрах были пропикированы дисперсионные кривые, характеризующие зависимость фазовой скорости наблюдаемой поверхностной волны от частоты. На основе полученных кривых был посроен скоростной разрез поверхностных волн, приведенный на рис. 3. Вдоль всего профиля наблюдений при малых длинах волн до 8-10м. наблюдаются меньшие значения скорости, что говорит о разуплотнении массива пород вблизи тоннеля. Значения скоростей в начале профиля, первые 70 м, так же низкие и для больших длин волн. Так проявляется зона выветривания и переход от скальных пород к грунтам близи портала. Так же можно отметить, что во второй половине профиля, там, где бетонная обсадка, наблюдаются большие значения скорости по сравнению с первой половиной тоннеля с чугунным тюбингом. В нескольких местах профиля, отмеченных на рис. 3А, вблизи тоннеля наблюдаются аномально низкие значения скорости. Причиной предположительно является разуплотнение пород, возможно из-за наличия трещин. В таких зонах может происходить просачивание воды. Тоннель законсервирован и не эксплуатируется в первую очередь именно из-за проблем, вызванных обводнением. Как упоминалось ранее, для пары ПВ на участке профиля с бетонной обсадкой, в нижней части спектра не наблюдалось дисперсионной кривой, соответствующей волне, распространяющееся в породе за обсадкой (рис. 3). В этих местах, обозначенных на рис. 3В, по-видимому, ослаблен контакт между обсадкой и породой, это связано с наличием пустот и/или сильным ослаблением пород за обсадкой.

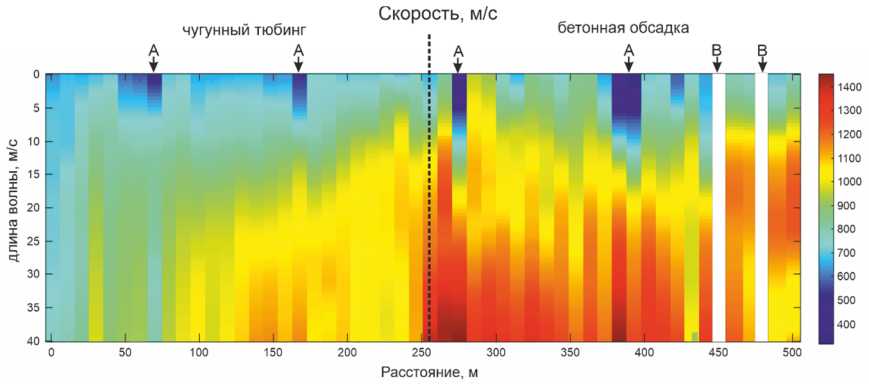


Рис. 3. Скоростной разрез поверхностных волн для всего профиля наблюдений, отмечены зоны пониженной скорости вблизи тоннеля (А), участки профиля в которых не наблюдается волна, распространяющаяся горном массиве за бетонной обсадкой (В)

Заключение

Проведены полевые опытно-методические исследования метода многоканального анализа поверхностных сейсмических волн для исследования структуры горного массива в окрестности железнодорожного тоннеля. Полученные результаты показали применимость аппаратуры, методик наблюдения и обработки данных, используемых в наземной инженерной сейсморазведке. Наиболее успешные результаты – четкое прослеживание дисперсионных кривых поверхностных волн в широком диапазоне частот, удалось получить на участке тоннеля с чугунным тюбингом. Судя по полученным данным, при условии достаточного контакта с породой, такая оболочка практически не затрудняет наблюдение волн, распространяющихся в горном массие. В случае бетонной обсадки толщиной около 0,5 м волны, распространяющиеся в массиве пород, наблюдаются ниже 100 Гц. В следствии отсутствия достаточно контакта между породой и обсадкой (предположительно) на отдельных сейсмограммах волны за обсадкой не наблюдалось.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00192, https://rscf.ru/project/24-27-00192/

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Park C. MASW for geotechnical site investigation // The Leading Edge. – 2013. – Vol. 32. – № 6. – P. 656-662.

2. Yablokov A. V., Dergach P. A., Serdyukov A. S., Polozov S. S. Development and Application of a Portable Vibroseis Source for Acquisition and Analysis of Seismic Surface Wave Data // Seismic Instruments. – 2022. – Vol. 58. – № 2. – P. S195-S203.

3. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. V., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84. – № 1. – P. A19-A24.

© А. С. Сердюков, А. В. Азаров, А. В. Яблоков, М. Н. Кормин, К. Б. Акулов, 2025

УДК 534-16, 550.34.013.4, 51-72, 534-26
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-115-123

Е. Б. Сибиряков[12]✉

Построение гладких ядер для решения краевых задач смешанного типа для уравнения Гельмгольца

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе теоретически обоснованы возможности определения свойств среды по данным сейсмических (или акустических) измерений, использующих независимое измерение нагрузок и перемещений. В качестве аналогии упругой среды использовались краевые задачи для двухмерных уравнений Гельмгольца. Для плоского слоя на полупространстве получено аналитическое решение краевых задач. В случае гладкой криволинейной границы раздела предложено использовать новый метод решения краевых задач стационарных колебаний путём сведения краевой задачи к системе интегральных уравнений с гладкими ядрами. Спектральное разложение этих ядер приводит к системе линейных уравнений с низким числом обусловленности. Показано, что новый метод позволяет находить решения краевых задач, в том числе смешанного типа, с высокой точностью и достоверностью.

Ключевые слова: краевые задачи, граничные интегральные уравнения, отражение от границы раздела, коэффициентные обратные задачи, дифракция

E. B. Sibiriakov[12]✉

The using of boundary element method with smooth kernels for the elastic stationary oscillations boundary value problems

[1]IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]SibSUTIS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

Abstract. In the paper the possibilities of determining the properties of a medium by seismic (or acoustic) measurements, using independent measurements of traction vector and displacements are presented. Boundary value problems for 2D Helmholtz equations were used as an analogy for an elastic medium. An analytical solution of boundary value problems for the case of plane layer on a half-space was obtained. In the case of a curved interface, it was proposed to use a new method for solving boundary value problems of stationary oscillations by reducing the boundary value problem to a system of integral equations with smooth kernels. Spectral decomposition of these kernels leads to a system of linear equations with a low condition number. It was shown that the new solution method allows finding solutions of boundary value problems, including mixed type ones, with high accuracy and reliability.

Keywords: boundary value problems, boundary integral equations, reflection from the interface, coefficient inverse problems, diffraction

Введение

Решение прямых краевых задач упругих стационарных колебаний используется для нахождения решений коэффициентных обратных задач как в геофизике, так и в задачах механики деформируемого твёрдого тела и акустики. При этом обычно предполагается, что источником волн является импульсный источник, на верхней свободной поверхности используются только перемещения, а сама коэффициентная обратная задача в классической постановке является некорректной [1]. Например, идеи, лежащие в основе AVO – AVA (Amplitude Versus Offset, Amplitude Versus Angle) используют зависимость амплитуды от удаления на первичных сейсмограммах до суммирования [2]. Границы применимости этого метода оказались не столь широки, как ожидалось первоначально. В том числе и потому, что необходимо выделять волны (действуя в рамках лучевого приближения), изначальная амплитуда которых при отражении от границы раздела неизвестна. Мысль о том, чтобы рассматривать перемещения как отклик на нагрузку для определения свойств среды не нова. В [3] результаты предполагаемых независимых измерений нагрузок и перемещений на верхней поверхности было предложено использовать для нахождения свойств слоистой среды, используя обобщённый принцип взаимности. Идея не получила широкого распространения по-видимому, по причине сложности алгоритма и отсутствия простых и наглядных аналитических решений. В [4] была решена задача о восстановлении конфигурации полостей в рамках статической упруго-пластической модели.

В любом случае для решения обратных задач необходимо использовать решения прямых задач и сравнивать результаты с некоторым эталоном. Будем рассматривать краевые задачи для плоского уравнения Гельмгольца как аналог задач упругих стационарных колебаний. При этом функция на верхней поверхности считается известной, а аналогом функции источника колебаний будет заданная на верхней границе нормальная производная от функции. Она является величиной измеряемой и тоже считается известной. Сравнивая вычисления с измерениями, можно попытаться определить свойства среды. Проблема может заключаться в том, что возбуждение колебаний далеко не всегда является линейным и упругим процессом, поэтому при практическом применении этого метода может потребоваться пересчёт для эффективной излучающей упругой поверхности, в данной работе ограничимся простой моделью. Сначала рассмотрим краевую задачу, связанную с плоским слоем на полупространства. В случае плоских границ раздела возможно получить аналитическое решение, выражающую отклик среды на внешней поверхности на аналог нагрузки. В случае криволинейных границ раздела будем решать задачу численно с помощью модифицированного метода граничных элементов, используя гладкие и ограниченные про модулю ядра.

Плоский слой на полупространстве

Найдём решение двухмерного уравнения Гельмгольца в среде, где на верхней поверхности задана какая-либо нагрузка, толщина плоского слоя h, в слое параметр $k = k_{up}$, в полупространстве, соответственно $k = k_{down}$:

$$\varphi_{zz} + \varphi_{xx} + k^2\varphi = 0\,; \frac{\partial\varphi}{\partial z}(0,x) = p(x); \qquad (1)$$

При этом необходимо найти функцию на поверхности $\varphi(0,x)$, как отклик среды с граничными условиями на аналог нагрузки $p(x)$. Граничные условия – непрерывность на границе, а также свойство, связанное с нормальной производной на границе:

$$\rho^{up}C^{up}\frac{\partial\varphi^{up}}{\partial z}(h,x) = \rho^{down}C^{down}\frac{\partial\varphi^{down}}{\partial z}(h,x) \qquad (2),$$

куда в качестве независимого параметра входит ещё и плотность среды. Напомню, что обратная эффективная пространственная длина волны, а также скорость и частота связаны соотношением $k = \frac{\omega}{C}$. Для определённости, не уменьшая общности алгоритма, будем считать, что плотность на границе раздела меняется не существенно и будем использовать условие (2) в виде:

$$k_{down}\frac{\partial\varphi^{up}}{\partial z}(h,x) = k_{up}\frac{\partial\varphi^{down}}{\partial z}(h,x) \qquad (3).$$

Зададим источник поля на поверхности. Пусть аналог вектора нагрузки на верхней поверхности (z = 0) задан формулой (4), а также представлен на рис. 1:

$$p(x) = -20x \times exp(-10x^2) \qquad (4)$$

Нагрузка на свободной поверхности, как правило, локализована и является управляемым параметром. Поскольку она локализована, можно провести её интервальное разложение на интервале измерений, и вычислить аналитически функцию во всём сегменте объёма, а, значит, и на верхней поверхности, удовлетворив всем граничным условиям. Пусть интервал, в котором проводятся измерения, находится в промежутке $x \in [-\pi;\pi]$. Функция, удовлетворяющая уравнению (1), может быть представлена на этом интервале в виде:

$$\varphi(0,x) = \sum_{n=0}^{N}\hat{\varphi}_{ic}\cos(nx) + \sum_{n=1}^{N}\hat{\varphi}_{is}sin(nx) \qquad (5).$$

В дальнейшем положим параметр N равным 40, что обеспечит заведомо достаточную точность. Найдя зависимость коэффициентов $\hat{\varphi}_{ic}, \hat{\varphi}_{is}$ от переменной z, вычислим функцию в данном сегменте пространства. Чтобы удовлетворять уравнению, упомянутые выше коэффициенты будут зависеть от двух констант, которые следует выбрать так, чтобы удовлетворить граничным условиям.

Введём обозначения: $\nu_{up} = \sqrt{|n^2 - k_{up}^2|}, \nu_{down} = \sqrt{|n^2 - k_{down}^2|}$, функция в слое $\varphi(z,x) = \varphi^{up}(z,x)$, в полупространстве $\varphi(z,x) = \varphi^{down}(z,x)$ Например, при $z \geq 0,\ \nu_{up} \neq 0$ коэффициенты $\hat{\varphi}_{is}$ будут равны:

$$\hat{\varphi}_{is}^{up} = \begin{cases} C_{1s}^{up} ch(\nu_{up} z) - C_{2s}^{up} sh(\nu_{up} z), n > k_{up} \\ C_{1s}^{up} cos(\nu_{up} z) - C_{2s}^{up} sin(\nu_{up} z), n < k_{up} \end{cases} \quad (6),$$

для нижнего слоя аналогично, только верхний индекс будет другим ($down$).

Поскольку $\frac{\partial\varphi(0,x)}{\partial z} = p(x)$ известно, а нагрузку на поверхности (поскольку она локализована) можно разложить на интервале

$$p(x) = \sum_{n=0}^{N} \hat{p}_{ic} \cos(nx) + \sum_{n=1}^{N} \hat{p}_{is} sin(nx) \quad (7),$$

то коэффициент C_{2s}^{up} можно найти сразу:

$$C_{2s}^{up} = -\frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}} \quad (8)$$

Таким образом, искомая функция на верхней поверхности будет определяться коэффициентом C_{1s}^{up}. В частности, в полупространстве $C_{1s}^{up} = \frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}}, \hat{\varphi}_{is}^{up}(0) = \frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}}$.

Предлагаю в дальнейшем отношение этих коэффициентов называть коэффициентом отклика, в отличии от общепринятого коэффициента отражения. Ибо отражения может и вовсе не быть, а отклик есть всегда. По этой причине данный параметр более информативен. В акустике среды могут называть более или менее жёсткими, сравнивая их импедансы. В связи с этим в зависимости от пространственной частоты интервального разложения *n,* можно называть среды мягкими, если $n < k$, иначе жёсткими. Теперь вычислим значения C_{1s}^{up} для плоского слоя на полупространстве. Будет четыре случая. Жёсткий слой на жёстком полупространстве, мягкий слой на жёстком полупространстве, жёсткий слой на мягком полупространстве и мягкий слой на мягком полупространстве. Когда нижнее полупространство жёсткое, то, например $C_{1s}^{down} = C_{2s}^{down}$, поскольку амплитуда должна быть ограничена и колебания не могу привести к разрушению полупространства. В случае равенства плотностей в первом случае ответ следующий:

$$\hat{\varphi}_{is}^{up}(0) = -\frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}} \left(\frac{\nu_{down} th(\nu_{up} h) + \frac{k_{down}}{k_{up}} \nu_{up}}{\nu_{down} + \frac{k_{down}}{k_{up}} \nu_{up} th(\nu_{up} h)} \right) \quad (9)$$

Аналогично вычисляются компоненты, связанные с разложениями по косинусам. В случае мягкого слоя на жёстком полупространстве ответ следующий:

$$\hat{\varphi}_{is}^{up}(0) = -\frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}}\left(\frac{\nu_{down}tg(\nu_{up}h) + \frac{k_{down}}{k_{up}}\nu_{up}}{\nu_{down} - \frac{k_{down}}{k_{up}}\nu_{up}tg(\nu_{up}h)}\right) \quad (10)$$

Из (10) видно, что амплитуда функции на верхней поверхности может быть равной бесконечности, что не удивительно. Мягкий слой на жёстком полупространстве может разрушиться на резонансных частотах, либо выйти за пределы упругости.

Случай, когда нижнее полупространство является мягким, то есть затухания амплитуды с глубиной нет, является более сложным, и, казалось бы, найти соотношения между C_{1s}^{down} и C_{2s}^{down} нельзя. Нужны какие-то дополнительные условия, так как неизвестных коэффициентов больше, чем условий. На самом деле можно. Следует использовать два условия. Первое. Коэффициенты ограничены. То есть разрушить полупространство, да ещё и периодически, нельзя. Второе при равных параметрах k сверху и снизу коэффициент отклика будет таким же, как и в полупространстве. Для случая жёсткого слоя на мягком полупространстве получается, что неизбежно $C_{1s}^{down} = C_{2s}^{down}$, и ответ будет совпадать с (9). Для мягкого слоя на мягком полупространстве, используя свойства матрицы поворота для коэффициентов получается следующий коэффициент отклика:

$$\hat{\varphi}_{is}^{up}(0) = -\frac{\hat{p}_{is}}{\nu_{up}}\left(\frac{\nu_{up}cos^2(\nu_{up}h) + \nu_{down}sin^2(\nu_{up}h) + (\nu_{down} - \nu_{up})sin(\nu_{up}h)cos(\nu_{up}h)}{\nu_{down}cos^2(\nu_{up}h) + \nu_{up}sin^2(\nu_{up}h) + (\nu_{down} - \nu_{up})sin(\nu_{up}h)cos(\nu_{up}h)}\right) \quad (11)$$

Как видим, знаменатель в ноль не обращается, а в случае одинаковых характеристик коэффициент отклика такой же, как и в полупространстве. В качестве иллюстрации представим на рис. 2 отклик жёсткого ($k_{up} = 0.1,\ h = 0.5$) слоя на мягком ($k_{down} = 10.5$) полупространстве (в виде перемещений на верхней поверхности) на нагрузку, представленную на рис. 1. Таким образом, задача о нахождении отклика слоя на полупространстве на нагрузку решена аналитически. Можно аналогичным образом построить точное решение и в случае нескольких слоёв.

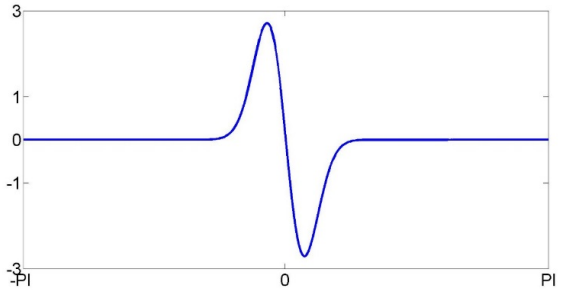


Рис. 1. Нормальная производная функции на внешней поверхности

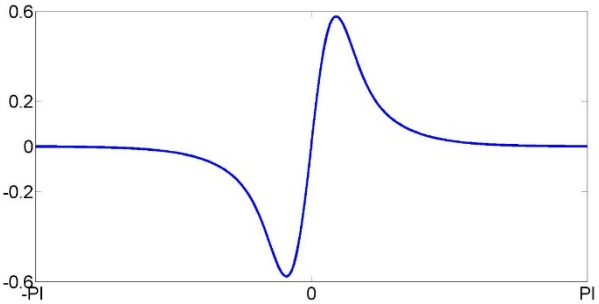


Рис. 2. Отклик жёсткого слоя на мягком полупространстве на нагрузку ($k_{up} = 0.1, k_{down} = 10.5,\ h = 0.5$)

Полученные точные решения дают возможность при независимом измерении нагрузок и перемещений на верхней поверхности определять толщину слоя и его акустические параметры, а также параметры полупространства, причём не только в лучевой области, но и в случае достаточно длинных волн по сравнению с толщиной слоя (дифракция), что может быть использовано не только в сейсморазведке, но также в акустике и биомедицине. Кроме того, предложенный алгоритм решения позволяет объяснить различие доминирующих пространственных частот поперечных, продольных и обменных волн и линейную зависимость затухания от частоты. Поскольку у продольных волн больше скорость, меньше параметр k. При $n > k$ затухание пропорционально первой степени частоты. Слабее всего затухают пространственные частоты, у которых $n \sim k$. При смене типа волны пространственные частоты с наименьшим затуханием смещаются. Декремент при этом остаётся примерно постоянным.

Криволинейный слой на полупространстве

Для того, чтобы понять возможность нахождения свойств среды в случае достаточно длинных волн, рассмотрим ту же задачу, что и в предыдущем параграфе, но с малоамплитудной криволинейной границей, изображённой на рис. 3 и представленной уравнением (12):

$$g(x) = -0.5 + 0.1 \times exp(-5x^2) \qquad (12)$$

В случае криволинейной границы раздела для нахождения функции на верхней границе будем численно решать краевую задачу методом граничных элементов, принимая во внимание, что в отличие от (2) производную нужно будет брать не по вертикальной координате, а по нормали в фиксированной точке. Для того, чтобы определить возможности определения свойств слоёв, чья толщина меньше длины волны, возьмём следующие параметры: $k_{up} = 2.5,\ k_{down} = 4.5$, чтобы на части пространственных частот среды были бы мягкими, на части – жёсткими. Построим финитные гладкие ядра аналогично и будем искать решение для потенциалов на поверхностях аналогично изложенному в [6]. В случае криволинейного слоя на полупространстве имеется три поверхности. Решение ищется мето-

дом неопределённых коэффициентов (коллокации), т.е. в фиксированных точках, количество которых совпадает с количеством коэффициентов разложения система решается точно. Несмотря на то, что формально эта задача считается некорректной, число обусловленности в том случае, когда на всех поверхностях, например, заданы нагрузки, число обусловленности матрицы линейной системы, к которой сводится краевая задача при выбранном количестве членов разложения, cond(**A**) ≈ 1.5, в случае задачи смешанного типа, к которой относится рассматриваемая, cond(**A**) ≈ 150.

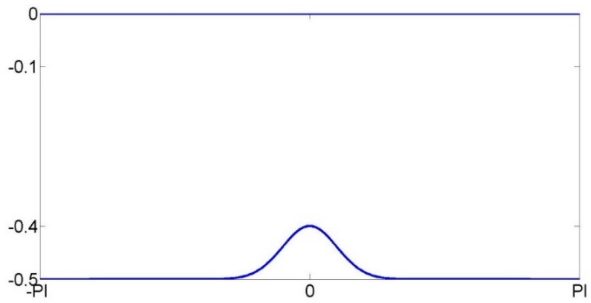


Рис. 3. Криволинейная граница раздела, описываемая уравнением (12) и верхняя граница

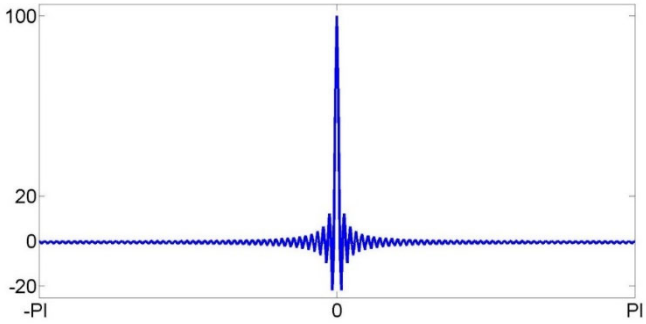


Рис. 4. Конечный аналог дельта-функции при значении переменной $GP(x, 0)$

Поскольку число обусловленности с увеличением количества точек коллокации растёт не очень быстро, есть основания предполагать, что этот метод также может быть использован в дальнейшем и для решения трёхмерных краевых задач. Результаты вычислений представлены на рис. 5 и 6. Сравнение точного решения для плоской границы раздела с численным показывает удовлетворительную точность. Кроме того, рис. 6 показывает возможность детектировать малоамплитудную криволинейную границу, характерный размер которой существенно меньше пространственной длины волны.

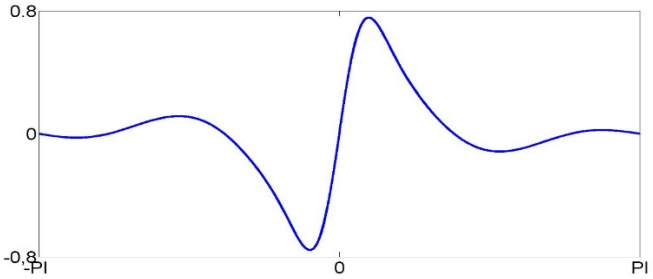


Рис. 5. Функция на верхней поверхности в случае плоской границы раздела

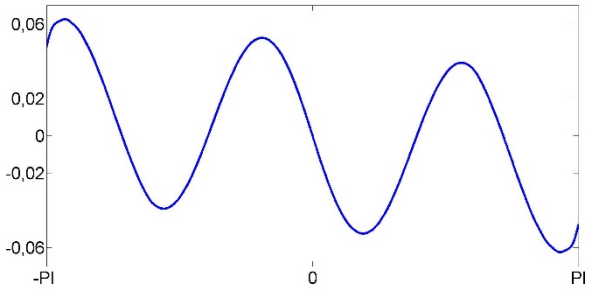


Рис. 6. Разность между функциями на границе раздела в случаях плоской и малоамплитудной криволинейной границами раздела

Заключение

В работе теоретически обоснованы возможности определения свойств среды по данным сейсмических (или акустических) измерений, использующих независимое измерение нагрузок и перемещений. В качестве аналогии упругой среды использовались задачи для двухмерных уравнений Гельмгольца. Для плоского слоя на полупространстве получено аналитическое решение краевых задач, позволяющие определять свойства слоя и полупространства путём сравнения аналога нагрузки и отклика на неё. В случае криволинейной границы раздела предложено использовать новый метод решения краевых задач стационарных колебаний путём сведения краевой задачи к системе интегральных уравнений с гладкими ядрами. Спектральное разложение этих ядер приводит к системе линейных уравнений с низким числом обусловленности. Таким образом, новый метод решения позволяет находить решения краевых задач, в том числе смешанного типа, с высокой степенью точности и достоверности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWZZ-2022-0017).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Учебник для студентов высших учебных заведений. Новосибирск. Сибирское научное издательство, 2009, 457 с.

2. Разин А.В., Меркулов В.П., Чернов С.А. Применение геофизики при изучении месторождений нефти и газа. Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела. ТПУ, 204. – 332 с.

3. Ватульян А.О., Гукасян Л.С., Недин Р.Д. // О задачи Коши в теории коэффициентных обратных задач для упругих тел // Владикавказский математический журнал. – 2016, Т.18, Выпуск 2, С. 31-40.

4. А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, О. А. Лукьяшко. Определение НДС поверхности тела или её участка в случае идеальной пластичности при заданных векторах напряжений и смещений // ГЕО-СИБИРЬ, Т. 2 «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» // Новосибирск, СГУГиТ, 2020, С. 201-209.

5. Сибиряков Е.Б. Использование метода граничных элементов с гладкими ядрами для решения граничных задач упругих стационарных колебаний. Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XIX 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. (г. Новосибирск, 17-19 мая 2023 г.) – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 3 – С. 276-284 – 2023

6. Е.Б. Сибиряков. О детектировании шероховатых границ. Физическая мезомеханика, Т.20, №6, Томск, 2017, с.98-104

© Е. Б. Сибиряков, 2025

УДК 550.832
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-124-131

П. А. Соколов[1]✉, А. К. Манштейн[1]

Промежуточные результаты разработки электромагнитного малоглубинного аппаратурно-программного комплекса с цифровым способом компенсации прямого поля

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

Аннотация. Работа посвящена развитию геофизической многочастотной аппаратуры электромагнитного профилирования. Можно констатировать тот факт, что адаптивные устройства – это неотъемлемые элементы современного оборудования, они находят применение для предсказания, идентификации (моделирования), выравнивания (компенсации) характеристик и подавления помех. Исследование направлено на улучшение характеристик измерительного тракта аппаратуры электромагнитного профилирования за счет применения запатентованного способа цифровой фильтрации для подавления помех в процессе работы прибора. В данной работе представлены промежуточные результаты разработки малоглубинного аппаратурно-программного комплекса, разработанный прототип на базе существующей аппаратуры и результаты эксперимента.

Ключевые слова: геофизическое обеспечение поиска полезных ископаемых, наземные индукционные приборы, метод выделения полезного сигнала, цифровая обработка

P. A. Sokolov[1]✉, A. K. Manstein[1]

Interim results of the development of an electromagnetic small-depth hardware and software complex with a digital direct field compensation method

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

Abstract. The work is devoted to the development of geophysical multi-frequency electromagnetic profiling equipment. It can be stated that adaptive devices are integral elements of modern equipment, they are used for prediction, identification (modeling), equalization (compensation) of characteristics and interference suppression. The research is aimed at improving the characteristics of the measuring path of electromagnetic profiling equipment through the use of a patented digital filtering method to suppress interference during operation of the device. This paper presents the intermediate results of the development of a small-depth hardware and software complex, a prototype developed based on existing equipment, and experimental results.

Keywords: geophysical support for mineral prospecting, surface induction instruments, useful signal selecting method, digital processing

Введение

Геофизические приборы, использующие метод электромагнитного индукционного профилирования, позволяют выявлять локальные различия в удельном

сопротивлении горных пород за счет создания электромагнитного поля с помощью генераторной катушки и последующего измерения сигналов, возникающих от индуцированных токов в земле [1]. Выделение полезного сигнала затрудняется тем, что сигнал от поля генератора (прямое поле) в приемной катушке превосходит по величине полезный сигнал от индуцированных токов, что делает его практически неразличимым на фоне помех.

Разные схемы подавления сигнала от прямого поля имеют различные конструкции, настройки и калибровки, что требует применения сложных электротехнических и конструкторских решений. Анализ существующих методов компенсации сигнала от поля генератора в приемном тракте выявил ряд недостатков в работе оборудования для электромагнитного профилирования. Например, при настройке трехкатушечного зонда [2] использование замкнутого проволочного кольца требует подбора моментов катушек и расстояний, что может усложнить процесс и снизить точность измерений. Кроме того, при идеальной фазировке реальной компоненты полезного сигнала, разностный сигнал многочастотного прибора с тремя катушками над грунтом оказывается в 1.7 раза меньше теоретической реальной компоненты полезного сигнала двухкатушечного зонда [3]. Устройство, описанное в патенте RU2502092 [4], демонстрирует низкую устойчивость к механическим воздействиям, что может привести к изменению настройки и уровня подавления прямого поля во время транспортировки и эксплуатации [Фадеев и др., 2018]. В методе [5] многократное цифро-аналоговое преобразование может вызывать «смещение нуля», а в установившемся режиме значения весовых коэффициентов могут находиться близко к истинному минимуму [6], что негативно влияет на точность выделения полезного сигнала.

Исследование направлено на улучшение характеристик измерительного тракта аппаратуры электромагнитного профилирования за счет применения запатентованного способа фильтрации для подавления помех в процессе работы прибора. Совокупность работ по созданию программного обеспечения, проведению экспериментов, проверке работы алгоритма на реальных и лабораторных данных определяют сложность направления научного исследования.

Целевая функция алгоритма фильтрации

Работа является промежуточным этапом разработки двухкатушечной аппаратуры с цифровым способом компенсации сигнала прямого поля и посвящена развитию геофизической многочастотной аппаратуры электромагнитного профилирования. Для реализации цифрового способа подавления сигнала прямого поля, основными компонентами устройства по меньшей мере являются: генераторная катушка, генератор гармонических сигналов, датчик тока (небольшая катушка в центре генератора), а также одна приемная катушка. Сигналы от катушек преобразуются в цифровой вид с помощью АЦП (аналогово-цифровой преобразователь), после чего оцифрованные данные поступают в блок фильтрации (блок подавления прямого поля), где к зарегистрированным данным применяется многоканальный адаптивный алгоритм RLS и выполняется уточнение параметров целевой функции - в соответствии с методом Нелдера - Мида [7].

В разработанном алгоритме целевая функция включает математическую модель сигнала, содержащую неизвестные весовые коэффициенты. Изменяя эти коэффициенты, невязка между измеренным сигналом и теоретической моделью стремится к наименьшему значению, что является известным методом решения обратных задач [8]. В процессе обработки используются стационарные сигналы, и согласно [6], наиболее подходящей целевой функцией являются наименьшие квадраты ошибок:

$$E = \sum_i (U^{\text{наблюденное}}{}_i - U^{\text{теоретическое}}{}_i)^2 \rightarrow min, \quad (1)$$

где $U^{\text{наблюденное}}$ – сигнал с приемной катушки, $U^{\text{теоретическое}}$ – математическая модель сигнала с приемной катушки.

Полагая, что электромагнитное поле генератора возбуждается гармоническим током и учитывая, что полезный сигнал, возникающий от индуцированных токов в среде за пределами генераторной петли, отстает на π/2 + φ (фаза) от первичного поля, и имеет свою амплитуду [9], математическая модель сигнала в приемной катушке представлена в виде:

$$U(t) = A_1 \cdot cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) - C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t), \quad (2)$$

где:

$$\begin{cases} A_1 = A - C \cdot sin(\varphi) \\ C_1 = C \cdot cos(\varphi), \end{cases} \quad (3)$$

где A – амплитуда сигнала прямого поля в приемной катушке, В; f – частота, Гц; t – время, сек; C – амплитуда полезного сигнала, В; φ – фаза полезного сигнала, град.

Если генераторная петля находится на достаточном расстоянии от центра приемной катушки, превышающем три диаметра генератора [10], то ее можно рассматривать как диполь. В этом случае амплитуда сигнала прямого поля в приемной катушке будет равна:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_g \cdot N_g \cdot I_0 \cdot S_p \cdot N_p}{4 \cdot \pi \cdot L^3}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; S_g – площадь генераторной петли, м^2; N_g – количество витков в генераторной петле; I_0 – амплитуда тока, протекающего в цепи генератора, А; S_p – площадь генераторной петли; N_p – количество витков в генераторной петле; L – расстояние от центра генераторной петли до центра приемной катушки.

Датчик тока выполнен в виде небольшой катушки и расположен в центре генератора, зная амплитуду сигнала от такого датчика, можно рассчитать ток в генераторе по формуле:

$$I_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot {R_g}^3 \cdot \varepsilon_t}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot S_g \cdot N_g \cdot S_t \cdot N_t}, \quad (5)$$

где R_g – радиус генераторной катушки, м; ε_t – амплитудное значение э.д.с. с датчика тока, В; S_t – площадь катушки датчика тока; N_t – количество витков в датчике тока.

Конечное представление целевой функции, подлежащей минимизации, имеет вид:

$$E(A_1, C_1) = \sum_k (x_k - [A_1 \cdot cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)_k - C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)_k])^2 \rightarrow min, \quad (6)$$

где k – это индекс элемента дискретной записи сигнала.

После нахождения неизвестных весовых коэффициентов (A_1, C_1) целевой функции (6), амплитуда и фаза полезного сигнала рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} \varphi = arctg\left[{(A_1 - A)}/{-C_1}\right] \\ C = {C_1}/{\cos(\varphi)}. \end{cases} \quad (7)$$

Прототипирование разрабатываемой аппаратуры

Чтобы оценить возможность применения разработанного способа подавления сигнала от прямого поля при полевых работах, и чтобы иметь возможность отладить работу цифрового фильтра, а также понять его недостатки и ограничения, была реализована базовая функциональность разрабатываемой аппаратуры на базе ЭМС. На корпус трехкатушечного прибора были закреплены: одинаковые приемная катушка и датчик тока (радиус 46 мм, 50 витков), а также усилитель (УС) с коэффициентом усиления 119, аккумулятор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с разрядностью 14 бит и частотой дискретизации до 10 МГц, который можно подключать к компьютеру для управления и сбором данных (рис. 1. (а)).

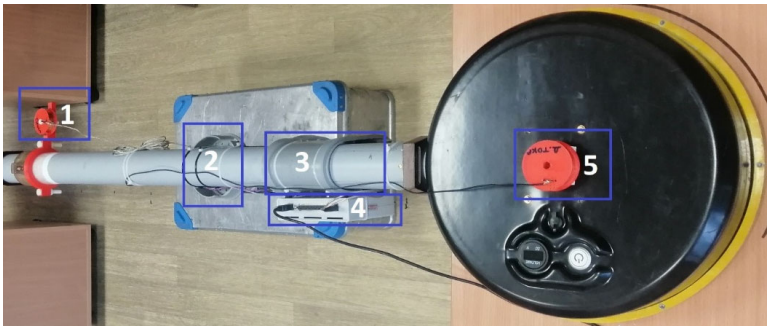
Подобное моделирование (рис. 1. (а)) разрабатываемой аппаратуры дает возможность не только проверить работоспособность алгоритма фильтрации и отладить работу, но и сравнить двухкатушечную аппаратуру с цифровым способом подавления прямого поля с существующей трехкатушечной аппаратурой ЭМС при идентичных условиях в ходе проведения экспериментов.

На сегодняшний день выполнен эксперимент, который демонстрирует работоспособность алгоритма фильтрации и который показывает перспективность развития применения цифрового способа подавления прямого поля.

