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»

№ 2

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. № 2. – 259 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

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

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 553.411.071
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-3-7

К. Д. Гладких[1]✉, Е. А. Кузнецова[2]

Патентный ландшафт технологий извлечения золота из техногенных месторождений

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kristinagladkikh1@gmail.com

Аннотация. Целью исследования является анализ теоретических и методических основ проведения патентного анализа в области извлечения золота из техногенных месторождений. Авторами показано отсутствие единого подхода к трактовке терминов «патентный ландшафт» и «анализ патентной активности». Также выявлены разные подходы к составлению патентного ландшафта. В работе была обоснована важность проведения патентного поиска, а также были выявлены факторы, в наибольшей мере оказывающие влияние на результат. Наряду с этим был сформирован патентный ландшафт для технологического решения, разработанного группой специалистов из ИНГГ СО РАН, который доказал уникальность анализируемой разработки. Была выявлена инновационность разработанной технологии, которая заключается в комплексном подходе. Существующие запатентованные технологии, направлены на извлечение золота определенного типа, они позволяют извлечь золото, залегающее в конкретной форме, при этом оставив часть вещества неизлеченным.

Ключевые слова: патентный ландшафт, золотодобыча, техногенные месторождения, хвостохранилища

K. D. Gladkikh[1]✉, E. A. Kuznetsova[2]

The patent landscape of gold extraction technologies from tailings dumps

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS
e-mail: kristinagladkikh1@gmail.com

Abstract. The purpose of the study is to analyze the theoretical and methodological foundations of patent analysis in the field of gold extraction from man-made deposits. The authors show the lack of a unified approach to the interpretation of the terms "patent landscape" and "analysis of patent activity". Different approaches to the design of the patent landscape have also been identified. The paper proved the importance of conducting a patent search, and also identified the factors that have the greatest impact on the result. Along with this, a patent landscape was formed for a technological solution developed by a group of specialists from INGG SB RAS, which proved the uniqueness of the analyzed solution. The innovativeness of the developed technology was revealed, which consists in an integrated approach. Existing patented technologies are aimed at extracting gold of a certain type, they allow you to extract gold in a specific form, while leaving part of the substance untreated.

Keywords: patent landscape, gold mining, technogenic deposits, tailings ponds

Введение

В условиях современного технологического развития особую актуальность приобретает вопрос защиты интеллектуальной собственности в сфере переработки минерального сырья [1-3]. Особенно это касается технологий извлечения золота из техногенных месторождений, где инновационные решения требуют тщательного патентного анализа.

Благодаря исследованиям в области интеллектуальной собственности, в настоящее время сформировались различные подходы к проведению патентного ландшафта. Данная процедура рассматривается с позиций юридической защиты, технологического аудита, конкурентного анализа и коммерциализации инноваций. Разные специалисты вкладывают в это понятие свой смысл, что приводит к многообразию методик проведения патентных исследований.

Понятие "патентный ландшафт" и "анализ патентной активности" часто рассматриваются экспертами как идентичные. Однако некоторые исследователи подчеркивают существенные различия между этими понятиями. В частности, патентный ландшафт включает более широкий спектр аналитических инструментов, позволяющих не только оценить текущее состояние технологий, но и спрогнозировать их [4,5].

Проведение патентного ландшафта становится особенно важным по нескольким причинам. Во-первых, он позволяет определить уровень патентной защиты существующих технологий. Во-вторых, дает возможность выявить свободные ниши для новых разработок. В-третьих, помогает избежать нарушения чужих патентных прав при коммерциализации собственных технологических решений.

Методы и материалы

Патентный анализ технологий извлечения золота из техногенных месторождений может быть осуществлен с различных методологических позиций. В современной исследовательской практике для проведения комплексного патентного анализа наиболее часто используются формально-статистический, содержательно-аналитический и прогностический подходы [6].

Для разработчиков новых технологий принципиальное значение имеют вопросы полноты и достоверности патентного поиска. Именно поэтому перспективы коммерциализации, возможности патентования и конкурентные преимущества технологического решения напрямую зависят от таких параметров анализа, как:

–глубина ретроспективы патентного поиска
–полнота выявления аналогов и прототипов
–точность определения ключевых слов
–достоверность оценки патентной активности конкурентов
–достоверность источников поиска информации

Результаты и обсуждение

Основой анализа в данной работе является разработка группы специалистов Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ СО

РАН), представляющая собой комплекс технологических решений для переработки золотосодержащего сырья из техногенных месторождений с учётом геолого-геохимических особенностей его залегания. Технологическое решение находится на стадии готовности, планируется последующее оформление патента и коммерциализация.

Суть технологического решения заключается в определении цепочки извлечения золота из техногенных месторождений при учете форм залегания золота, а также типов примесей, которые содержит драгоценный металл.

Согласно ГК РФ, необходимыми условиями патентоспособности изобретения являются новизна, изобретательский уровень и промышленная применимость [7]. В рамках данной работы патентные исследования производились на базе Федерального института промышленной собственности (ФИПС) по ключевым словам [8]. В качестве ключевых слов были выбраны следующие: «Драгоценные металлы из отходов», «Добыча золота из отходов», «Утилизация отходов золотодобычи», «Техногенные месторождения», «Золото из техногенных месторождений», «Цепочка по извлечению золота из хвостохранилищ». Результаты проведенного патентного поиска представлены в таблице 1.

В ходе патентного анализа было выявлено, что цепочки по извлечению золота из техногенных месторождений создаются авторами для разработки хвостохранилищ, однако их достаточно мало и они не нарушают условия новизны.

Инновационность разработанной специалистами схемы по добыче золота из техногенных месторождений заключается в комплексном подходе. В настоящее время технологии, внедряемые игроками на рынке, направлены на извлечение золота определенного типа. Эти технологии применимы не ко всем месторождениям, они позволяют извлечь золото, залегающее в конкретной форме, при этом оставив часть вещества неизлеченным. Разработанное специалистами технологическое решение позволит добывать золото разных типов, не используя при этом ранее неизвестных, сильно дорогостоящих аппаратов и технологий. Комбинация и адаптация уже имеющихся технологий к использованию их на техногенных месторождениях представляет собой инновационный подход, который ранее не применялся в таком формате.

Таблица 1

Результаты патентного анализа

Вид и номер документа	**Наименование объекта интеллектуальной собственности**	**Заявитель (правообладатель)**	**Дата публикации**
2763829, прекратил действие, но может быть восстановлен	Линия переработки золотосодержащего сырья техногенных месторождений	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Забайкальский государственный университет" (ФГБОУ ВО "ЗабГУ") (RU)	11.01.2022
2020129963, прекратил действие,	Способ извлечения благородных металлов и	Вершинин Иван Иванович (RU)	10.09.2020

но может быть восстановлен	установка "Стевер" для его реализации		
2022129644, может прекратить действие	Способ извлечения ценного компонента методом комбинирования кучного и скважинного выщелачивания	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН) (RU)	15.11.2022
2020138200, может прекратить свое действие	Способ комплексного обогащения россыпей и/или техногенных образований благородных металлов и линия комплексного обогащения россыпей и/или техногенных образований благородных металлов	Курганов Капитон Петрович (RU)	30.09.2021
2021115033, действует	Центробежный обогатительно-классифицирующий аппарат	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИХ ДВО РАН) (RU)	25.05.2021
2283883, нет возможности восстановления	Способ рудоподготовки техногенных отходов к кучному выщелачиванию золота	Читинский государственный университет (ЧитГУ) (RU)	20.09.2006
2457330, нет возможности восстановления	Способ повторной разработки россыпных месторождений	Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики Дальневосточного отделения РАН (ИПМ ДВО РАН) (RU)	27.07.2012
2659910, действует	Способ извлечения благородных металлов из россыпных и техногенных месторождений полезных ископаемых (варианты) и поточная линия для его осуществления	Общество с ограниченной ответственностью Производственная Компания "Спирит" (RU)	04.07.2018

Заключение

Таким образом, при проведении анализа теоретических и методических основ формирования патентного ландшафта в области извлечения золота из техногенных месторождений авторами показано отсутствие единого подхода к трактовке терминов «патентный ландшафт» и «анализ патентной активности». Также выявлены разные подходы к составлению патентного ландшафта. Помимо этого, авторами сформирован патентный ландшафт для технологического решения, разработанного группой специалистов из ИНГГ СО РАН, на основе которого доказана уникальность анализируемой разработки. В качестве преимущества рассматриваемой инновационной разработки был выделен комплексный подход. Было выявлено, что недостатком существующих запатентованных технологий

является направленность на извлечение золота определенного типа, которое залегает в конкретной форме. В таком случае часть вещества остается не извлечённым.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках базового проекта НИР лаборатории 1105 ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Пак В.А., Удут В.Н., Довгань А.В., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Гелий: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 7. – С. 52-55.

2. Эдер Л.В., Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В. Состояние и перспективы развития нефтегазового комплекса // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2017. – № 3. – С. 41-49.

3. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Концепция формирования новых центров нефтегазового комплекса на востоке России // Новосибирск, 2010.

4. Попов Н. Составление и анализ патентных ландшафтов //Патенты и лицензии. Интеллектуальные права. – 2016. – №. 12. – С. 39-46.

5. Николаев А. С. Управление инновационной деятельностью предприятия с помощью методов патентной аналитики и патентных ландшафтов //Экономика. Право. Инновации. – 2019. – №. 2. – С. 49-55.

6. Михайлова Е. С., Тимощук И. В., Горелкина А. К. Методология построения патентных ландшафтов на примере очистки сточных вод угледобывающих предприятий //Уголь. – 2023. – №. 10 (1172). – С. 28-35.

7. Российская Федерация. Федеральный закон " Условия патентоспособности изобретения" от 18.12.2006 № 230-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64629/4b30fa7ca4e5733597a1bc9b2b12351cc5c430e6/?ysclid=m9v5wwbo69226828 (дата обращения: 24.04.2025).