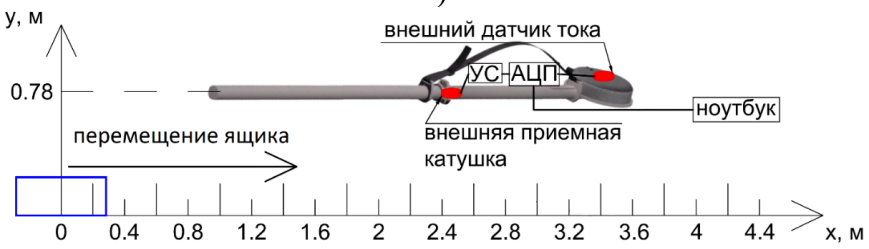
Суть эксперимента заключалась в передвижении алюминиевого ящика под неподвижной аппаратурой с закрепленными на ней внешней приемной катушкой

в плоскости с генератором и внешним датчиком тока на крышке генератора (рис. 1. (а)), что соответствует предлагаемому устройству аппаратуры [7].

Схема эксперимента представлена на рисунке 1 (б). Алюминиевый ящик имел размеры (Д х Ш х В) 585 х 385 х 240 мм, перемещение ящика осуществлялось с шагом 200 мм от начала координат до отметки 4400 мм, расстояние от пола до оси аппаратуры было 7800 мм, дальняя приемная катушка ЭМС, ближняя приемная катушка ЭМС, внешняя приемная катушка, центр генератора и центр внешнего датчика тока находились на расстоянии 1109 мм, 2109 мм, 2509 мм и 3409 мм от центра ящика соответственно.



а)



б)

Рис. 1. Реализация разрабатываемой аппаратуры на базе ЭМС (1 – внешняя приемная катушка, 2 – усилитель, 3 – аккумулятор, 4 – АЦП, 5 – внешний датчик тока, а), условная схема эксперимента (б)

Регистрация данных была выполнена синхронно с работой аппаратуры ЭМС. Для обеспечения синхронизации измеренных данных, на ноутбуке с помощью специального программного обеспечения, начиналась запись сигналов от датчика тока и от приемной катушки после усилителя с частотой дискретизации 1 МГц в течении трех секунд, после чего запускалось разовое измерение аппаратурой ЭМС на 4-х частотах (2.5, 3.086, 3.906 и 5.102 кГц), соответственно внешней приемной катушкой и внешним датчиком тока регистрировался сигнал в момент работы генератора, исходные зарегистрированные данные представлены на рисунке 2.

Измерения проводились с накоплением измерений на одной точке профиля для получения объективных данных о влиянии шума на результаты измерений существующей аппаратуры и результаты работы алгоритма фильтрации, а также

для наглядного различия изменения сигнала, связанного с проводящим объектом, от случайного изменения регистрируемого сигнала.

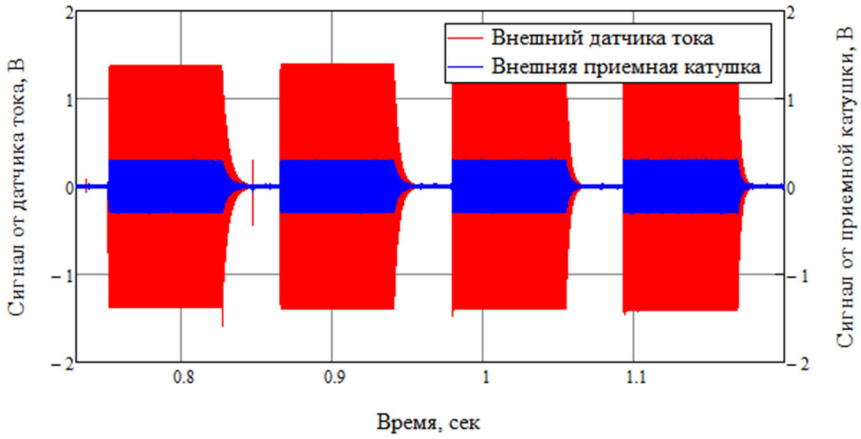


Рис. 2. Исходные зарегистрированные сигналы от внешней приемной катушки после усилителя и внешнего датчика тока

Результаты

Для получения амплитудных значений полезного сигнала от проводящего объекта вблизи аппаратуры после подавления прямого поля, исходные данные (рис. 2) были разбиты на сэмплы по 100 периодов и отфильтрованы в соответствии с запатентованным способом, подробно описанным в работе [7]. Полученные результаты представлены на рисунке 3. Первые 14 измерений регистрировались, когда центр ящика находился в начале координат, после смещения ящика на 200 мм было сделано 4 измерения, на последующих позициях ящика вдоль профиля запись данных была по 3 точки и, когда центр ящика находился на отметке 4400 мм, было выполнено 7 измерений. Длина профиля была ограничена размерами помещения, в котором проводился эксперимент.

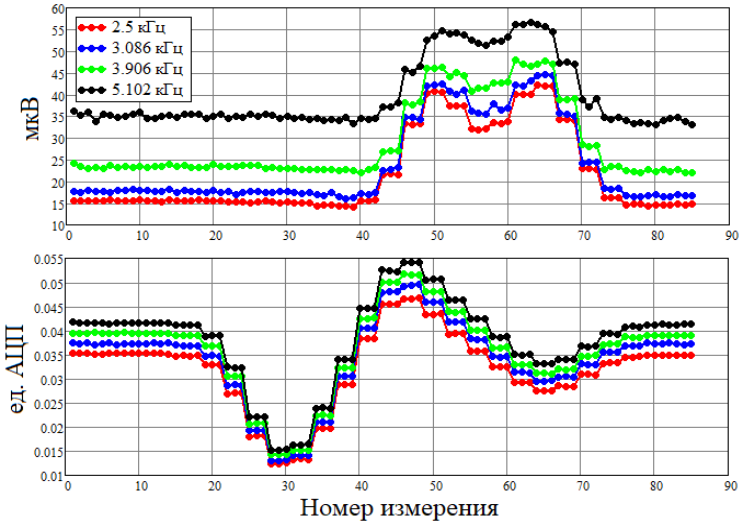


Рис. 3. Амплитуда полезного сигнала в приемной катушке после фильтрации (сверху), нормированный на ток сигнал ЭМС (снизу)

Для сопоставления позиции проводящего объекта под аппаратурой и анализа полученных результатов были взяты усредненные значения на каждой позиции ящика вдоль профиля (рис. 4).

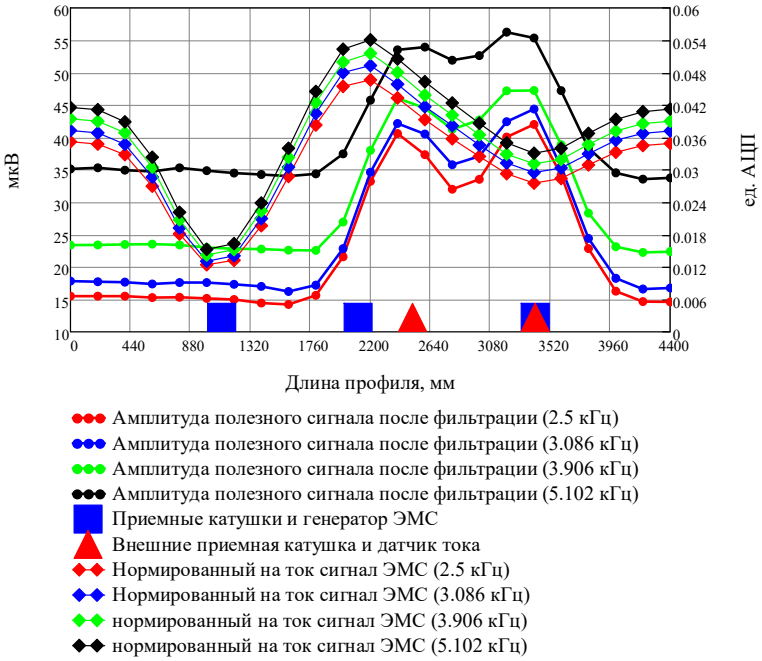


Рис. 4. Усредненная амплитуда полезного сигнала в приемной катушке после фильтрации и усредненный нормированный на ток сигнал ЭМС

Заключение

На сегодняшний день созданный оригинальный метод [7] подавления сигнала прямого поля, основанный на анализе теории цифровой фильтрации, прошёл проверку через многочисленные лабораторные экспериментальные тестирования. Проведённые эксперименты с реальными данными указывают на потенциал создания двухкатушечной аппаратуры частотного электромагнитного зондирования с блоком цифровой фильтрации.

В ходе проведенных исследований были получены значимые результаты, указывающие на недостатки цифрового способа компенсации сигнала от поля генератора в приемном тракте аппаратуры. На рисунке 3 амплитуда полезного сигнала после фильтрации на частоте 2.5 кГц сопоставима по характеру с результатами работы трехкатушечной аппаратуры, при неизменном положении ящика на каждой позиции. Однако, с увеличением частоты (5.102 кГц) на данных после фильтрации «полочки» становятся менее выраженными, что может быть связано с меньшим коэффициентом усиления сигнала, чем в приборе ЭМС, либо с уменьшением дискретизации исходных данных, поскольку для всех регистрируемых частот она была одинаковой.

В целом, полученные результаты дают ценную информацию для дальнейшего анализа работы алгоритма цифровой компенсации прямого поля, а работа

с исходными данными в избыточном количестве позволит оптимизировать и отладить код для корректной работы перед реализацией в виде отдельной платы, встраиваемой в аппаратуру. Собранный прототип на базе ЭМС в дальнейшем позволит выполнить ряд экспериментов для оценки цифровой компенсации и сравнения получаемых результатов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манштейн А.К., Эпов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования: пат. RU № 2152058 C1; заявитель и патентообладатель Институт геофизики СО РАН; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18. 4 с.
2. Манштейн А.К., Эпов М.И., Балков Е.В., Сухорукова К.В. Способ калибровки устройства для наземного электромагнитного частотного зондирования: пат. RU № 2461850 C2; заявитель и патентообладатель Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; опубл. 20.09.2012 Бюл. № 26. 4 с.
3. Балков Е.В., Манштейн А.К. Сравнение характеристик двух- и трехкатушечной реализации индукционных зондов для малоглубинного частотного зондирования / Геофизический вестник. - 2006. - №1. - С.12-17.
4. Манштейн А.К., Балков Е.В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования: пат. RU № 2502092 C2; заявитель и патентообладатель Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
5. West G.F., Walker P.W., Polzer B.D. Magnetic compensation circuit and method for compensating the output of a magnetic sensor, responding to changes in a first magnetic field: pat. US Pub.No.: 9389281 B2; Application Vale S. A.; pub. Date 12.07.2016. 12 p.
6. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: техносфера, 2013. – 528 с.
7. Манштейн А.К., Соколов П.А. Способ подавления сигнала прямого поля в электромагнитном индукционном зондировании и устройство для его реализации / Заявка RU 2023 121 274 A. Опубликовано: 23.04.2024 Бюл. № 12, 14 с.
8. Митрофанов Г.М. Обратные задачи геофизики. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. – 101 с.
9. Параснис Д.С. Принципы прикладной геофизики; перевод с английского С. Д. Виноградова; под редакцией В. Н. Жаркова. – М.: Мир, 1965. - 200 с.
10. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть 2. Электромагнитные поля. – М.: Недра, 2000. – 483 с.

© П. А. Соколов, А. К. Манштейн, 2025

УДК 550.834.
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-132-139

В. М. Соловьев[1]✉, В. С. Селезнев[2], А. Ф. Еманов[1], А. А. Еманов[1], С. А. Елагин[1], А. Е. Шенмайер[1]

О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины

[1]Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований характеристик излучения 40-тонного вибратора на Быстровском полигоне в разные временные периоды. Показана изменчивость излучаемого сигнала в ближней и дальней зоне вибратора до третьей декады июня. Представлены результаты трехлетних режимных вибросейсмических просвечиваний с 40-тонным вибратором земной коры северо-восточного участка Горловской впадины с крупными угольными разрезами Колыванский и Восточный. Приведены примеры коррелограмм и графики времен пробега продольных волн на сейсмостанциях. Установлено небольшое уменьшение времен пробега на с/ст «Елбаши» вблизи разреза Колыванский, что связывается с деструкцией среды в период произошедших здесь техногенных землетрясений с магнитудами 4.7 (27.11.2023) и 4.4 (17.03.2024) в осадочном чехле. Обоснованы дальнейшие эксперименты по активному мониторингу среды земной коры Горловского угольного бассейна.

Ключевые слова: вибратор ЦВ-40, вибромониторинг, коррелограммы, техногенные землетрясения, ряды наблюдений

V. M. Solovyev[1]✉, V. S. Seleznev[2], A. F. Emanov[1], A. A. Emanov[1], S. A. Elagin[1], A. E. Shenmayer[1]

On the duration of seasonal environmental changes under a powerful vibration source and vibration monitoring of coal mining sections of the Gorlovka depression

[1]Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Abstract. The results of investigations of the radiation characteristics of a 40-ton vibrator at the Bystrovsky polygon in different periods of time are presented. The variability of the radiated signal in the near and far zones of the vibrator up to the third decade of June is shown. The results of three-year planned vibroseismic X-ray radiographs with a 40-ton vibrator of the Earth's crust in the north-eastern part of the Gorlovskaya Depression with large coal mines Kolyvansky and Vostochny are presented. Examples of correlograms and plots of travel times of longitudinal waves at seismic stations are given. The insignificant decrease of travel times at the Elbashinsky section near Kolyvansky is found, which is connected with destruction of the environment during man-made earthquakes with magnitudes 4.7 (27.11.2023) and 4.4 (17.03.2024) in the sedimentary cover. Further experiments on active monitoring of the state of the Earth's crust in the Gorlovka coal basin were justified.

Keywords: CV-40 vibrator, vibration monitoring, correlograms, anthropogenic earthquakes, observation series

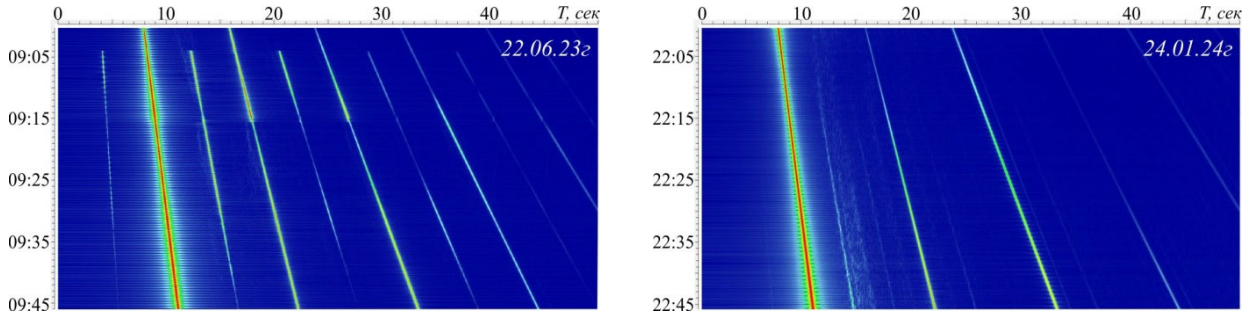
Введение

На Быстровском вибросейсмическом полигоне в течение нескольких десятилетий рядом организаций РАН и СО РАН проводятся испытания искусственных управляемых источников сейсмических волн, предназначенных для исследования внутренних оболочек Земли, проведения экспериментальных исследований по ряду фундаментальных проблем геофизики (таких как исследование напряженного и метастабильного состояний твердой среды), разработки и опробования новых методик выявления предвестников опасных сейсмических событий, изучения нелинейных взаимодействий геофизических полей разной природы и др. Во многих из упомянутых направлений за годы существования полигона получены результаты мирового уровня; ряд разработок успешно внедрен в производство [1, 2, 3].

О влиянии сезонных изменений среды под виброисточниками на регистрируемые волновые поля в «ближней» и «дальней» зонах

Уже в первых экспериментах с 100-тонным вибратором на Быстровском полигоне, наряду с высокой стабильностью и повторяемостью вибрационных воздействий, была установлена сезонная изменчивость волновых полей от вибратора в ближней и дальней зонах, связанная с изменением на порядок характеристик грунта под вибратором [3, 4]. Было отмечено изменение волновых полей в зимний период, начиная примерно с начала ноября по конец марта; резкий спад амплитуд излучения начинается с первых чисел ноября, минимум наблюдается в середине марта, а максимум излучения – с середины мая по конец октября. Было установлено, что по типу спектра излучения можно выделить зимнее излучение и летнее излучение с переходными периодами между ними, а также, что процесс смены типа излучения циклический с высокой степенью равенства однотипных характеристик излучения разных лет друг другу. Характерным признаком отличия зимних коррелограмм от летних для 40-тонного виброисточника (кроме самих величин амплитуд, меняющихся на порядок [5]) является практическое отсутствие в зимний период полукратных, полуторократных, 2.5-кратных… гармоник (рис. 1).

По данным экспериментов 2016 - 2018 гг. с использованием специального температурного датчика под вибратором на разных глубинах установлено, что стабильное (по амплитуде) излучение сохраняется в течение 4-х летне-осенних месяцев и короткий период зимой в феврале-марте [4]. В конце марта и апреле и в переходный осенне-зимний период отмечается сильный разброс амплитуд [6].



а) б)

Рис. 1. Примеры текущих спектров в ближней зоне вибратора ЦВ-40 в летний (22 июня 2023 г.) (А) и в зимний (24 января 2024 г.) (Б) периоды

В 2022 году после технического ремонта и перестановки виброисточника ЦВ-40 был повторен ряд экспериментов по изучению резонансов в системе вибратор/грунт и повторяемости вибросеансов. Ниже (на рис. 2) представлен пример экспериментов с накоплением вибрационных сеансов, казалось бы, в относительно стабильный летний период на площадке Быстровского полигона.

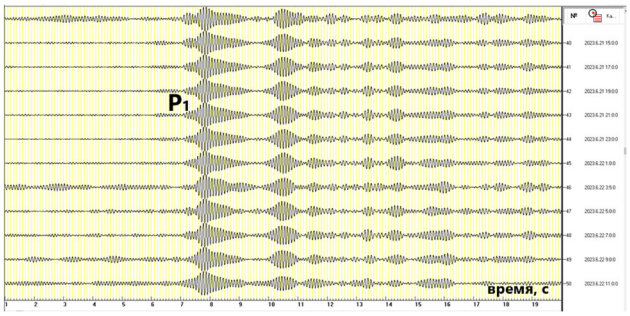


Рис. 2. Примеры коррелограмм (с нормировкой на каждой трассе) от вибратора ЦВ-40, зарегистрированные на с/ст Новосибирск при повторных сеансах излучения 21-22 июня 2023 года

Было выполнено 12 сеансов излучения вибратора ЦВ-40 (с интервалом в 2 часа) в частотном диапазоне 7.91-11.23 Гц на средних дебалансах с 13-00 (Гринвич) 21 июня 2023 года по 11-00 22 июня 2023 года.

Получены достаточно стабильные повторные коррелограммы. Однако при рассмотрении значений максимумов амплитуд излучения продольной волны P_1 (T~7.6-7.9 с) были отмечены незначительные изменения в начальный и средний период мониторинга и достаточно сильные в конце (рис. 3). Небольшие скачки амплитуд, вплоть по десятый сеанс (рис. 3), согласуются с ранее проведенными экспериментами, при которых уменьшение амплитуд при повторных сеансах обусловлено выдавливанием небольшого количества воды под вибратором при его работе; при этом происходит уменьшение скоростей упругих волн под вибратором и понижение резонанса излучения в низкочастотную область [5, 7], расширяя эффективный диапазон излучения.

Небольшой перерыв в работе вибратора приводит к первоначальному состоянию (виду виброграммы и текущих спектров), что можно трактовать как восстановление структуры среды.

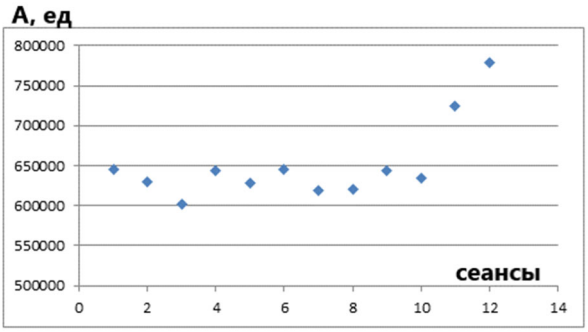


Рис. 3. График максимальных амплитуд продольной волны P_1 при суточном мониторинге 21-22 июня 2023 года

Этим объясняются незначительные флуктуации амплитуды на графике (рис. 3). Резкий же скачок амплитуд, более чем на 20% (рис. 3), объяснить этим невозможно. Прояснить ситуацию помогает анализ графиков промерзания и оттаивания грунта под вибратором, полученных ранее (в 2016-2017 гг.) с температурным датчиком на глубинах до 5м [4]. Из него следует, что с апреля по июнь грунт под вибратором переходит из твердо-мерзлого состояния в пластично-мерзлое и уже далее в нормальное не мерзлое состояние. В конце мая начале июня (в среднем за разные годы) этот процесс затрагивает бóльшие глубины в 1.5-2 м.

Можно предположить, что этот процесс в результате большого количества вибросеансов в течение дня в июньском эксперименте 2023 года был ускорен большим поступлением тепла под вибратор [8] и привел к полному оттаиванию грунта и включению в резонанс более толстого слоя под вибратором; это, соответственно, и привело к сильному повышению амплитуд излучения после 10-го сеанса. При этом существенно расширился частотный диапазон излучения виброисточника в ближней зоне и наблюдалось появление полукратной и полуторакратных гармоник практически сразу после включения вибратора.

Результаты проведенного эксперимента наглядно иллюстрируют высокую чувствительность вибросейсмического метода к изменениям в среде, это, во-первых; а во-вторых – диктуют необходимость учета изменений в среде под вибратором при анализе волновых полей в дальней зоне при вибромониторинге.

Вибромониторинг угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине

В 2022-2024 гг. были продолжены также начатые ранее исследования по режимным вибросейсмическим просвечиваниям участков крупных угледобывающих разрезов Восточный и Колыванский. Регистрация виброисточника ЦВ-40 осуществлялась на сети временных сейсмостанций («Елбаши» (KLV01) и «Усть-Чем» (KLV02)) в районе разрезов и опорной сейсмостанции Новосибирск (NVS) (рис. 4).

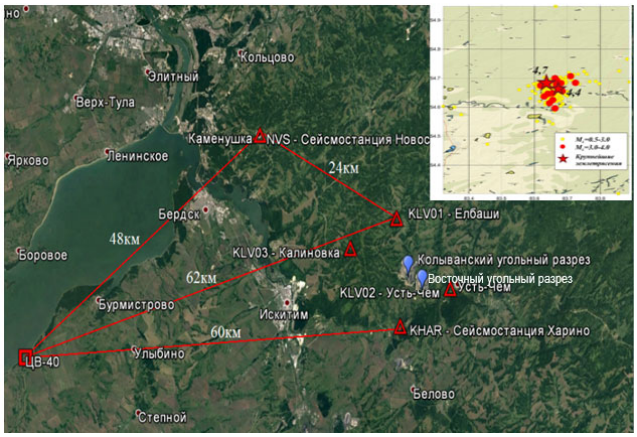


Рис. 4. Схема режимных вибросейсмических исследований в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный. На врезке – эпицентры землетрясений в районе Горловской впадины в 2022-2024 гг.

Для исключения сезонных изменений в районе виброисточника при мониторинге анализируется разность времен прихода двух волн, например, P- и S-волн на одной коррелограмме, как это показано в [2, 6, 9], либо двух продольных волн, регистрируемых от вибратора на разных станциях. Для мониторинга северо-западного участка Горловской впадины с коррелограмм на станции «KLV01» снимались времена волны P_2 (предположительно продольной отраженной волны от неглубоко залегающей границы в верхней части коры), как наиболее четко выраженной на коррелограммах по сравнению с первыми вступлениями (рис. 5).

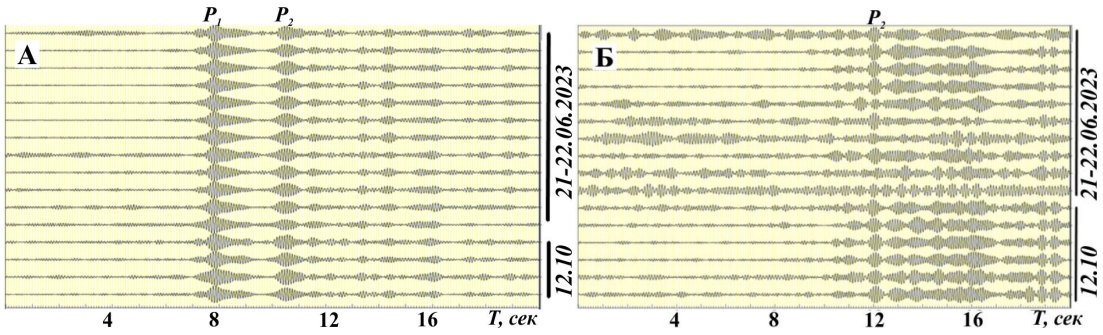


Рис. 5. Примеры записей от вибратора ЦВ-40 на с/ст. NVS (А) и KLV01 (Б)

Разброс разности времен регистрации максимумов волны P_2 со с/ст «KLV01» и P_1 с опорной сейсмостанции «NVS» (рис. 5) составляет в 2022-2024 гг. примерно 0.011 с (за исключением пары точек) при среднем значении ~4.228 с (рис. 6А). На полученном графике разности времен отмечается небольшое уменьшение разности времен в 2022-2023 гг., а затем увеличение. С одной стороны, выявленные отклонения не являются значимыми, поскольку находятся в пределах точности измерений в 0.003-0.005 с. Тем не менее, проведено сравнение

полученных данных графика разности времен с данными графика разности по другим станциям и материалами сейсмологических наблюдений на исследуемой площади.

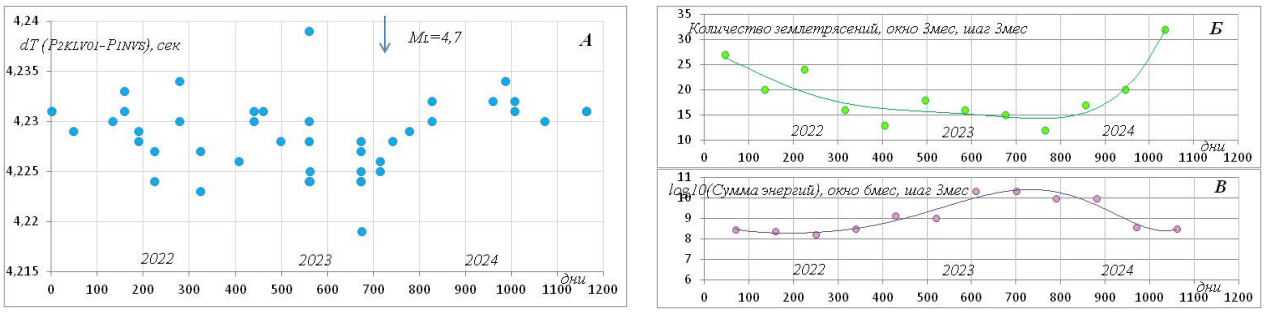


Рис. 6. Графики разности времен пробега волн на с/ст. «KLV01» и «NVS» в 2022-2024 гг. (А), количества (Б) и суммарной энергии (В) землетрясений в районе угольных разрезов Колыванский и Восточный

Подобный тренд уменьшения разности времен отсутствует на графике с с/ст. SLR (в стороне от площади угольных разрезов) и опорной с/ст. NVS, что подтверждает обособленность данных на рис. 6А.

За период мониторинга с 2022 по 2024 гг. на исследуемой площади АСФ ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано свыше 230 землетрясений с магнитудами Ml от 0.5 до 4.7. Наиболее крупное событие с Ml = 4.7 произошло 27.11.2023 года в северном окончании Колыванского разреза; на рис. 6А оно отмечено как раз в самой области понижения разности времен.

Проанализированы также графики количества и энергии землетрясений за исследуемый период. Как видно из графика на рис. 6Б с 2022 года по конец 2023 года (и начало 2024) происходит уменьшение количества землетрясений (осредненное за трехмесячный период) от 26 до 12, а потом резкое возрастание до 20-32 (в конце 2024 года). Фактическое понижение разности времен на рис. 6А практически совпадает с значительным понижением количества событий на рис. 6Б. К данному минимуму на рис. 6А и 6Б приурочен также максимум выделенной энергии (Lg E) (рис. 6В). Можно предположить, что при сильном увеличении угольных разработок произошло уплотнение пород и накопление потенциальной энергии, которое привело к разрядке в виде крупного события с M=4.7.

С большей вероятностью выявленная корреляция не случайна; понижение графика разности времен может говорить об увеличении скорости продольных волн в пределах окрестности с/ст KLV 01, которое произошло под воздействием уплотнения пород.

Чтобы понять, какие значимые вариации могут быть связаны с процессами подготовки и разрядки землетрясений в просвечиваемой вибратором земной коре участка исследований, был рассмотрен ряд публикаций по мониторингу и прогнозу землетрясений в разных регионах России и мира [10-13].

С использованием мировой зависимости из [12] о размерах очага землетрясения в зависимости от магнитуды было установлено, что размеры большинства очагов техногенных землетрясений Горловской впадины с магнитудами до 4.5-4.7 могут составлять около 5 километров. При пересечении таких аномальных зон (подготовки или разгрузки землетрясений) трассами сейсмических лучей следует ожидать вариаций в волновых полях (времен пробега, амплитуд, углов выхода, спектрального состава, поляризации и т. д.) [10-13]. Применительно к кинематическим параметрам значимые вариации времен продольных волн при вибросейсмическом мониторинге Горловского угленосного бассейна должны превышать точность измерений и составлять хотя бы 2σ (σ – среднеквадратическое отклонение из данных на рис. 6А за 2022-2024 гг., равное 0.0027 с), что составляет чуть более 0.005 с.

Обзор немногочисленной литературы по сейсмическим предвестникам землетрясений показал, что полученные в экспериментах с естественными источниками вариации времен пробега продольных волн (в пересчете на пятикилометровую аномальную зону подготовки землетрясения) могут составлять до 0.025 с. Это в пять раз больше значимых вариаций параметра разности времен пробега продольных волн, которые могут быть установлены при режимных вибросейсмических наблюдениях в Горловской впадине. Если рис. 6А действительно отражает процесс подготовки и развития техногенных землетрясений в пределах разрабатываемых разрезов, то малость выявленных вариаций может объясняться как отклонением трассы мониторинга (вибратор ЦВ-40 – с/ст Елбаши) от активизированной среды (до 4-7 км), так и тем обстоятельством, что техногенно-природные землетрясения происходят в осадочном чехле с повышенным затуханием, а не в кристаллических породах, для которых получены немногочисленные ссылки о вариациях времен пробега перед землетрясениями [10, 11, 13].

Заключение

По результатам круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника показано, что сезонные изменения волновых полей могут продолжаться до конца июня; это диктует необходимость учета изменений в среде под вибратором при анализе волновых полей в дальней зоне при вибромониторинге.

По результатам режимных вибросейсмических наблюдений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации разности времен регистрации продольных волн на с/ст «Елбаши» (KLV01) и опорной с/ст Новосибирск (NVS), выражающиеся в закономерном уменьшением разности времен примерно на 0.005-0.007 с в конце 2023 года и начале 2024 года; для этого периода отмечено также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии. В качестве согласования выявленных зависимостей высказано предположение, что при сильном увеличении угольных разработок в 2022-2023 гг. произошло уплотнение пород и накопление потенциальной энергии, которое привело к разрядке в виде крупного события с M=4.7 в конце 2023 года. Уменьшение количества землетрясений (или

сейсмическое затишье) перед крупными землетрясениями неоднократно отмечалось специалистами в разных регионах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) 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».

Авторы выражают признательность коллегам из Алтае-Саянского и Сейсмологического филиалов ФИЦ ЕГС РАН за участие в экспериментах и ценные замечания при обсуждении статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф. и др. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. – М: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. – 470 с.

2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В. и др. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. –Новосибирск: Издво СО РАН, 2010. – 310 с.

3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры. В сборнике: Проблемы региональной геофизики. Материалы геофизической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения С.В. Крылова. – 2001. – С. 55-58.

4. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Елагин С.А. и др. О влиянии сезонных изменений среды под вибратором ЦВ-40 на характеристики его излучения (при вибросейсмическом мониторинге Алтае-Саянского региона). – Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017. – Т.2. – №4. – С. 34-39.

5. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Романенко И.Е. и др. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмических исследованиях и активном мониторинге среды // Проблемы информатики. – 2016. – №1. – С. 58-72.

6. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. и др. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири. Проблемы информатики. г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2018. – С. 349-356.

7. Геза Н.И., Егоров Г.В., Юшин В.И. Особенности напряженного состояния рыхлой среды, подвергаемой пульсирующей нагрузке. Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», изд. ИГД СО РАН, 2004. – С. 340-347.

8. Юшин В.И., Аюнов Д.Е., Дучков А.Д. Мониторинг изменения температуры под плитой действующего сейсмического вибратора. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 2. – С. 32-36.

9. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Елагин С.А., Галёва Н.А. Развитие сети активного мониторинга в сейсмоактивном Алтае-Саянском регионе. – Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 46-55.

10. Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Природа временных вариаций скоростей упругих волн в земной коре Гармского района // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 6. – С. 3-16.

11. Моги К. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 373 с.

12. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. –М: Наука, 1985. – 408 с.

13. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 9. – С. 13-30.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-140-146

Т. А. Ступина[1]✉, Е. В. Цибизова[1], Н. А. Бушенкова[1]

Азимутальная анизотропия в мантии по данным анализа расщепления SKS-волн в районе вулкана Таупо

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

Аннотация. Работа посвящена изучению азимутальной анизотропии в мантии Земли по данным измерений параметров расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии. Применение полуавтоматического подхода контроля качества позволило по телесейсмические данным за 2003-2018 гг. сформировать репрезентативный каталог событий, зарегистрированных локальной сетью станций. В дальнейшем это позволило получить результаты, демонстрирующие, что направление поляризации «быстрой» поперечной волны, в основном, параллельно границе субдукции. Временные задержки прихода «быстрой» и «медленной» волн расщепления составило около 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в мантии под сетью станций.

Ключевые слова: азимутальная анизотропия, субдукция, SKS-волны

T. A. Stupina[1]✉, E. V. Cibizova[1], N. A. Bushenkova[1]

Azimuthal anisotropy in the mantle from SKS-wave splitting analysis in the Taupo volcano area

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

Abstract. This work is devoted to the study of azimuthal anisotropy in the Earth's mantle based on measurements of SKS-wave splitting parameters in the Taupo supervolcano area in New Zealand. The use of a semi-automated approach to quality control made it possible to form a representative catalog of teleseismic events recorded by a local network of stations in 2003-2018. This subsequently made it possible to obtain results demonstrating that the polarization direction of the leading shear wave is mainly parallel to the subduction boundary. The time delays in the arrival of the "fast" and "slow" direction shear waves were about 1.7 seconds, which indicates a significant influence of anisotropy in the mantle beneath the station network.

Keywords: azimuthal anisotropy, subduction, SKS waves

Введение

Изучение динамических процессов, происходящих в зонах субдукции, сопряжено с исследованиями неоднородностей в мантии и остается актуальным по настоящее время. «Молодая» субдукционная зона, сформированная погружением Тихоокеанской плиты под Австралийскую, вызывает большой интерес у многих ученых. Северный остров Новой Зеландии расположен в зоне, где граница между плитами имеет изгиб. Скорость относительного движения плит

уменьшается в этом регионе к югу и в Новозеландском сегменте движение становится параллельным границе плит [1] (рис.1). В желобе Хикуранги к востоку от Северного острова происходит субдукция утолщенного океанического плато Хикуранги. Севернее плато переходит в океаническую плиту средней мощности, субдуцирующую под желоб Кермадек (северное продолжение желоба Хикуранги). На Южном острове субдукция стимулирует появление сдвиговой разломной зоны, включающей систему разломов Марлборо и Альпийский, по которому происходит основная часть относительного движения Австралийской и Тихоокеанских плит [2]. Активная тектоника Северного острова обусловлена влиянием субдукции в желобе Хикуранги, задугового рифтинга в Вулканической Зоне Таупо (ВЗТ) и правосдвиговой разломной зоны на востоке острова (Рис.1). Наблюдается существенное сжатие в аккреционном клине между желобом Хикуранги и восточным побережьем Северного острова. Раскрытие рифта ВЗТ (часть Центрального Вулканического Региона, или ЦВР) продолжается уже, как минимум последние 2-4 миллиона лет, с примерной скоростью от нескольких до 20 мм в год [3]. Около 25 млн лет назад в регионе прекратился спрединг, и началось сдвиговое движение плит, послужившее началом субдукции. На Земле обнаружено всего 2-3 региона с похожей историей развития, и они мало изучены.

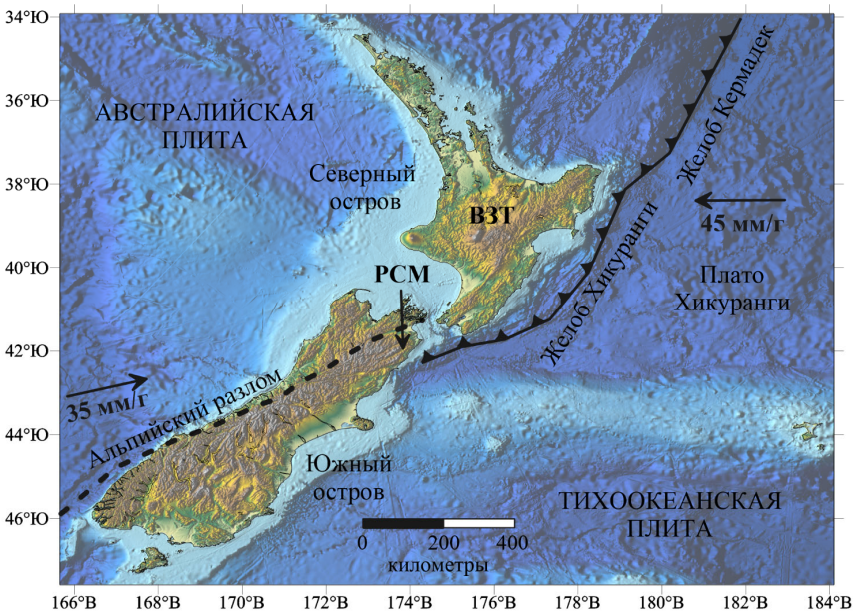


Рис. 1. Региональная тектоническая обстановка Новой Зеландии. РСМ – разломная система Марлборо, ВЗТ – вулканическая зона Таупо

Многочисленные исследования сейсмической анизотропии, как одного из параметров, характеризующих тектонические процессы, активно проводились в различных зонах субдукции в течении нескольких десятков лет и выявили ряд закономерностей изменения поляризации «быстрой» поперечной волны и степени анизотропии среды в зонах субдукции по направлению от желоба к задуговой области [4,5]. В то же время, постоянно пополняющиеся свежими данными

мировые каталоги сильных землетрясений позволяют получать новые решения или уточнять прежние.

Настоящая работа посвящена исследованию азимутальной сейсмической анизотропии в мантии по данным измерений параметров расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии от телесейсмических событий, зарегистрированных локальной сетью из семи станций в 2003-2018 гг. Результаты исследования показали, что направление поляризации «быстрой» поперечной волны преимущественно параллельно границе субдукции и хорошо согласуется с результатами работ [6, 7, 8], выполненных по независимым данным других станций, расположенных в северной части острова в более ранний период. Временные задержки прихода «быстрой» и «медленной» поперечных волн в совокупности составили 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в мантии.

Методы и данные

В обработке были использованы сейсмологические данные с семи однотипных (BFZ, BKZ, HIZ, KHZ, OUZ, QRZ, WPVZ) широкополосных станций Национальной сейсмографической сети Новой Зеландии («New Zealand National Seismograph Network»), находящиеся в открытом доступе через международную сеть FDSNWS [9]. Расположение станций показано на карте (рис. 4). В настоящей работе применялся метод анализа расщепления поперечных волн, основанный на минимизации энергии по трансверсальной компоненте [10], в котором вычислялся азимут (ϕ) поляризации «быстрой» поперечной волны и разность времен (δt) прихода «быстрой» и «медленной» поперечных волн, отражающие характеристики направленности деформаций и степени анизотропии среды.

Используемый метод реализован в процедуре программы «SplitRacer», разработанной в университете им. Гёте Франкфурт-на-Майне [11] и в настоящее время широко применяемой многими научными коллективами. В программном приложении существует возможность задавать двухслойные анизотропные модели и вычислять оценки параметров как для одного события, так и по всем событиям на конкретной станции, выполнять контроль качества выделенной фазы SKS волны.

На первом этапе по данным каталога [9] был сформирован подкаталог из 647 сильных землетрясений с $M_w \geq 6$ и эпицентральными расстояниями 85°-140° за период с 2003 по 2018 год.

На втором этапе к сейсмическим 100-секундным трехкомпонентным записям применялся односекундный фильтр низких частот и «ресемплинг» до 20 Гц с целью понижения расчетного времени. Далее по таблице времен, сформированной в приложении «TauP» [12] для модели «Iasperi91», выделенные фазы SKS-волн анализировались на часовых и 100-секундных записях по нескольким сейсмическим событиям с целью подбора удовлетворительных параметров (полосовой фильтр в диапазоне 4-50 секунд, соотношение сигнал/шум более 2.5 в диапазоне 20 секунд за 5 секунд до теоретической фазы) для дальнейшей автоматизации процесса. Во избежание интерференции, фазе SKS на протяжении 10

секунд не должны предшествовать вступления других фаз. Временное окно устанавливалось в диапазоне 25 секунд и устанавливалось оно за 5 секунд до теоретического времени вступления фазы. Далее определялись четкие вступления фаз на радиально-трансверсально преобразованных горизонтальных компонентах и оценивалась эллиптическая форма траектории движения частиц, указывающая на наличие расщепления. На Рисунке 2 приведен пример обработки записи землетрясения станции BKZ.

На третьем этапе к отобранному подкаталогу для каждой станции применялся статистический анализ, включая построение гистограмм распределения разности между теоретическим и вычисленным обратным азимутом с целью исключения дезориентированных со временем приемников или их коррекции. Единичные события с большим отклонением были исключены из дальнейшей обработки. В результате, например, из подкаталога для станции BKZ было отобрано 87 землетрясений, удовлетворяющих установленным выше параметрам.

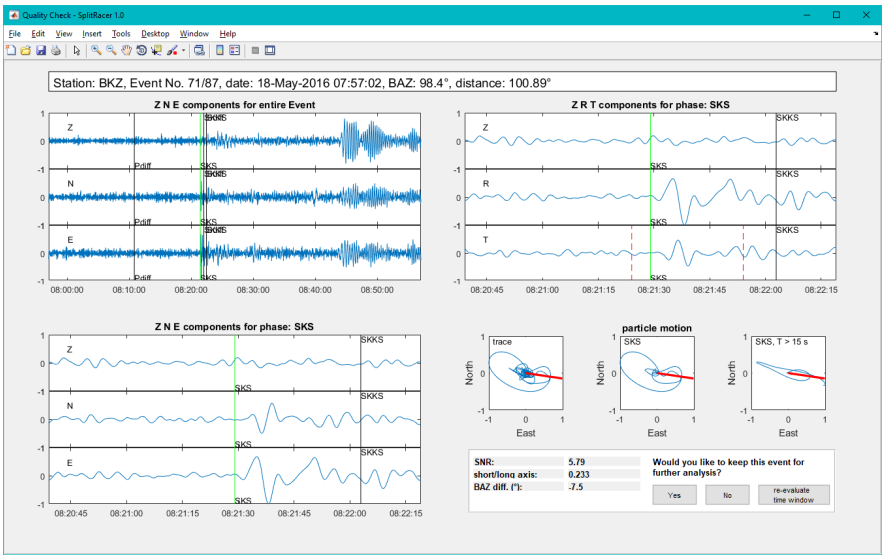


Рис. 2. Графический интерфейс обработки записи сейсмического события на станции BKZ.

На четвертом этапе расчет параметров расщепления осуществлялся сеточным методом по переменным (ϕ, δt) с шагом (1°, 0.1 сек.) и минимизированием энергии по трансверсальной компоненте в диапазоне от 0° до 180° и от 0 до 4 секунд, соответственно. Качество полученного решения оценивалось в совокупности через размер 95% доверительного интервала, вычисленного на основе F-теста двухпараметрической модели, относительную величину снижения энергии («energy reduction», более 85%) и по наличию трансформации траектории движения частиц из эллипса в линию. На Рисунке 3 приведен пример диалогового окна программы вычисления параметров расщепления для одного события, записанного станцией BKZ.

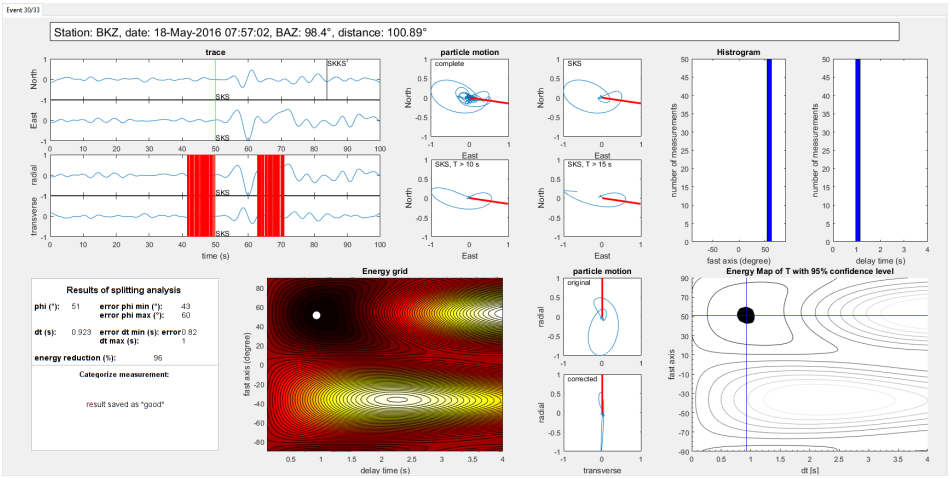


Рис. 3. Графический интерфейс анализа расщепления поперечных волн на 100-секундной записи станции BKZ.

На пятом этапе параметры расщепления вычислялись одновременно по всем событиям с минимизацией суммарной энергии по трансверсальной компоненте.

Результаты и обсуждения

В результате применения выше описанной методики и многокритериального подхода к отбору данных, на семи станциях было обработано 4 529 сейсмограмм за период с 2003 по 2018 год, из которых только на 509 удалось выделить расщепление SKS-волн.

Таблица 1

Значения параметров расщепления под станциями

Станции	Параметр 1			Параметр 2		
	ϕ, °	ϕ_{min}, °	ϕ_{max}, °	δt, сек.	δt_{min}, сек	δt_{max}, сек
BFZ	38	33	41	2.20	1.8	2.4
BKZ	24	22	26	1.6	1.5	1.8
HIZ	38	29	46	0.82	0.62	1.1
KHZ	33	27	37	1.1	0.92	1.3
OUZ	64	52	79	0.72	0.41	1
QRZ	20	13	29	2.4	1.6	3.2
WPVZ	26	21	30	1.4	0.92	1.9

Значения параметров расщепления, азимут поляризации ϕ «быстрой» волны и его границы 95% доверительного интервала (ϕ_{min}, ϕ_{max}), степень анизотропии δt и ее границы 95% доверительного интервала (δt_{min}, δt_{max}) под каждой станцией представлены в табл. 1. Пространственное распределение параметров расщепления, с явно выделяющимся параллельным субдукционной зоне направлением, показано на карте (рис. 4), где пунктирная линия обозначает правосдвиговую разломную зону, зубчатая линия - положение Австралийско-Тихоокеанской зоны субдукции с направлением погружения в сторону «зубцов». В результате

проведенного исследования азимутальной анизотропии в мантии по вычисленным параметрам расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии получено, что преобладающее направление поляризации «быстрой» поперечной волны параллельно границе субдукции (рис. 4) и согласуются с результатами из работ [6,7,8] по другим станциям. Временные задержки прихода поперечных волн по «быстрому» и «медленному» направлениям составили порядка 1.7 секунд (средневзвешенная оценка по сети станций), что указывает на значительное влияние анизотропии, обусловленной ориентацией кристаллической решетки оливина в верхней мантии вследствие взаимодействия погружающегося слэба с окружающей мантией.

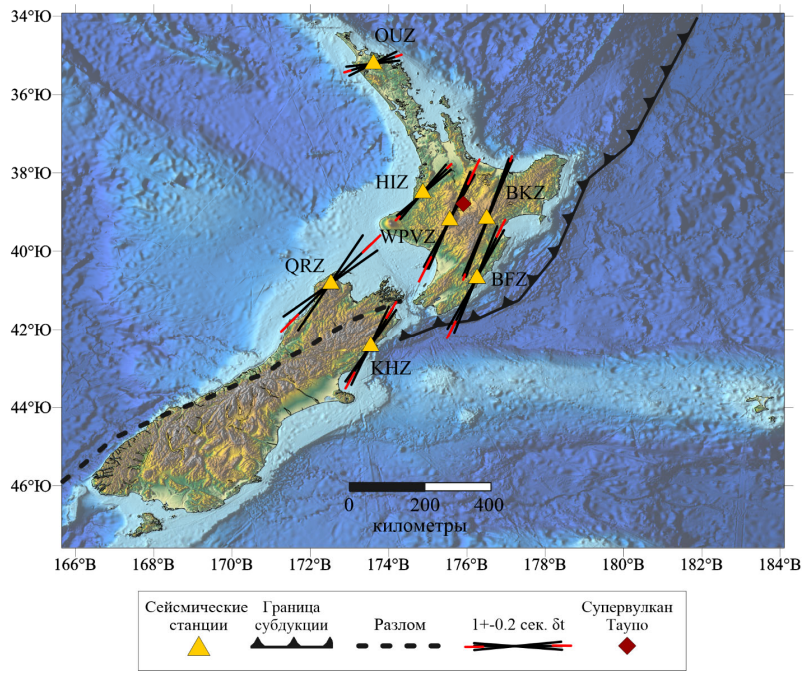


Рис. 4. Распределение параметров расщепления SKS-волн для каждой станции, задействованной в исследовании. Длина черных линий - значение параметра δt, угол наклона линии - параметр ϕ. Дополнительные черные линии – границы 95% доверительного интервала для ϕ. Красная линия - расширение δt до границ 95% доверительного интервала.

Заключение

Полученные в ходе исследования результаты позволяют предполагать, что анизотропия, обнаруженная под регионом супервулкана Таупо (Новая Зеландия) по SKS-волнам, обусловлена ориентацией кристаллической решетки оливина в верхней мантии вследствие взаимодействия погружающегося слэба Тихоокеанской плиты с окружающей мантией. Доминирующее направление поляризации «быстрой» поперечной волны параллельно границе субдукции, что подтверждается работами других ученых. Временные задержки прихода поперечных волн по «быстрому» и «медленному» направлениям составили порядка 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в верхней мантии.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке ФНИ FWZZ-2022-0017.

Авторы выражают благодарность А.А. Яковлеву и А.А. Баланкову за работу с программными кодами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. DeMets C., R. G. Gordon, D. F. Argus, S. Stein. Current plate motions // Geophysical Journal International. – 1990. - Vol. 101. - № 2. - P. 425–478.
2. Van Dissen Russell, Robert S. Yeats. Hope fault, Jordan thrust, and uplift of the Seaward Kaikoura Range, New Zealand // Geology. – 1991. - Vol. 19.- №4. - P. 393-396.
3. Villamor Pilar, Kelvin Berryman. A late Quaternary extension rate in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, derived from fault slip data // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. – 2001. - Vol. 44. - № 2 - P. 243-269.
4. Long M.D., Silver P.G. Mantle flow in subduction systems: The subslab flow field and implications for mantle dynamics // Journal of Geophiysical Researh. – 2009. –Vol. 114. – P. B10312.
5. Paczkowski Karen. Dynamic Analysis of Modifications to Simple Plate Tectonic Theory // ProQuest Dissertations and Theses. – 2012. - № AAT 3535406. - ISBN 9781267856869. – 185 p.
6. Klosko E. R. et al. Upper mantleanisotropy in the New Zealand region // Geophys. Res. Lett. - 1999. - Vol. 26. – P. 1497 –1500.
7. Marson-Pidgeon, K., M. K. Savage, and K. Gledhill. Seismic anisotropy beneath the lower half of the North Island, New Zealand // Journal of Geophiysical Researh. – 1999 – Vol. 104. - № 20. – P. 277 – 286.
8. Audoine E., M. K. Savage, and K. Gledhill. Anisotropic structure under a back arc spreading region, the TaupoVolcanic Zone, New Zealand // Journal of Geophiysical Researh. – 2004 – Vol. 109. – № B11. – P. 305 - 326.
9. Сейсмические данные // GeoNet Aotearoa New Zealand Seismic Digital Waveform Dataset. GNS Science. – 2021. - https://doi.org/10.21420/G19Y-9D40.
10. Silver Paul G., W. Winston Chan. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation // Journal of Geophysical Research Solid Earth. – 1991. - Vol. 96. - № B10. – P. 429 – 454.
11. Reiss Miriam Christina and Rümpker Georg. SplitRacer MATLAB Code and GUI for Semiautomated Analysis and Interpretation of Teleseismic Shear-Wave Splitting // Seismological Research Letters. – 2017. - Vol. 88. - № 2A. – P. 392 – 409.
12. Crotwell H. Philip, Thomas J. Owens, Jeroen Ritsema. The TauP Toolkit Flexible Seismic Travel-time and Ray-path Utilities // Seismological Research Letters. – 1999. - Vol. 70. - № 2. - P. 154-160.

© Т. А. Ступина, Е. В. Цибизова, Н. А. Бушенкова, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-147-153

И. В. Суродина[1,2]✉, К. В. Сухорукова[1]

Трёхмерное конечно-разностное моделирование микрозондов без фокусировки тока

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

Аннотация. Работа посвящена прямому моделированию показаний микрозондов каротажа в произвольной трёхмерной изотропной среде. В частности, рассматриваются зонды без фокусировки тока - микрограндиет зонд (МГЗ) и микропотенциал зонд (МПЗ). На основе конечно-разностного метода был создан алгоритм и написана программа, позволяющая моделировать кажущееся сопротивление МГЗ и МПЗ в изотропных средах. Проведено тестирование и верификация программы. Представлены результаты расчетов для реалистичных моделей.

Ключевые слова: конечно-разностное моделирование, микрокаротаж, уравнение Пуассона

I. V. Surodina[1,2]✉, K. V. Suhorukova[1]

Three-dimensional finite-difference simulation of microprobes without current focusing

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,
Russian Federation
e-mail: sur@ommfao1.sscc.ru

Abstract. The work is devoted to direct simulation of micrologging in an arbitrary three-dimensional isotropic medium. In particular, probes without current focusing are considered - micrograndient probe and micropotential probe Based on the finite-difference method, an algorithm was created and a program was written that allows modeling the apparent resistivity of MGP and MPP in isotropic media. The program was tested and verified. The results of calculations for realistic models are presented.

Keywords: finite different simulation, micrologging, Poisson equation

Введение

Метод электрического микрозондирования – гальванический микрокаротаж – предназначен для исследования удельного электрического сопротивления (УЭС) породы в нескольких сантиметрах от стенки скважины. Микрозонды по своей конфигурации делятся на обычные и фокусирующие. К первым относятся микроградиент и микропотенциал зонды, ко вторым – несколько разновидностей зондов бокового каротажа.

Электроды микроградиент и микропотенциал зондов (МГЗ и МПЗ) расположены в изоляционном материале внешней части прижимной площадки. Прижатие микрозонда к стенке скважины обеспечивается рессорным или рычажным устройством [1].

Традиционно каротаж МГЗ и МПЗ применяется для автоматизированного выделения в разрезе проницаемых интервалов – потенциальных коллекторов нефти и газа. При бурении с применением водно-глинистого бурового раствора на стенке скважины в интервале проницаемой породы формируется глинистая корка. В результате процесса фильтрации в поровое пространство породы бурового раствора на стенке скважины оседают глинистые частицы, и нарастает фильтрационная корка – плотный глинистый слой небольшой толщины (до 1.5–2.0 см) с сопротивлением, близким к УЭС бурового раствора, но существенно меньшим, чем УЭС пласта. Из-за небольшой толщины этого прослоя его влияние не сказывается на сигналах глубинных зондов электрокаротажа, но приводит к характерному соотношению сигналов МГЗ и МПЗ: если кажущееся сопротиление МПЗ больше, чем МГЗ, то это признак наличия глинистой корки и соответственно проницаемости пласта – потенциального коллектора углеводородов. По этому соотношению в программных комплексах для обработки данных каротажа автоматически выделяют интервалы коллекторов.

Другим, не менее важным аспектом, повышающим интерес к микрокаротажу, остается сложность решения обратной задачи фильтрации бурового раствора в коллектор. Фильтрат отличается по электропроводности от нефти и пластовой воды, поэтому в пористой среде формируется специфическое радиальное распределение электропроводности, зависящее как от параметров бурения, так и от фильтрационно-емкостных свойств и исходного соотношения пластовых флюидов. Радиальное распределение оценивается по данным больших зондов электрокаротажа, но для решения обратной фильтрационной задачи также важно знать значение УЭС на ближних к скважине сантиметрах породы. Для этого и поставлена задача создания программных средств моделирования сигналов электрических микрозондов.

Прямая трёхмерная задача электрического микрокаротажа

Метод микрозондирования заключается в детальном исследовании кажущегося сопротивления прискважинной части разреза зондами очень малой длины. Зондовая установка представляет собой "башмак", на внешней изолирующей стороне которого установлены три точечных электрода на расстоянии 2.5 см друг от друга [2]. Они образуют два зонда: микроградиент зонд (МГЗ) A0.025M0.025N и микропотенциал зонд (МПЗ) A0.05M, у которого электродом N служит корпус прибора (рис. 1). Башмак экранирует микрозонд от пластовой жидкости и тем самым снижает влияние скважины на результаты измерений.

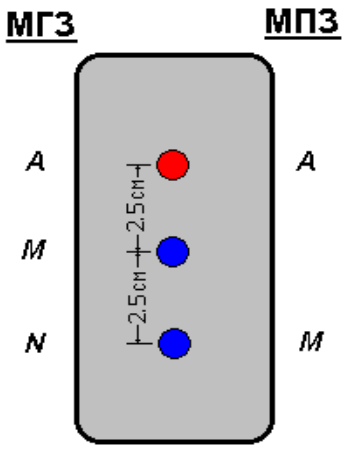


Рис. 1 Схема зондовой установки МГЗ и МПЗ

Задача моделирования МГЗ и МПЗ сводится к моделированию потенциала Φ точечного источника A постоянного тока в среде с заданным распределением электропроводности $\sigma(x,y,z) = 1/\rho(x,y,z)$. Кривизной поверхности скважины в виду малости размеров зонда можно пренебречь: считаем плоской границу раздела сред "скважина – горная порода".

Для определенности расположим источник A в начале координат, а приемники (измерительные электроды) *M, N* вдоль оси Y. Ось Z направим перпендикулярно оси скважины. Задачу для потенциала будем решать, выделяя известное решение для потенциала в однородной среде. Представим потенциал электрического поля $U = U^0 + U^a$, где $U^0 = \rho_0 I/4\pi R -$ потенциал точечного источника в однородной среде с сопротивлением ρ_0 на расстоянии R, $I -$ сила тока, $U^a -$ аномальный потенциал.

В декартовой системе координат уравнение для Φ^a примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma\frac{\partial U^a}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma\frac{\partial U^a}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma\frac{\partial U^a}{\partial z}\right)=$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left((\sigma-\sigma_0)\frac{\partial U^0}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left((\sigma-\sigma_0)\frac{\partial U^0}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left((\sigma-\sigma_0)\frac{\partial U^0}{\partial z}\right) \qquad (1)$$

При удалении от источника потенциал затухает как $1/R$, поэтому вдали от источников ($x = \pm X,\ y = \pm Y$, z=$\pm Z$) для функции U^a справедливы предельные значения:

$$U^a|_{x=\pm X} = 0,\ U^a|_{y=\pm Y} = 0,\ U^a|_{z=\pm Z} = 0. \qquad (2)$$

Уравнения (1) и (2) определяют задачу Дирихле для одного точечного источника. Для дискретизации данной задачи используем консервативную разностную схему [3]. Полученную систему линейных алгебраических уравнений приводим к симметричному виду с помощью диагонального преобразования подобия, далее нормируем матрицу так, чтобы её диагональные элементы стали

единичными. Эта подготовительная работа с матрицей не занимает много времени, но позволяет существенно сократить ресурсы для памяти на графическом процессоре (GPU) и в итоге получить быстрое решение задачи. Подробно этот подход описан в работе [4].

Тестирование и отладка программы моделирования сигналов МГЗ и МПЗ проходили в три этапа.

Этап 1: Проверка принципа взаимности. Одним из возможных методов тестирования программ моделирования электромагнитных полей служит проверка выполнения так называемого принципа взаимности. В данной задаче принцип взаимности проявляется в неизменности значения потенциала при смене положений источника и приемника поля. Серия вычислительных экспериментов показала, что значения потенциала остаются неизменными с погрешностью в 1–2%. Расчёты проведены на видеокарте K40 кластера НКС30Т+GPU ССКЦ СО РАН.

Этап 2: Сравнение с программой для точечного источника, находящегося на поверхности горизонтально-слоистой среды с непроводящим верхним полупространством. Тестирование проводилось для тонких сильно контрастных слоев. В процессе сравнительного моделирования построена итоговая сетка, на которой вычисленный потенциал совпал с тестовыми значениями с погрешностью 2–3 %.

Этап 3: Вычисление кажущегося сопротивления. Для МГЗ кажущееся сопротивление считается через разность потенциалов в точках M и N и коэффициент зонда. Для МПЗ дополнительно вычисляется потенциал в удалённой точке и затем берется разность потенциалов. Коэффициент зонда на практике вычисляется экспериментально. Следуя [5], он был взят равным 0.5. Местоположение удалённой точки определено из ряда экспериментальных вычислений, поскольку сам корпус прибора не моделируется.

Результаты

В тестовых расчётах башмак моделировался как металлическая прямоугольная пластина 0.1 х 0.2м и толщиной 0.005 м. Под башмаком располагался изоляционный слой толщиной 0.002 м, под изоляционным слоем – сама установка A0.025M0.025N. В программе предусмотрена возможность изменения как размеров башмака и изоляционного слоя, так и их сопротивлений.

Проведена серия расчетов для двухслойных моделей: 3 и 10 Ом·м и 3 и 20 Ом·м. Для этих моделей увеличивалась толщина слоя с УЭС 3 Ом·м, находящегося под прибором и моделирующего зону проникновения (ЗП), начиная от 0.001 до 0.2 м. На рисунках 2а (2б) приведены значения потенциалов на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (от расстояния от прибора до удаляющегося слоя с УЭС 10 Ом м (20 Ом м)). Также на рисунках приведены значения разности потенциалов МГЗ.

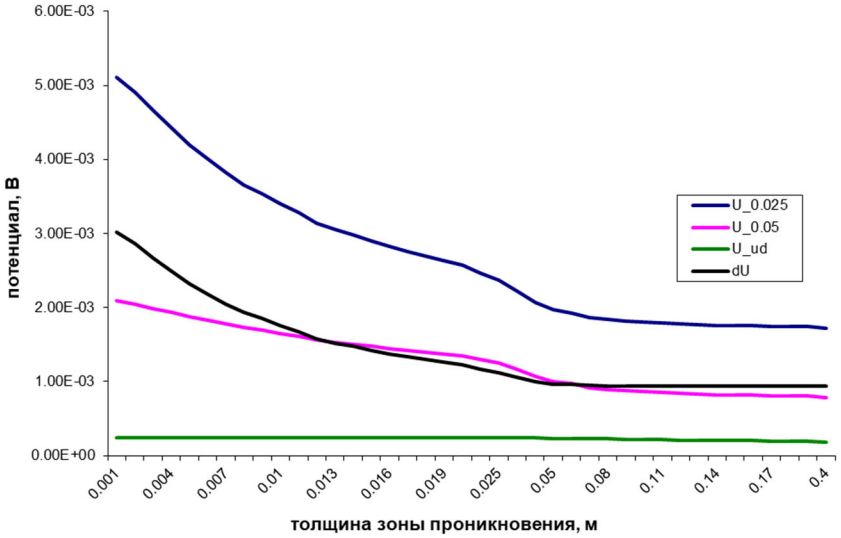


Рис. 2а. Значение потенциала (В) на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 10 Ом·м

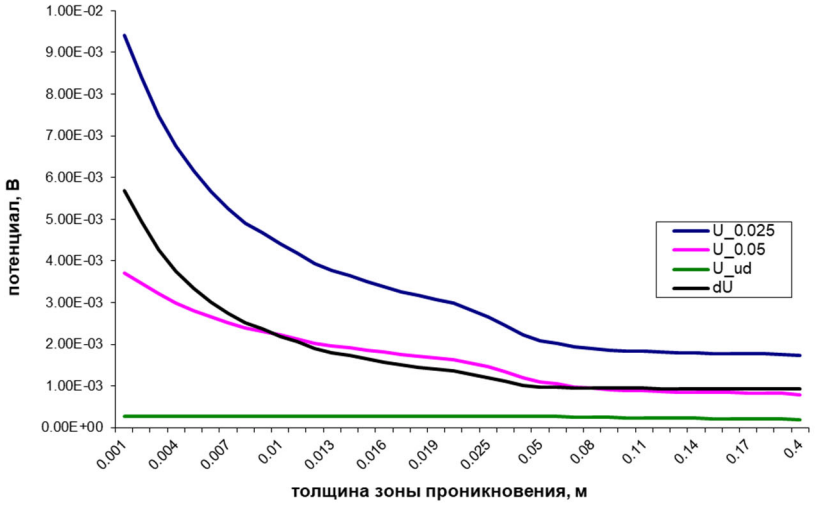


Рис. 2б. Значение потенциала (В) на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (м). Модель б) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 20 Ом·м

При толщине ЗП около 4 см для обеих моделей (рис. 2а и 2б) разность потенциалов МГЗ (dU) выходит на асимптоту. Это согласуется с ранее известными оценками, что глубинность исследования МГЗ составляет 4 см [6] (Doll, 1950). Потенциал на удаленном электроде (U_ud) меняется довольно слабо по сравнению с электродами M (U_0.025) и N (U_0.05).

На рисунках 3а–б показано кажущееся сопротивление для этих же моделей для зондов МГЗ и МПЗ. По кажущемуся сопротивлению видно, что глубинность МПЗ больше, чем МГЗ – выход на асимптоту у МПЗ наступает на 11 см, а у МГЗ – на 4 см. Это также согласуется с данными Долля [6].

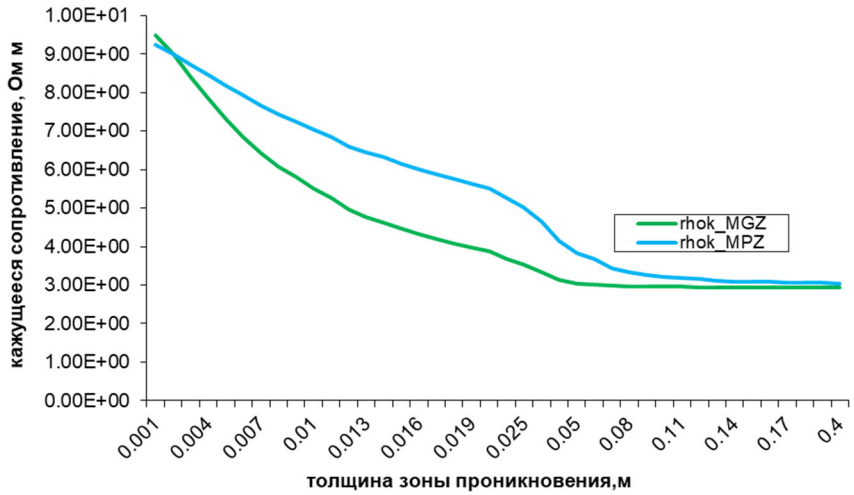


Рис. 3а. Значение кажущегося сопротивления rhok (Ом·м) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 10 Ом·м

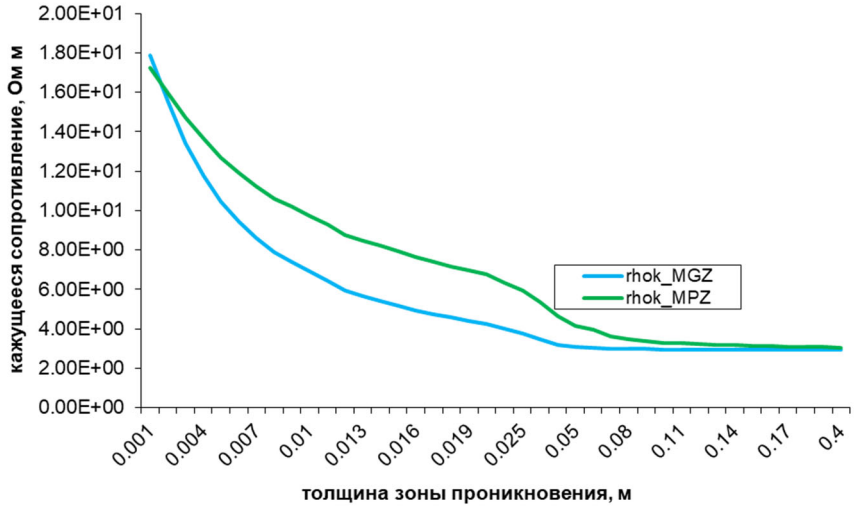


Рис. 3б. Значение кажущегося сопротивления rhok (Ом·м) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: б) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 20 Ом·м

В однородной среде с УЭС 1–300 Ом·м сигналы обоих зондов с достаточной точностью соответствуют требуемым уровням (рис. 4а). Модель на рис. 4б описывает ситуацию нефтенасыщенного коллектора, бурение которого велось на минерализованном полимерном растворе, вследствие чего в прискважинной области в пластовой воде повысилась минерализация (из-за диффузии ионов из бурового раствора через полимерную пленку). В этом случае выход на асимптоту сигнала МГЗ происходит при толщине измененной зоны около 7 см, а МПЗ – около 20 см. Отличие от случая менее контрастной модели на рис. 3б свидетельствует о необходимости численного анализа сигналов электрических микрозондов в каждом практически важном случае.

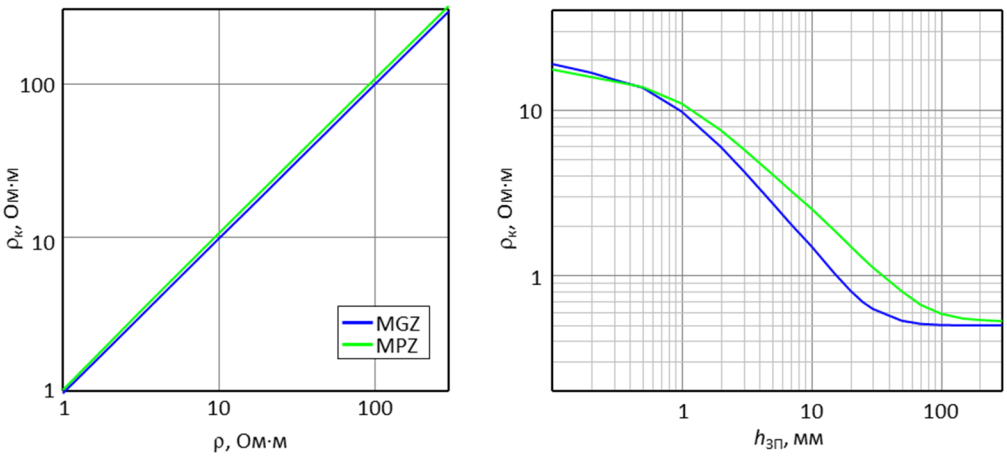


Рис. 4. Значение кажущегося сопротивления (Ом·м) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) однородное пространство;
б) УЭС ЗП 0.5 Ом·м, УЭС пласта 20 Ом·м

Заключение

Создан алгоритм и написана программа для быстрого прямого моделирования показаний микрозондов. Проведено тщательное тестирование и верификация полученных резельтатов.