8. Федеральный институт промышленной собственности: офиц. сайт. URL: https://www1.fips.ru/?ysclid=m9v61awgwj448524477 (дата обращения: 24.04.2025).

© К. Д. Гладких, Е. А. Кузнецова, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-8-14

А. А. Долганов[1,2]✉, В. Ю. Немов[1,2]

Факторный анализ мирового спроса на нефть

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

Аннотация. В исследование проведен анализ прогнозов спроса на нефть, опубликованных мировыми организациями: EIA, IEA, BP и OPEC. Центральная проблема – в различиях между этими прогнозами, вызванных методологией и лежащими в их основе предположениями. Цель работы – обзор и сравнение прогнозов, выявление факторов, определяющих расхождения, и разработка рекомендаций для России. Для достижения этой цели использовались методы анализа и сопоставления данных из официальных отчетов организаций. Результаты исследования демонстрируют, что различия в прогнозах обусловлены не только экономическими факторами, но и политической конъюнктурой, экономическими интересами и подходами к вопросам климатической политики. Были выделены два кластера прогнозов: оптимистичные оценки EIA и OPEC, предполагающие стабильный спрос на нефть, и консервативные сценарии IEA и BP, предсказывающие значительное сокращение потребления нефти в связи с переходом к чистым источникам энергии. Российской Федерации важно учитывать эти разногласия при разработке своей энергетической стратегии и адаптации к изменениям на мировом рынке.

Ключевые слова: мировой нефтяной рынок, прогноз спроса, сценарии развития рынка

A. A. Dolganov[1]✉, V. Yu. Nemov[2]

Factor analysis of global oil demand

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.dolganov@g.nsu.ru

Abstract. The study analyzes oil demand forecasts published by global organizations: EIA, IEA, BP and OPEC. The central problem is the differences between these forecasts caused by the methodology and underlying assumptions. The aim of the paper is to review and compare the forecasts, identify the factors driving the differences, and develop recommendations for Russia. To achieve this goal, the methods of analysis and comparison of data from official reports of organizations were used. The results of the study demonstrate that the differences in projections are determined not only by economic factors, but also by the political conjuncture, economic interests and approaches to climate policy issues. Two clusters of projections were identified: optimistic estimates by EIA and OPEC, assuming stable oil demand, and conservative scenarios by IEA and BP, predicting a significant reduction in oil consumption due to the transition to clean energy sources. It is important for the Russian Federation to take these differences into account when developing its energy strategy and adapting to changes in the global market.

Keywords: global oil market, demand forecast, market development scenarios

Введение

Мировой рынок нефти – важнейший элемент глобальной экономики, влияющий на политику, бизнес и финансовые институты [1-3]. Прогнозирование потребления нефти важно для правительств, международных организаций и компаний, стремящихся выработать стратегические решения в условиях меняющейся глобальной экономики. Прогнозы, публикуемые такими организациями, как EIA, IEA, BP и OPEC, являются важной основой для анализа текущих тенденций и оценки возможных путей развития мирового рынка нефти.

Однако существует нерешенная проблема: несоответствие прогнозов, предоставляемых различными аналитическими агентствами, которое обусловлено различными допущениями, лежащими в основе прогнозов. В настоящее время не существует единой методики прогнозирования мирового спроса на нефть, что затрудняет создание согласованной стратегии добычи и потребления углеводородного сырья.

Цель исследования заключается в анализе прогнозов спроса, предложенных EIA, IEA, BP и OPEC. В рамках работы предполагается решить следующие задачи: провести обзор существующих прогнозов, определить причины их расхождений и, на основе этого, сформулировать рекомендации для России.

Теоретическая ценность работы заключается в понимании факторов, влияющих на формирование прогнозов спроса. Практическая значимость состоит в возможности применения полученных выводов для разработки стратегий в сфере энергетической политики и экономического планирования.

Методы и материалы

Для получения результатов исследования использовались методы анализа и сравнения данных, полученных с официальных сайтов EIA, IEA, BP и OPEC.

Результаты и обсуждение

Влияние нефтяного рынка на мировую экономику трудно переоценить. Он определяет финансовые потоки, влияет на политические решения и напрямую воздействует на экономическое благосостояние стран-производителей. Учитывая, что спрос является основной движущей силой этого рынка, точные прогнозы спроса на нефть необходимы для принятия обоснованных решений на всех уровнях. Многие организации, включая EIA, IEA, BP и OPEC, занимаются прогнозированием спроса и дают свою оценку относительно развития будущих событий на этом рынке, ниже мы изучим их прогнозы, выявим ключевые факторы, лежащие в их основе, и проанализируем, как различные методологии и цели приводят к разным сценариям развития событий.

Управление энергетической информацией США (EIA) представляет несколько сценариев развития мирового энергетического рынка (рис. 1), основанных на сочетаниях факторов, таких как экономический рост, развитие технологий с нулевыми выбросами углерода и изменения в энергетической политике. В базовом сценарии предполагается, что все вышеперечисленные факторы сохраняют свою текущую динамику на весь прогнозируемый период. Как результат

потребление нефти в этом сценарии вырастет на 20% до 121 млн баррелей в сутки к 2050 году. В альтернативных сценариях высокого и низкого экономического роста (High and Low Economic Growth cases), демонстрирующих зависимость между потреблением нефти и темпами роста ВВП, предполагается, что экономическое процветание способствует росту потребности в энергии, таким образом, в случае высокого экономического роста глобальный спрос на нефть вырастет к 2050 году на 40% до 140 млн баррелей в сутки, в то время как в сценарии с низким экономическим ростом потребление нефти увеличится на 4,5% и составит 106 млн баррелей в сутки [2]. Организация также рассматривает влияние стоимости технологий с нулевыми выбросами углерода на нефтяной спрос в различных сценариях, предполагая высокие или низкие затраты (High and Low Zero-Carbon Technology Cost cases) В случае высоких затрат капитальные расходы остаются на уровне 2022 года на протяжении всего прогнозного периода, в то время как в сценарии с низкими затратами они снижаются на 40% к 2050 году [2]. Однако в обоих сценариях спрос остаётся аналогичным базовому. Причины этого не раскрываются, однако можно предположить, что существует ряд факторов, которые нейтрализуют эффект от изменения затрат на технологии.

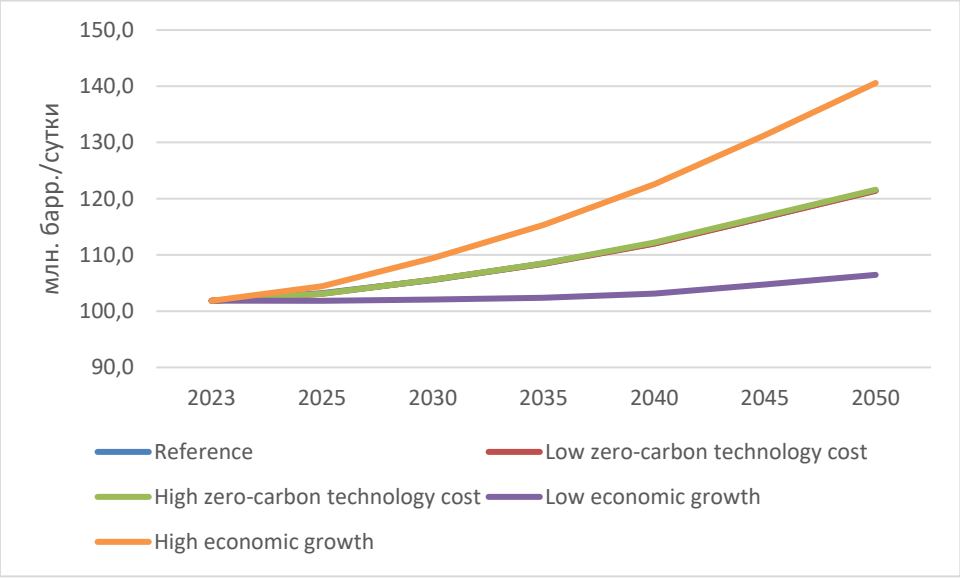


Рис. 1. Прогноз спроса на нефть, EIA

Международное энергетическое агентство (IEA) представляет три основных сценария: STEPS (Stated Policies), APS (Announced Pledge) и NZE (Net Zero Emissions by 2050), которые отражают различные уровни амбициозности в отношении снижения выбросов и перехода к чистым источникам энергии (рис. 2). Сценарий STEPS – основа для оценки текущих политических тенденций, предполагающая реализацию существующих и разрабатываемых мер на уровне стран и международных организаций, включая обязательства по Парижскому соглаше-

нию, однако их реализация не гарантирует достижения целевых показателей по сокращению выбросов углерода, поэтому переход к чистым источникам происходит медленно, что приводит к стабильному спросу на нефть в ближайшие десятилетия, с постепенным сокращением потребления до 97 мб/д к 2050 году. Сценарий APS строится на официальных заявлениях правительств и международных организаций, этот сценарий более амбициозен, предполагая полную реализацию заявленных целей в установленные сроки. В результате ожидается резкое сокращение спроса на нефть до 54,7 млн баррелей в сутки к 2050 году, преимущественно за счет снижения потребления в развитых странах, где технологии с нулевыми выбросами становятся доступными и экономически выгодными, в развивающихся же странах потребление нефти может оставаться высоким на протяжении более длительного времени [3]. В отличие от предыдущих сценариев, NZE нацелен на полную трансформацию глобальной энергетической инфраструктуры. Он ориентирован на полное устранение выбросов углекислого газа в энергетическом секторе к 2050 году, предполагая развертывание широкого спектра технологий с нулевым углеродом [3]. Это приводит к сокращению спроса на нефть на 80% по сравнению с текущим уровнем.