Благодарности

Исследования выполнены по проекту ПФНИ № FWZZ2022-0026.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. https://rosprombur.ru/mikrokarotazh-skvazhin.html
2. Померанц Л.И., Бондаренко М.Т. Геофизические методы исследования нефтяных и газовых скважин - М.: Недра, 1981 г. – 376 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. – 655 с.
4. Суродина И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 51-61.
5. Чаадаев Е.В. Теория электрического и электромагнитного каротажа – Калинин: Союзпромгеофизика,1989. – 445 с.
6. Doll, H.G. The Microlog. Trans. AIME. – 1950. – Vol. 189. – P. 17–32.

© И. В. Суродина, К. В. Сухорукова, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-154-161

К. В. Федин[1,2,3]✉, О. К. Марилов[3], А. Л. Лукьянова[1,3]

Применение пассивного сейсмического метода стоячих волн для определения технического состояния насыпной плотины в зоне вечной мерзлоты

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты геофизического обследования насыпной каменно-земляной плотины гидроэлектростанции, расположенной в зоне вечной мерзлоты методом пассивного сейсмического мониторинга. В результате обследования были выявлены зоны повышенной динамической активности, связанные с разуплотнением грунта, трещинообразованием. Локализованы аномальные участки с наибольшими смещениями амплитудно-частотных характеристик (скорости вибраций), определены зоны с повышенными значениями напряжённо-деформированного состояния грунта, проведена качественная оценка зон локальных обводнённостей. Работа гидроагрегатов и температурные деформации могут провоцировать непредвиденные резонансы, особенно в зонах с выявленными дефектами. Полученные результаты демонстрируют эффективность пассивных сейсмических методов для мониторинга плотин.

Ключевые слова: пассивная сейсмика, сейсмоэмиссионная томография, мониторинг.

K. V. Fedin[1,2,3]✉, O. K. Marilov[3], A. L. Lukyanova[1,3]

Integration of the passive seismic standing wave method and the emission tomography method to determine the technical condition of an embankment dam in the permafrost zone

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk.
[2] Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk.
[3] Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of a geophysical survey of an embankment rock-earth dam of a hydroelectric power plant located in the permafrost zone using passive seismic monitoring. As a result of the survey, areas of increased dynamic activity associated with soil decompression and cracking were identified. Anomalous areas with the greatest shifts in amplitude-frequency characteristics (vibration rates) were localized, zones with increased values of the stress-strain state of the soil were identified, and a qualitative assessment of local flooding zones was carried out. The operation of hydraulic units and temperature deformations can provoke unforeseen resonances, especially in areas with identified defects. The results obtained demonstrate the effectiveness of passive seismic methods for monitoring dams.

Keywords: passive seismics, emission tomography, monitoring

Введение

На долю гидроэнергетики в России приходится порядка 20% установленной мощности и выработки электроэнергии [1, 2]. Изменение климата оказывает значительное влияние на безопасную эксплуатацию гидротехнических сооружений, расположенных в районах Крайнего Севера. Повышение среднегодовой температуры приводит к таянию вечной мерзлоты, что может ослабить грунтовые основания плотин и других инфраструктурных объектов, приводя к чрезвычайным ситуациям, связанным, например, с ослаблением несущей способности грунтов, появлением трещин в теле плотине, которые в дальнейшем могут привести к возникновению фильтрационных процессов [3, 4] и прорыву плотины. Эти факторы способствуют образованию обширных зон фильтраций, трещин, полостей и других скрытых дефектов в структуре конструкций и грунтов, которые трудно обнаружить традиционными методами [5-8].

Обеспечение безопасности и непрерывной работы гидроэлектростанции требует разработки и внедрения современных методов диагностики и мониторинга. Так, одними из ключевых являются геофизические методы выявления изменений динамических характеристик тела плотины. Сейсмические методы считаются одними из наиболее информативных для обнаружения и оценки зон фильтрации особенно в сложных геологических условиях, таких как многолетнемёрзлые грунты [9-15].

Методы и материалы

Объектом исследования являлась каменно-земляная плотина ГЭС, расположенная в зоне вечной мерзлоты на многолетнемерзлых грунтах. Тело плотины представляет собой камень различных фракций со стороны верхнего бьефа и свайное поле со стороны нижнего бьефа.

Обследование проводилось пассивным сейсмическим методом стоячих волн, основанным на регистрации записей сейсмических колебаний объекта. Источником колебаний являлись гидроагрегаты, работающие с постоянной частотой.

Каждая конструкция имеет свои собственные частоты, зависящие от геометрии, материала, массы и условий закрепления. Если частота внешних воздействий совпадает с собственной частотой конструкции, возникает явление резонанса, что может привести к значительным колебаниям и разрушению конструкции. Так, при наличии дефекта (трещины, полости и др.), он также будет иметь собственную частоту.

При проведении обследования использовались регистраторы сейсмических сигналов D-REG с низким уровнем внутреннего шума [16] и трёхкомпонентные велосиметры высокой чувствительности GS20DX. Измерения проводились по всей длине плотины.

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных «паразитных» шумов, для их последующего учёта при обработке полученных данных;

2. Регистрация шумовых записей на исследуемом участке местности для выделения в них стоячих волн с использованием семи датчиков: одного статично зафиксированного в одной точке и шести перемещаемых;

3. Нормировка уровня шумов перемещаемых датчиков на уровень опорного для каждого измерения;

4. Разбиение шумовых записей на блоки;

5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путём их суммирования;

6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Площадные измерения

По заранее спланированной системе наблюдений проводилась расстановка шести перемещаемых датчиков, а затем замер отклика среды в течении трех минут. Пример съёмки данных перемещаемыми датчиками согласно спланированной системе наблюдений приведён на рис. 1. После успешной процедуры проведения замера производилась перестановка датчиков согласно системе наблюдений и процесс повторялся вплоть до окончания работ.

Рис. 1. Пример расстановки перемещаемых датчиков согласно системе наблюдений

Обследование проводилось по следующей системе наблюдений (рис. 2). Шаг сети наблюдений по оси X составлял 3 м, однако, ввиду присутствия аномальных пьезометрических показателей, полученных при фильтрационных наблюдениях перед сейсмическими обследованиями, некоторые участки проходились более плотной сетью наблюдений (1 м по оси Y). Всего было реализовано 792 точки наблюдения.

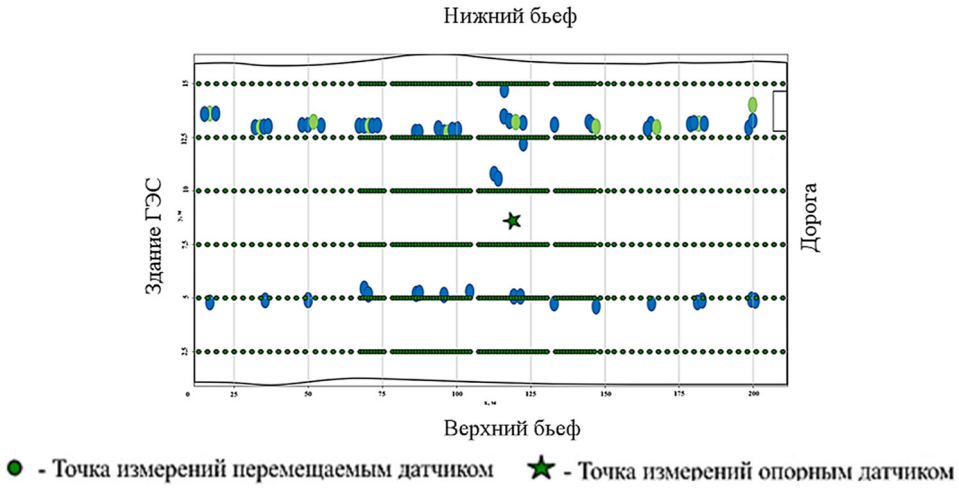


Рис. 2. Схема расстановки опорного и перемещаемых сейсмодатчиков согласно схеме каменно-земляной плотины (вид сверху)

Результаты

Ниже представлена амплитудно-частотная карта колебаний по оси Y с отображением локализованных зон повышенных значений колебаний в нанометрах (рис. 3).

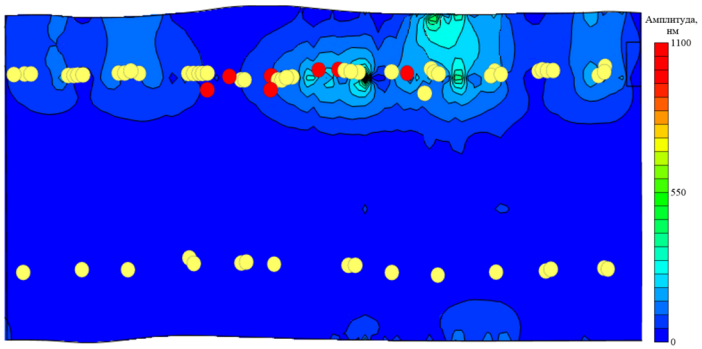


Рис. 3. Локализация зон повышенных значений амплитуд

Данная карта амплитудно-частотных колебаний по оси Y демонстрирует пространственное распределение амплитуд в нанометрах с использованием цветовой шкалы, где красные зоны соответствуют максимальным значениям, а синие – минимальным. На карте также показана схема расположения пьезометров, где красным цветом отмечены пьезометры с аномальными показателями уровня воды, желтым – с нормальными.

Наличие обширной зоны повышенных значений амплитуд, смещенной к нижнему бьефу, свидетельствует о повышенной динамической активности, связанной, вероятно, с разуплотнением грунта или трещинообразованием.

Местами красные метки пьезометров (аномальные уровни воды) совпадают с зонами возникновения повышенного числа резонансных явлений, подтверждая связь фильтрационных процессов с механическими деформациями.

В данном случае коэффициентом Пуассона является отношение скоростей продольных и поперечных волн Vp/Vs приповерхностных грунтов (глубина до 30 м).

Ниже представлены изображения локальных зон обводнённостей, полученных с помощью коэффициента Пуассона (качественная оценка) с использованием метода стоячих волн (рис. 4)

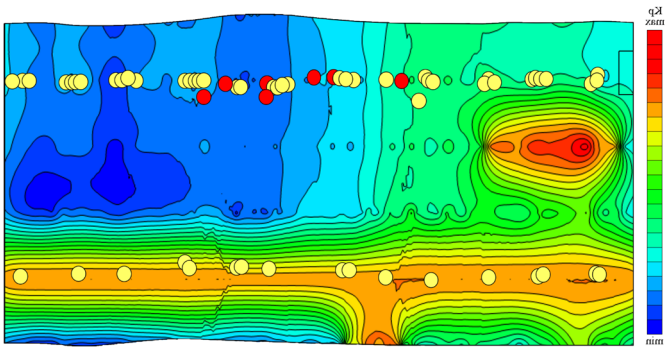


Рис. 4. Локализация зон повышенных значений обводнённостей по коэффициенту Пуассона (качественная оценка)

Поскольку это качественная оценка на цветовой шкале справа красным цветом отображены наиболее обводнённые участки, синим – наименее. Ранее упоминалось, что в теле плотины находится бетонная стена, которую можно вижнть в нижней части карты оранжевым цветом. Однако, наличие одводненного участка в правой части плотины может указывать на деградацию противофильтрационного экрана на данном участке. Наличие сезонных перепадов температур в регионе обследования приводит к накоплению воды и, как следствие, возникновению достаточно обширной области повышенных значений обводнённости.

Карта суммарных колебаний по трём осям со связанным по значениям амплитуд спектром представлена на рис. 5.

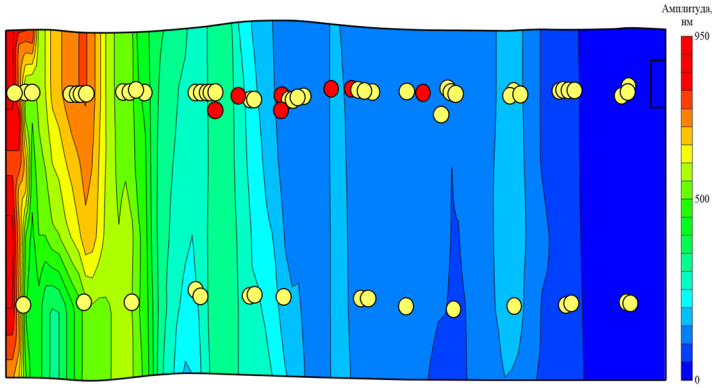


Рис. 5. Локализация зон повышенных значений амплитуд (суммарные колебания по трём осям)

Данное распределение амплитуд является нормальной картиной затухания упругих волн в теле плотины, поэтому в силу присутствия здания ГЭС в левой части рисунка с работающими гидроагрегатами, расположенными в здании и являющимися в том числе источниками колебаний, красная зона смещена в сторону здания ГЭС.

Для того, чтобы оконтурить сваи был применён расчёт диапазона частот (в данном случае составлявший 65 – 90 Гц) (рис. 3.1.6) из заранее известных длин свай согласно проекту (от 60 метров с убыванием ближе к берегу с дорогой) по следующей формуле [17]:

$$\nu = \frac{V_p}{2h} \quad (1)$$

где, ν – частота продольной волны, V_p – скорость распространения продольной волны в исследуемой среде, h – длина сваи.

Оконтуренные сваи со связанным по значениям амплитудным спектром, расположенные внутри насыпной плотины, отображены на рис. 6.

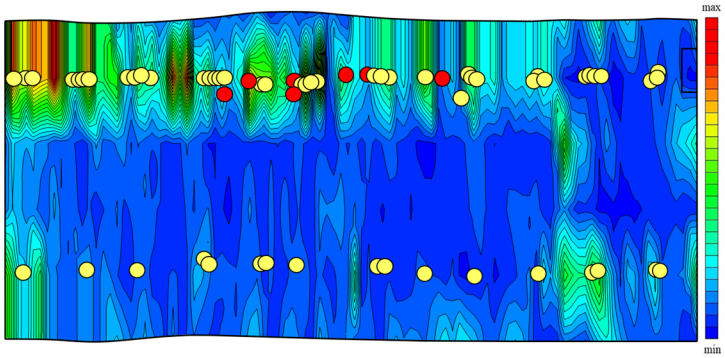


Рис. 6. Локализация зон, соответствующих расположению свай согласно схеме внутри каменно-земляной плотины

Расположение свай со стороны нижнего бьефа подтверждает данная картина распределений. Амплитудный спектр также демонстрирует наличие свай на картине амплитудного распределения.

Наличие включений зелёного цвета в верхней части карты говорит о наличии аномальных зон в данном диапазоне частот, что может указывать на возникновение повышенного числа резонансных явлений на данных участках, связанных с наличием скрытых дефектов.

Выводы

В результате комплексного обследования каменно-земляной плотины в зоне вечной мерзлоты методом пассивного сейсмического мониторинга были выявлены зоны повышенной динамической активности, связанные с разуплотнением грунта, трещинообразованием и резонансными явлениями. Наибольшая ампли-

туда колебаний по оси Y смещена к нижнему бьефу, что коррелирует с аномальными показателями уровня воды

Работа гидроагрегатов создаёт направленные колебания, имеющие наибольшие амплитудные значения вблизи здания ГЭС, а амплитудный спектр демонстрирует логарифмическое затухание волн, характерное для конструкции плотины. Смещение собственных частот ГЭС из-за температурных деформаций может провоцировать непредвиденные резонансы, особенно в зонах скрытых дефектов.

Полученные результаты демонстрируют эффективность пассивных сейсмических методов для мониторинга каменно-земляной плотины в условиях Крайнего Севера. Выявленные риски требуют внедрения систем непрерывного контроля, адаптированных к климатическим и геологическим особенностям региона.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кривощеков, Д. П. ЕДИНЫЙ ЭНЕРГОРЫНОК РОССИИ И БЕЛОРУССИИ В РАМКАХ ИНТЕГРАЦИИ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА. Journal of Monetary Economics and Management. – 2024(2), 84-85.

2. Соловьёва, Ю. В., & Бадалзода, С. (2024). «Зеленая» энергетика как тренд развития в мире и в России: перспективы и возможности. Россия и Азия, (3), 29.

3. Erpicum, S., Crookston, B. M., Bombardelli, F., Bung, D. B., Felder, S., Mulligan, S., ... & Palermo, M. (2021). Hydraulic structures engineering: An evolving science in a changing world. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 8(2), e1505.

4. Murton, J. B. (2021). Permafrost and climate change. In Climate change (pp. 281-326). Elsevier.

5. Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety: technical problems of ageing concrete dams. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 10(6), 241-279.

6. Narita, K. (2000). Design and construction of embankment dams. Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology.

7. Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H. (2008). Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. Journal of Applied Geophysics, 65(3-4), 155-164.

8. Andersen, G. R., Cox, C. W., Chouinard, L. E., & Hover, W. H. (2001). Prioritization of ten embankment dams according to physical deficiencies. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127(4), 335-345.

9. Li, S., Lai, Y., Zhang, M., & Yu, W. (2015). Seasonal differences in seismic responses of embankment on a sloping ground in permafrost regions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 76, 122-135.

10. Quinn, M. C., Wagner, A. M., Engel, C. S., Winters, K. E., Coclin, C. G., & Picucci, J. R. Distributed Fiber Optic Sensing in Cold Regions. In Geo-Congress 2024 (pp. 536-544).

11. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2022). Determination of Cavities Under the Concrete Slab Anchoring the Upper Slopes of the Novosibirsk Hydroelectric Power Station Using Standing Waves. Processes in GeoMedia—Volume IV, 1-8.

12. Бах, А. А., Еманов, А. Ф., & Клёцин, В. И. (2018). Изучение плотины Богучанской ГЭС методом стоячих волн. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 3, 138-144.

13. Еманов, А. Ф., Селезнёв, В. С., Бах, А. А., & Красников, А. (2012, April). Метод стоячих волн в инженерной сейсмологии. In 8th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 2012 (pp. cp-284). European Association of Geoscientists & Engineers.

14. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2021). Mapping of underground cavities by the passive seismic standing waves method: the case study of Barsukovskaya cave (Novosibirsk region, Russia). Geophysical Prospecting, 69(1), 167-179.

15. Fedin, K. V., Kolesnikov, Y. I., & Ngomayezwe, L. (2022). Determination of ice cover thickness using compression standing waves. Cold Regions Science and Technology, 198, 103552.

16. Eponeshnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8-11, 2020): Abstracts. – Amsterdam, 2020. P. 1-5

17. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.

© К. В. Федин, О. К. Марилов, А. Л. Лукьянова, 2025

УДК 620.179
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-162-167

К. В. Федин[1,2,3]✉, А. Л. Лукьянова[1,3], К. Ю. Мелехин[1]

Разработка неразрушающего акустического метода контроля для выявления неоднородных включений в стрелочных переводах

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты проведенной серии экспериментов, направленных на разработку метода неразрушающего контроля для выявления неоднородных включений в стрелочных переводах при их изготовлении. Данные исследования позволяют определять дефектные участки без дополнительного применения таких стандартных методов неразрушающего контроля, как магнитопорошковая дефектоскопия, твердометрия, ультразвуковой контроль, радиографический контроль и др. Результаты проведенных экспериментов показали, что предлагаемый метод позволяет выявлять неоднородные включения, трещины и полости в рельсах, не затрачивая на обследование большое количество времени и имеет преимущество перед классическими методами контроля.

Ключевые слова: железная дорога, контроль, неоднородности

K. V. Fedin[1,2,3]✉, A. L. Lukyanova[1,3], K. Y. Melekhin[1]

Development of a non-destructive acoustic control method for detecting inhomogeneous inclusions in railroad switches

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russian Federation
[3] Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of a series of experiments aimed at developing a non-destructive testing method for detecting heterogeneous inclusions in railroads switches during their manufacture. These studies make it possible to identify defective areas without additional application of such standard methods of non-destructive testing as magnetic particle flaw detection, hardness testing, ultrasonic testing, radiographic control, etc. The results of the experiments have shown that the proposed method makes it possible to identify heterogeneous inclusions, cracks and cavities in rails without spending a lot of time on examination and has an advantage over classical control methods.

Keywords: railway, control, heterogeneities

Введение

Система проведения неразрушающего контроля рельсов и элементов стрелочных переводов включают в себя организационную структуру, непосредственно средства для проведения неразрушающего контроля и персонал, выполняющий работы на основе регламентирующей его документации [1].

На сегодняшний день проведение неразрушающего контроля рельс и стрелочных переводов производится при их изготовлении стандартными методами [2,4] и с помощью вагонов-дефектоскопов и дефектоскопных автомотрис после их монтажа на полотно железной дороги в условиях эксплуатации и с периодичностью, установленной методикой [3,4]. Оба варианта обследований не обходятся без визуального контроля.

При изготовлении контроль проводится выборочно в местах предварительной зачистки, поэтому бывают случаи, когда рельс, визуально не имеющий никаких повреждений и дефектов может расколоться при его монтаже или эксплуатации.

При производстве железнодорожной рельсовой или стрелочной продукции используются высокоуглеродистые стали с добавлением магния и кремния. Такой состав позволяет выдерживать динамические нагрузки от подвижных составов. Тем не менее, во время производства возможно появление дефектов (трещин, полостей) и неоднородных включений в головке изделия, которые по прошествии времени развиваются и могут привести в лучшем случае к излому при монтаже, а в худшем к аварийной ситуации при эксплуатации. Наиболее распространенными являются дефекты в виде поперечных трещин, которые сложно обнаружить [5].

Единственным применяемым способом для обнаружения дефектов на данный момент является ультразвуковая зеркально-теневая дефектоскопия, осуществляющаяся съемными и мобильными дефектоскопами, с помощью которых ежегодно получается обнаружить порядка 10000 остродефектных изделий заводского происхождения [6]. На рисунке 1 показаны примеры заводских дефектов, которые привели к изломам рельсового пути.

Рис. 1. Заводские дефекты, приведшие к изломам рельсов в пути [6]

Одним из способов решения проблемы несвоевременного выявления таких дефектов является обследование рельс и стрелочных переводов по всей длине, однако выполнить такую работу стандартными методами неразрушающего контроля – весьма трудоемкая и времязатратная задача, на решение которой направлено данное исследование.

Методы и материалы

Эксперименты проводились на Новосибирском стрелочном заводе (АО «НСЗ»), изготавливающем продукцию для путей магистрального железнодорожного транспорта, путей промышленных предприятий, метрополитенов и других железнодорожных инфраструктур [7]. Из одной партий случайным образом были выбраны четыре рельса, в которых по результатам обследования не было выявлено дефектных участков.

Обследование проводилось сейсмоакустическим методом, основанным на регистрации шумовых записей колебаний объекта. Источником акустического шума являлся шум от производства.

Для регистрации сейсмоакустических шумов применялись широкополосные датчики (рис. 2), в основе которых лежит пьезокерамический диск с рабочей частотой до 50 кГц. Для обследования всей длины стрелочного перевода измерения проводились с равномерным шагом в 15 см. В качестве регистратора сигналов использовался двухканальный осциллограф.

Похожие эксперименты по выявлению неоднородностей в цельной структуре проводились ранее [8-13].

Рис. 2. Пьезокерамический регистратор и осциллограф

Проведение эксперимента можно разделить на следующие этапы:

1. Проводится регистрация шумов в каждой точке в течении 1 минуты по всей длине стрелки.

2. Полученные шумовые записи разбиваются на блоки и вычисляются их амплитудные спектры. Производится расчет мощности.

3. Для каждого отдельного блока шумовых записей выполняется преобразование Фурье и осреднение полученных спектров путем их суммирования.

4. Последним этапом строится карта распределения мощности сигнала по площади исследуемого объекта.

Для дополнительного уточнения был использован прибор Спектр 4.3, принцип действия которого основан на свойстве акустической волны отражаться от границ раздела сред с различным акустическим импедансом. Примером таких границ может быть металл-воздух или металл-включение). В данном случае волна возбуждалась с помощью небольшого удара.

Результаты

В ходе проведения экспериментов была выявлена стрелка с участком, характеризующимся резким падением суммарного значения амплитуды. Для подтверждения того, что причиной такого падения является именно дефект, были проведены дополнительные замеры прибором Спектр 4.3. Дополнительные замеры проводились в трех местах стрелки: двух предположительно однородных и в найденном предположительно дефектном.

Для каждого из участков были получены амплитудно-частотные спектры. На рис. 3а и 3б показаны спектры цельных участков.

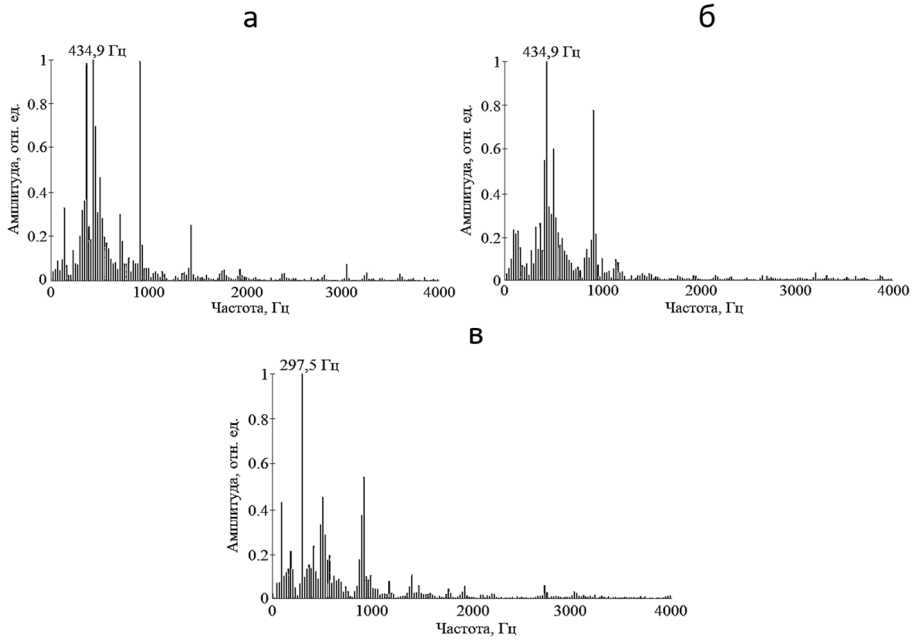


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры для цельных участков стрелки (а, б) и для дефектного участка (в)

Наибольшая амплитуда сигнала в таком случае соответствует 434,9 Гц. При обследовании дефектного участка наибольшая амплитуда сигнала составила 297,5 Гц. Такое смещение частот может указывать на наличие резкой отражающей границы, то есть дефекта.

На рис. 4 показана карта распределения мощности сигнала в месте предполагаемого дефекта.

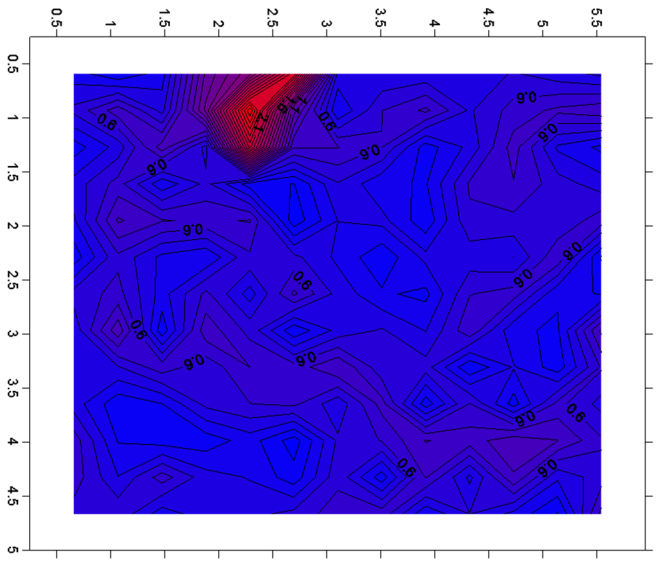


Рис. 4. Карта распределения мощности сигнала в месте дефекта. Красным цветом выделяется дефектная зона, голубым – цельный металл.

Для подтверждения наличия дефекта был произведен распил стрелки (рис. 5), который подтверждает наличие неоднородного включения. В левом верхнем углу видна неоднородность, которую удалось зафиксировать.

Рис. 5. Фото стрелки после распила

Выводы

В результате серии проведенных экспериментов удалось обнаружить дефектный участок стрелочного перевода и подтвердить его наличие с помощью распила. Преимуществом данного метода неразрушающего контроля является следующее:

1. Измерения проводятся по всей длине стрелочного перевода;
2. Не требуется предварительной зачистки металла;
3. Отсутствует необходимость в применении других методов неразрушающего контроля.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Учебное пособие для студентов 3-го курса по ПМ 03. Устройство, надзор и техническое состояние железнодорожного пути и искусственных сооружений. МДК 03.03. Неразрушающий контроль рельс. / В.Ф Петухов; ВТЖТ – филиал ФГБОУ ВО РГУПС. – Волгоград, 2017. – 154с.

2. ГОСТ 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: ГОССТАНДАРТ России, 2019. – 43с.

3. ГОСТ 34524-2019. Рельсы железнодорожные. Неразрушающий контроль в условиях эксплуатации. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11с.

4. ГОСТ 34663-2020. Стыки рельсов и стрелочных переводов сварные. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13с.

5. Гостев Г.А. Проблемы эксплуатации и неразрушающего контроля рельсов с приведенным износом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 1. – № 57. – С. 90-94.

6. Шелухин А.А., Дымкин Г.Я., Рощин Е.В., Этинген И.З. Неразрушающий контроль рельсов при изготовлении / А.А. Шелухин, // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 1. – С. 21-22.

7. Каталог продукции акционерного общества «Новосибирский стрелочный завод» (АО «НСЗ»). – 2021. – 255 с.

8. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустотелых объектов по записям микросейсм: натурный эксперимент // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. 18-22 апреля 2016 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.4. –Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 34-38.

9. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. О глубинности метода обнаружения подземных пустот по микросейсмам // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": сборник материалов в 6 т. Т.4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 296-301.

10. Федин К.В., Колесников Ю.И. Обнаружение пустот под твердым дорожным покрытием по изгибным стоячим волнам // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология":(г. Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.) : сборник материалов в 6 т. Т.4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 281-297.

11. Федин К.В., Каргаполов А.А., Колесников Ю.И. Влияние щелевидных дефектов на поле стоячих волн, формирующихся в закрепленной балке под действием акустических шумов // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. – Т.1. – С. 88-92.

12. Федин К.В., Каргаполов А.А Влияние неоднородностей на поле стоячих волнообразцов простой формы на примере несущей балки // Проблемы недропользования 2012г.: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практическая конференции (7-10 февраля 2012 г.). – Екатеринбург : УрО РАН, 2012. – С. 201-210.

13. Федин К.В., Влияние неоднородностей на поле стоячих волн конструктивных элементов сооружений // Проблемы развития газовой промышленности Сибири: Сборник тез. докл. XVII науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов ТюменНИИгипрогаза. – Тюмень : ООО ТюменНИИгипрогаз, 2012. – С. 217-219.

© К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, К. Ю. Мелехин, 2025

УДК 550.8, 550.344.33, 550.379
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-168-175

К. В. Федин[1,2,3]✉, А. Л. Лукьянова[1,3], А. А. Гриценко[1,2], П. С. Осипова[1]

Определение технического состояния Ново-Афонского монастыря в Абхазии пассивным микросейсмическим методом на основе выделения стоячих волн в комплексе с методом электротомографии

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе исследуется применение пассивного метода стоячих волн для оценки устойчивости строительных конструкций и выявления дефектов конструкций на примере Ново-Афонского монастыря в Абхазии. Этот метод позволяет эффективно локализовать скрытые повреждения в зданиях и на прилегающей территории, а также оценить состояние грунтов на прилегающей территории. Исследования проводились в комплексе с методом электротомографии. Результаты обследования показали, что повышенные амплитуды колебаний в северо-западной части монастыря и в районе разрушенной лестницы связаны с просадкой грунта и обводнением. Анализ данных электротомографии подтвердил наличие аномалий низкого удельного электрического сопротивления, что указывает на повышенное водонасыщение грунтов в этой области. Сопоставление данных сейсмического и геоэлектрического обследования позволило сделать вывод о снижении несущей способности фундамента и ограждающих стен в результате воздействия подземных вод. В результате работы была подтверждена эффективность и необходимость использования пассивного сейсмического метода для мониторинга состояния объектов культурного наследия для своевременного выявления потенциальных угроз и увеличения срока эксплуатации сооружений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, стоячие волны, электротомография

K. V. Fedin[1,2,3]✉, A. L. Lukyanova[1,3], A. A. Gritsenko[1,2], P. S. Osipova[1]

New Athos Monastery (Abkhazia) technical condition assessment using passive microseismic method based of standing waves extraction with combination of electrical resistivity tomography method

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russian Federation
[3] Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Abstract. This study investigates the passive standing wave method for assessing the stability of building structures and identifying structural defects, using the New Athos Monastery in Abkhazia as a case study. This method effectively locates hidden damage in the buildings and evaluates soil

conditions in the surrounding area. The research was conducted alongside electrical resistivity tomography. The survey results revealed that increased vibration amplitudes in the northwestern part of the monastery and near the destroyed staircase are linked to soil subsidence and water saturation. An analysis of electrical resistivity tomography data confirmed the presence of low-resistivity anomalies, indicating that groundwater saturation in the soil is heightened in this zone. A comparison of seismic and geoelectric survey data led to the conclusion that the bearing capacity of the foundation and retaining walls has diminished due to the influence of groundwater. The study confirmed the effectiveness and necessity of utilising passive seismic methods to monitor the condition of cultural heritage sites. This approach allows for the prompt identification of potential threats and extends the service life of structures.

Keywords: non-destructive testing, standing waves, electrical resistivity tomography

Введение

Объекты культурного и исторического значения требуют обследования их технического состояния и оценки возможности дальнейшей эксплуатации [1]. Время и природные факторы являются основными причинами разрушения каменных и кирпичных конструкций. Для своевременного выявления потенциальных структурных повреждений и оценки безопасности эксплуатации требуется проведение периодического обследования состояния конструкций [2,3,4]. На сегодняшний день используются различные методы для мониторинга состояния зданий. Важным ограничением при выборе метода диагностики является возможность проведения обследования во время эксплуатации объекта.

Наиболее популярными неразрушающими методами при обследовании зданий и сооружений являются лазерное сканирование [5] и фотограмметрия, которые позволяют получить геометрическую информацию об объекте исследования. Эти методы часто используются в комплексе, поскольку фотограмметрия применяется для обследования внешних поверхностей конструкции и прилегающей территории, а лазерное сканирование позволяет качественно обследовать здание изнутри. Фотограмметрия часто используется в сочетании с тепловым методом. Тепловизоры позволяют оценить температуру поверхности объекта, поэтому они являются полезным инструментом для обнаружения скрытых трещин в зданиях [6,7].

Для определения устойчивости конструкций на сегодняшний день существует три основных безопасных метода: дистанционное зондирование, мониторинг верхнего слоя земной поверхности и мониторинг объектов с использованием стоячих волн [8,9,10,11].

В инженерной сейсмологии широкое распространение получили стоячие волны. По динамическим параметрам волн возможна локализация неоднородностей и оценка состояния инженерных объектов (плотины, здания, мосты, пустоты и т.д.). Для определения этих параметров используются различные методы, например, возбуждение стоячих волн (собственных колебаний) в зданиях искусственно, с помощью ударов кувалдой [12,13] вынужденных колебаний [14,15] или быстрого снятия нагрузки [16].

Целью данной работы является апробация применения пассивного метода стоячих волн для оценки устойчивости здания и определения местоположения дефектов конструкций на примере обследовании Ново-Афонского монастыря и прилегающей территории.

Ранее предложенный метод использовался только для оценки технического состояния мостов [17], поиска дефектов в асфальтовом покрытии дороги [18], мониторинга работы гидроагрегатов на гидроэлектростанции [19], а также для изучения устойчивости надземного трубопровода, закреплённого на опорах [20].

В качестве дополнительного метода обследования прилегающей территории использован метод электротомографии (ЭТ), основанный на разичии горных пород по их удельному электрическому сопротивлению (УЭС) [21].