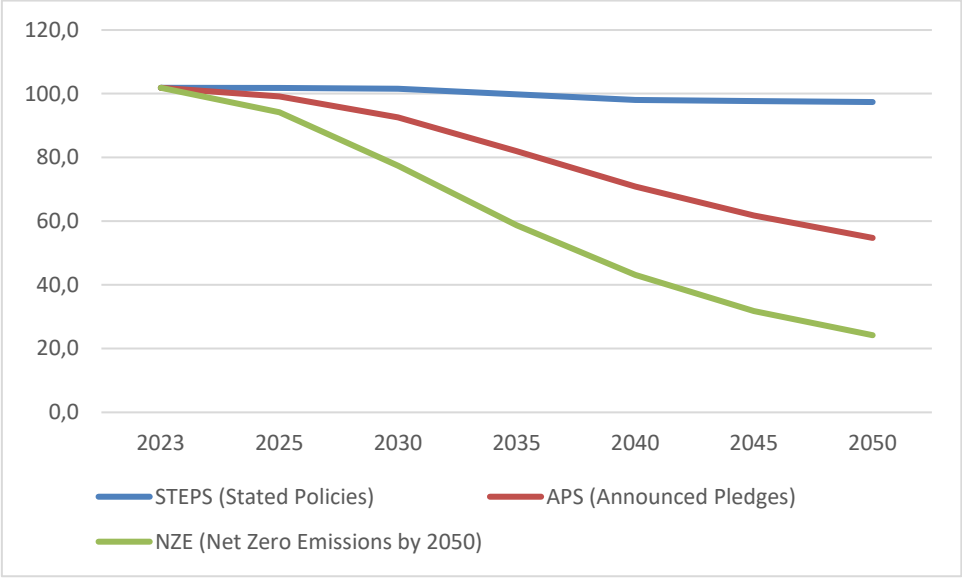


Рис. 2. Прогноз спроса на нефть, IEA

Перейдем к следующей организации, BP в своем ежегодном отчете приводит два ключевых сценария развития мирового энергетического рынка: Current Trajectory и Net Zero (рис 3). Первый, как и другие базовые сценарии, которые мы рассматривали, предполагает, что в ближайшие десятилетия глобальная энергетическая система будет продолжать следовать тем путем, который она в настоящее время проходит, однако в отличие от предыдущих сценариев глобальный спрос в рамках этого сценария сокращается сильнее до 76,8 млн баррелей в

сутки, при этом заметных различий в предпосылках не наблюдается [1]. Сценарий Net Zero, предполагающий быстрые и резкие изменения, ориентирован на достижение углеродной нейтральности к середине столетия, как и сценарий NZE от IEA, поэтому в рамках сценария потребление нефти сокращается почти в 3 раза до 28,2 млн баррелей в сутки из-за технологических изменений и мер, направленных на снижение углеродных выбросов [1].

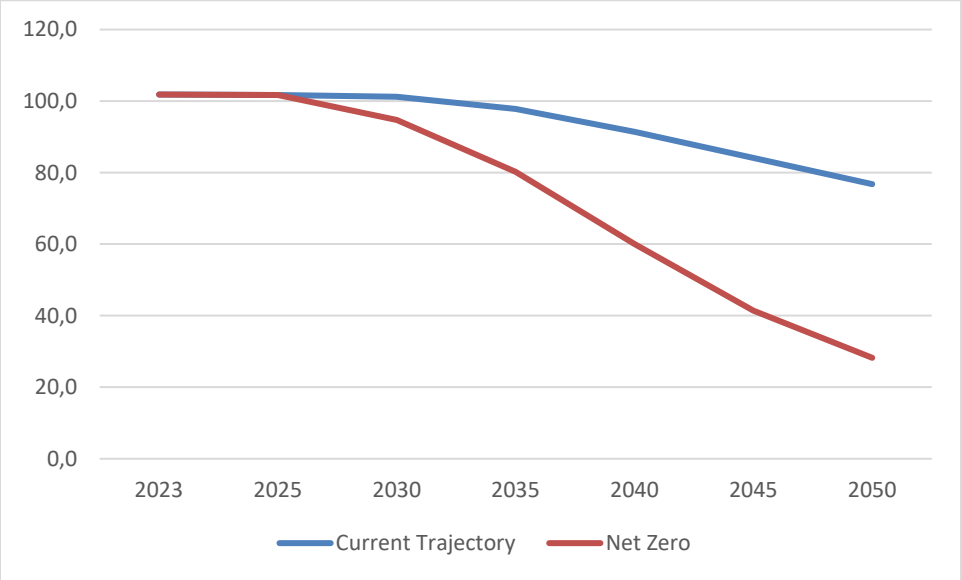


Рис. 3. Прогноз спроса на нефть, BP

OPEC предлагает три ключевых сценария для анализа будущего энергетического рынка: Reference Case, Advanced Technology и Laissez-Faire (рис. 4). Базовый случай – reference case – похож на выше рассмотренные базовые сценарии: предполагает сохранение текущих тенденций, умеренный экономический рост с постепенным внедрением мер по сокращению выбросов [4]. Ожидается, что нефтяной спрос будет постепенно увеличиваться до 120 млн баррелей в сутки к 2050 году, благодаря устойчивому потреблению нефти в развивающихся странах. В отличие от этого, сценарий Advanced Technology предполагает быстрый и активный переход к низкоуглеродной экономике за счет технологий улавливания и хранения углерода (CCUS), удаления углерода из атмосферы (DAC), водородных технологий и внедрения циклической углеродной экономики (CCE) для достижения целей Парижского соглашения [4]. В результате глобальный спрос на нефть стабилизируется на уровне чуть выше 100 млн баррелей в сутки до 2035 года и будет постепенно снижаться к 96 млн баррелей в сутки к 2050 году. Сценарий Laissez-Faire, напротив, предполагает слабо координированную политику и ограниченные усилия по сокращению выбросов углерода с направленностью на быстрый экономический рост в развивающихся странах, как итог рост промышленности и урбанизация приведут к увеличению спроса на нефть [4]. Он

превысит 113 млн баррелей в сутки к 2030 году, и достигнет 127 млн баррелей в сутки к 2050 году.

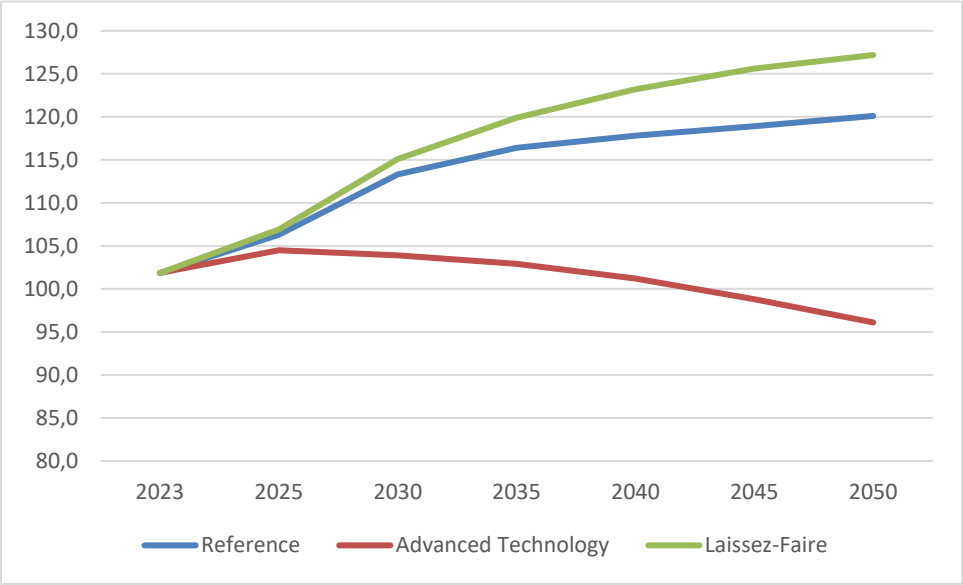


Рис. 4. Прогноз спроса на нефть, OPEC

Заключение

В итоге, анализ позволяет сформулировать ряд заключений. Во-первых, прогнозы отличаются факторами, заложенными в модели прогнозирования, к ним можно отнести темпы экономического роста, доступность и стоимость технологий с нулевыми выбросами углерода, государственная энергетическая политика, а также глобальные изменения в области климата и экологии. С одной стороны, все прогнозы построены на одних факторах, однако в каждой модели имеет место быть своя комбинация предпосылок. Во-вторых, прогнозы можно разделить на два кластера: EIA и OPEC образуют первый, они имеют более оптимистичные взгляды на будущее потребление нефти, несмотря на переход к возобновляемым источникам энергии; в то время как IEA и BP считают, что рынок нефти обречен, и потребность в этом виде энергии сократится в 3-4 раза за счет перехода к чистым источникам энергии.

Различия в прогнозах во многом объясняются политикой самих организаций, оказывающей прямое влияние на результаты. Аналитические центры, поддерживающие амбициозные климатические цели, как правило, преуменьшают роль нефти в энергетическом балансе, что соответствует политике их стран, направленной на сокращение выбросов и развитие чистых технологий. Организации, заинтересованные в стабильности добычи углеводородов и росте энергопотребления, напротив, более оптимистично оценивают будущий спрос на нефть и газ, отражая их экономическую заинтересованность в сохранении текущих рыночных тенденций.

В заключение, несмотря на многообразие прогнозов и подходов к энергетическому переходу, нефть и газ остаются важными источниками энергии. Для России, как для крупного игрока на мировом энергетическом рынке, принципиально важно разрабатывать собственные независимые прогнозы спроса, учитывающие как внешние факторы, так и внутренние экономические и политические условия, что позволит своевременно корректировать энергетическую политику, обеспечивать энергетическую безопасность и эффективно реагировать на изменения в мировой экономике.

Благодарности

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Стратегия комплексного освоения ресурсов и запасов газа Восточной Сибири и Дальнего Востока // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2009. – № 1. – С. 18-28.

2. Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Пак В.А., Удут В.Н., Довгань А.В., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Гелий: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 7. – С. 52-55.

3. Эдер Л.В., Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В. Состояние и перспективы развития нефтегазового комплекса // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2017. – № 3. – С. 41-49.

4. Energy Outlook 2024. BP. 2024. URL: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html (дата обращения: 28.04.2025).

5. International Energy Outlook 2023. EIA, U.S. Energy Information Administration. 2023. URL: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/ (дата обращения: 28.04.2025).

6. World Energy Outlook 2024. International Energy Agency. 2024. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024 (дата обращения: 28.04.2025).

7. World Oil Outlook 2023. Organization of the Petroleum Exporting Countries. 2023. URL: https://www.opec.org/world-oil-outlook.html (дата обращения: 28.04.2025).

© А. А. Долганов, В. Ю. Немов, 2025

УДК 338.43
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-15-20

Д. Д. Жаркова[1], А. Ю. Новиков[2]✉

Эколого-экономические аспекты деятельности отрасли животноводства

[1] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

Аннотация. Животноводство, как значимая часть сельского хозяйства, играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности страны, и других социально-экономических аспектах. При этом сельскохозяйственная деятельность может наносить вред окружающей среде и приводить к выбросам парниковых газов. В статье проанализированы ключевые негативные экологические последствия от сельскохозяйственной деятельности: загрязнение атмосферы, избыточное использование водных ресурсов, воздействие на почвы и подземные воды. Для решения данных проблем могут использоваться технологии малых ирригационных систем, современные практики сбора и хранения навоза, модернизация вентиляционных систем на предприятиях и др. При этом во многих случаях существует противоречие между экономической целесообразностью внедрения технологических инноваций и сокращением вреда для окружающей среды. Рассмотрены экономические аспекты внедрения технологий по сокращению негативного экологического воздействия. Проанализированы этапы процесса аналитической обработки данных в животноводстве.

Ключевые слова: эмиссия загрязняющих веществ, животноводство, сокращение ущерба окружающей среде, экономическая эффективность

D. D. Zharkova[1], A. Y. Novikov[2]✉

Ecological and economic aspects of the livestock industry

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

Abstract. Livestock, as a significant part of agriculture, plays an important role in ensuring food security of the country, and other socio-economic aspects. At the same time, agricultural activities can harm the environment and lead to greenhouse gas emissions. The article analyzes the key negative environmental consequences of agricultural activities: air pollution, excessive use of water resources, impact on soils and groundwater. To solve these problems, small irrigation system technologies, modern practices of collecting and storing manure, special ventilation systems at enterprises, etc. can be used. At the same time, in many cases there is a contradiction between the economic feasibility of introducing technological innovations and reducing harm to the environment. The economic aspects of introducing technologies to reduce negative environmental impact are considered. The stages of the process of analytical data processing in animal husbandry are analyzed.

Keywords: emissions of pollutants, livestock, reduction of environmental damage, economic efficiency

Введение

В 2022 г. за счет вида деятельности «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» в среднем по России было создано 4,2% от всей валовой добавленной стоимости. Для развитых постиндустриальных экономик характерен малый вклад «Сельского хозяйства» в ВВП, однако данный сектор играет важнейшую роль с точки зрения продовольственной безопасности страны. Животноводство является одной из составляющих сектора «Сельское хозяйство», обеспечивающих производство мяса, молочной и иной продукции.

При этом животноводство оказывает значительное влияние на окружающую среду. В частности, можно выделить два аспекта: климатический [1] и экологический. Первый связан с выбросами парниковых газов от внутренней ферментации животных, а также систем сбора и хранения навоза. Экологический вред от животноводства связан с эмиссией веществ загрязнителей в почвы, подземные воды, водоемы и атмосферу.

Для нивелирования негативного воздействия животноводства на окружающую среду разрабатываются специальные технологии, позволяющие улавливать, обезвреживать или предотвращать эмиссию веществ загрязнителей. Однако зачастую инвестиции в данные технологии не являются экономически целесообразными, т.к. не несут прямого положительного эффекта с точки зрения производства. При принятии решения о внедрении таких технологий необходим комплексный эколого-экономический анализ.

Экологические последствия сельскохозяйственной деятельности

Сектор «Сельское хозяйство» и животноводство в частности оказывают существенное отрицательное воздействие на состояние почвенных ресурсов, водоемов и атмосферы, что с экономической точки зрения проявляется в виде негативных экстерналий. Сектор «Сельское хозяйство» является одним из основных источников загрязнения окружающей среды, хотя его эмиссия ниже, чем от транспорта, энергетики и промышленного производства.

Динамика эмиссии веществ загрязнителей сектора представлена на рис. 1. Стоит отметить, что динамика доли сектора «Сельское хозяйство» в общих выбросах по РФ совпадает с темпами изменения самих выбросов.

Однако, в свете усиливающегося внимания к вопросам экологической безопасности, проблемы, связанные с загрязнением природных ресурсов в секторе «Сельское хозяйство», приобретают все более актуальный характер. Можно выделить следующие направления негативного влияния на окружающую среду.

1. Воздействие на почвы и подземные воды. В первую очередь негативное влияние связано с отходами животноводческой деятельности.

Согласно данным, опубликованным в источниках РД-АПК, среднесуточная масса экскрементов, выделяемая одним представителем крупного рогатого скота, составляет приблизительно 55 килограммов [2], исключая производствен-

ные отходы. В контексте интенсивного пастбищного скотоводства, при котором численность скота одной организации может достигать до 10 000 голов на пастбище, суммарное количество навоза, образующегося ежедневно, может составлять до 550 тонн.

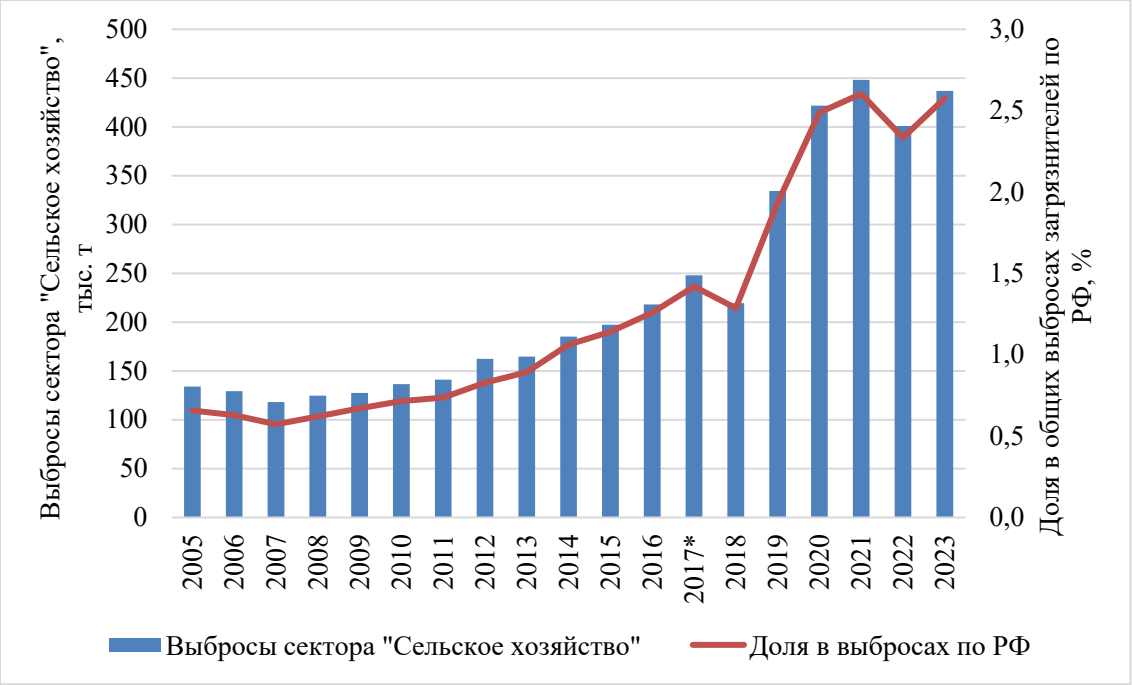


Рис. 1. Выбросы загрязняющих веществ сектора «Сельское хозяйство»
*с учетом изменений в структуре ОКВЭД 2

В Российской Федерации общая площадь сельскохозяйственных угодий составляет 845,4 тыс. гектаров, что в расчете на одну организацию эквивалентно среднему показателю в 3244,1 гектара [3]. При попадании необработанных экскрементов домашних птиц и других видов животных в почвенный слой происходит процесс трансфера летучих органических соединений в почву. Эти соединения имеют потенциал к миграции в более глубокие горизонты почвы или в прилегающие поверхностные водоёмы через вертикальные и горизонтальные водные потоки [4].

Контаминация поверхностных и подземных водных ресурсов отходами производства крупных агрокомплексов и фермерских хозяйств приводит к деградации санитарно-гигиенического состояния водоемов, что, в свою очередь, ограничивает доступ населения к традиционным источникам водоснабжения. Эксплуатация водных ресурсов, загрязненных в результате сельскохозяйственной деятельности, может стать причиной развития гастроинтестинальных и иных патологий у человека и животных [5]. В результате сброса сточных вод с животноводческих комплексов наблюдается снижение биоразнообразия, в частности, массовая гибель рыбных популяций в реках и прудах.

Изменение соотношения питательных веществ в почве влечёт за собой дисбаланс в кормовых культурах, что в свою очередь нарушает обмен веществ у животных, питающихся такими кормами. Избыток нитратов в растениях может негативно сказываться не только на здоровье животных, но и людей, употребляющих в пищу свежие овощи, такие как морковь, свекла, салат и сельдерей, которые могут накапливать нитраты. В организме человека в результате реакции вторичных аминов с азотной кислотой могут образовываться нитрозамины – вещества, обладающие высокой канцерогенной и мутагенной активностью.