Объект исследования

Исследования проводились на территории Ново-Афонского монастыря у подножия горы Афон в Абхазии. Монастырь был основан в 1875 г., строительство продолжалось вплоть до 1900 г. В советское время здание использовалось как туристическая база, а с 1924 по 1994 год было заброшено. Во время длительного простоя подземные помещения были полностью затоплены, а в некоторых частях просел грунт. В 1990-х годах монастырь был восстановлен, с 2000 г. по 2010 г. проведена реставрация.

Здания монастыря построены из кирпича и камня. Расположение комплекса на горном склоне увеличивает риск оползней.

Методы и материалы

Пассивный сейсмический метод на основе выделения стоячих волн позволяет локализовать скрытые дефекты, проанализировать остаточный ресурс конструкции и оценить влажность грунта на прилегающей территории. Суть метода заключается в накоплении большого количества амплитудных спектров записей шума, в результате чего на усреднённых (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов.

Измерения на объекте проводились с использованием сейсмических регистраторов сигналов «Байкал-1» и трёхкомпонентных сейсмических приёмников «GS-ONE LF» (рис. 1а). При проведении съёмки вдоль профиля использовались несколько подвижных и один неподвижный (опорный) регистраторы. Для нормализации уровня шума подвижных датчиков использовались данные от опорного регистратора. Запись осуществлялась путём накопления сигнала – продолжительность непрерывной записи на каждой точке наблюдения составляла 5 минут. Частота измерений составила 500 Гц.

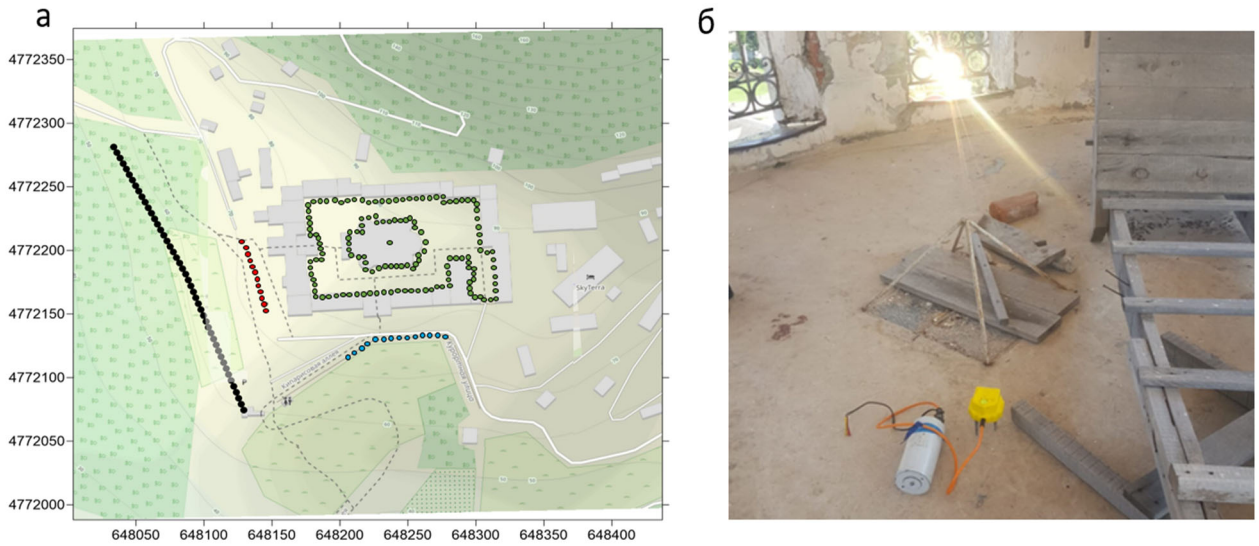


Рис. 1. Схема расположения датчиков сейсмического метода (зеленые точки – по внутреннему периметру монастыря, красные и синие – вдоль ограждающих стен) и профиля электротомографии (черные точки) (а) и цифровой регистратор Байкал-1 и трёхкомпонентный сейсмоприёмник GS-ONE LF на исследуемом объекте (б).

Измерения проводились вдоль замкнутого периметра вокруг храмового комплекса и части прилегающей территории с целью обнаружения просадок и обводнения грунта. На рисунке 1б показана схема установки датчиков на территории монастыря.

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм следующий:

1. Регистрация записей шума на исследуемом объекте для выделения стоячих волн с использованием геофонов;

2. Нормализация уровня шума подвижных датчиков до опорного уровня для каждого измерения;

3. Разделение записей шума на блоки по 120 секунд;

4. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путём их суммирования;

5. Выделение амплитуды собственных колебаний из амплитудных спектров;

6. Построение карт распределения амплитудно-частотных характеристик на исследуемой площади или профиле.

Интерпретация полученных данных основана на анализе карт распределения амплитудно-частотных характеристик, построенных методом триангуляции с линейной интерполяцией и обобщённого спектра.

Метод электротомографии объединяет в себе методики зондирования и профилирования. Особенностями этой модификации являются многоканальные из-

мерения с помощью системы электродов, размещённых вдоль одного профиля на равных расстояниях друг от друга, а также двумерный или трёхмерный математический аппарат инверсии данных.

При исследованиях на территории монастыря профиль электротомографии располагался на склоне ниже здания монастыря, под западной ограждающей стеной (рис. 2).

Измерения проводились с помощью многоканальной электроразведочной станции «Скала-48К12». Последовательность подключения электродов соответствовала установке «Венера-Шлюмберже». Расстояние между электродами составило 5 м, длина профиля – 235 м, глубинность исследований – до 30 м.

Первичная обработка данных ЭТ проводилась в программе Xeris (КБ «Электрометрии»), двумерная обратная задача решена в программе Res2DInv (автор Loke M.H.).

Результаты

По результатам обследования методом выделения стоячих волн периметра здания монастыря и ограждающих стен были построены карты распределения амплитуд собственных колебаний низшей моды (рис. 3). Повышенные значения амплитуд определены в западной и восточной части карты. Наиболее высокие значения маркированы в северо-западном углу карты. На местности в северо-западном углу монастыря обнаружена просадка грунта, а в восточной части – обводнение в подвальном помещении.

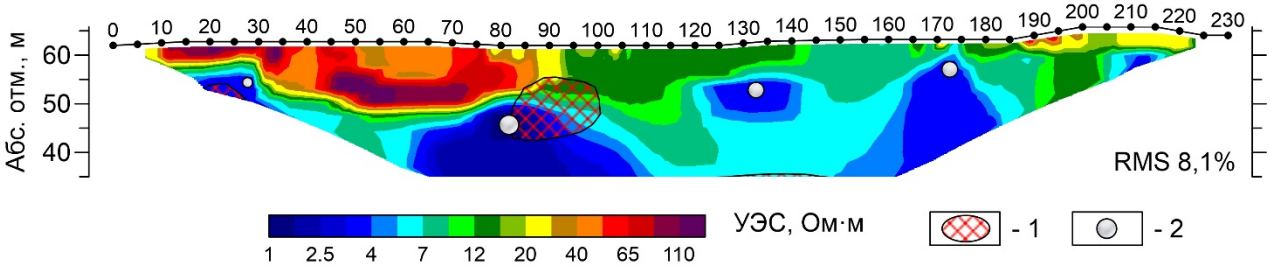
По данным измерений вдоль западной ограждающей стены максимальные амплитуды установлены вблизи разрушенной лестницы.

По результатам векторно-поляризационного анализа сейсмических сигналов установлено, что доминирующее направление смещения грунта – юго-запад.

Рис. 3. Карты распределения амплитуды колебаний низшей моды на территории монастыря.

На геоэлектрическом разрезе (рис. 4), полученном по результатам 2-D инверсии данных ЭТ, УЭС варьируется от 0,7 до 300 Ом·м. На большей части разреза сопротивление не превышает 20 Ом·м, что, вероятно, связано с высокой водонасыщенностью грунтов. Аномалии низкого УЭС менее 4 Ом·м выделяются в интервалах 20-30 м, 125-135 м и 165-175 м на глубине 8 м и в интервале 75-85 м на глубине 15 м. В зонах низкого УЭС наблюдаются и аномалии повышенной заряжаемости (*m*) более 50 мВ/В в интервалах 15-25 м и 80-100 м. Положение низкоомных аномалий на одной глубине и сопровождение их аномалиями повышенной заряжаемости позволяет сделать вывод, что аномалии связаны с металлическими объектами – трубами. Отсутствие аномалий *m* в интервалах 125-135 м и 165-175 м может объясняться сильной коррозией труб. Расширение низкоомных аномалий вдоль профиля и на глубину связано как с неоднозначностью 2-D инверсии на трёхмерном объекте, так и с тем, что, вероятно, вдоль труб происходит фильтрация подземных вод вниз по склону.

Аномалия высокого УЭС (40-200 Ом·м) на пикетах 40-80 м на глубине 10 м интерпретируется как погребённый разрушенный фундамент лестницы или стены.



1 – зоны аномалий заряжаемости более 50 мВ/В, 2 – предполагаемое положение металлической трубы

Рис. 4. Геоэлектрический разрез вдоль западной ограждающей стенки монастыря

Сопоставление геоэлектрического разреза и карты амплитуды колебаний вдоль западной стены установлено, что выявленная область высоких амплитуд соотносится с аномалией низкого УЭС в интервале 75-85 м профиля ЭТ.

На основе результатов сейсмического и электрометрического обследования здания монастыря и окрестной территории сделан вывод, что просадки грунта на территории монастыря и повреждения конструкций связаны с обводненностью грунтов.

Заключение

В данной работе представлены результаты апробации пассивного сейсмического метода стоячих волн для обследований конструкций здания Ново-Афонского монастыря и прилегающей территории. По результатам обследования вдоль контура зданий монастыря выявлена зона повышенных амплитуд собственных колебаний в северо-западном углу, связанная с обводнением грунта и

его последующей просадкой. Обследование западной ограждающей стены показало, что наиболее деформированная область расположена ближе к северному углу. Комплексирование результатов с данными ЭТ показало, что зоне аномалий повышенных колебаний соответствует область низкого УЭС. Это подтверждает предположение об обводненности грунтов.

В результате исследований подтверждена эффективность использования пассивного метода стоячих волн для выявления потери устойчивости здания и определения местоположения дефектов конструкции. Водонасыщенный грунт и фундамент приводят к снижению их несущей способности, что, в свою очередь, может приводить к трещинам и разрушениям в фундаменте и стенах. Проведение регулярного обследования объектов культурного и исторического значения неразрушающим методом стоячих волн и реагирование на обнаруженные аномалии позволит сохранить их первозданный вид и увеличить срок службы эксплуатации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zilbirova, I. Yu., Novoselova, I. V., Al-Fatla, T. N. M. (2021). Organizational and technological approaches to the construction and technical expertise of cultural heritage sites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1083(1), 012058.
2. Entezami, A., Shariatmadar, H., Mariani, S. (2020). Early damage assessment in large-scale structures by innovative statistical pattern recognition methods based on time series modeling and novelty detection. Advances in Engineering Software, 150, 102923.
3. Entezami, H. Shariatmadar, B. Behkamal. A novel double-hybrid learning method for modal frequency-based damage assessment of bridge structures under different environmental variation patterns. Mech. Syst. Signal Process., 201 (2023), Article 110676
4. Deng, Y., Zhao, Y., Ju, H., Yi, T.-H., Li, A. (2024). Abnormal data detection for structural health monitoring: State-of-the-art review. Developments in the Built Environment, 17, 100337.
5. Casula, G., Fais, S., Ligas, P. (2009). An experimental application of a 3D terrestrial laser scanner and acoustic techniques in assessing the quality of the stones used in monumental structures. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 4(1), 45-56.
6. Pappalardo, G., Mineo, S., Caliò, D., Bognandi, A. (2022). Evaluation of Natural Stone Weathering in Heritage Building by Infrared Thermography. Heritage, 5(3), 2594-2614.
7. Adamopoulos, E., Colombero, C., Comina, C., Rinaudo, F., Volinia, M., Girotto, M., Ardissono, L. (2021). Integrating multiband photogrammetry, scanning, and gpr for built heritage surveys: the façades of castello del valentino. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VIII-M-1-2021, 1-8.
8. Liang, Z., Xue, R., Xu, N., Li, W. (2020). Characterizing rockbursts and analysis on frequency-spectrum evolutionary law of rockburst precursor based on microseismic monitoring. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103564.
9. Kumar, V., Jha, P., Singh, N.P., Cherukuri, S. (2021). Dynamic Stability Evaluation of Underground Powerhouse Cavern Using Microseismic Monitoring. Geotechnical and Geological Engineering, 39, 1795-1815.

10. Ma, K., Wang, S., Yuan, F., Peng, Y., Jia, S. (2020). Study on Mechanism of Influence of Mining Speed on Roof Movement Based on Microseismic Monitoring. Advances in Civil Engineering, 2020.

11. Uniyal, A., Shah, P.N., Rao, S.S. (2018). Sectoral Migration of Ganga River and Its Implication on the Stability of Phaphamau Bridge Near Allahabad, U.P., India. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 46, 1125-1134.

12. Cheng, M.H., Kohler, M.D., Heaton, T.H. (2006). Prediction of Wave Propagation in Buildings Using Data from a Single Seismometer. Bulletin of the Seismological Society of America, 105, 107-119.

13. Park, S.A., Choi, J.S., Min, K.W. (2011). Dynamic characteristics for traditional wooden structure in Korea by using impact hammer test. Procedia Engineering, 14, 477-484.

14. Clinton, J.F., Bradford, S.C., Heaton, T.H., Favela, J. (2006). The observed wander of the natural frequencies in a structure. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(1), 237-257.

15. Zwolski, J., Bien, J. (2011). Modal analysis of bridge structures by means of forced vibration tests. Journal of Civil Engineering and Management, 17(4), 590-599.

16. Robson, B.N., Harik, I.E. (1998). Pullback testing of seismically isolated P/C I-girder bridge. Journal of Structural Engineering, 124, 930-937.

17. Fedin, K.V., Olenchenko, V.V., Osipova, P.S., Pechenegov, D.A., Kolesnikov, Yu.I., Ngomayezwe, L. (2023). Assessment of the technical condition of bridges and their ground foundations using the electrical resistivity tomography and the passive seismic standing wave method. Journal of Applied Geophysics, 217, 105188.

18. Ngomayezwe, L., Kolesnikov, Y.I., Fedin, K.V. (2022). Diagnostics of asphalt pavement using elastic standing waves. Near Surface Geophysics, 20(1), 82-93.

19. Gromyko, P.V., Fedin, K.V., Seleznev, V.S., Kolesnikov, Yu.I., Ngomayezwe, L. (2023). Monitoring of the hydraulic units operation of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant using remote seismic observations. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 52, 335-349.

20. Kolesnikov, Yu.I., Fedin, K.V., Ngomaizve, L. (2019). Experimental substantiation of using acoustic noise in above-ground pipeline diagnostics. Journal of Mining Science, 55(2), 219-228.

21. Бобачев, А. А., Горбунов, А. А., Модин, И. Н., Шевнин, В. А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. Приборы и системы разведочной геофизики – 2006. – Т. 2. – С. 14-17.

© К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, А. А. Гриценко, П. С. Осипова, 2025

УДК 543.05:550.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-176-181

В. В. Федотов[1]✉, М. Н. Балдин[1], В. М. Грузнов[1]

Ввод пробы алканов с объемного сорбента в газовый хроматограф для геохимической съемки

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

Аннотация. Одним из видов геохимической съемки при оконтуривании месторождения нефти и газа является газовая съемка по легким предельным углеводородам (алканам). Из-за малых значений концентрации алканов в приповерхностном слое земной поверхности приходится применять различные способы обогащения/концентрирования. В настоящей работе развивается метод концентрирования углеводородов С1-С5 на угольных сорбентах, позволяющих эффективно концентрировать эти вещества. Испарение и ввод на анализ углеводородов с очень широким диапазоном температур кипения является не простой задачей. Данная работа посвящена разработке ввода проб легких углеводородов в хроматографическую колонку для использования в полевом хроматографе при проведении газовой съемки. Приведены полученные результаты.

Ключевые слова: газовая хроматография, ввод пробы, термодесорбция, алканы

V. V. Fedotov[1]✉, M. N. Baldin[1], V. M. Gruznov[1]

The introduction of an alkane sample from a volumetric sorbent into a gas chromatograph for geochemical survey

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

Abstract. One of the types of geochemical survey in the delineation of oil and gas fields is gas survey for light saturated hydrocarbons (alkanes). Due to the low concentration of alkanes in the near-surface layer of the earth's surface, it is necessary to use various enrichment/concentration methods. In this paper, we develop a method for concentrating C1-C5 hydrocarbons on carbon sorbents, which allows for the effective concentration of these substances. Evaporation and analysis of hydrocarbons with a very wide range of boiling points is not an easy task. This work is devoted to the development of introducing of light hydrocarbon samples into a chromatographic column for use in a field chromatograph during gas survey. The obtained results are presented.

Keywords: gas chromatography, sample injection, thermal desorption, alkanes

Введение

Геохимические методы поисков месторождений нефти и газа, в частности, газовая съемка, возникли около ста лет назад, но широкое применение получили только в последние десятилетия 20-го века [1]. Такие их свойства, как отсутствие бурения, относительная малозатратность и малое время проведения делают их весьма привлекательными для проведения поисковых работ и в наши дни [2,3].

В ИНГГ СО РАН развиваются разные направления газовой съемки [4-8]. Это и работы по газам, растворенным в морской воде, и снежная съемка по легким углеводородам, и приповерхностная съемка по аренам.

Данная работа, проводимая в Лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий (574) ИНГГ СО РАН, является развитием газовой съемки для поиска месторождений нефти и газа [7,8], расширяя класс анализируемых веществ на легкие алканы.

Целью работы является создание схемы универсального устройства ввода проб в газохроматографическую колонку с вводом пробы с объемного концентратора, с заранее заданным алгоритмом, с возможностью быстрой смены инжекторов в портативном хроматографе: концентрационного, шприцевого, автодозирующего.

Для реализации этого предложены концентраторы с сорбентом из угольного нетканого материала АНМ, конфигурация которого не препятствует доступу сорбируемых молекул к нетканому материалу, что позволит использовать их в режиме пассивного концентрирования.

Экспериментальная часть

Для углеводородов С1-С5 характерна резко различающаяся летучесть. Для полной термодесорбции их с сорбента необходим длительный нагрев концентратора. Для исключения потерь легколетучих углеводородов типа метан, этан необходимо осуществлять термодесорбцию в замкнутом объеме. Первоначально была создана и реализована схема ввода пробы, обеспечивающая термическую десорбцию пробы с объемного сорбента в полностью герметичном объеме. Схема показана на рис. 1.

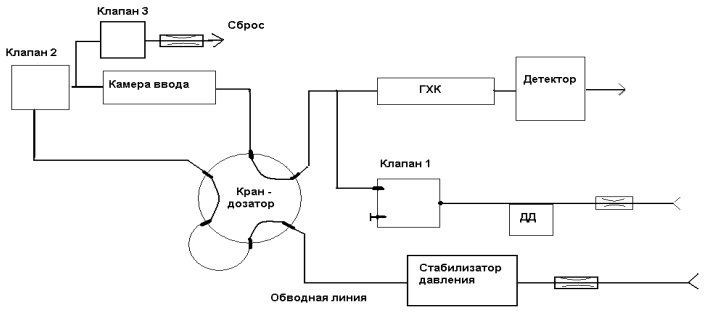


Рис. 1. Газовая схема вода пробы с краном-дозатором и обводной линией газа-носителя. ГХК – мегаборная хроматографическая колонка; детектор – пламенно-ионизационный; клапаны 1-3 электромагнитные; ДД – датчик давления.

Для герметизации объема, в котором осуществляется десорбция пробы между устройством ввода и газохроматографической колонкой, в схеме установлен прогреваемый шестиходовой кран-дозатор. Перед внесением концентратора

в устройство ввода кран-дозатор переключался таким образом, чтобы устройство ввода полностью отсекалось от аналитического тракта.

Для более быстрого и стабильного ввода пробы после десорбции линия подачи газа-носителя выполнена следующим образом: к запирающему электромагнитному клапану была подведена обводная линия газа-носителя с независимым стабилизатором давления и ограничителем потока. Введение обводной линии дало возможность независимо устанавливать давление газа-носителя в момент ввода пробы. Это позволило компенсировать увеличение сопротивления газовых линий из-за вставленного крана-дозатора. Давление в этой линии устанавливалось таким образом, чтобы стабилизировать поток газа-носителя через испарительную камеру устройства ввода в газохроматографическую колонку в момент ввода пробы при переключении электромагнитных клапанов в режим «ввод» и минимизировать изменение фонового тока детектора.

Результаты

Предложенная схема реализована в макете ГХ и достигнута удовлетворительная работоспособность. Пример анализа смеси легких углеводородов с концентрациями по 0,125 ppm приведен на рис. 2. Отбор пробы из виалы объемом 40 мл на концентратор производился в течение 12 ч при комнатной температуре. Параметры проведения анализа: температура десорбции – 270 °С, время десорбции – 1 мин, длительность ввода – 4 сек, расход газа-носителя гелия через хроматографическую колонку – 12 мл/мин [9].

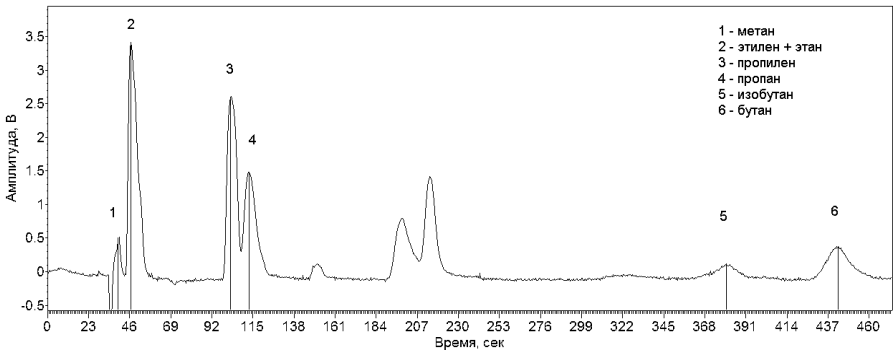


Рис. 2. Хроматограмма тестовой смеси с концентрацией УВ по 0,125 ppm, отобранной концентратором из виалы объемом 40 мл. Колонка Restek MXT-Q-PLOT (30 м*0,53 мм*20 мкм), температура колонки 80 °С, расход через ГХК - 12 мл/мин

Для десорбции пробы в изолированном объеме в режиме, с заранее заданным алгоритмом, схема вода пробы с краном-дозатором (рис. 1) была модернизирована. В схему ввода пробы введены электромагнитные клапаны, обеспечивающие десорбцию в изолированном объеме, что исключает потери анализируемых веществ при десорбции с концентраторов большой сорбционной емкости и увеличить время десорбции при наличии в пробе веществ с сильно различаю-

щейся летучестью, как в случае алканов С1-С5. Предложенная схема показана на рис. 3. На газохроматографическое устройство ввода проб с предложенной схемой без крана-дозатора с вводом пробы с концентратора, с заранее заданным алгоритмом управления электромагнитными клапанами, получен патент на полезную модель [10].

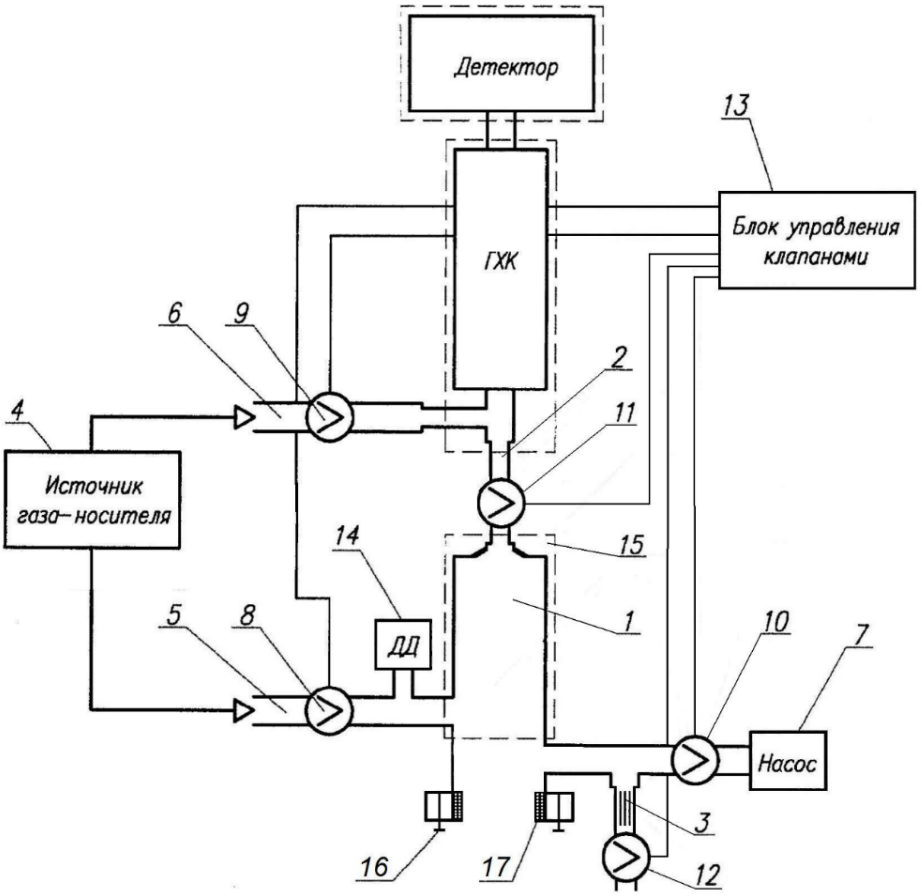


Рис. 3. Принципиальная схема устройства ввода пробы с концентратора, с заранее заданным алгоритмом управления электромагнитными клапанами, и с универсальным устройством ввода проб с возможностью смены инжекторов: концентрационного, шприцевого и автодозирующего.

Устройство ввода проб (рис. 3) содержит: 1 – универсальную камеру ввода; 2 – линию ввода пробы; 3 – ограничитель потока; 4 – источник газа-носителя; 5 и 6 – линии газа-носителя; 7 – насос; 8-12 – электромагнитные клапаны; 13 – блок управления клапанами; 14 – датчик давления; 15 – термостат; 16 – универсальный узел крепления взаимозаменяемых инжекторов; 17 –уплотнительный элемент.

Функциональная схема работы устройства ввода проб с концентратора показана на рис.4.

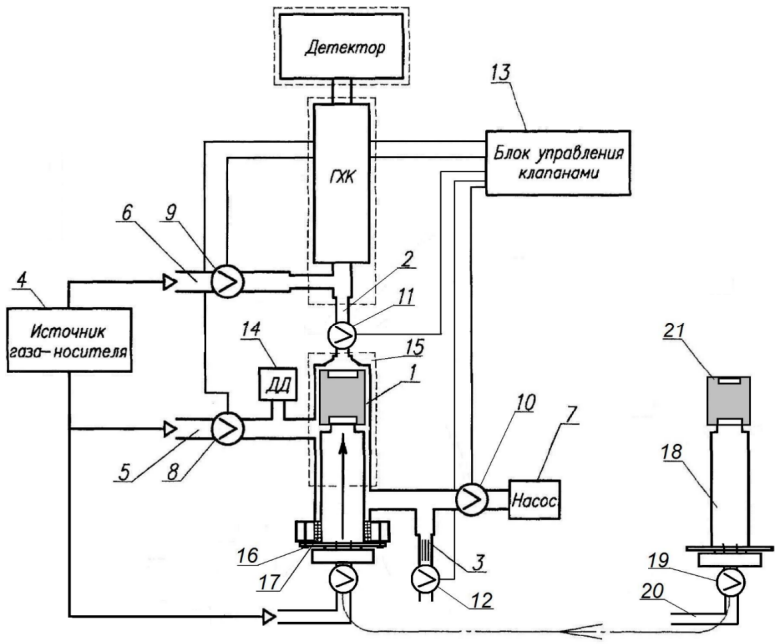


Рис. 4. Функциональная схема устройства ввода проб с концентрационным инжектором для ввода проб с концентратора

Для съема пробы с концентратора, концентратор 21 с отобранной пробой устанавливается на шток 18 концентрационного инжектора, причем со стороны штока остается доступ газа к концентратору. Шток 18 вместе с концентратором 21 вводится в горячую камеру 1 устройства ввода проб, герметизируется с помощью уплотнительного элемента 17 и фиксируется на универсальном узле крепления 16. После того как шток 18 с концентратором 21 установлен в камеру ввода 1, по изменению давления в камере ввода 1 и, как следствие, изменению сигнала датчика давления 14 запускается цикл ввода пробы с концентратора в анализатор. В начале цикла ввода пробы происходит нагрев концентратора 21 и десорбция анализируемой пробы в камеру ввода 1. Во время нагрева концентратора клапан 9 открыт, а клапаны 8, 10, 11, 12 и 19 закрыты, таким образом, камера ввода пробы 1 с концентратором 21 герметизируется, что обеспечивает сохранность и представительность пробы с концентратора 21, десорбирующейся в камере ввода 1. Одновременно газ-носитель через линию газа-носителя 6 и клапан 9 поступает в анализатор, проходит через ГХК и детектор, обеспечивая их нормальное функционирование во время нагрева пробы, при этом через загерметизированную клапанами камеру ввода пробы 1 с концентратором 21 поток газа-носителя отсутствует. По истечению времени десорбции (время задается блоком управления 13) закрывается клапан 9, а клапаны 11 и 19 открываются, и десорбированная проба в виде узкой «пробки» из камеры 1 через клапан 11 и линию ввода пробы 2 потоком газа-носителя из линии газа-носителя 20 продавливается (поступает) в анализатор. После окончания ввода десорбированной пробы из камеры ввода 1 в ГХК анализатора (время задается блоком управления 13), клапан 19 закрывается, клапаны 9 и 12 открываются, газ носитель из линии газа-носителя 6 проходит через клапан 9 и разделяется на два потока. Один больший поток

газа-носителя поступает в ГХК и детектор, обеспечивая разделение анализируемой пробы на ГХК анализатора и детектирование, а другой меньший поток проходит через клапан 11, камеру ввода 1 с концентратором 21, ограничитель потока 3, клапан 12 и сбрасывается в атмосферу, производя таким образом очистку камеры ввода 1 и концентратора 21. После окончания анализа шток 18 с концентратором 21 извлекается из камеры ввода 1.

Заключение

Показана работоспособность пассивных концентраторов на основе угольного нетканого материала АНМ. Получено обогащение пробы на уровне 10-20 для алканов С2-С4. Ведется проработка методики для проведения полевых анализов. Планируется полевое испытание концентраторов.

Благодарности

Работа выполнена в рамка Программы фундаментальных научных исследований Российской Федерации, проект FWZZ-2022-0027 (ИНГГ СО РАН) «Новые технологии внелабораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов», руководитель к.т.н. А.Л. Макась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В. А. Методы исследования природных газов. – М.; Ленинград: ОНТИ НКТП СССР Нефтяное издательство, 1932. – 256 с.

2. Sechman H. Detailed analysis of gaseous components in soil gases around petroleum wells - An effective tool for evaluation of their integrity // Applied Geochemistry. – 2022. – V. 142. – P. 105346.

3. Хисамов Р. С., Войтович С. Е., Чернышова М. Г. и др. Способ поиска залежи углеводородов на основе принципа пассивной адсорбции / Патент RU 2499285. Дата подачи заявки: 31.10.2012, опубликовано: 20.11.2013 Бюл. № 32.

4. Вышемирский В. С., Доильницын Е. Ф., Красавчиков В. О., Шугуров В. Ф. Прямые геохимические поиски нефти и газа на шельфе Черного моря. – Новосибирск: Наука, 1991. – 92 с.

5. Конторович А. Э., Фомин А. Н., Сенников Н. В., Зайцев А. И., Зубова Е. А. и др. Прямые поиски залежей углеводородов на территории степного Алтая методом газогеохимической съемки по снегу // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2007. – Новосибирск : СГГА, 2007. – Т. 5. – С. 60-65.

6. Тимшанов Р. И., Белоносов А. Ю., Шешуков С. А. Применение геохимической съемки на разных стадиях геолого-разведочных работ // Геология нефти и газа. – 2018. – № 3. – С. 103-109.

7. Карташов Е. В., Балдин М. Н., Грузнов В. М. Особенности применения пассивных концентраторов для геохимической съемки при поиске залежей нефти и газа // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012. – Новосибирск: СГГА, 2012. – Т. 1 – С. 177-182.

8. Балдин М.Н., Белоносов А.Ю., Прямов М.В., Грузнов В.М. Опыт геохимической съемки с пассивными концентраторами на сильно обводненной территории Тевризского газоконденсатного месторождения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – Т. 5. – № 2. – С. 113-116.

9. Федотов В. В., Балдин М. Н., Грузнов В. М. Универсальный газохроматографический ввод органических веществ для исследования объектов окружающей среды // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 5 (57). – С. 144-148.

10. Федотов В. В., Балдин М. Н., Грузнов В. М. Газохроматографическое устройство ввода проб / Патент на полезную модель № 217236 RU. Приоритет от 22.09.2022 г. Дата государственной регистрации 23.03.2023 г. Опубликовано: 23.03.2023. Бюл. № 9.

© В. В. Федотов, М. Н. Балдин, В. М. Грузнов, 2025

УДК 551.510.72(282.251.2)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-182-186

А. В. Чугуевский[1]✉, М. С. Мельгунов[1], М. Ю. Кропачева[1], И. В. Макарова[1]

Вклад «горячих» частиц во вторичную миграцию ^{137}Cs в аллювиальных отложениях реки Енисей

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

Аннотация. В течение длительного времени Красноярский горно-химический комбинат (ГХК) был источником радиоактивного загрязнения поймы реки Енисей целым рядом долгоживущих техногенных радионуклидов (ТРН), в том числе гамма-излучающими изотопами ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{155}Eu, ^{137}Cs и ^{60}Co. После вывода из эксплуатации прямоточных реакторов сброс радиоактивных отходов непосредственно с предприятия сократился на несколько порядков. Теперь основными источниками загрязнения экосистемы реки Енисей являются отстойники, расположенные на территории комбината, и аллювиальные отложения поймы (особенно в ближней зоне влияния ГХК), в которых уже накоплены значительные количества ТРН. Радионуклиды в аллювиальных отложениях представлены в двух формах нахождения – рассеянной и концентрированной форме в виде «горячих» частиц (ГЧ). В данной работе проведена оценка потенциальной возможности растворения ГЧ различной природы и вовлечения во вторичную миграцию изотопа ^{137}Cs, входящего в их состав. Показано, что от 10 до 48% ^{137}Cs представлено в потенциально мигрирующих формах. В то время как изотопы ^{154}Eu, ^{155}Eu, ^{60}Co имеют сравнительно небольшой период полураспада (τ) (5,2 – 8,6 лет), и их активность достаточно быстро снижается вследствие радиоактивного распада. Для ^{137}Cs эта величина составляет 30 лет, и воздействие на окружающую среду он будет оказывать в течении гораздо более длительного периода времени.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, «горячие» частицы, вторичное перераспределение

A. V. Chuguevsky[1]✉, M. S. Melgunov[1], M. Yu. Kropacheva, I. V. Makarova[1]

Contribution of «hot» particles to secondary migration of ^{137}Cs in alluvial sediments of the Enisey River

[1] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: chuguevsky@igm.nsc.ru

Abstract. For a long time, the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine (MCC) was a source of radioactive contamination of the Yenisei River floodplain with a number of long-lived artificial radionuclides, including gamma-emitting isotopes ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{155}Eu, ^{137}Cs and ^{60}Co. After the once-through reactors were decommissioned, the discharge of radioactive waste directly from the plant was reduced by several orders of magnitude. Now the main sources of pollution of the Yenisei River ecosystem are settling tanks located on the territory of the plant and alluvial deposits of the floodplain (especially in the near zone of influence of the MCC), which have already accumulated significant amounts of artificial isotopes. Radionuclides in alluvial deposits are present in two forms of presence - dispersed and concentrated in the form of "hot" particles (HP). In this work, the potential possibility of dissolution of GP of various nature and involvement in secondary migration of the isotope ^{137}Cs included in their composition is assessed. It is shown that from 10 to 48% of ^{137}Cs is presented in

potentially migrating forms. While the isotopes ^{154}Eu, ^{155}Eu, ^{60}Co have a relatively short half-life (τ) (5.2 – 8.6 years), and their activity decreases quite quickly due to radioactive decay. For ^{137}Cs this value is 30 years, and it will have an impact on the environment over a much longer period of time.

Keywords: artificial radionuclides, «hot» particles, secondary redistribution

Введение

Наряду с рассеянной формой, значительная часть ТРН, поступивших в аллювиальные отложения поймы реки Енисей в ходе деятельности Красноярского ГХК, связаны с «горячими» частицами. К «горячим» частицам относят «… частицы, имеющие микрометровые и субмикрометровые размеры, обладающие на несколько порядков большей активностью, чем средняя активность почвы тех же размеров» [9]. По определению МАГАТЭ [10] радиоактивные частицы в окружающей среде определяются как локализованные агрегаты радиоактивных атомов, которые дают повышение неоднородности распределения радионуклидов, существенно отличную от таковой в фоновой матрице. Важнейшим свойством, во многом определяющим радиоэкологическую опасность «горячих» частиц, помимо высокой удельной активности входящих в ее состав радионуклидов, является потенциальная возможность выноса их при выветривании или растворении за пределы области локализации частицы в окружающую среду [10, 11]. Эффективность таких процессов на примере растворения чернобыльских ГЧ рассматривается в работе [12].

История изучения «горячих» частиц, связанных с радиоактивным загрязнением поймы реки Енисей, насчитывает уже более 30 лет [2, 7, 8, 13, 14, 15]. По составу гамма-излучающих радионуклидов все ГЧ, данные по которым приведены в указанных работах можно условно разбить на три группы: моноизотопные – содержат только ^{137}Cs с активностью до 2×10^6 Бк на частицу; двухизотопные, содержащие ^{137}Cs и ^{134}Cs с активностями в диапазоне от 2.7×10^4 до 30×10^6 Бк и 10-7500 Бк, соответственно; полиизотопные – ^{137}Cs (4×10^4-7×10^5 Бк), ^{134}Cs (180-1250 Бк), ^{154}Eu (1000-5000 Бк), ^{155}Eu (300-1400 Бк), ^{60}Co (20-30 Бк) и ^{241}Am (20-75 Бк). Следует отметить доминирующую роль ^{137}Cs и отсутствие широко распространенного в аллювиальных отложениях ^{152}Eu.

В ранее опубликованных работах [2, 16, 17, 18] при изучении миграционной способности ТРН, накопленных в пойме реки Енисей рассматривается, главным образом, их рассеянная форма нахождения. Возможность же вовлечения во вторичную миграцию радионуклидов, содержащихся в форме ГЧ к настоящему времени изучена недостаточно полно.

Целью данной работы было определение роли ГЧ в процессах вторичного перераспределения.

Методы и материалы

Все аналитические работы по изучению ГЧ проводились в ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН (Лаборатория геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии). Определение изотопного состава и активности гамма-излучающих ради-

онуклидов выполнялось гамма-спектрометрическим методом с использованием HPGe и Ge(Li) коаксиальных и HPGe планарного ППД.

Для выявления форм нахождения ^{137}Cs в «горячих» частицах проведено фракционное разделение по методике Tessier [19], адаптированной для искусственных радионуклидов в донных отложений реки Енисей [20]

Результаты

В таблице 1 приведены содержания гамма-излучающих радионуклидов в двух разнотипных (моноцезиевой и полиизотопной) ГЧ, отобранных для проведения эксперимента по фракционному разделению.

Таблица 1

Радионуклидный состав «горячих» частиц из ближней зоны влияния Красноярского ГХК, отобранных для определения форм нахождения ^{137}Cs

Номер частицы	Активность, Бк						
	^{154}Eu	^{155}Eu	^{137}Cs	^{134}Cs	^{60}Co	^{241}Am	^{243}Cm
Gch05			1592000				
Gch06	4071	2463	235100	28	186	11800	3130

Примечание: пределы обнаружения для всех изотопов составляют величину не хуже 5 Бк. Относительная ошибка определения по критерию 2s для ^{137}Cs и ^{154}Eu не превышает ±10%; для ^{134}Cs, ^{155}Eu, ^{60}Co, ^{241}Am и ^{243}Cm ±15-20%.

Результаты эксперимента по фракционному разделению ^{137}Cs представлены на рис.1.

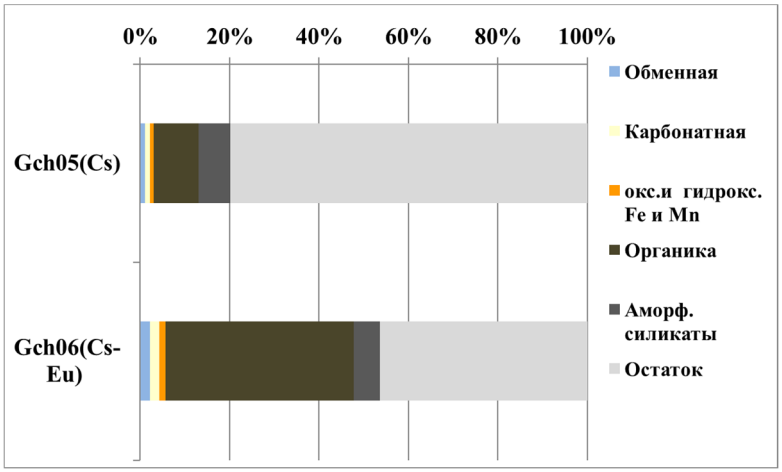


Рис. 1. Результаты эксперимента по фракционному разделению ^{137}Cs в моноцезиевой и полиизотопной частице

Видно, что распределение радионуклида по фракциям существенно отличается для частиц двух разных типов. Содержание обменной и карбонатной фракций, а также оксидов и гидроксидов Fe и Mn невелико и составляет первые про-

центы (при этом значение в 2 раза выше для полиизотопной частицы). Количество органической фракции выше 10% и 42% для моноцезиевой и полиизотопной частиц. Существенно отличается содержание ^{137}Cs в нерастворимом остатке – 80 и 46%.

Обсуждение

Радионуклидный состав частиц, использованных в эксперименте, типичен для ближней зоны ГХК и соответствует данным, приведенным в ранее опубликованных работах [2,7,8,13]. Так же доминирует ^{137}Cs и отсутствует активационный изотоп ^{152}Eu, характерный для вмещающих аллювиальных отложений.

На основании полученных в результате эксперимента по фракционному разделению данных можно сделать выводы о возможности миграции ^{137}Cs, входящего в состав ГЧ различного типа. Согласно работе [10] к подвижным формам относятся обменная, карбонатная форма и оксиды и гидроксиды Fe и Mn. К слабо-подвижным – связанные с органикой и аморфные силикаты. Вместе с тем принято считать, что оксиды и гидроксиды Fe и Mn становятся подвижными только в восстановительных условиях, а в рассматриваемом случае условия окислительные. Поэтому в данной работе к подвижным формам отнесены обменная и карбонатная фракции, условно-подвижным – три остальные.

Заключение

В результате проведения эксперимента показано, что доля ^{137}Cs в мигрирующих формах составляет около 3% в моноцезиевой частице и около 6% в полиизотопной. Содержание ^{137}Cs в потенциально-мигрирующих формах – 17 и 48% соответственно.

Таким образом, учитывая довольно высокие содержания подвижных форм ^{137}Cs в ГЧ, особенно в полиизотопной, периодически продолжающееся поступление их в экосистему реки Енисей. ГЧ могут вносить существенный вклад в перераспределение ТРН, по крайней мере ^{137}Cs, особенно учитывая многократно, на несколько порядков, сократившийся сброс непосредственно с ГХК.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400193-7) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Аналитическая работа выполнена в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов А.В., Ашанин М.В., Иванов А.Б., Мартынова А.М. Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината // Атомная энергия. – 1993. – Т. 74. – Вып. 2. – С. 144-150.

2. Сухоруков Ф.В. Дегерменджи Ф.В. Белолипецкий и др. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2004. – 286 с.

3. Кузнецов Ю.В., Ревенко Ю.А., Легин В.К., Раков Н.А., Жидков В.В., Савицкий Ю.В., Тишков В.П., Поспелов Ю.Н., Егоров Ю.М. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря // Радиохимия. – 1994. – Т. 36. – Вып. 6. – С. 546-559.

4. Болсуновский А.Я., Атурова В.П., Марио Бургер и др. Радиоактивное загрязнение территории населенных пунктов Красноярского края в регионе размещения Горно-химического комбината // Радиохимия. – 1999. – Т. 41. – Вып. 6. – С. 563-568.

5. Линник В.Г. Техногенные радионуклиды в поймах р. Теча и среднего течения р. Енисей // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2011. – № 4. – С. 24-30.

6. Носов А.В., Мартынова А.М. Анализ радиационной обстановки на р. Енисее после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81. – Вып. 3. – С. 226-232.

7. Болсуновский А.Я., Горяченкова Т.А., Черкезян В.О., Мясоедов Б.Ф. Горячие частицы в Красноярском крае // Радиохимия. – 1998. – Т. 40. – № 3. – С. 271-274.

8. Болсуновский А.Я., Черкезян В.О., Барсукова К.В., Мясоедов Б.Ф. Исследование высокоактивных проб почв и горячих частиц поймы реки Енисей // Радиохимия. – 2000. – Т. 42. – № 6. – С .560-564.

9. Быховский А.В., Зараев О.М. Горячие аэрозольные частицы при техническом использовании атомной энергии. – М.: Атомиздат, 1974. – 254с.

10. Salbu B. Speciation of radionuclides – analytical challenges within environmental impact risk assessments // Journal of Environmental Radioactivity. – 2007. – № 96. – P. 47-53.

11. Salbu B., Lind O.C., Skipperud L. Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – № 74. – P. 233-242.

12. Булгаков А., Коноплев А., Войцехович О., Канивец В., Лаптев Г., Попов В., Смит Дж. Оценка и прогноз скорости растворения топливных частиц в донных отложениях водоема-охладителя Чернобыльской АЭС // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий : Труды Междунар. конф. – СПб: Гидрометеоиздат, 2006. – Т. 2. – С. 24-30.

13. Bolsunovsky A.Ya., Melgunov M.A. Study of Sediments and Radioactive Particles of the Yenisei River Using a Variety of Analytical Methods // Journal of Geoscience and Environment Protection. – 2014. – Vol. 2. – № 3. – P. 153-158.

14. Chuguevskii A.V., Sukhorukov F.V., Melgunov M.S., Makarova I.V., Titov A.T. “Hot” particles of the Yenisei River: radioisotope composition, structure, and behavior in natural conditions // Doklady Earth Sciences. – 2010. – № 430. – P. 51-53.

15. Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., Lind O.C., Salbu B. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei river floodplain // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 111-132.

16. Носов А.В. Исследование механизмов миграции радиоактивных веществ в пойме Енисея // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 12. – С. 84-91.

17. Вакуловский С.М., Тертышник Э.Г., Кабанов А.И. Перенос радионуклидов в р. Енисей // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – № 5. – С. 285-291.

18. Bondareva L., Artamonova S. The relationship of mineral and geochemical composition to artificial radionuclide partitioning in Yenisei river sediments downstream from mining-and-chemical combine Rosatom // Natural Science. – 2011. – Vol.3. – № 7. – P.517-529.

19. Tessier A., Cambell P.G., Bisson M Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analytical chemistry. – 1979. – Vol. 51. – № 7. – P. 844-851.

20. Бондарева Л.Г., Болсуновский А.Я., Сухоруков Ф.В., Казбанов В.И., Макарова И.В., Леглер Е.В. Оценка миграционной способности трансурановых радионуклидов (^{241}Am, изотопов плутония) и ^{152}Eu в донных отложениях реки Енисей // Радиохимия. – 2005. – Т. 47. – № 4. – С. 289-294.

© А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов, М. Ю. Кропачева, И. В. Макарова, 2025

УДК 550.837
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-187-192

Н. Н. Неведрова[1], А. Е. Шалагинов[1]✉, И. О. Шапаренко[1], А. М. Санчаа[1], С. М. Бабушкин[2]

Геоэлектрические модели разломных структур в юго-восточной части Горловской впадины по данным электротомографии

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская федерация
[2] Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская федерация
e-mail: shalaginovae@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Горловская впадина Новосибирской области, расположенная между Колывань-Томской складчатой зоной и Салаиром, отделена от них региональными разломами. Она характеризуется напряженным тектоническим строением и крупнейшими в России запасами антрацита. Начиная с 2019 г. по сейсмологическим данным во впадине наблюдается значительное усиление сейсмической активности, связанной по мнению сейсмологов не только с природными процессами, но и с техногенными воздействиями. Землетрясения концентрируются в зоне крупных действующих угольных карьеров – Колыванского и Восточного вблизи юго-восточного борта впадины. Далее сейсмичность может развиваться как опасный для инфраструктуры и населения процесс, за которым необходимо наблюдать. Для регулярных наблюдений методами геоэлектрики важно выявить и обосновать те разломные структуры, которые можно отнести к сейсмогенерирующим. На геоэлектрических разрезах активные разломы обычно выделяются зоной пониженных удельных электрических сопротивлений. Для этого исследования привлечены полевые данные метода электротомографии по профилям, пересекающим разломные структуры в юго-восточной части впадины. Геоэлектрические модели как результат интерпретации, обоснованные численным моделированием, позволяют выявить разломы, в зоне которых оптимально наблюдать за развивающейся сейсмичностью.

Ключевые слова: Горловская впадина, разломные структуры, электротомография, геоэлектрический разрез

N. N. Nevedrova[1], A. E. Shalaginov[1]✉, I. O. Shaparenko[1], A. M. Sanchaa[1], S. M. Babushkin[2]

Geoelectric models of fault structures in the south-eastern part of the Gorlovskaya depression based on electrical resistivity tomography data

[1] Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shalaginovae@ipgg.sbras.ru

Abstract. The Gorlovskaya depression of the Novosibirsk Region, located between the Kolyvan-Tomsk folded zone and Salair, is separated from them by regional faults. It is characterized by tense tectonics and the largest anthracite reserves in Russia. Since 2019, according to seismological data, a significant increase in seismic activity has been observed in the depression, associated, according to seismologists, not only with natural processes, but also with man-made impacts. Earthquakes are concentrated in the area of large operating coal quarries – Kolyvansky and Vostochny near the south-eastern side of the depression. Further seismicity can develop as a process dangerous for infrastructure and the population, which must be monitored. For regular observations using geoelectric meth-

ods, it is important to identify and substantiate those fault structures that can be classified as seismogenic. On geoelectric sections, active faults are usually distinguished by a zone of low specific electrical resistance. This study involved field data from the electrical tomography method along profiles crossing fault structures in the southeastern part of the basin. Geoelectric models as a result of interpretation, substantiated by numerical modeling, allow us to identify faults in the zone of which it is optimal to observe developing seismicity.

Keywords: Gorlovskaya depression, fault structures, electrical resistivity tomography, geoelectric section

Введение

Горловская впадина (прогиб) расположена между Колывань-Томской складчатой зоной и северо-западным Салаирским антиклинорием. Она вытянута от Камня-на-Оби в правобережьи р. Обь в сторону долины р. Томь. Ширина впадины всего 1,5-15 км, а длина около 120 км, она характеризуется чередованием антиклинальных и синклинальных складок, осложненных складчатостью более мелких порядков с присутствием локальных разломов. Впадина ограничена с двух сторон системой региональных дизъюнктивов и надвинута на структуры Салаира, от которого её отделяют с юго-востока Чемской, Доронинский и Кемеровский разломы [1]. На территории прогиба отложилось большое количество органогенных осадочных пород, таких как известняки, каменный уголь. В верхней части разреза преобладает угленосная моласса карбон-раннепермского возрастов, а средняя и нижняя части представлены континентальными и морскими отложениями соответственно. Метаморфизм пермских углей достигает антрацитовой стадии и этот угольный бассейн вмещает крупнейшие месторождения антрацита, которые начали добывать вначале прошлого столетия в шахтах и далее карьерах [2].

В настоящее время продолжают интенсивно разрабатываться целый ряд карьеров, включая Колыванский и Восточный. Именно в этих карьерах за последние 3 года концентрируются землетрясения, достигающие магнитуд в 4,7. Усиление сейсмической активности в Горловской впадине происходит, начиная с 2019 г., после Колыванского землетрясения с магнитудой ML = 4,3. Далее сейсмичность только усиливается. Специалисты сейсмологи полагают, что усиление сейсмической активности, связано не только с природными процессами, но и с техногенными воздействиями – промышленными взрывам и перемещениями больших объемов извлекаемой горной породы в угольных карьерах [3]. Даже относительно небольшие магнитуды приповерхностных землетрясений компенсируются близостью очагов к поверхности. Они могут быть опасны для населения и сооружений и вызвать локальные катастрофы.

Длительное интенсивное воздействие техногенных источников неминуемо приводит к изменениям природных геодинамических и гидрогеологических режимов, влияющих на геофизические и, в том числе, на электромагнитные поля. Строение Горловской впадины как глубинное, так и приповерхностное ранее было изучено недостаточно. Работы геофизическими методами проводились в 70-80-е гг. прошлого столетия только на отдельных участках с угольными месторождениями.

Цель работы заключается в определении геоэлектрических характеристик отложений осадочного выполнения, выявлении разломных структур методами электроразведки в Горловской впадине. Это позволит далее обоснованно привлечь электроразведку для регулярных наблюдений за развивающейся сейсмичностью совместно с сейсмологическими методами.

Методы электроразведки и характеристики полевых измерений

Начиная с 2020 г., в зоне сейсмической активизации юго-восточной части Горловской впадины были начаты полевые работы комплексом методов электроразведки, в который входили зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСБ), вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электротомография (ЭТ). В качестве основного метода для восстановления глубинного строения выбраны зондирования становлением поля, выполненные по профилю, пересекающему впадину с запада на восток. В целях построения модели верхней части разреза до глубин 40-100 м использована электротомография. В результате были получены первые представления о геоэлектрических характеристиках впадины. По данным ЗСБ, на глубинах 50-100 м выделена кровля слоя мощностью в 300 м с УЭС в интервале 0.1-10.0 Ом·м, по геологическим данным слой соответствует залежам антрацита [4]. В 2022 г. пройден профиль ЗСБ через разломные структуры, отделяющую Горловскую впадину от Салаира. На полученном разрезе разломная зона проявляется в виде надвига в восточной части профиля с понижением значений удельного электрического сопротивления относительно вмещающих блоков. [5]. Работы методом ЭТ были продолжены в последующие годы для построения моделей разломных структур. На рис. 1 показана схема измерений методом ЭТ через разломы юго-восточного борта Горловской впадины.

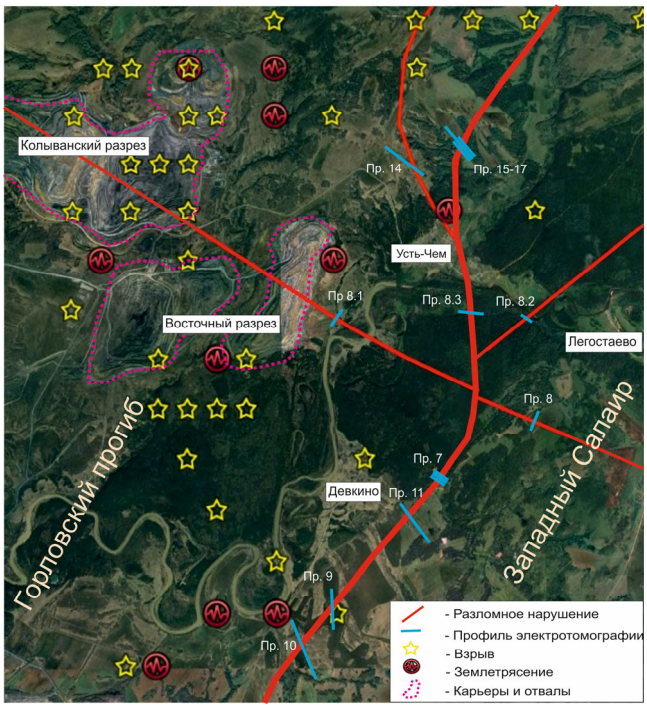


Рис. 1. Схема измерений методом ЭТ через разломные зоны юго-восточного борта Горловской впадины

Результаты интерпретации

Интерпретация всех полученных полевых данных электротомографии осуществлялась с помощью двух программных комплексов моделирования и инверсии Direct-Inverse-Solver (DiInSo) [8] и Res2DInv [9]. Вначале рассмотрим разрезы по профилям, выполненные через Чемской разлом (рис. 2). На рис. 2 показаны разрезы по трем параллельным профилям в северной части участка исследования. Разломная зона, выделенная на всех разрезах в интервале профиля от 0 до 250-300 м, характеризуется понижением УЭС более чем на порядок относительно высокоомых отложений Салаира с УЭС до 2000 Ом·м.

Далее продвигаясь по территории участка с севера на юг, рассмотрим разрезы по профилям 8 и 8.1, выполненные через второстепенный разлом простиранием на северо-запад южнее пос. Усть-Чем (рис. 3).

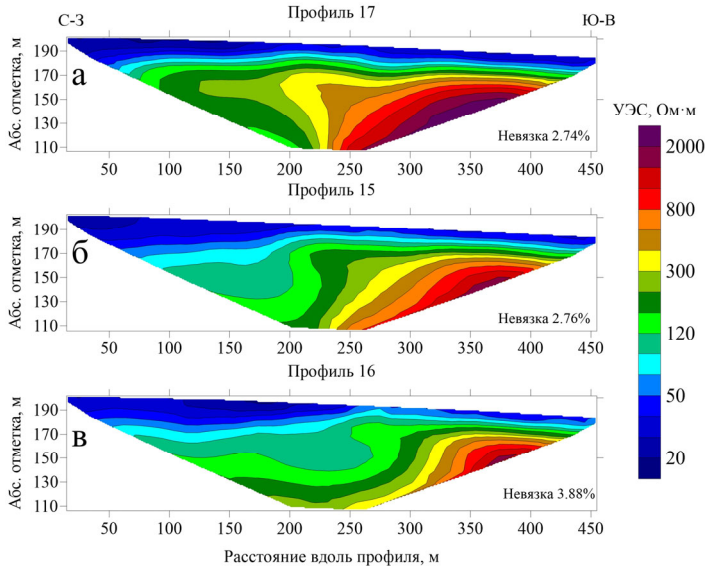


Рис. 2. Разрезы по профилям 16, 17, 18 через Чемской разлом на севере участка исследования

На разрезах 8 и 8.1 разлом не выделяется. Получены практически горизонтально-слоистые модели среды с маломощным верхним проводящим слоем с УЭС от 3 до 100 Ом·м, залегающим на высокоомных породах, достигающих 700 Ом·м. И наконец приведем разрезы по профилям в южной части планшета (рис. 4). Здесь ситуация более сложная. По профилям 11 и 7 в их северо-западной части на разрезах видны низкоомные зоны, скорей всего, соответствующие разломным структурам. Причем для разреза по профилю 7 разлом обоснован трехмерным моделированием. Но на этом интервале Чемского разлома невозможно проверить реальную ширину зоны разлома, т.к. для этого следует продлить профили на северо-запад, где находится заболоченный глубокий овраг. На профиле 10 разлом предположительно выделяется в интервале профиля от 550 до 700 м, характеризуется понижением УЭС.

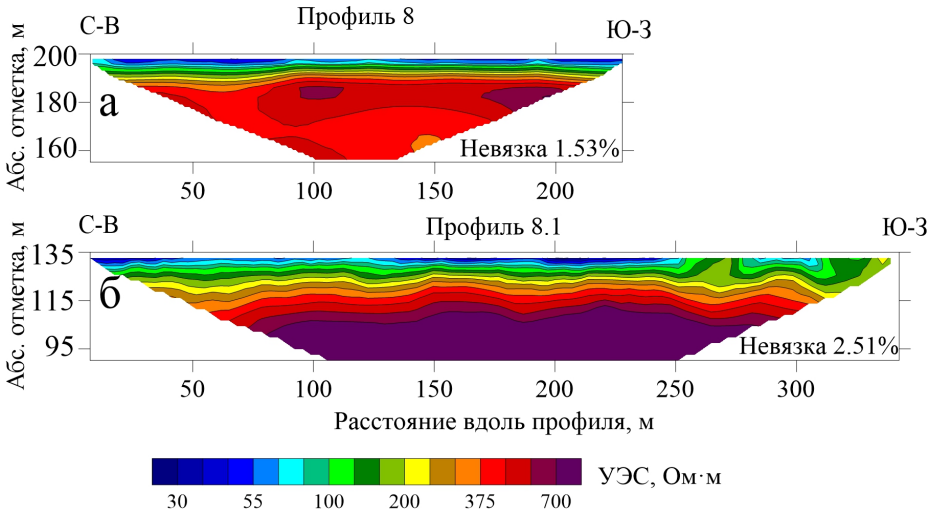


Рис. 3. Разрезы вкрест второстепенного разлома простиранием на северо-запад между поселками Усть-Чем и Девкино

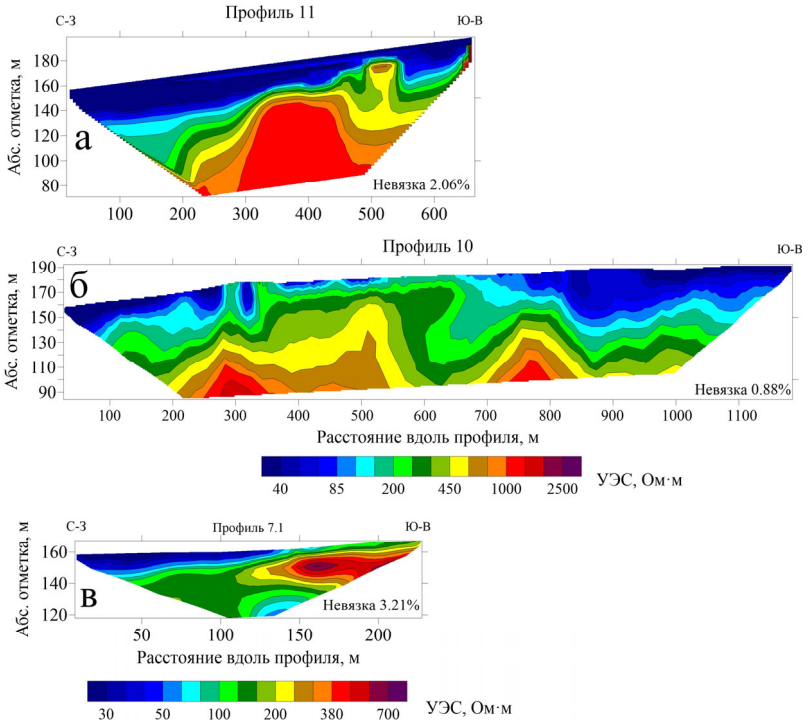


Рис. 4. Разрезы по профилям 11, 10, 7 через Чемской разлом на юге участка

Заключение

В статье приведены характерные разрезы через юго-восточные разломные структуры Горловской впадины. По данным электротомографии подтверждено, что региональный Чемской разлом, протянувшийся с юго-востока через весь участок исследования, является надвигом, т.е. отложения впадины надвинуты на Салаирский антиклинорий. Получены геоэлектрические параметры разломных зон, выделяющихся пониженными значениями УЭС. Это дает возможность в дальнейшем выбрать оптимальное место для регулярных наблюдений методом ЭТ.

Планируется продлить некоторые профили на северо-восток там, где позволяет рельеф для определения ширины зоны разлома.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геологическая карта: N-44-XVIII (Черепаново). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Кузбасская серия, масштаб: 1:200000, серия: Кузбасская / под ред. Ратанов Л.С. – ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2014. – 200 с.
2. Иванов О.П., Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В., Борисенко А.С., Оболенский А.А., Васильев И.П., Гимон В.О. Геодинамика, магматизм, и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – 227 с.
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 207-210.
4. Котельников А.Д., Максиков С.В., Котельникова И.В., Макаренко Н.А., Субботин К.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-44-XVIII – Черепаново. Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2008. – 78 с.
5. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Шапаренко И.О., Шалагинов А.Е. Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками. Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVII международной научной конференции (г. Новосибирск, 19-21 мая 2021 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 272-279.
6. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Геоэлектрическое строение разломного ограничения Горловского прогиба Новосибирской области по данным нестационарных электромагнитных зондирований. Интерэкспо ГЕО-Сибирь – XIX 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. (г. Новосибирск, 17-19 мая 2023 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – Т. 2. – № 4. – С. 61-67.
7. https://nemfis.ru/siber-64k15
8. http://diinso.sourceforge.net/
9. http://www.geotomosoft.com

© Н. Н. Неведрова, А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко, А. М. Санчаа, С. М. Бабушкин, 2025

УДК 551.345, 624.139, 692.115, 536.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-193-200

А. Н. Шеин[1]✉, А. И. Синицкий[1], А. А. Башкова[1,2]

Проблемы и перспективы использования термостабилизации оснований зданий в г. Салехард при современных климатических трендах

[1]Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация
[2]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Российская Федерация
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются перспективы использования термостабилизации оснований зданий в г. Салехард в условиях современных климатических изменений. В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард показано, что за последние 30 лет благоприятный для работы сезонных охлаждающих устройств период с температурами ниже минус 7°С уменьшился почти на месяц. На практическом примере показано наличие положительного тренда температуры грунтового основания действующего объекта, возведённого по I принципу строительства. Всё это может привести к снижению эффективности термостабилизации грунтов оснований зданий, возведённых на мерзлоте по I принципу строительства. В связи с чем возникает необходимость в предъявлении повышенных требований к принятию проектных решений при строительстве на мерзлых грунтах и особенно вблизи южной границы криолитозоны.

Ключевые слова: термостабилизация, сезонное охлаждающее устройство, мерзлота, климатические изменения

A. N. Shein[1]✉, A. I. Sinitsky[1], A. A. Bashkova[1,2]

Problems and prospects of using thermostabilization of building bases in Salekhard under current climatic changes

[1]Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug, Salekhard, Russian Federation
[2]Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS,
Tyumen, Russian Federation
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Abstract. The paper considers the prospects of using thermal stabilization of the foundations of buildings in Salekhard in the conditions of modern climatic changes. As a result of the analysis of the air temperature at the Salekhard meteorological station, it is shown that over the past 30 years, the period favorable for the operation of the seasonal cooling device with temperatures below minus 7°C has decreased by almost a month. A practical example shows the presence of a positive trend in the temperature of the soil base of an existing facility built according to the I principle of building. All this can lead to a decrease in the efficiency of thermal stabilization of the soils of the foundations of buildings erected on permafrost according to the I principle of construction. In this regard, there is a need for increased requirements for making design decisions during construction at the permafrost and especially near the southern border of the cryolithozone.

Keywords: thermostabilization, seasonal cooling device, permafrost, climate change

Введение

Мерзлота занимает значительную (60-65%) часть территории РФ, которая продолжает активно осваиваться и развиваться. Помимо труднодоступности северных территорий, мёрзлые породы осложняют их освоение из-за возникающих проблем при возведении и дальнейшей эксплуатации инфраструктуры в таких условиях [1]. Проблемы возникают не только из-за сложного строения пород, но и ускорившихся в последнее время процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата. При строительстве сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по I принципу (с сохранением основания в мерзлом состоянии) широкое распространение получила технология термостабилизации грунтов (ТСГ). Основным способом обеспечения требуемого температурного режима фундамента для сохранения мерзлого состояния грунтов является сооружение проветриваемого (вентилируемого) подполья (ПП) и применение сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ). Среди различных типов таких устройств наиболее часто в ПП используются вертикальные двухфазные естественно-конвективные устройства с испарителем и оребренным конденсатором [2-5]. При наличии градиента температур между стабилизируемыми грунтами и наружным воздухом хладогент конденсируется в ребристом радиаторе-конденсаторе, расположенном в верхней части СОУ, затем естественным путем стекает в нижнюю, испарительную часть, где отбирает теплоту грунта, охлаждая его, испаряется и поднимается вверх. Однако разница между температурой грунтов и температурой воздуха на юге Арктики – уменьшается ввиду климатических изменений, как следствие поддержание нормативных температур мёрзлых грунтов в основании зданий становится всё сложнее. В связи с чем, нормативы и правила строительства, особенно вблизи изменяющейся южной границы криолитозоны требуют постоянной актуализации. Необходим системный, научно-методический подход применения принципов строительства в районах распространения ММП, в том числе с обоснованием долгосрочной перспективы использования СОУ.

На южной границе криолитозоны располагаются почти все крупные города Ямала, в том числе окружная столица – г. Салехард, который в 2024 году был одним из лидеров по вводу жилья в округе. Строительство здесь ведётся по I принципу с применением СОУ, за редким исключением. Как следствие взрывными темпами растёт количество охлаждающих систем (термосифонов). Вместе с тем геокриологическая обстановки вблизи г. Салехард значительно изменилась: температура мёрзлых грунтов за последние 40 лет с -1°С повысилась до около нулевых значений, а её кровля с 1,5-2 м опустилась до 7-8 м [6-7]. Основные климатические показатели тоже говорят не в пользу устойчивости ММП: по данным Салехардской метеостанции с 1990 года величина линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха составила +0,09°С/год, вместе с температурой увеличивается количество осадков [8]. В связи с вышеизложенным возникает необходимость в проведении оценок современной и перспективной эффективности СОУ и использования I принципа строительства в г. Салехард.

Исходя из технических характеристик современных СОУ [4-5] можно принять, что теплообмен между грунтами, где установлены СОУ, и атмосферным воздухом начинается при температуре ниже -7°С. Но нужно понимать, что существует ещё множество факторов, влияющих на теплообмен: культура эксплуатации ПП; ветровые показатели; температура грунтов в основании здания – разница между температурой грунтов и температурой воздуха уменьшается к концу зимнего периода и др. Тем не менее, проведём оценки изменения продолжительности работы СОУ в годовом цикле опираясь на изменение температуры воздуха. Рассмотрим практические примеры работы термостабилизации под несколькими зданиями в г. Салехард на основе данных мониторинга температуры грунтовых оснований объектов.

Методы и материалы

Для анализа температуры воздуха использовались специализированные массивы для климатических исследований [9]. После выгрузки данных по метеостанции г. Салехард, где наблюдения ведутся с 1982 г., была проведена их статистическая обработка: рассчитано количество дней, когда средняя температура воздуха превышала значения: -7°С, -10°С и -15°С, построены линейные тренды для каждого набора данных для разных временных отрезков.

Практические данные получены в основании капитальных зданий г. Салехард, где с 2018 года развивается система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства и является составляющей региональной сети наблюдения за мерзлотой. Получаемая информация о мёрзлых грунтах под зданием позволит определить текущее состояние грунтового основания и прогнозировать развитие ситуации. В настоящий момент к системе подключено 40 объектов, где пробурено и оборудовано более 300 термометрических скважин. Для мониторинга используется оборудование производителей ИП Кураков (г. Томск), ООО «Русгеотех», ООО НТП «Горизонт», ООО «Криолаб» (г. Москва). Установленные комплекты термометрической аппаратуры прошли тестирование и были запрограммированы на период измерения 3 ч, в соответствии с периодом измерения ближайшей метеостанции в г. Салехард. Погрешность калибровки датчиков измерения температуры – 0.1°С. Данные с приборов поступают на сервер в автоматическом режиме и собираются в единую систему хранения и визуализации геокриологической информации ГИС «ЯМАЛ-АРКТИКА» (https://monitoring.arctic.yanao.ru) [10; 11]. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных.

Для анализа практических данных были выбраны несколько объектов, подключённых к система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований, с рядами мониторинга не менее 4 лет. Информация анализировалась на характерных глубинах после чего проводилось вычисление средних значений и расчёт линейного тренда для сравнительного анализа вычисленных статистических характеристик температурных данных на разных объектах.