Вместе с основными питательными веществами (азот, фосфор, калий), которые находятся в навозе, в почву также поступают и могут накапливаться в токсичных количествах различные вещества: натрий хлорид из кормов для свиней (около 10 граммов на одну голову в день), биостимуляторы, средства для очистки помещений (каустическая сода в объеме 1 кг в сутки 1 тысячу свиней), а также средства для борьбы с вредителями и прочее.

2. Загрязнение атмосферы вредными твёрдыми частицами. Одним из значимых факторов, оказывающих негативное влияние на экологическую обстановку, являются атмосферные эмиссии. К ним относятся не только газы, способствующие парниковому эффекту, но и аммиак, а также микробиологические агенты, образующиеся в процессе ведения сельскохозяйственной деятельности, в частности на фермерских предприятиях и в животноводческих комплексах.

Эмиссионное воздействие отходов животноводства на экологическую среду оценивается на основе комплекса параметров, включая концентрацию загрязняющих компонентов в выбросах, скорость и направление воздушных потоков, состояние растительного покрова, рельеф местности и прочие эколого-географические факторы.

На крупных откормочных комплексах, где численность скота достигает 10 000 голов, было установлено, что в зимний период в атмосферу выбрасывается до 103,9 миллиардов микробных клеток и 6,2 килограмма пыли в час.

Вблизи птицефабрик наблюдается концентрация микробных организмов в воздухе, варьирующаяся от 1,5 до 8,0 миллиардов клеток на кубический метр. При этом на расстоянии 100 метров от зданий птицефабрик концентрация микробных клеток может достигать 8,3 миллиарда на кубический метр. На расстоянии 400 метров от источника загрязнения этот показатель снижается примерно в два раза.

Для минимизации негативного воздействия микробных организмов на окружающую среду и здоровье населения рекомендуется применение следующих мер: оптимизация систем вентиляции и фильтрации воздуха на птицефабриках, создание зеленых зон для естественной очистки атмосферы, регулярный мониторинг качества воздуха, строгая реализация санитарных норм и проведение образовательных программ для персонала, направленных на соблюдение гигиенических стандартов.

3. Потребление воды. Вода является ключевым ресурсом в сельском хозяйстве, необходима для орошения, увлажнения растений и роста культур, а также для питья и кормления животных, обработки продукции и дезинфекции обору-

дования. Однако агропромышленный комплекс, особенно птицеводство и животноводство, негативно влияет на экологию, способствуя деградации водных ресурсов. По статистике, эти отрасли потребляют около 20% пресной воды в мире для содержания сельскохозяйственных животных [6]. Значительная часть водных ресурсов уходит на орошение полей, где выращивают корма. Согласно ВНТП-Н-97 «Нормы расходов воды потребителей систем сельскохозяйственного водоснабжения», на фермах с телятами, молодняком, нетелями, быками и мясными коровами среднесуточное потребление воды может достигать 247 литров на голову.

По всей планете насчитывается около 600 миллионов фермерских угодий, где содержатся животные для производства мяса, молока и других продуктов [7]. Это означает, что потребление воды для поения и обеспечения скота является колоссальным по всему миру. Например, в племенном поголовье Сибири на начало 2023 года было зарегистрировано 42 105 голов, что эквивалентно 13,4% от общего объема поголовья в данном регионе. Это означает, что только на поение крупного рогатого скота на ферме расходуется 10,3 тыс. литров воды в день и 3,8 млн литров в год [8]. Таким образом, потребление воды для поения и обеспечения скота действительно является значительным, и эти цифры подтверждают важность эффективного управления ресурсами на фермерских хозяйствах.

Для рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве необходимо применять методы, такие как точное орошение, маломасштабные ирригационные системы и меры по сокращению водопотерь. Систематическое орошение позволяет точно регулировать подачу воды в зависимости от потребностей растений и климатических условий, что снижает потери и повышает урожайность. Мульчирование почвы предотвращает рост сорняков, испарение влаги и разрушение почвы, что экономит воду и способствует увеличению урожая.

Малые ирригационные системы, установленные непосредственно на полях, обеспечивают точное распределение воды, уменьшая потери и повышая продуктивность. влияние на рациональное использование водных ресурсов.

Экономические аспекты внедрения технологий

Агропромышленный сектор отличается высокой сложностью технологических операций, проблематикой обеспечения ресурсами, воздействием климатических факторов и зависимостью от условий рынка сельскохозяйственной продукции и аграрного сырья, который функционирует в рамках условий совершенной конкуренции. Производственные методы не остаются на месте, особенно в области животноводства: кормление, разведение, уход за животными претерпевают значительные изменения.

В анализе аграрной деятельности ключевые задачи – получение точной информации о ресурсах компании, их состоянии и эффективности, а также выявление причин текущего положения организации и своевременное распространение аналитической информации среди пользователей. Основная цель анализа – оперативное и точное формирование управленческих решений на основе данных.

Экономический анализ в аграрной сфере включает использование методов и техник с учетом особенностей сельскохозяйственного бизнеса.

В процессе аналитической обработки данных применяется методика расчета относительных индикаторов, которая включает в себя следующие этапы:

1. Оценка динамики изменений показателей во времени.

2. Сопоставление показателей исследуемой организации со средними значениями, характерными для соответствующего района или региона, а также с показателями ведущих предприятий в данной отрасли. Это позволяет оценить конкурентоспособность компании и ее положение на рынке.

3. Структурный анализ выполняется путем сопоставления отдельных элементов структуры с общим объемом, что дает возможность выявить долевое соотношение компонентов и их влияние на целостную картину организации или процесса.

Также важным аспектом является сопоставление капитальных вложений и эксплуатационных издержек, чье соотношение значительно отличается для разных применяемых технологий. Итоговое принятие решений должно опираться с одной стороны на финансово-экономическую эффективность внедрения технологий, а с другой стороны – на эколого-климатический эффект.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках базового проекта НИР лаборатории 1105 ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комарова А. В., Филимонова И. В., Новиков А. Ю. Углеродный след сектора сельского хозяйства Новосибирской области // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2022. – № 5(389). – С. 484-488.

2. РД-АПК 1.10.01.01-18. «Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота». URL https://mzpotok.ru/upload/iblock/5ee/mz_RD_APK_1.10.01.01_18.pdf (дата обращения: 27.05.2024).

3. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/publications-plans (дата обращения: 30.01.2024).

4. Zhang X. et al. Environmental risks caused by livestock and poultry farms to the soils: Comparison of swine, chicken, and cattle farms // Journal of Environmental Management. – 2022. – Т. 317. – С. 115320.

5. Косимов Х. О. Иброхимов К. Санитарно-гигиеническая проблема загрязнения окружающей среды отходами животноводческих и птицеводческих комплексов // Бухарский государственный медицинский институт, Бухара, Узбекистан – 2023. – С.9-13.

6. Жаналиева Р. Н. и др. Изучение проблем водных ресурсов Казахстана и стран центральной азии //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 2. – С. 58-65.

7. FAO, Достижение ЦУР: в центре внимания семейные фермерские хозяйства// Booklet. – 2019. – №. 1. – С. 28.

8. Миненко А. В., Селиверстов М. В. Состояние государственной поддержки племенного животноводства в алтайском КРАЕ //Экономика и бизнес: теория и практика. – 2024. – №. 9-1 (115). – С. 117-120.

© Д. Д. Жаркова, А. Ю. Новиков, 2025

УДК 336.77
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-21-26

А. Н. Ибрагимова[1]✉, И. В.Филимонова[2]

Оценка и анализ рынка ипотечного жилищного кредитования с учетом региональных особенностей

[1] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.ibragimova1@gmail.com

Аннотация. Ипотечное жилищное кредитование является ключевым фактором доступности жилья и экономического развития в России, однако его эффективность варьируется в зависимости от региональных условий, таких как социально-экономические факторы и инфраструктура. В исследовании проведен комплексный анализ ипотечного рынка в 87 регионах России с использованием эконометрических методов, включая модели Pooled OLS, Fixed Effects и Random Effects, за период с 2019 по 2023 год. Выявлены основные факторы, влияющие на объемы ипотечного кредитования, а также различия между регионами. На основе результатов предложены рекомендации по оптимизации ипотечных программ и улучшению государственной жилищной политики для повышения доступности жилья в менее развитых регионах.

Ключевые слова: ипотечное кредитование, региональные особенности, панельные данные, эконометрические модели, доступность жилья, государственная поддержка

A. N. Ibragimova[1]✉, I. V. Filimonova[2]

Assessment and Analysis of the Mortgage Housing Lending Market with Consideration of Regional Specifics

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS
e-mail: a.ibragimova1@gmail.com

Abstract. Mortgage lending is a key factor in housing affordability and economic development in Russia, but its effectiveness varies depending on regional conditions, such as socio-economic factors and infrastructure. The study conducts a comprehensive analysis of the mortgage market across 87 Russian regions using econometric methods, including Pooled OLS, Fixed Effects, and Random Effects models, over the period from 2019 to 2023. Key factors influencing mortgage lending volumes and regional disparities are identified. Based on the findings, recommendations are proposed to optimize mortgage programs and enhance state housing policies to improve housing affordability in less developed regions.

Keywords: mortgage lending, regional specifics, panel data, econometric models, housing affordability, government support

Введение

Ипотечное жилищное кредитование играет важную роль в обеспечении доступности жилья, стимулировании строительной отрасли и поддержании социальной стабильности. В России устойчивое развитие ипотечного рынка рассмат-

ривается как стратегический аспект государственной политики, закрепленный в таких документах, как «Стратегия развития строительной отрасли и ЖКХ на период до 2030 года» [1]. Однако региональная дифференциация в уровне доходов, банковской инфраструктуре и мерах господдержки приводит к неравномерному развитию как ипотечного рынка, так и других [2-4]. В одних регионах ипотека активно поддерживает спрос на жилье, в других – остается малодоступной из-за низкой платежеспособности населения.

Цель исследования — провести оценку и анализ рынка ипотечного жилищного кредитования в России с учетом региональных особенностей, выявить ключевые факторы его развития и предложить рекомендации по повышению доступности жилья.

Методы и материалы

Для анализа рынка ипотечного кредитования с учетом региональной специфики применен эконометрический подход на основе панельных данных за 2019–2023 гг. по 87 регионам России. Использованы модели Pooled OLS, фиксированные эффекты (FE) и случайные эффекты (RE), учитывающие временные и пространственные различия.

Информационной теоретической и статистической базой исследования стали данные Банка России, Росстата, АИЖК, Минстроя России.

В качестве зависимой переменной в модель включены:

- Y — объем ипотечных кредитов (млн руб.).
- PY — объем на душу населения (тыс. руб.).
- ln(PY) — логарифмированная переменная.

Сформирована уникальная база данных по независимым переменным:

1. Социально-демографические: Pop_1 (численность населения, тыс. чел.); WAP_1 (доля трудоспособного населения, %); RGP_1 (ВРП, млн руб.); $PRGP_1$ (ВРП на душу, руб.); PCI_1 (доходы населения, руб./мес.); $PCCS_1$ (расходы населения, руб./мес.); SM_1 (прожиточный минимум, руб./мес.); ER_1 (занятость населения, %); UR_1 (безработица, %).

2. Ипотечные условия: LT_2 (срок ипотечного кредита, годы); IR_2 (ставка по ипотеке, %); ALA_2 (размер ипотечного кредита, млн руб.).

3. Банковская система: NCO_3 (число кредитных организаций, шт.); $SMRF_3$ (рефинансирование, млн руб.); NB_3 (число банков, шт.); NBM_3 (число ипотечных банков, шт.); $NBBP_3$ (число банков на 100 тыс. чел.); VYD_3 (вклады, млрд руб.).

4. Жилищные условия: HCP_4 (ввод жилья, кв. м/чел.); $HCRI_4$ (ввод жилья на 1 млн руб. доходов населения, кв. м); HF_4 (плотность жилья, кв. м/чел.); HUA_4 (жилые единицы, ед./тыс. чел.); SHC_4 (стесненные условия, %); $SHSB_4$ (старый фонд, %); $SFELS_4$ (благоустроенное жилье, %); MI_4 (миграция, чел./1000 чел.); $ACSH_4$ (стоимость жилья, руб./кв. м); HAI_4 (доступность жилья, лет).

5. Государственная поддержка: FM_5 (семейная ипотека, %); FEM_5 (дальневосточная, %); ITM_5 (IT-ипотека, %); RM_5 (сельская, %); MPM_5 (военная, %); $AARP_5$ (региональные программы, млрд руб.); $NSYF_5$ («Молодая семья», шт.).

Для проверки корректности и точности модели была проведена серия тестов, в частности на мультиколлинеарность. Проверка выполнена с помощью VIF и матрицы корреляций.

Построенная эконометрическая модель в общем виде выглядит следующим образом:

$$PY_{it} = f(PRGP1_{it}, PCCS1_{it}, SM1_{it}, UR1_{it}, IR_2,\ LT_2, ALA_2, NCO_3, SMRF_3, NB_3,$$

$$NBM_3, NBBP_3, VYD_3, HCP_4, HCRI_4, HF_4, HUA_4, SHC_4, SHSB_4, SFELS_4, MI_4,$$

$$ACSH_4, \mathrm{HAI}_4, FM_5, FEM_5, ITM_5, RM_5, MPM_5, AARP_5, NSYF_5,$$

$$YEAR_{2019_i}, .., YEAR_{2023_i}) + \varepsilon_{it} = X_{it}\beta + \alpha_i + \varepsilon_{it},$$

где $YEAR_{2019_i}, .., YEAR_{2023_i}$ — фиктивные переменные, для оценки годовых эффектов и α_i — ненаблюдаемая переменная, характеризующая специфические особенности каждого из регионов.

Выбор между моделью обычной регрессии и моделью с фиксированными эффектами проводился с помощью критерия Фишера. Если H_0: $\alpha_1 = \cdots = \alpha_n = 0$ принимается, то выбор делается в пользу обычной регрессии.

Выбор между моделью обычной регрессии и моделью со случайными эффектами проводится с помощью теста Бройша-Паланга. Если H_0: $\sigma_\alpha = 0$ принимается, то выбор делается в пользу обычной регрессии.

Выбор между моделью со случайным эффектом и моделью с фиксированным эффектами проводится с помощью теста Хаусмана. Если H_0: $corr(\alpha_i, X_{it}) = 0$ принимается, то выбор делается в пользу моделью со случайным эффектом.

Результаты

Анализ выявил значительную гетерогенность объемов ипотечного кредитования (рис. 1). Лидерами являются Москва, Московская область, Санкт-Петербург, Краснодарский край, Татарстан, Башкортостан и Свердловская область. Наименьшие объемы характерны для Ингушетии, Ненецкого и Чукотского АО, Алтайского края и Еврейской АО. Средний объем ипотечных кредитов по России составил 59 874 млн руб.

Коэффициенты корреляции (рис. 2) показали сильную положительную связь между объемом ипотеки на душу населения (PY) и потребительскими расходами (PCCS, 0.77), а также прожиточным минимумом (SM, 0.68). ВРП на душу населения (PRGP) имеет умеренную корреляцию (0.54), а безработица (UR) — отрицательную (-0.49).

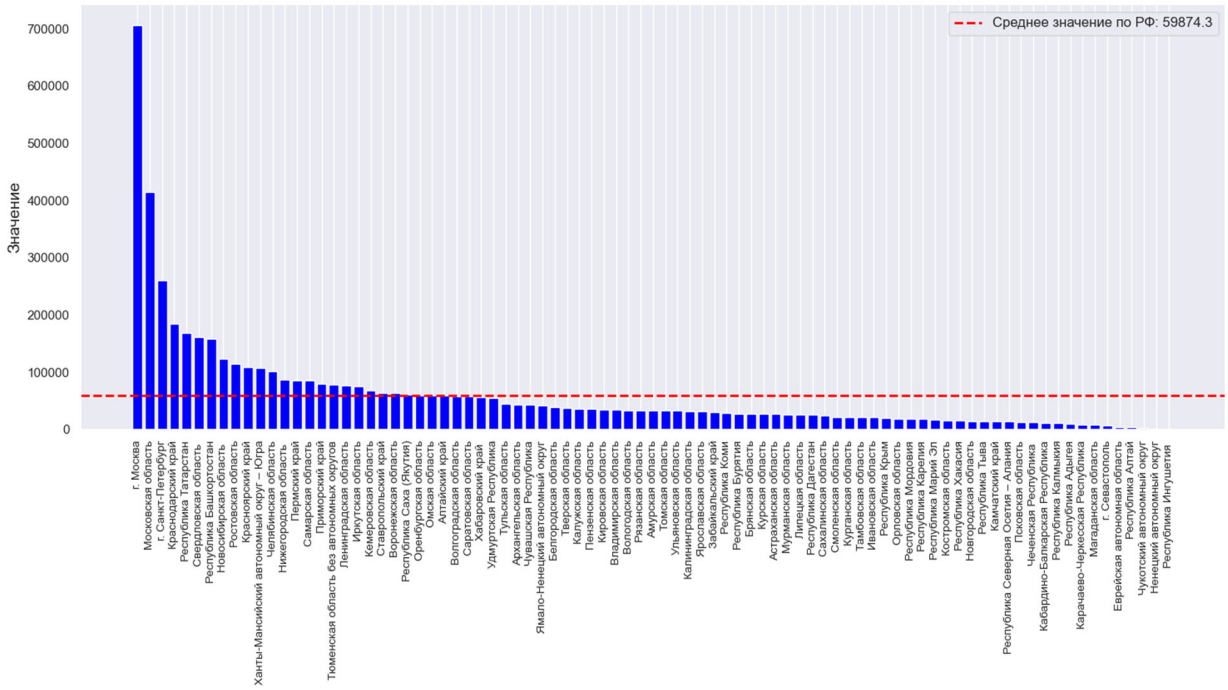


Рис. 1. Объем ипотечного жилищных кредитов по регионам (среднее значение за 2019–2023 годы).

Источник: расчеты авторов

Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты регрессионных моделей (социально-демографические факторы)

Переменная	**Pooled OLS**	**Random Effects**	**Fixed Effects**
$PRGP_1$	5.70e-06**	4.18e-06**	4.62e-06**
$PCCS_1$	0.0016904**	0.0021258**	0.0020407**
SM_1	0.0042105**	0.0031487**	0.0036031**
UR_1	-2.911174**	-2.341715**	-2.506338**
$YEAR_{2020}$	12.42925**	12.70788**	12.54578**
$YEAR_{2021}$	33.19419**	33.12886**	32.87156**
$YEAR_{2022}$	-3.589555	-1.909669	-3.151973
$YEAR_{2023}$	38.13667**	39.2823**	37.92685**
cons	13.00768	11.93984	9.578134
R^2	0.7804	-	-
$R^2 - within$	-	0.9260	0.9258
$R^2 - between$	-	0.6994	0.7031
$R^2 - overall$	-	0.7751	0.7780
$sigma_u$	-	23.366999	23.177463
$sigma_e$	-	9.2609323	9.2609323
rho	-	0.86424916	0.86232677

Источник: расчеты авторов

Тесты Фишера, Бройша–Пагана и Хаусмана показали, что модель со случайными эффектами (RE) является предпочтительной, так как индивидуальные эффекты не коррелируют с регрессорами, а дисперсия случайных эффектов значима.