Результаты

Используя данные метеостанции Салехард за последние 100 лет, установим количество дней, когда средняя температура воздуха превышала значения: -7°C, -10°C и -15°C (рис. 1, сплошные линии). Анализируя полученные данные, можно заметить, что на рубеже 20-21 веков происходит смена тренда. Чтобы оценить, как быстро сокращается количество благоприятных для эффективной работы СОУ дней были рассчитаны линейные тренды для 1930-1990 гг. и 1990-2023 гг. (рис. 1, пунктирные линии). Видно, что если до 1990 г. ситуация была относительно стабильной и количество дней со средней температурой меньше -10°C колебалось вблизи пяти месяцев (140-150 дней), то за последние 30 лет благоприятный для работы СОУ период уменьшился почти на месяц (120 дней). Схожая ситуация наблюдается для двух других случаев -7°C и -15°C (рис. 1).

В дополнение к отрицательному тренду можно заметить резкие скачки на графиках: в 2020 г. количество дней со средней температурой меньше -10°C упало до трёх месяцев (рис. 1, красная стрелка). Такие резкие колебания климатических показателей могут негативно сказаться на несущей способности грунтов ввиду отклонения от расчётного режима работы систем ТСГ.

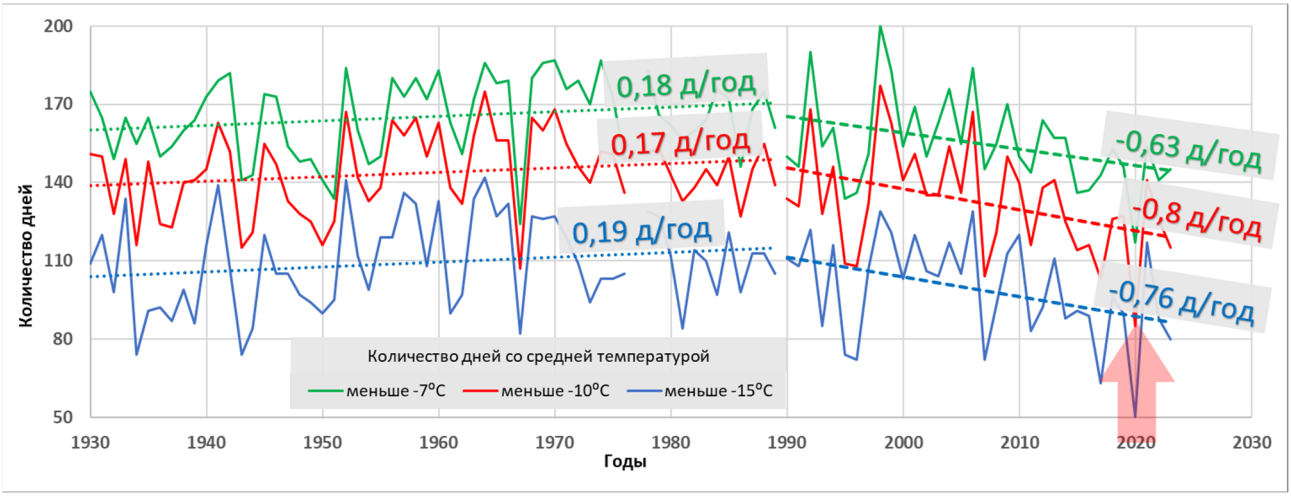


Рис. 1. Количество дней со среднесуточной температурой меньше -7°C (зелёная), -10°C (красная) и -15°C (синяя кривая) по данным метеостанции Салехард

Для анализа практических данных были выбраны два объекта капитального строительства, где проводится мониторинг температуры грунтового основания с 2018 г. Объект I введён в эксплуатацию в 2017 г., объект II – в 2004 г. К системе мониторинга здания подключены в 2018 и 2019 гг. соответственно, но при этом в данных есть пропуски в 2020 г., поэтому этот год был исключён из анализа. Проведён анализ данных температурного мониторинга в четырёх скважинах для объектов I и II за период 2019-2024 гг.: построены кривые на глубинах 6 и 9 м для каждой скважины (рис. 2, цветные кривые), рассчитано среднее значение в

каждый момент времени для рассмотренной выборки, вычислен линейный тренд для полученной средней температуры грунта с 2019 по 2024 гг. и с 2021 по 2024 гг.

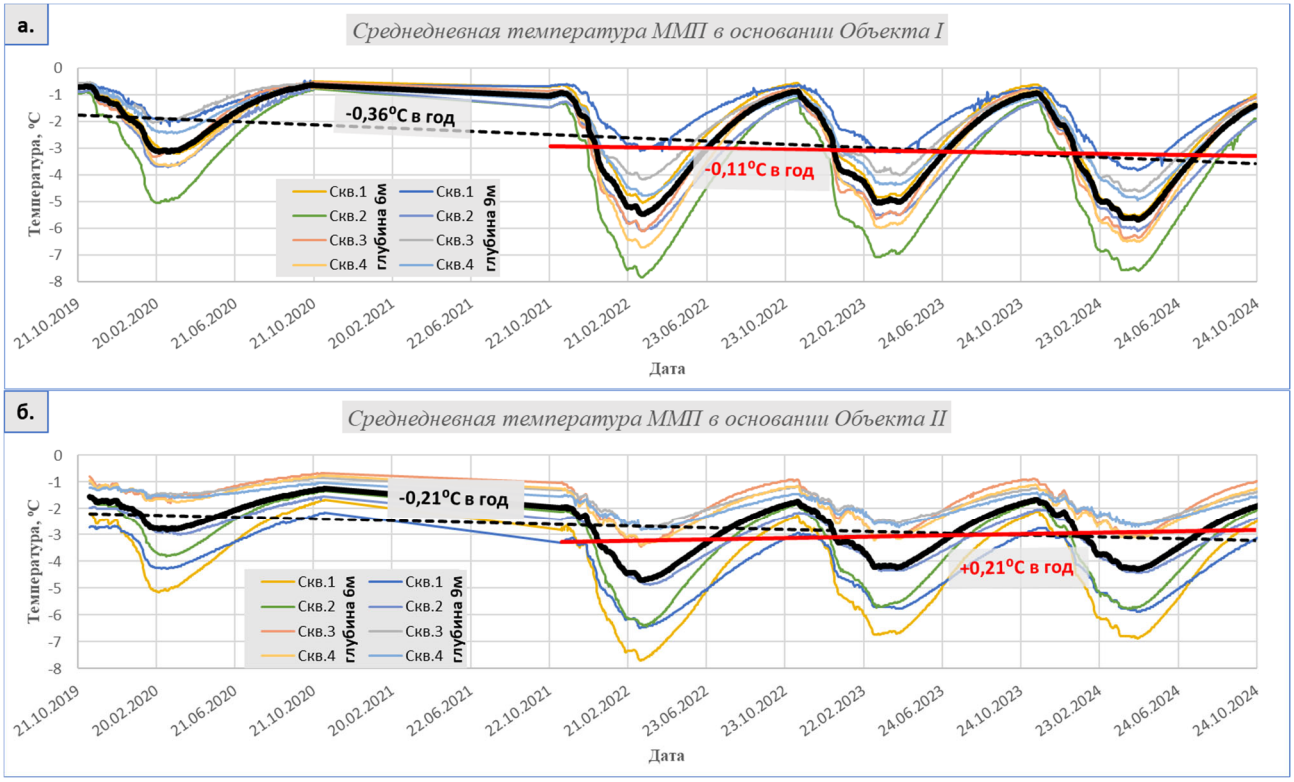


Рис. 2. Температура грунтов в основании объектов I (а) и II (б) в скважинах на глубинах 6 и 9 м за период октябрь 2019 г. - октябрь 2024 г. (цветные кривые); среднее значение по всем кривым для рассмотренной выборки (чёрная кривая); линейный тренд для полученной средней с 2019 по 2024 гг. (чёрная пунктирная прямая) и с 2021 по 2024 гг. (красная прямая)

Обсуждение

В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард (рис. 1) можно констатировать, что в обозримом будущем и при текущих темпах потепления эффективность ТСГ будет уменьшаться. Как следствие, в будущем потребуется либо наращивание количества термосифонов, либо вывод их из работы с сопутствующими мероприятиями по сохранению объектов. Любой сценарий влечёт значительные социально-экономические риски. В этой связи вызывает опасение повсеместное применение СОУ в городах с околонулевыми температурами мёрзлых грунтов и заглублённой кровлей. Необходима непрерывная актуализация нормативов и правил строительства вблизи южной границ криолитозоны, а также системный, научно-методический подход применения СОУ при строительстве, а дальнейшая их эксплуатация должна быть строго регламентирована.

При рассмотрении конкретных объектов, возведённых по I принципу строительства с применением СОУ, также можно заметить, что на эффективность ра-

боты термостабилизации влияет не только климатические данные, но и возраст здания. На рис. 2 линейный тренд, построенный по средней температуре на 6 и 9 м за 2019-2024 годы, в обоих случаях – отрицательный, что связано с аномально тёплым 2019 годом. Тем не менее, скорость понижения средней температуры на глубинах 6 и 9 м на более старом объекте II почти в два раза ниже по сравнению с объектом I: 0.21°C в год и 0.36°C соответственно.

Если исключить из расчётов тёплый 2019 год, то на объекте I температура уменьшается в три раза (рис. 2а, красная кривая) 0.11 вместо 0.36°C в год, но всё равно остаётся отрицательной. На объекте II температура изменяется на положительную (рис. 2б, красная кривая) с приростом 0.21°C в год, средняя температура грунтов на рассмотренных глубинах повышается. Продолжающееся охлаждение основания объекта I связано, прежде всего, с возрастом объекта – менее 10 лет, где основная часть СОУ ещё находятся в рабочем. На объекте II по пришествию 20 лет эксплуатации объекта термостабилизирующие устройства начинают выходить из строя или работать менее эффективно, что сказывается на поддержании температуры грунтового основания.

Ещё одним критерием эффективности работы термостабилизации под рассмотренными объектами является годовая амплитуда колебаний температуры – чем сильней охлаждаются грунты, тем эффективней работает технология. На объекте I в 2024 году грунты охладились за зимний период на 4.5°C (с -1 до -5.5°C), на объекте II в два раза слабже – на 2.5°C (-1.7 до -4.3).

Выявленные отличия состояния грунтов в основании рассмотренных объектов можно объяснить рядом причин – возраст здания, количество и разные характеристики используемых СОУ, культура эксплуатации объекта. Независимо от причин и факторов, полученный на втором объекте тренд может говорить о том, что заложенные проектом технологические решения могут не справиться с термостабилизацией грунтов в основании данного здания в перспективе современных климатических трендов.

Заключение

В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард показано, что за последние 30 лет благоприятный для работы СОУ период с температурами ниже минус 7°C уменьшился почти на месяц. Это может привести к снижению эффективности термостабилизации грунтов оснований зданий, возведённых на мерзлоте по I принципу строительства.

На практическом примере показано наличие положительного тренда температуры грунтового основания действующего объекта, возведённого по I принципу строительства с применением ТСГ. Средняя температура на глубинах 6 и 9 м за последние три года возрастает со скоростью 0.21°C в год.

Таким образом, при современных климатических трендах и в сложившихся инженерно-геокриологических условиях необходимо предъявлять повышенные требования к принятию проектных решений при строительстве на ММГ и особенно вблизи южной границы криолитозоны.

В будущем планируется провести более точные оценки эффективности работы СОУ для различных объектов, определить количественные критерии их эффективности. В том числе для решения этой задачи Научный центр изучения Арктики с 2018 года развивает в г. Салехард систему температурного мониторинга грунтов в основаниях объектов капитального строительства [12-13].

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства» при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеин А. Н., Камнев Я. К. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3 (108). – С. 42-50.

2. Лаврик А.Ю., Буслаев Г.В., Куншин А.А. [и др.] Системы термостабилизации грунта: опыт и перспективы // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – №12 (132). – С. 88-91.

3. Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2019. – Т. 5. № 3. – С. 25-46.

4. Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: тр. ученых и специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» за 2010-2014 гг. / под ред. Г.М. Долгих. – Новосибирск: Гео, 2014. – 218 с.

5. Галкин М.Л., Рукавишников А.М., Генель Л.С. Термостабилизация вечномерзлых грунтов // Холодильная техника. – 2013. – № 10. – С. 44-49.

6. Королева Е.С., Шеин А.Н., Исаев В.С., Башкова А.А. Развитие сети регионального мониторинга в Ямало-Ненецком автономном округе // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии: Материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2023. – С. 98-101.

7. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A. [et al.]. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 7.

8. Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. [и др.] Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Васьюган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. – 2022. – Т. 21. – № 3. – С. 27-38.

9. Специализированные массивы для климатических исследований. – URL: http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml (дата обращения: 04.02.2025).

10. Громадский А.Н., Арефьев С.В., Волков Н.Г., Камнев Я.К., Синицкий А.И. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – №3. – С. 17-21.

11. System of automated geocryological monitoring (2025). – URL: https://monitoring.arctic.yanao.ru/ (Accessed 10 March 2025 in Russian).

12. Шеин А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 3. –С. 58–69.

13. Башкова А.А., Шеин А.Н., Горелик Я. Б. Мониторинг грунтов основания здания на искусственном новообразовании мерзлоты // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 2. – С. 41-51.

© А. Н. Шеин А. Н., А. И. Синицкий, А. А. Башкова, 2025

УДК 550.8.056
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-201-207

А. Д. Штейн[1]✉, М. И. Протасов[1]

Структурно-ориентированное сглаживание для расчёта частотно-зависимой скоростной модели

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

Аннотация. В работе исследованы алгоритмы структурно-ориентированного сглаживания для расчёта частотно-зависимых скоростных моделей. Зависимость сглаживания от направления возникает при частотно-зависимом трассирование лучей, которые и задают векторное поле, с учётом которого и нужно сгладить модель. В данной работе это векторное поле предлагается рассчитывать на основе решения уравнения эйконала методом быстрой маршировки. В результате сглаженные модели зависят от частоты, положения источника сейсмических волн и поля времён, порождённого этим источником. Разработанные алгоритмы численно исследованы на реалистичных синтетических моделях сред.

Ключевые слова: Структурно-ориентированное сглаживание, частотная зависимость

A. D. Shtein[1]✉, M. I. Protasov[1]

Structure-oriented smoothing for frequency-dependent velocity model calculation

[1]Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shteynad@ipgg.sbras.ru

Annotation. The paper investigates structure-oriented smoothing algorithms for frequency-dependent velocity models calculation. The dependence of smoothing on direction occurs with frequency-dependent ray tracing, which sets the vector field, which is taken into account for model smoothing. In this paper, it is proposed to calculate this vector field based on the solution of the eikonal equation by the fast marching method. As a result, the smoothed models depend on the frequency, position of the seismic wave source, and the time field generated by this source. The developed algorithms are numerically investigated on realistic synthetic models.

Keywords: structure-oriented smoothing, frequency dependence

Введение

Известно, что время пробега волны в ограниченном диапазоне частот связано с объемным интегралом от медленности по волновому пути между источником и приемником, где волновой путь зависит от частоты. Известны несколько попыток получить частотно-зависимые решения, оставаясь при этом в рамках схемы трассирования лучей. Наиболее привлекательными с практической точки зрения являются подходы, основанные на сглаживании модели. Однако, обычное сглаживание приводит к противоречивой схеме в том смысле, что модель сглаженной скорости является кинематически некорректной.

Учёт такой некорректности осуществляется в подходе, предложенном в работе [1], где представлен алгоритм частотно-зависимого трассирования лучей, основанный на локальном сглаживании в пределах длины волны в процессе трассирования. В этом подходе происходит сглаживание скоростной модели в плоскости, перпендикулярной к лучу, с использованием весовой функции, ширина которой пропорциональна длине волны. Таким образом происходит структурно-ориентированное, частотно-зависимое сглаживание скоростной модели. Такое сглаживание можно осуществлять отдельно от трассирования лучей, и таким образом возможно реализовать альтернативные варианты расчёта частотно-зависимых решений. Тогда возникает необходимость исследовать различные алгоритмы структурно-ориентированного сглаживания для поиска наиболее устойчивого решения.

Структурно-ориентированное сглаживание имеет различные применения в задачах геофизики: [2-6]. В данной работе рассматриваются три алгоритма структурно-ориентированного сглаживания для расчёта частотно-зависимых скоростных моделей. При этом поле направлений, необходимое для сглаживания, предлагается рассчитывать на основе решения уравнения эйконала методом быстрой маршировки. В результате сглаженные модели зависят от частоты, положения источника сейсмических волн и поля времён, порождённого этим источником. Разработанные алгоритмы численно исследованы на реалистичных синтетических моделях сред.

Методы и материалы

Исследуется три алгоритма структурно-ориентированного сглаживания для расчёта частотно-зависимых скоростных моделей: а) сглаживание вдоль локально-плоского фронта; б) объёмное сглаживание по зоне Френеля; в) сглаживание на основе решения уравнения диффузии.

Идея сглаживания, предложенная в работе [1], заключается в том, чтобы определить в точке локально плоский волновой фронт и сглаживать вдоль него. Учитывается конечное число контрольных точек, которые вносят вклад в зависимости от выбранной весовой функции. Скорость в точке рассчитывается по формуле:

$$\bar{c}(x_v, z_v) = \frac{\sum_{n=-N}^{N} w_n \, c(x_n, z_n)}{\sum_{n=-N}^{N} w_n}, \tag{1}$$

где $\bar{c}(x_v, z_v)$ – средняя скорость в точке x_v, $c(x_n, z_n)$ – скорость в контрольной точке (x_n, z_n), w_n – значение весовой функции в контрольной точке (x_n, z_n). Положение контрольных точек вычисляется по формуле:

$$(x_n, z_n) = \begin{cases} (x_v, z_v); & n = 0 \\ (x_{n-1}, z_{n-1}) + \dfrac{\theta_{max} k}{4\pi N} c(x_{n-1}, z_{n-1}) \hat{n}; & n > 0 \\ (x_{n+1}, z_{n+1}) - \dfrac{\theta_{max} k}{4\pi N} c(x_{n+1}, z_{n+1}) \hat{n}; & n < 0 \end{cases}, \tag{2}$$

где θ_{max} – параметр усечения, k – длина волны, N – число контрольных точек, $\hat{n}$ – единичный вектор, перпендикулярный лучу (или градиенту поля времён) в точке (x_v, z_v).

При объёмном сглаживании по зоне Френеля используется модификация сглаживания на основе функции Гаусса. В результате скорость в точке рассчитывается по формуле:

$$c_{sm}(x_{i_0}, z_{j_0}) = \frac{\sum_{i=i_0-N_x}^{i_0+N_x} \sum_{j=j_0-N_z}^{j_0+N_z} w_{ij} \cdot c(x_i, z_j)}{\sum_{i=i_0-N_x}^{i_0+N_x} \sum_{j=j_0-N_z}^{j_0+N_z} w_{ij}}, \quad (3)$$

где $c_{sm}(x_{i_0}, z_{j_0})$ – сглаженная скорость в точке; $c(x_i, z_j)$ – скорость в точке (i, j) окна сглаживания; w_{ij} – весовая функция. w_{ij} рассчитывается по формуле:

$$w_{ij} = e^{-\alpha_{ij}|p|^2(1-\cos\beta)^2} \cdot e^{-4\alpha_{ij}|p|^2(\cos\beta)^2}, \quad (4)$$

где $\cos\beta$ – угол между вектором $\vec{p}$ из точки (x_{i_0}, z_{j_0}) в точку (x_i, z_j) и вектором $\vec{n}$ градиента поля времён в точке (x_i, z_j); α – коэффициент, вносящий зависимость от физических свойств. α_{ij} вычисляется по формуле:

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{\nu}{c(x_i, z_j) \cdot m}\right)^2, \quad (5)$$

где ν – частота, m – зона Френеля.
$\cos\beta$ задаёт направление сглаживания и вычисляется по формуле:

$$\cos\beta\,(x_i, z_j) = \frac{(\vec{p} \cdot \vec{n})}{|p||n|}; \quad \vec{p} = (x - x_0, z - z_0); \quad \vec{n} = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (6)$$

где T – поле времён, известное в каждой точке скоростной модели c.

Для сглаживания на основе решения уравнения диффузии используется алгоритм, изложенный в статье [2]. Идея данного сглаживания заключатся в применении процесса диффузии к изображению с привлечением структурного тензора, который задаёт направление сглаживания:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D\nabla u), \quad (7)$$

где u – изображение, t – время, D – тензор диффузии.

Сначала рассчитывается структурный тензор S, который записывается следующим образом:

$$S = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial z} \\ \frac{\partial T}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial x} & \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Далее выполняется сглаживание структурного тензора в масштабе σ, на этом этапе происходит свёртка с неориентированным фильтром Гаусса:

$$S_\sigma(i_0, j_0) = \sum_{i=i_0-\sigma}^{i_0+\sigma} \sum_{j=j_0-\sigma}^{j_0+\sigma} e^{-\alpha_{ij}|p|^2} \cdot S(i_0, j_0). \tag{9}$$

Затем проводится спектральное разложение S_σ:

$$S_\sigma = \sum_{i=1}^{2} \lambda_i v_i {v_i}^T, \qquad \lambda_1 > \lambda_2. \tag{10}$$

Для уравнения диффузии из собственных чисел λ_i и собственных векторов v_i тензора S_σ строится тензор диффузии D:

$$D = \sum_{i=1}^{2} \mu_i v_i {v_i}^T, \qquad \mu_1 = 0, \ \mu_2 = 1. \tag{11}$$

Таким образом, собственный вектор, параллельный структуре, имеет собственное значение 1, а собственный вектор, перпендикулярный структуре, имеет собственное значение 0.

Для численного решения уравнения диффузии (7) используется схема Эйлера:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \cdot \nabla(D_n \nabla u_n), \tag{12}$$

которая записывается в следующем виде [3]:

$$\begin{aligned} u_{n+1} = u_n + \Delta t\Big(&\frac{\partial D_{11}}{\partial x}\frac{\partial u_n}{\partial x} + D_{11}\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} + \frac{\partial D_{12}}{\partial x}\frac{\partial u_n}{\partial z} + D_{12}\frac{\partial^2 u_n}{\partial z \partial x} + \\ &\frac{\partial D_{21}}{\partial z}\frac{\partial u_n}{\partial x} + D_{21}\frac{\partial^2 u_n}{\partial x \partial z} + \frac{\partial D_{22}}{\partial z}\frac{\partial u_n}{\partial z} + D_{22}\frac{\partial^2 u_n}{\partial z^2}\Big). \end{aligned} \tag{13}$$

Для всех описанных выше алгоритмов сглаживания необходимы направления градиента поля времен, которые совпадают с направлениями лучей. Времена пробега рассчитываются при решении уравнения эйконала:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{c^2(x, z)}. \tag{14}$$

Для его решения используется алгоритм быстрой маршировки второго порядка, реализованный в программном пакете Madagascar [7] и описанный в работе [8]. Производные времён пробега рассчитываются конечно-разностными схемами.

Результаты

Разработанные алгоритмы сглаживания исследуется на ряде синтетических моделей, включая модель SEG_Salt2D (рис. 1).

Результаты применения алгоритма сглаживания вдоль локально-плоского фронта к модели SEG_Salt2D на частоте 20 и 10 Гц (рис. 2) показывают зависимость от частоты, положения источника и поля времён. Однако, данный алгоритм работает неустойчиво на низких частотах. Например, на частоте 10 Гц видны резкие скачки скоростей на границе с соляным телом, которых не было в исходной модели.

Результаты применения алгоритма объёмного сглаживания по зоне Френеля к модели SEG_Salt2D на частоте 20 и 10 Гц (рис. 3) также подчеркивают наличие зависимости от частоты, положения источника и поля времён. Сглаженные модели в этом случае не содержат аномальных скачков скоростей, данный алгоритм устойчиво работает как на высоких, так и на низких частотах.

Модели, полученные алгоритмом сглаживания на основе решения уравнения диффузии, показаны на рис. 4. В этом случае результат сглаживания зависит главным образом от времени диффузии. Большие времена в алгоритме диффузии соответствуют низким частотам. Однако, при большом значении времени диффузии в расчётах может проявляться неустойчивость. Например, при времени диффузии 1500 секунд присутствуют области аномально низких значений скоростей. Следовательно, низкочастотное решение, полученное данным алгоритмом, является неустойчивым.

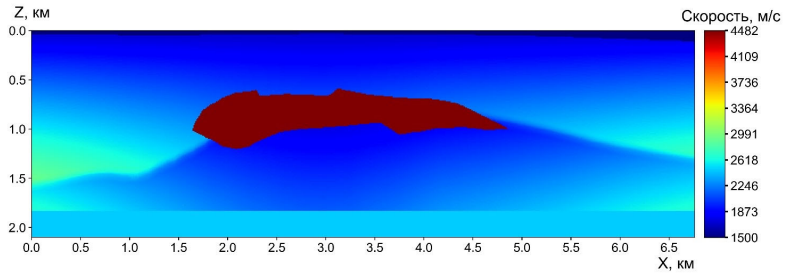


Рис. 1. Скоростная модель SEG_Salt2D

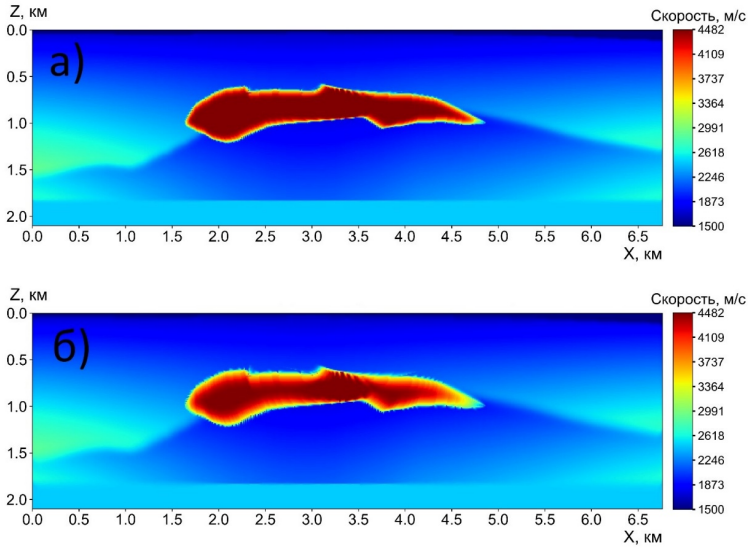


Рис. 2. Результат применения алгоритма сглаживания вдоль локально-плоского фронта к модели SEG_Salt2D: а) – на частоте 20 Гц, б) – на частоте 10 Гц.

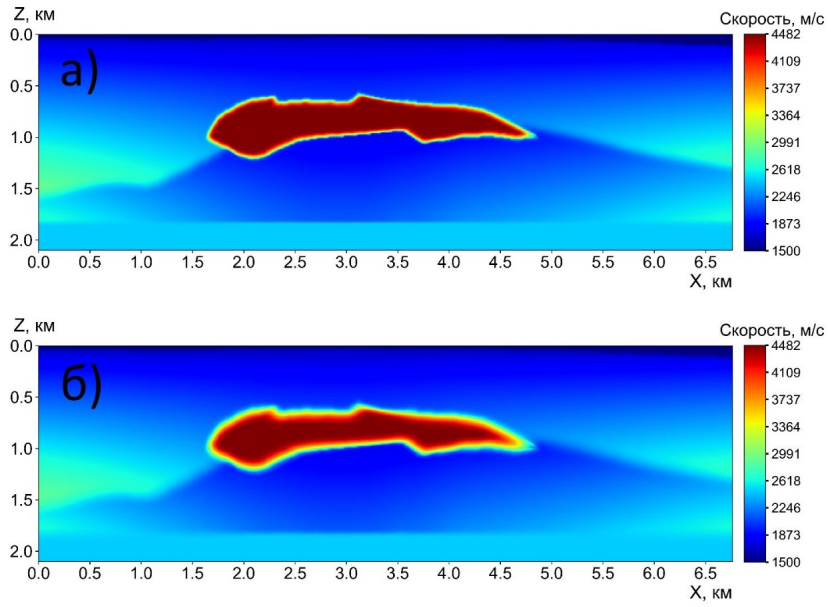


Рис. 3. Результат применения алгоритма объёмного сглаживания по зоне Френеля к модели SEG_Salt2D: а) – на частоте 20 Гц, б) – на частоте 10 Гц.

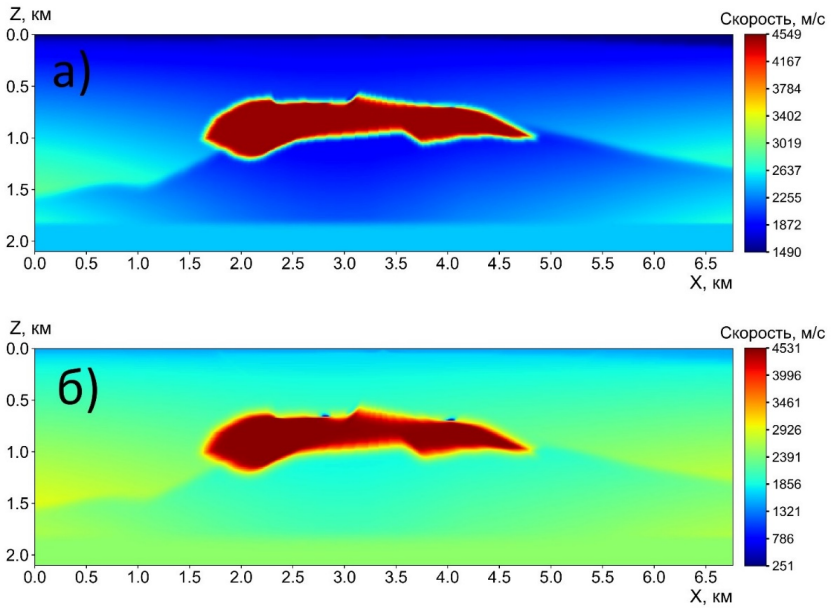


Рис. 4. Результат применения алгоритма сглаживания на основе решения уравнения диффузии к модели SEG_Salt2D: а) – с временем 500 секунд, б) – с временем 1500 секунд.

Заключение

В работе реализованы и исследованы три алгоритма структурно-ориентированного сглаживания для расчёта частотно-зависимых скоростных моделей: а) сглаживание вдоль локально-плоского фронта; б) объёмное сглаживание по зоне Френеля; в) сглаживание на основе решения уравнения диффузии. Разработанные алгоритмы численно исследованы на реалистичных синтетических моделях

сред. Результаты исследования показывают, что низкочастотные решения, полученные алгоритмом сглаживания на основе решения уравнения диффузии и алгоритмом сглаживания вдоль локально-плоского фронта, являются неустойчивыми. В то же время, структурно-ориентированное частотно-зависимое объёмное сглаживание по зоне Френеля устойчиво работает как на высоких, так и на низких частотах, и является наиболее устойчивым решением, рекомендуемым к использованию.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-71-20002-П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lomax A. The wavelength-smoothing method for approximating broad-band wave propagation through complicated velocity structures. // Geophysics J. Int. - 1994. – vol. 117, p. 313-334.

2. Fehmers, G. C. Fast structural interpretation with structure-oriented filtering. / G. C. Fehmers, C. F. W. Höcker // Geophysics. – 2003. – vol 68, № 4, p. 1286–1293. – doi:10.1190/1.1598121

3. Yao G. Reflection-Waveform Inversion Regularized with Structure-Oriented Smoothing Shaping. / G. Yao, N. V. da Silva, D. Wu // Pure Appl. Geophys. – 2019. – vol. 176, p. 5315–5335. – doi: https://doi.org/10.1007/s00024-019-02265-6.

4. Hale D. Structure-oriented smoothing and semblance. / D. Hale / CWP report 635. – 2009. – 10 p.

5. Luo L., Rao Y., Zhao Z., Zhang J. Adaptive structure-based full-waveform inversion // Geophysics. – 2024. – vol. 89, № 3, p. R303-R313. – doi: 10.1190/geo2023-0273.1

6. Wang W., Gao J., Li K., Ma K., Zhang X. Structure-oriented Gaussian filter for seismic detail preserving smoothing. // Proc. IEEE Int. Conf. on Image Process. – 2009. - p. 601–604. – ISSN 1522-4880.

7. Madagascar main page – URL: https://ahay.org/wiki/Main_Page (дата обращения 11.04)

8. Rickett J. A second-order fast marching eikonal solver. / J. Rickett, S. Fomel // Stanford Exploration Project, Report 100. - 1999. - p. 287-293

© А. Д. Штейн, М. И. Протасов, 2025

УДК 550.8.05
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-208-214

Т. А. Янушенко[1,2]✉, Н. А. Голиков[1,3,4], Л. А. Рыбалкин[5], В. Г. Смирнов[2], М. Й. Шумскайте[1,2]

Повышение достоверности определения типа насыщающего флюида на основе анализа двумерных карт времен ядерной релаксации

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук (ИНХ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Новосибирский государственный университет (НГУ),
г. Новосибирск, РоссийскаяФедерация
[4] Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
[5] Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: yanushenkota@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В нефтегазовой отрасли ядерно-магнитная резонансная (ЯМР) релаксометрия является эффективным инструментом для изучения характеристик пород-коллекторов (таких как пористость, проницаемость, степень насыщенности), анализа состава и определения типа пластовых флюидов. В работе исследуются возможности ЯМР-релаксометрии для анализа структуры порового пространства образцов керна и определения типа насыщающих их флюидов. Основное внимание уделено совместной интерпретации времен продольной и поперечной релаксации. Показано, что стандартный анализ спектров только времен поперечной релаксации не всегда позволяет точно определить тип флюида, особенно при смешанном насыщении, в то время как 2D-карты значительно повышают достоверность интерпретации. Кроме того, продемонстрирована возможность качественной оценки вязкости проб нефтей по соотношению времен продольной и поперечной релаксации. Важно отметить, что использование двумерных карт времен релаксации существенно расширяет потенциал метода ЯМР-релаксометрии, обеспечивая более точное определение типа насыщающего флюида и его свойств.

Ключевые слова: ЯМР-релаксометрия, времена продольной и поперечной релаксации, насыщающий флюид, двумерные карты

T. A. Yanushenko[1,2]✉, N. A. Golikov[1,3,4], L. A. Rybalkin[5], V. G. Smirnov[2], M. Y. Shumskayte[1,2]

Improving the reliability of saturating fluid type determination based on the analysis of two-dimensional maps of nuclear relaxation times

[1] A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
[2] 2 A. V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (INC SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
[3] Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russian Federation
[4] Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russian Federation
[5] N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGD SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: yanushenkota@ipgg.sbras.ru

Abstract. In the oil and gas industry, nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry is an effective tool for studying reservoir rock properties (such as porosity, permeability, and saturation), analyzing composition, and determining fluid types. This study explores the capabilities of NMR relaxometry for analyzing the pore structure of core samples and identifying the types of saturating fluids. The focus is on the joint interpretation of longitudinal and transverse relaxation times. It is shown that standard analysis based only on transverse relaxation time spectra does not always allow for precise fluid typing, especially in cases of mixed saturation, whereas 2D maps significantly improve interpretation reliability. Additionally, the possibility of qualitatively assessing oil viscosity based on the ratio of longitudinal to transverse relaxation times is demonstrated. Importantly, the 2D relaxation time mapping method substantially expands the potential of NMR relaxometry method, enabling more accurate determination of saturating fluid type and its properties.

Keywords: NMR relaxometry, longitudinal and transverse relaxation times, saturating fluid, two-dimensional maps

Введение

Ядерно-магнитная резонансная (ЯМР) релаксометрия является одним из информативных неразрушающих методов исследования пористой среды и флюидного насыщения в нефтегазовой геологии. Физической основой метода служит взаимодействие ядерных спинов протонов флюида с внешним магнитным полем, характеризующееся временами релаксации - спин-решеточной, продольной (T_1) и спин-спиновой, поперечной (T_2). Эти характеристики несут информацию о физико-химических свойствах флюидов и их расположении относительно стенок пор, что делает ЯМР уникальным инструментом для изучения поровой структуры и свойств флюидов [1].

Обычно в петрофизических исследованиях используется анализ распределения времен поперечной релаксации T_2, получаемых при помощи CPMG последовательности, которая позволяет оценивать распределение пор по размерам. Однако, как отмечают авторы [2], такой подход может оказаться недостаточным при изучении образцов со смешанным насыщением, поскольку разные флюиды могут иметь перекрывающиеся T_2-спектры.