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с исследованиями Коростелевой и Целиной [5], подчеркивающими роль доходов и потребительских расходов в развитии ипотечного рынка. Отрицательное влияние безработицы подтверждает выводы Саврукова [6] о зависимости ипотеки от платежеспособности населения. В отличие от предыдущих работ, данное исследование акцентирует внимание на региональных различиях, выявляя необходимость дифференцированного подхода к ипотечным программам. Ограничением исследования является отсутствие данных о неформальных доходах, которые могут влиять на ипотечный спрос в некоторых регионах.

Помимо социально-демографических факторов, были построены регрессионные модели зависимости объема ипотечных жилищных кредитов (PY1) от других групп объясняющих переменных: ипотечные условия, развитие банковской системы, жилищные условия и предложение жилья и государственные меры поддержки. Для оценки зависимостей использовались также три основных подходов. Анализ показал, что вне зависимости от группы объясняющих факторов, модель со случайными эффектами (RE) лучше всего описывает данные и позволяет получить наиболее точные и теоретически обоснованные оценки влияния факторов на объем ипотечного кредитования.

Заключение

Ипотечное кредитование в России отличается значительной региональной неоднородностью, что связано с различиями в уровне доходов, уровне безработицы, развитии банковской инфраструктуры и мерах государственной поддержки. Эконометрический анализ выявил, что основными факторами являются потребительские расходы, валовой региональный продукт на душу населения и доступность льготных программ.

В качестве рекомендаций по повышению уровня доступности жилья, можно сформулировать следующее:

- расширить льготные ипотечные программы в регионах с низкими доходами;
- увеличить плотность банковской сети в отстающих регионах;
- адаптировать программы государственной поддержки, такие как «Молодая семья» и «Сельская ипотека», к специфическим условиям каждого региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. утв. распоряжением Правительства РФ № 3268-р от 31.10.2022 г.

2. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Nikitenko S.M. New directions for sustainable development of oil and gas industry of russia: innovative strategies, regional smart specializations, public-private partnership // В сборнике: 17TH International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings. – 2017. – С. 365-372.

3. Эдер Л.В., Саблин К.С., Проворная И.В. Научные подходы к обоснованию приоритетных инновационно-технологических направлений пространственной специализации ресурсных регионов России // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 5. – С. 220-224.

4. Эдер Л.В., Проворная И.В. Основные направления инновационного развития нефтегазовой промышленности России // В сборнике: Инновационный потенциал экономики России: состояние и перспективы. Алексеев А.В., Казанцева Л.К. сборник научных трудов. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. – Новосибирск, 2013. – С. 165-183.

5. Коростелева Т. С., Целин В. Е. Модели множественной регрессии как инструмент оценки эффективности функционирования региональных ипотечных рынков //Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2021. – Т. 12. – №. 3. – С. 164-178.

6. Савруков А. Н. Методика оценки потенциала ипотечного жилищного кредитования в регионе // Региональная экономика: теория и практика. – 2012. – №. 8. – С. 33-43.

© А. Н. Ибрагимова, И. В. Филимонова, 2025

УДК 332.145
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-27-31

П. И. Ивашнева[1], А. В. Комарова[1,2]✉

Оценка эффектов деятельности добывающих компаний на экономику ресурсного региона

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

Аннотация. Ресурсные регионы обеспечивают значительную долю налоговых поступлений и экспорта России. Однако их зависимость от добывающего сектора создает риски сырьевого проклятия: рост добычи полезных ископаемых стимулирует краткосрочные экономические показатели, но усиливает долгосрочные структурные дисбалансы. Цель исследования – оценка влияния деятельности добывающих компаний на экономическое развитие 6 регионов России (Ямало-Ненецкий автономный округ, Республика Хакасия, Магаданская область, Кемеровская область, Ханты-Мансийский автономный округ, Республика Саха (Якутия)) за период 1998–2024 гг. На основе панельных данных применены методы панельной регрессии с фиксированными эффектами и динамической модели панельных данных для анализа структурных и динамических зависимостей. Результаты подтвердили гипотезу «голландской болезни»: рост налоговых поступлений от добычи снижает ВРП на душу населения. Выявлена инерционность экономики, отражающая кумулятивный эффект инвестиций в инфраструктуру.

Ключевые слова: ресурсные регионы, экономическое развитие, голландская болезнь, панельная регрессия

P. I. Ivashneva[1], A. V. Komarova[1]✉

Assessment of the Effects of Extractive Companies' Activities on the Economy of a Resource Region

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS,
Novosibirsk, the Russian Federation
e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

Abstract. Resource regions, which contribute a significant share of tax revenues and exports to Russia, face risks of the "resource curse": growth in mineral extraction stimulates short-term economic indicators but exacerbates long-term structural imbalances. The aim of this study is to assess the impact of extractive companies' activities on the economic development of six Russian regions (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Republic of Khakassia, Magadan Oblast, Kemerovo Oblast, Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Republic of Sakha (Yakutia)) over the period 1998–2024. Using panel data, fixed-effects panel regression and dynamic panel data model were applied to analyze structural and dynamic dependencies. The results confirmed the "Dutch disease" hypothesis: an increase in tax revenues from extraction reduces GDP per capita. Economic inertia was identified, reflecting the cumulative effect of infrastructure investments.

Keywords: resource regions, economic development, Dutch disease, panel regression

Введение

Ресурсные регионы занимают центральное место в экономике России как страны, которая является крупным сырьевым экспортером, в особенности газа и нефти. Однако развитие этих регионов сопровождается противоречиями, описанными в теории «ресурсного проклятия». С одной стороны, добывающий сектор создает рабочие места, финансирует инфраструктурные проекты и формирует бюджетные резервы. С другой — избыточная зависимость от сырьевых доходов подавляет диверсификацию, усиливает социальное неравенство и повышает уязвимость к внешним шокам, таким как падение цен на нефть [1-3].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки влияния ресурсных компаний на региональную экономику с учетом структурных и динамических факторов. Цель работы состоит в оценке влияния деятельности ресурсных компаний на экономическое развитие ресурсного региона.

Для достижения цели в ходе исследования поставлены следующие задачи:

1. Анализ теоретических и методических подходов к оценке влияния ресурсных компаний на экономику региона;

2. Выявление ключевых показателей, характеризующих вклад ресурсных компаний в развитие региона;

3. Проведение эмпирического анализа на основе панельных данных, регрессионного и факторного анализа для оценки влияния деятельности компаний на ключевые экономические индикаторы;

4. Оценка вклада ресурсных компаний в развитие инфраструктуры и производственных мощностей региона;

Объектом исследования является экономика ресурсного региона, подверженного воздействию деятельности добывающих компаний. Предметом – влияние деятельности добывающих компаний на экономическое развитие региона.

Методы и данные

Для оценки влияния деятельности добывающих компаний на экономическое развитие региона было выбрано шесть ресурсных регионов Российской Федерации, представляющие разные типы ресурсной специализации:

1. Уголь – Кемеровская область и Республика Хакасия;
2. Минералы и драгметаллы – Республика Саха (Якутия) и Магаданская область;
3. Нефть и газ – Ямало-Ненецкий автономный округ и Ханты-Мансийский автономный округ;

Период наблюдений охватывает 1998–2024 гг., что позволяет учесть как долгосрочные структурные изменения, так и краткосрочные колебания, связанные с внешними шоками (например, кризис 2008–2009 гг. и санкционное давление 2022–2024 гг.). Источниками данных выступили официальные статистические сборники Росстата, отчеты Банка России по динамике цен на сырьевые товары, а также региональные социально-экономические отчеты, предоставляю-

щие детализированную информацию по налоговым поступлениям, занятости и инвестициям в основной капитал [4]. Исходный набор данных включал в себя:

1. Экономические показатели – ВРП (млн руб.); ВРП на душу населения (руб.); налог на прибыль организаций, специализирующихся на добыче полезных ископаемых (тыс. руб.); доля инвестиций в основной капитал к ВРП (%); доля добывающей промышленности в ВРП (%);

2. Социальные показатели – численность занятых в возрасте 15-72 лет (чел.); среднегодовая численность занятых в экономике в добывающей промышленности (чел.); среднемесячная номинальная заработная плата (руб.);

Первичная обработка данных включала устранение пропусков и аномалий, характерных для длительных временных рядов.

Для обеспечения репрезентативности данных проведена проверка на стационарность с использованием теста Дики-Фуллера, выявившая нестационарность исходных рядов. Нестационарность устранена с помощью логарифмирования переменных. Перед построением моделей также была проведена проверка на гетероскедастичность и мультиколлинеарность.

Была построена панельная регрессия с фиксированными эффектами. Формально модель выражается как:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 tax_{it} + \beta_2 empl_{it} + \beta_3 share_{it} + \beta_4 wage_{it} + \beta_5 inv_{it} + \alpha_i + \varepsilon_i,$$

где Y – логарифмированное значение ВРП на душу населения в году t региона i; β – коэффициенты панельной регрессии; *tax* – выплаты налога на прибыль организаций для компаний добывающего сектора в году t в бюджет региона i; *empl* - среднегодовая численность занятых в экономике в добывающей промышленности региона i в году t; *share* - доля добывающей промышленности в ВРП региона i в году t; *wage* - среднемесячная номинальная заработная плата в регионе i в году t; *inv* - доля инвестиций в основной капитал к ВРП региона i в году t; α – фиксированные эффекты для региона i; ε – случайная ошибка.

Результаты и обсуждение

Для панельной регрессии с фиксированными эффектами (1) были получены следующие результаты (табл. 1). Модель демонстрирует высокую объяснительную способность ($R^2 = 0{,}6853$), что означает, что 68.5% дисперсии ВРП на душу населения объясняется включенными переменными F-статистика (71,847, p = 0,0000) подтверждает общую значимость модели.