Прорывом в этой области стало развитие двумерной ЯМР-релаксометрии (T_1-T_2), основанной на комбинации импульсных последовательностей IR (инверсия-восстановление) и CPMG [3].

Методы и материалы

При стандартном использовании метода ЯМР получают распределение времен поперечной релаксации T_2. Интерпретация результатов позволяет делать выводы о структуре порового пространства, а именно о распределении насыщенных флюидом пор по размеру.

Для получения карт времен продольной и поперечной релаксации используется IR-CPMG последовательность (рис. 1). Ее главное отличие от CPMG последовательности, используемой для получения спектра времен поперечной релаксации, заключается в подаче предварительного радиочастотного (РЧ) импульса, инвертирующего магнитные моменты протонов водорода, и в ожидании восстановления системы в течение итеративного времени τ_1. Затем подается РЧ

импульс, переводящий магнитные моменты в поперечную плоскость, что в свою очередь является началом CPMG последовательности. В этот момент сигнал может быть зарегистрирован и использован для получения спектра времен продольной релаксации T_1. При помощи последующей CPMG последовательности получают спектр поперечной релаксации T_2. Дальнейшее решение уравнения Фредгольма второго рода с неизвестными T_1 и T_2 позволяет получить двумерную матрицу, которую возможно отобразить в виде карты.

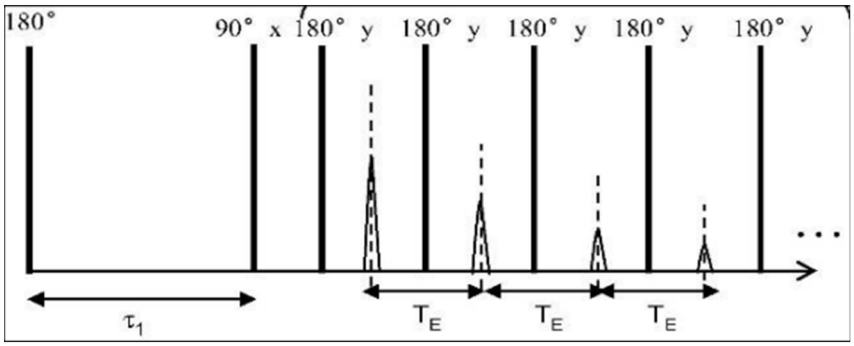


Рис. 1. Схема серий импульсов ЯМР-экспериментов при IR-CPMG-последовательности [4]

В работах [2, 3] приведены диапазоны времен продольной и поперечной релаксации для некоторых типов флюидов (рис. 2). Стоит отметить, что карты T_1-T_2 получены для прибора с рабочей частотой 22 МГц, но общие закономерности действительны и для более низких частот. Флюиды, находящиеся в свободном объеме, имеют отношение $T_1/T_2 \sim 1$. Это означает, что максимум сигнала лежит на главной диагонали. Для насыщающих поровое пространства флюидов отношение T_1/T_2 всегда больше 1. Для битумов и керогена это отношение может достигать нескольких сотен.

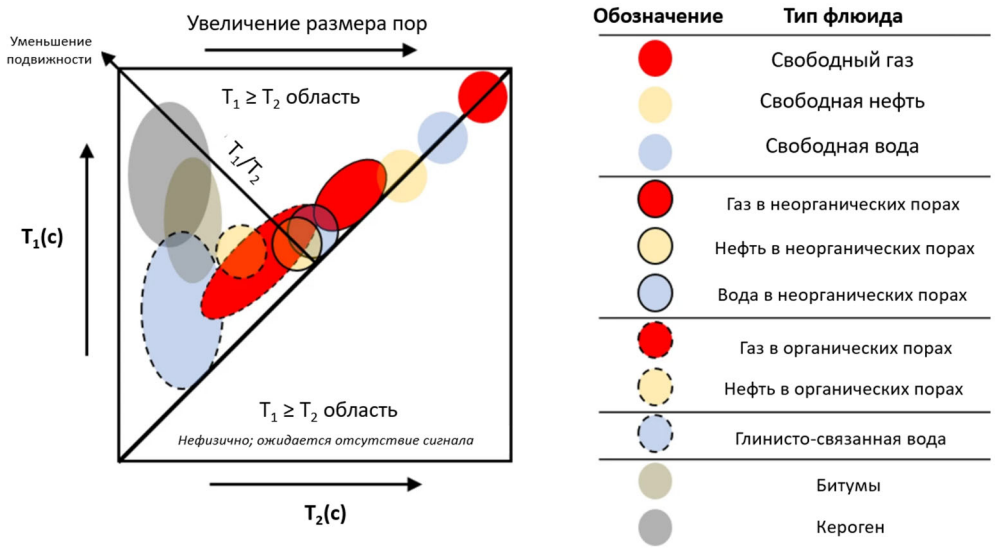


Рис. 2. Карта времен релаксации T_1-T_2 для разных типов флюидов [2]

В настоящей работе измерения проводились на ЯМР-анализаторе «Micro12-040V» (производство Niumag, Китай) с индукцией магнитного поля 0,28 Тл, рабочей частотой 12 МГц и расстоянием между эхо-импульсами 0,1 мс, температура магнитной системы 32°C.

В работе использовались следующие образцы:

- Образцы угля диаметром 30 мм и длиной от 38 до 43 мм.
- Насыпные образцы, состоящие из шариков спеченной сажи с размерами частиц порядка 2 мм. Образцы помещались в ЯМР прибор в специальной ячейке, которая могла выдержать дополнительное давление для донасыщения метаном.
- Пробы нефти разной вязкости, находящиеся в свободном объеме.

Результаты и обсуждение

Карты T_1-T_2 позволяют определить тип флюида в том случае, когда по спектру T_2 это сделать невозможно. Рассмотрим такой случай на примере образца угля. Спектр времен T_2 (рис. 3) имеет одномодальный вид, что свидетельствует о насыщении образца флюидом одного типа, например, глинисто-связанной водой. Но при совместной интерпретации времен T_1 и T_2 становится ясно, что образец насыщен не только водой, так как спектр времен T_1 имеет бимодальный вид (рис. 4). Высокоамплитудный пик соответствует воде, второй пик, согласно источникам, соответствует битумам. Низкоамплитудный пик на значениях T_2 от 0.01 до 0.1 является артефактом математической обработки. Использование карт T_1-T_2 позволило в данном случае определить типы флюидов, а при последующей обработке можно оценить и соотношение насыщающих флюидов.

Рис. 3. Спектр времен поперечной релаксации T_2 образца угля

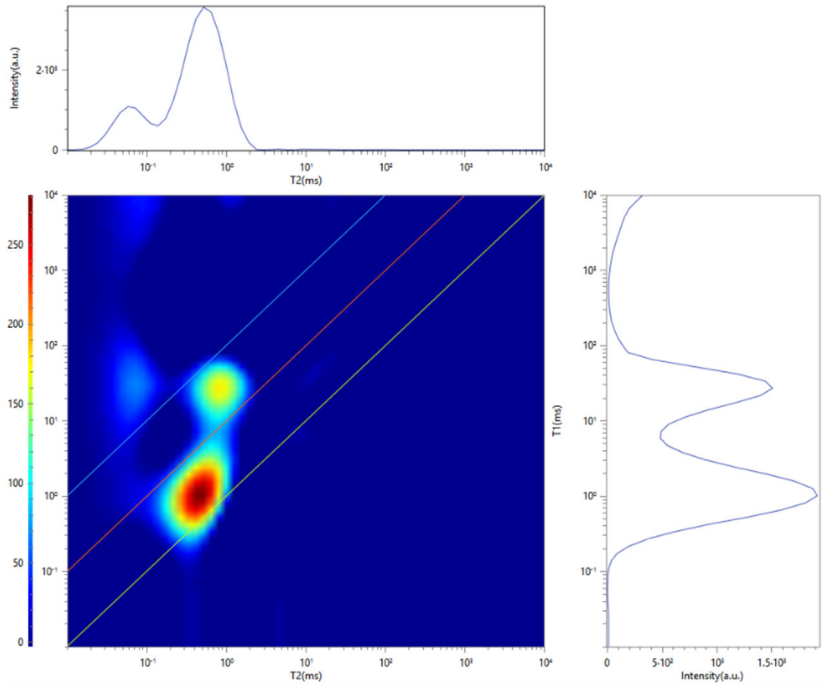


Рис. 4. Карта времен релаксации T_1-T_2 образца угля

На рис. 5 представлены спектры T_2 насыпного образца, состоящего из шариков спеченной сажи. В случае А образец насыщен только водой. В случае Б этот образец находится под давлением и донасыщен метаном. Для создания высокого давления метана использовалась измерительная ячейка из немагнитного материала (высокопрочный пластик PEEK), содержащего небольшое количество атомов водорода, создающих ЯМР-отклик при измерениях. Рассматривая спектр Б, невозможно точно определить, не зная априорной информации, что насыщение смешанное. А это в свою очередь может повлечь ошибки при интерпретации результатов.

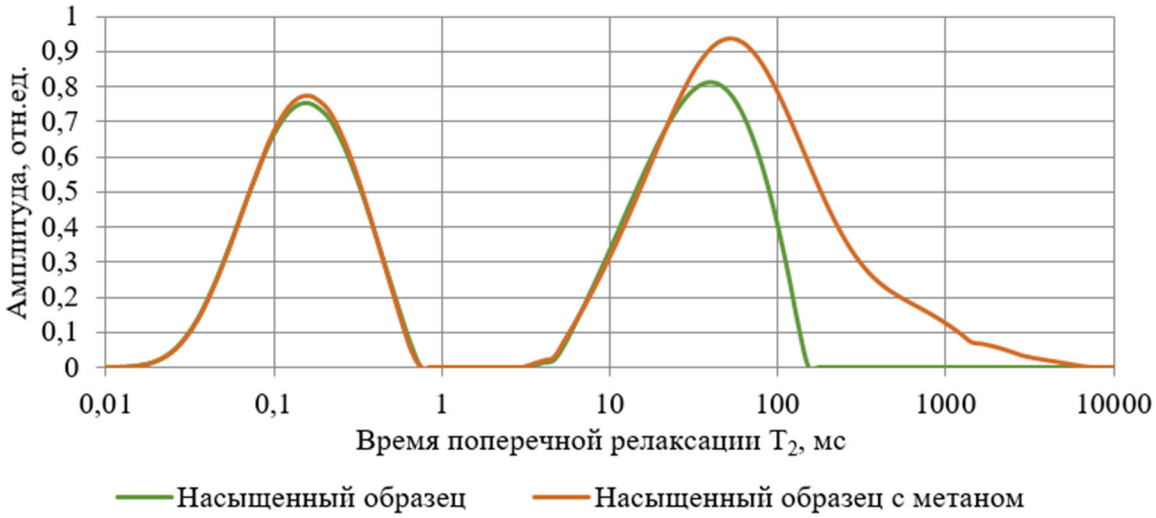


Рис. 5. Спектры времен поперечной релаксации T_2 для образца спеченной сажи А) насыщенного водой; Б) насыщенного водой и метаном

Анализ карт времен релаксации T_1-T_2 (рис 6) позволяет определить, что образец содержит в поровом пространстве два флюида – газ и воду. При этом времена релаксации T_1 и T_2 совпадают с рассматриваемыми временами в работе [2]. На рис. 6А и 6Б высокоамплитудное пятно, соответствующее малым временам поперечной релаксации, является сигналом от измерительной ячейки, а не сигналом от глинисто-связанной воды. Это было подтверждено с помощью карты T_1-T_2, полученной от не содержащей образец ячейки. Высокоамплитудное пятно сохранялось и было расположено в том же месте – времена $T_1 \sim 700$, $T_2 \sim 0.1$, отношение $T_1/T_2 \sim 7000$.

На рис. 6А представлена карта для насыщенного водой образца. На рис. 6Б после донасыщения газом над пиком воды появляется дополнительный пик, который соответствует временам релаксации метана. Как и в случае образца угля, карты T_1-T_2 позволили определить смешанное насыщение, в отличие от спектров времен поперечной релаксации.

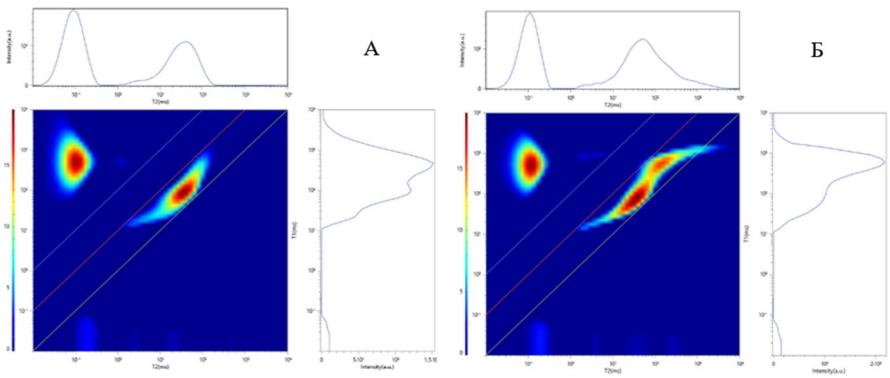


Рис. 6. Карты времен релаксации T_1-T_2 для образца спеченной сажи А) насыщенного водой; Б) насыщенного водой и с метаном

В связи с тем, что времена T_1 и T_2 зависят от вязкости флюида по-разному [1, 4], по картам релаксации T_1-T_2 можно качественно оценить вязкость нефти. Так на рис. 7 представлены результаты ЯМР измерений тяжелой (А) и легкой (Б) нефтей в свободном объеме. Видно, что в первом случае времена релаксации существенно меньше, чем во втором.

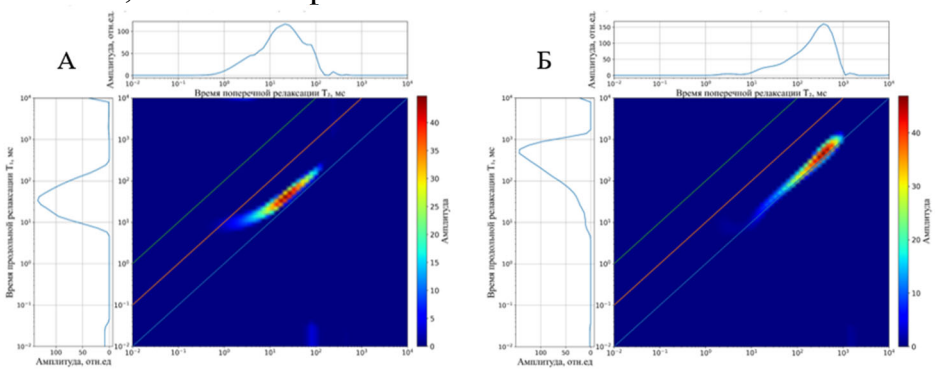


Рис. 7. Карты времен T_1-T_2 для А) тяжелой нефти; Б) легкой нефти

Заключение

Таким образом, совместный анализ времен продольной и поперечной релаксации T_1-T_2 позволяет с большей точностью решать задачи по определению типа насыщающего флюида, так как интерпретация только спектра времен поперечной релаксации T_2 не позволяет этого сделать в полной мере в виду наложения спектров T_2 при смешанном насыщении. Помимо этого, интерпретация карт времен продольной и поперечной релаксации позволяет качественно оценить вязкость образцов флюида, находящегося в свободном объеме.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00157, https://rscf.ru/project/25-23-00157/.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coates G.R., Xiao L.Z., Prammer M.G. NMR Logging Principles and Applications. – Houston: Gulf Publishing Company, 1999 – 342 p
2. Elsayed M., Isah A., Hiba M., Hassan A., Al-Garadi K., Mahmoud M., El-Husseiny A., Radwan A. A review on the applications of nuclear magnetic resonance (NMR) in the oil and gas industry: laboratory and field-scale measurements // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology – 2022. – Vol. 12, – pp. 2747–2784.
3. Ge X., Fan Y., Chen H., Deng S., Cao Y., Zahid M. A. Probing the influential factors of NMR T1 – T2 spectra in the characterization of the kerogen by numerical simulation // Journal of Magnetic Resonance. – Vol. 260. – 2015. – pp. 54–66.
4. Куприянов П.А., Чернышёв Ю.С., Чижик В.И. Количественный анализ на основе ядерного магнитного резонанса: учеб.-метод. Пособие – СПб.: Изд. С.-Петерб. ун-та., 2021. – 54 с.

© Т. А. Янушенко, Н. А. Голиков, Л. А. Рыбалкин, В. Г. Смирнов, М. Й. Шумскайте, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-3-215-218

С. В. Яскевич[1]✉, И. В. Бойчук[2], А. А. Дучков[1], П. А. Дергач[1], Д. Р. Харасов[3]

Первые испытания аппаратуры DAS на полигоне Ключи

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] ООО Т8, Москва, Россия
e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе приводятся примеры сейсмограмм – полученных при помощи оптоволоконного кабеля на полигоне Ключи. Для Российской оптоволоконной системы продемонстрирована возможность записи кондиционных сейсмических материалов при профильных наблюдениях. Кабель, установленный без навивки, позволяет уверенно регистрировать поверхностные волны, что делает его перспективным с точки зрения методов обработки типа MASW. Кабель с навивкой по вертикальному борту траншеи глубиной 1м делает возможным регистрацию рефрагированной волны, что может рассматриваться как полезная информация для восстановления разреза методами активной томографии и кинематической инверсии

Ключевые слова: DAS, интеррогатор, оптоволокно, сейсмические приборы, запись, экспериментальная установка, акустика

S. N. Ponasenko[1,2]✉, S. V. Yaskevich[1,2], A. A. Duchkov[1,2], R. A. Bakeev[3], Y. P. Stefanov[1,2,3]

First tests of DAS equipment at the Klyuchi

[1] Institute Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
T8, Moscow, Russia
e-mail: PonasenkoSN@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents examples of seismograms obtained using a fiber-optic cable at the Klyuchi test site. The Russian fiber-optic system has demonstrated the ability to record quality seismic data during profile observations. A cable installed without winding allows reliable recording of surface waves, which makes it promising in terms of MASW-type processing methods. A cable with winding along the vertical side of a 1 m deep trench makes it possible to record a refracted wave, which can be considered useful information for reconstructing a section using active tomography and kinematic inversion methods.

Keywords: microseismic monitoring, seismic moment tensor inversion, geomechanical modeling, CO2 sequestration

Введение

Сейсмические наблюдения при помощи аппаратуры DAS начали набирать популярность в начале – середине 2010-х. Демонстрация возможности записи упругих колебаний посредством регистрации растяжения оптоволоконного кабеля [Mateeva et al., 2014] вызвала неподдельный интерес в геофизическом сообществе. В России долгое время не было разработок – аналогичных современным

коммерческим предложениям. На рынке появлялись разработки, называющиеся DAS – амплитудный DAS, которые по сути чем-то похожи на наиболее ранние разработки в области оптоволоконной сенсорики, подходят для задач охраны периметров, но к современным DAS системам, которые применимы к сейсмологии или сейсморазведке такие приборы отношения не имеют. В последние годы в России было реализовано несколько приборов типа DAS и нами было осуществлено тестирование регистратора компании ООО Т8 «Агидель» на полигоне Ключи.

Описание полевого эксперимента

На полигоне Ключи был реализован профиль поверхностных наблюдений длиной 150 метров. Верхняя часть разреза состоит из неоген-четвертичных рыхлых отложений, под которыми залегает сложный палеозойский разрез, представленный сланцами с высокими скоростями распространения волн. Оптоволоконный кабель был проложен в траншее глубиной 1 метр и шириной 20-30 см, выкопанной траншеекопателем (Рис. 1). Дно траншеи перед укладкой кабеля очистили и утрамбовали, затем засыпали траншею извлеченным грунтом. На южной половине профиля была применена более сложная укладка: один кабель по дну, другой – по боковой стенке (Рис. 2). Однако кабель, уложенный кольцами по дну, был поврежден и не использовался. Для дублирования оптоволоконных измерений использовались трехкомпонентные сейсмоприемники, расставленные с шагом 2 метра.

Рис. 1. Траншея для укладки оптоволоконного кабеля –вид до закапывания (слева), глубина около метра, ширина 20-30 см. Обозначение расположения профиля на спутниковом снимке (справа).

Рис.2. Схема укладки оптоволоконного кабеля в части траншеи. Кольцами на дне уложено оптоволокно, которое было перебито в процессе установки, под ним прямой оптоволоконный кабель.

Запись волнового поля

Как результат работ основную ценность представляет зарегистрированная запись оптоволоконной системой, демонстрация которой составляет основную задачу данной работы. Сама запись, пересчитанная в шаг по ПП 2м. представлена на Рис.3. Пересчет был необходим, так как оптоволоконная система регистрации позволяет получать данные вдоль длины оптоволоконного кабеля. При установке последнего отмечались 10-метровые участки – можно было потом получить реальные положения оптоволоконных «сейсмоприемников». Сейсмическая запись, представленная на Рис.3 содержит: запись поверхностных волн, которая занимает большую часть сейсмограммы, эти волны имеют характерную для поверхностных волн скорость; в левой части (отделена на рисунке пунктирной линией) в первых вступлениях явно идентифицируется фаза преломленной волны, которая исчезает после окончания «навивки» оптоволоконного кабеля. Полноценная отработка профиля с такой системой наблюдений методом преломленных волн не представляется возможной, так как они наблюдаются только на его половине (с навивкой), но представленный результат – одна из первых убедительных демонстраций работы Российской оптоволоконной системы наблюдений.

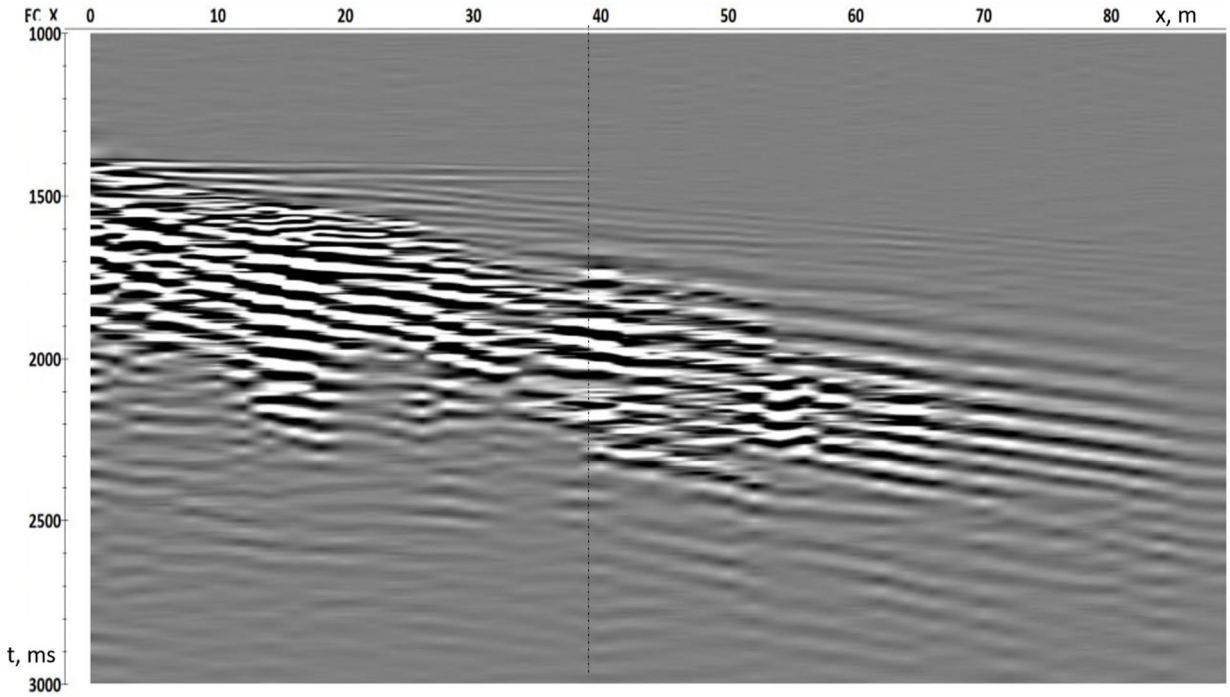


Рис.3. Сейсмограмма для ПВ типа центр расширения на окончании профиля (ближний к области намотки кабеля). Вертикальная пунктирная линия

Заключение

Для Российской оптоволоконной системы продемонстрирована возможность записи кондиционных сейсмических материалов при профильных наблюдениях. Кабель, установленный без навивки, позволяет уверенно регистрировать поверхностные волны, что делает его перспективным с точки зрения методов обработки типа MASW. Кабель с навивкой по вертикальному борту траншеи глубиной 1м делает возможным регистрацию рефрагированной волны, что может рассматриваться как полезная информация для восстановления разреза методами активной томографии и кинематической инверсии.

Благодарности

Авторы исследования выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации по гранту 075-15-2003-588.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mateeva A. et al. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling //Geophysical Prospecting. – 2014. – Т. 62. – №. 4-Vertical Seismic Profiling and Microseismicity Frontiers. – С. 679-692.

© С. В. Яскевич, И. В. Бойчук, А. А. Дучков, П. А. Дергач, Д. Р. Харасов, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. А. В. Тимохин, И. В. Коровников. Нижнепалеозойские трилобиты внутреннего шельфа Сибирской платформы 3
2. А. М. Фомин, Е. В. Белова, С. А. Моисеев. Анализ нефтегазоносности и результатов испытаний межсолевых горизонтов кембрия на территории Ангаро-Ленской НГО 11
3. Я. В. Фомина, Д. А. Новиков, И. И. Юрчик. Перспективы реализации проектов CCS в меловых комплексах Тазовско-Пурского артезианского бассейна..... 19
4. М. Е. Шабурова. Прогноз развития трещиноватости в карбонатных коллекторах с учётом особенностей тектонического развития региона 25
5. П. А. Глазырин, Г. Г. Шемин, В. В. Сапьяник, Е. В. Деев. Фациальное районирование нижнеюрских нефтегазоносных отложений сибирского сектора Арктики..... 33
6. С. А. Язикова. Оценка плотности эффективного палеотеплового потока северо-восточных районов Западно-Сибирского бассейна..... 42
7. Н. И. Яндола. Мышьяк в природных водах восточной части Новосибирской области..... 47
8. С. П. Мишенина, С. Б. Бортникова, Ю. А. Манштейн, Г. Л. Панин. Комплексные геофизико-геохимические исследования термального поля кальдеры вулкана Узон, Камчатка..... 53
9. К. С. Непеина, Е. А. Баталева. Первичные оценки сингулярных спектров компонент магнитотеллурического зондирования 1D вейвлет-лидером ... 60
10. Г. В. Нестерова, К. В. Сухорукова, И. В. Суродина. Построение электрогидродинамических моделей ачимовских коллекторов Сургутского свода по данным скважинных и керновых измерений..... 68
11. В. В. Оленченко, А. А. Заплавнова. Объёмная геоэлектрическая модель канала питания гидрогеогенной наледи 73
12. Е. В. Поспеева, М. В. Панарина. Геоэлектрическое строение Ленской ветви Предверхоянского краевого прогиба по магнитотеллурическим данным..... 80
13. В. В. Плоткин, Е. В. Поспеева, В. В. Потапов, А. А. Заплавнова. Оценки достоверности результатов магнитотеллурического зондирования..... 88
14. С. Н. Понасенко, С. В. Яскевич, А. А. Дучков, Р. А. Бакеев, Ю. П. Стефанов. Оценка сейсмичности инициации разлома при закачке CO_2 с помощью геомеханического моделирования 94
15. М. И. Протасов. Объектно-ориентированный алгоритм выделения рассеянных волн в сейсмических данных 99
16. А. С. Сердюков, В. В. Сказка, Н. Е. Бирючков. Моделирование распространения поверхностных сейсмических волн в частотной области 103

17. А. С. Сердюков, А. В Азаров, А. В. Яблоков, М. Н. Корми, К. Б. Акулов. Применение многоканального анализа поверхностных сейсмических волн для исследования железнодорожного тоннеля 110
18. Е. Б. Сибиряков. Построение гладких ядер для решения краевых задач смешанного типа для уравнения Гельмгольца 115
19. П. А. Соколов, А. К. Манштейн. Промежуточные результаты разработки электромагнитного малоглубинного аппаратурно-программного комплекса с цифровым способом компенсации прямого поля 124
20. В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер. О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины 132
21. Т. А. Ступина, Е. В. Цибизова, Н. А. Бушенкова. Азимутальная анизотропия в мантии по данным анализа расщепления SKS-волн в районе вулкана Таупо 140
22. И. В. Суродина, К. В. Сухорукова. Трёхмерное конечно-разностное моделирование микрозондов без фокусировки тока 147
23. К. В. Федин. , О. К. Марилов, А. Л. Лукьянова. Применение пассивного сейсмического метода стоячих волн для определения технического состояния насыпной плотины в зоне вечной мерзлоты 154
24. К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, К. Ю. Мелехин. Разработка неразрушающего акустического метода контроля для выявления неоднородных включений в стрелочных переводах 162
25. К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, А. А. Гриценко, П. С. Осипова. Определение технического состояния Ново-Афонского монастыря в Абхазии пассивным микросейсмическим методом на основе выделения стоячих волн в комплексе с методом электротомографии 168
26. В. В. Федотов, М. Н. Балдин, В. М. Грузнов. Ввод пробы алканов с объемного сорбента в газовый хроматограф для геохимической съемки 176
27. А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов, М. Ю. Кропачева, И. В. Макарова. Вклад «горячих» частиц во вторичную миграцию 137Cs в аллювиальных отложениях реки Енисей 182
28. Н. Н. Неведрова, А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко, А. М. Санчаа, С. М. Бабушкин. Геоэлектрические модели разломных структур в юго-восточной части Горловской впадины по данным электротомографии 187
29. А. Н. Шеин, А. И. Синицкий, А. А. Башкова. Проблемы и перспективы использования термостабилизации оснований зданий в г. Салехард при современных климатических трендах 193
30. А. Д. Штейн, М. И. Протасов. Структурно-ориентированное сглаживание для расчёта частотно-зависимой скоростной модели 201
31. Т. А. Янушенко, Н. А. Голиков, Л. А. Рыбалкин, В. Г. Смирнов, М. Й. Шумскайте. Повышение достоверности определения типа насыщающего флюида на основе анализа двумерных карт времен ядерной релаксации 208
32. С. В. Яскевич, И. В. Бойчук, А. А. Дучков, П. А. Дергач, Д. Р. Харасов. Первые испытания аппаратуры DAS на полигоне Ключи 215

CONTENTS

1. A. V. Timokhin, I. V. Korovnikov. Lower Paleozoic trilobites of the inner shelf of the Siberian Platform 3
2. A. M. Fomin, E. V. Belova, S. A. Moiseev. Analysis of oil and gas potential and test results of intersalt horizons of the cambrian within the Angara-Lena oil and gas area 11
3. Y. V. Fomina, D. A. Novikov, I. I. Yurchik. Prospects for the implementation of CCS projects in the Cretaceous complexes of the Taz-Pur artesian basin 19
4. M. E. Shaburova. Prediction of carbonate reservoirs fracturing based on tectonic development features of the region 25
5. P. A. Glazyrin, G. G. Shemin, V. V. Sapyanik, E. V. Deev, Facies zoning of the lower jurassic oil and gas deposits of the Siberian sector of the Arctic 33
6. S. A. Yazikova. Estimation of the effective paleo heat flow density of the northern areas of the West Siberian basin 42
7. N. I. Yandola. Arsenic in natural waters of the eastern part of the Novosibirsk Region 47
8. S. P. Mishenina, S. B. Bortnikova, Yu. A. Manshtein, G. L. Panin. Complex geophysical and geochemical studies of the thermal fieldat the Uzon volcano caldera, Kamchatka 53
9. K. S. Nepeina, E. A. Bataleva. Preliminary estimation of singular spectra for components of magnetotelluric soundings with 1D wavelet-leader 60
10. G. V. Nesterova, K. V. Sukhorukova, I. V. Surodiva. Ectrohydrodynamic models of Achimov reservoirs of Surgut arch based on borehole and core measurements 68
11. V. V. Olenchenko, A. A. Zaplavnova. The feeding channel 3D geoelectric model of a hydrogeogenic icing 73
12. E. V. Pospeeva, M. V. Panarina. Geoelectric structure of the Lena branch of the Predverkhoyan marginal trough according to magnetotelluric data 80
13. V. V. Plotkin, E. V. Pospeeva, V. V. Potapov, A. A. Zaplavnova. Estimates of Reliability of Magnetotelluric Sounding Results 88
14. S. N. Ponasenko, S. V. Yaskevich, A. A. Duchkov, R. A. Bakeev, Y. P. Stefanov. Assessment of seismicity associated with fault activation due to CO_2 injection using geomechanical modeling 94
15. M. I. Protasov. Object-oriented algorithm for the extraction of diffracted/scattered waves in the data 99
16. A. S. Serdyukov, V. V. Skazka, N. E. Biryuchkov. Modeling of surface seismic wave propagation in the frequency domain 103
17. A. S. Serdyukov, A. V. Azarov, A. V. Yablokov, M. N. Kormin, K. B. Akulov. Application of multi-channel analysis of surface seismic waves for railway tunnel research 110

18. E. B. Sibiriakov. The using of boundary element method with smooth kernels for the elastic stationary oscillations boundary value problems..... 115
19. P. A. Sokolov, A. K. Manstein. Interim results of the development of an electromagnetic small-depth hardware and software complex with a digital direct field compensation method 124
20. V. M. Solovyev, V. S. Seleznev, A. F. Emanov, A. A. Emanov, S. A. Elagin, A. E. Shenmayer1On the duration of seasonal environmental changes under a powerful vibration source and vibration monitoring of coal mining sections of the Gorlovka depression 132
21. T. A. Stupina, E. V. Cibizova, N. A. Bushenkova. Azimuthal anisotropy in the mantle from SKS-wave splitting analysis in the Taupo volcano area 140
22. I. V. Surodina, K. V. Suhorukova. Three-dimensional finite-difference simulation of microprobes without current focusing 147
23. K. V. Fedin, O. K. Marilov, A. L. Lukyanova. Integration of the passive seismic standing wave method and the emission tomography method to determine the technical condition of an embankment dam in the permafrost zone..... 154
24. K. V. Fedin, A. L. Lukyanova, K. Y. Melekhin. Development of a non-destructive acoustic control method for detecting inhomogeneous inclusions in railroad switches..... 162
25. K. V. Fedin, A. L. Lukyanova, A. A. Gritsenko, P. S. Osipova. New Athos Monastery (Abkhazia) technical condition assessment using passive microseismic method based of standing waves extraction with combination of electrical resistivity tomography method..... 168
26. V. V. Fedotov, M. N. Baldin, V. M. Gruznov. The introduction of an alkane sample from a volumetric sorbent into a gas chromatograph for geochemical survey 176
27. A. V. Chuguevsky, M. S. Melgunov, M. Yu. Kropacheva, I. V. Makarova. Contribution of «hot» particles to secondary migration of 137Cs in alluvial sediments of the Enisey River..... 182
28. N. N. Nevedrova, A. E. Shalaginov, I. O. Shaparenko, A. M. Sanchaa, S. M. Babushkin. Geoelectric models of fault structures in the south-eastern part of the Gorlovskaya depression based on electrical resistivity tomography data 187
29. A. N. Shein, A. I. Sinitsky, A. A. Bashkova. Problems and prospects of using thermostabilization of building bases in Salekhard under current climatic changes 193
30. A. D. Shtein, M. I. Protasov. Structure-oriented smoothing for frequency-dependent velocity model calculation..... 201
31. T. A. Yanushenko, N. A. Golikov, L. A. Rybalkin, V. G. Smirnov, M. Y. Shumskayte. Improving the reliability of saturating fluid type determination based on the analysis of two-dimensional maps of nuclear relaxation times 208
32. S. N. Ponasenko, S. V. Yaskevich, A. A. Duchkov, R. A. Bakeev, Y. P. Stefanov. First tests of DAS equipment at the Klyuchi 215

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

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»

№ 3

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Я. А. Лесных*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 20.08.2025. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 12,96. Тираж 34 экз. Заказ 86.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.