Таблица 1

Оценка коэффициентов панельной регрессии

Фактор	Оценка	Стандартная ошибка	*t*-значение	*p*-значение
Intercept	-2,423e+06	2,299e+06	-1,054	0,2934

Окончание табл. 1

Выплаты налога на прибыль организаций для компаний добывающего сектора	-0,0015	0,0006	-2,467	0,0147
Среднегодовая численность занятых в экономике в добывающей промышленности региона	15,540	11,138	1,395	0,1648
Доля добывающей промышленности в ВРП	8042,1	1,86e+04	0,432	0,6660
Среднемесячная номинальная заработная плата в регионе	28,169	7,137	3,947	0,0001
Доля инвестиций в основной капитал к ВРП региона	-55,510	33,310	-1,667	0,0975

При анализе результатов видно, что отрицательный коэффициент (-0,0015, p = 0,0147) при налоге на прибыль указывает, что увеличение налоговых поступлений от добычи на 1 млн руб. снижает ВРП на душу населения на 1,5 тыс. руб. Это подтверждает гипотезу «голландской болезни»: сырьевые доходы подавляют развитие других секторов. Положительный коэффициент при среднемесячной заработной плате (28,169, p = 0.0001) показывает, что рост средней зарплаты на 1 руб. увеличивает ВРП на душу на 28 руб. Это подчеркивает роль доходов населения в стимулировании экономической активности. Отрицательный коэффициент при доле инвестиций в основной капитал (-55,510, p = 0,0975) может быть связан с неэффективным распределением инвестиций в условиях сырьевой зависимости. Незначимыми в модели (p > 0,05) оказались факторы занятости в добывающей промышленности и доли добывающей промышленности, что указывает на отсутствие прямого влияния занятости и структурной доли добычи на ВРП.

Заключение

Результаты панельной регрессии с фиксированными эффектами подтвердили гипотезу «голландской болезни»: рост налоговых поступлений от добычи оказывает статистически значимое отрицательное влияние на ВРП на душу населения. Каждые дополнительные 1 млн руб. налоговых отчислений снижают экономический показатель на 1,5 тыс. руб., что свидетельствует о подавлении диверсификации экономики в условиях сырьевой зависимости. При этом среднемесячная заработная плата демонстрирует устойчивый положительный эффект, подчеркивая важность доходов населения как драйвера внутреннего спроса. Неожиданный негативный вклад инвестиций в основной капитал, вероятно, связан с их неэффективным распределением в регионах с доминированием добывающего сектора, где ресурсы часто направляются на поддержку существующей инфраструктуры, а не на развитие новых отраслей.

На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для политики управления ресурсными регионами. Во-первых, хорошей альтернативой

могло бы служить создание региональных стабилизационных фондов, которые позволят аккумулировать сырьевые доходы и направлять их на финансирование инноваций и диверсификацию экономики. Во-вторых, налоговые льготы для малого и среднего бизнеса в несырьевых секторах могут снизить зависимость регионов от добычи. В-третьих, усиление экологического регулирования помогут компенсировать ущерб, связанный с эксплуатацией природных ресурсов.

Благодарности

Доклад подготовлен в рамках НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) "Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепанова Д. М. Влияние природных ресурсов на экономическое развитие России //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – №. 2. – С. 159-164.

2. Джораев В. О. Особая роль трансграничных и природно-ресурсных регионов в трансформации экономики России //Пространство экономики. – 2007. – №. 1-3. – С. 91-96.

3. Снопик Ю. О. Ресурсное проклятье России: причины и признаки //Теория и практика современной науки. – 2016. – №. 12-2. – С. 250-254.

4. Комарова, А.В., Новиков А. Ю. Показатели экономического развития нефтедобывающих регионов России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2022. – № 1(176). – С. 45-52.

© П. И. Ивашнева, А. В. Комарова, 2025

УДК 338.27
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-32-35

В. И. Канафьева[1]✉, В. Б. Шовтак[1]

Рынок жилья: предложение и платежеспособный спрос

[1] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: v.kanafeva@g.nsu.ru

Аннотация. Строительство жилых помещений является одной из важнейших отраслей экономики страны. Начиная с 2020 года на рынке жилья наблюдается значительный рост цен, в связи с чем, население не может позволить себе оплатить приобретаемое жилье сразу и вынуждено прибегать к ипотечному кредитованию. Однако, на сегодняшний день на рынке наблюдается «почти лопнувший пузырь»: спрос на жилье падает, что может привести к риску перепроизводства на рынке жилья. Целью работы является прогнозирование спроса и предложения на рынке жилья для разработки рекомендаций по стабилизации рынка. В работе использовались такие методы, как регрессионный анализ временных рядов и их прогнозирование. В результате было выявлено, что ожидаемый объем выдач ипотечных жилищных кредитов будет ниже, чем показатели текущего года, при этом объемы ввода жилья останутся примерно на прежнем уровне. Исходя из опыта 2020 года, который привел к перегреву цен, было предложено стабилизировать рынок жилья именно со стороны предложения.

Ключевые слова: ипотечное кредитование, рынок жилья, стоимость жилья

V. I. kanafeva[1]✉, V. B. Shovtak[1]

Housing market: production costs and effective demand

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: v.kanafeva@g.nsu.ru

Abstract. Residential construction is one of the most important sectors of the economy. Since 2020, the housing market has experienced significant price growth, making it difficult for people to afford homes without mortgage loans. However, the market is now facing a "nearly burst bubble": housing demand is declining, which may lead to overproduction. The purpose of this study is to forecast housing demand and supply to develop recommendations for market stabilization. The research methods include time series regression analysis and forecasting. The results show that the expected volume of mortgage lending will be lower than this year's figures, while housing construction volumes will remain stable. Based on the 2020 experience, which led to overheated prices, the study suggests stabilizing the housing market by adjusting supply.

Keywords: mortgage lending, housing market, property prices

Введение

Проблема роста цен на жилье уже не раз исследовалась в научных трудах. Однако, большинство авторов рассматривали рост цен в конкретных регионах, учитывая такие факторы, как расстояние от метро, этажность дома, близость до школы и т.д. В данной работе акцент внимания направлен на изучение влияния переменной времени на ценообразование жилья. В 2020 году государство с целью поддержания жилищного рынка ввело множество льготных ипотечных программ, что привело к перегреву рынка: объемы строительства и ипотечного кредитования начали резко увеличиваться. На сегодняшний день существует следу-

щая неразрешенная проблема: как сделать жилье доступным для граждан и избежать падения рынка? Данное исследование позволяет выявить перспективы развития ситуации на рынке жилья, а также разработать рекомендации по поддержке рынка.

В разделе приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы, описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость.

Методы и материалы

Для анализа использовались такие временные ряды, как динамика объема ввода жилья (рис. 1) [1] и динамика объема выдач ипотечных жилищных кредитов (рис. 2) [2].

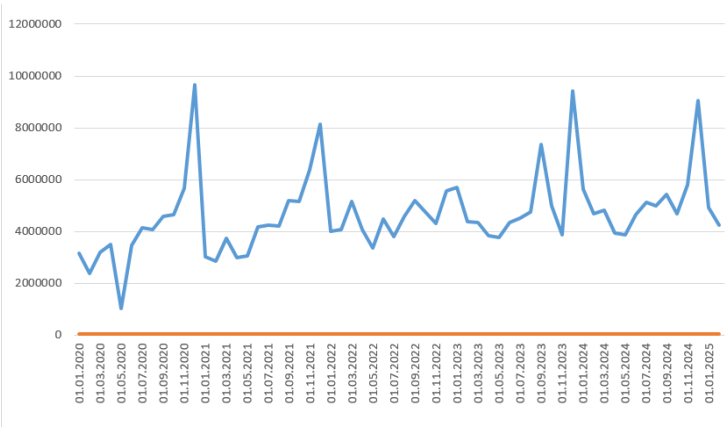


Рис. 1. Динамика объема ввода жилья 2020-2025 гг., кв. м.

Как мы видим, общий уровень объема ввода жилья действительно увеличился за последние 5 лет и, помимо прочего, данные обладают ярко выраженной сезонностью: к концу каждого года наблюдается пик, а к началу, напротив, спад. Данное явление можно объяснить тем, что застройщики часто стремятся закрыть проекты к концу года. Помимо прочего, в январе и феврале стройкки зачастую приостанавливаются в связи с праздниками и погодными условиями.

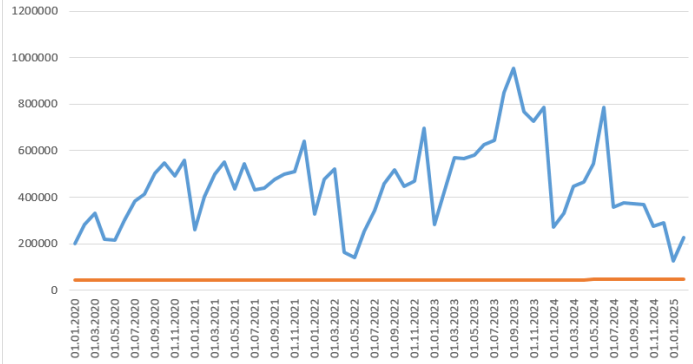


Рис. 2. Динамика объема выдач ипотечных жилищных кредитов 2020-2025 гг., млн руб.

Что касается объема выдач ипотечных жилищных кредтов, то здесь мы тоже видим ярко выраженный сезонный характер. Помимо прочего, начиная с 2024 года наблюдается падение объема выдач кредитов, что связано с повышением ключевой ставки и, как следствие, ипотечных жилищных ставок, а также с отменной некоторых льготных ипотечных программ.

Так как оба временных ряда имеют сезонный характер, для прогнозирования было принято использовать модель SARIMA (p, d, q) (P, D, Q, S) [3]. Так как сезонный характер проявляется каждые 12 месяцев, то была взята SARIMA-модель со следующими параметрами: SARIMA(1, 1, 1,)(1, 1, 1, 12).

Результаты

Как мы видим по результатам моделирования, объем ввода жилья на ближайший год ожидается немного меньше, чем в предыдущем (рис. 3).

Рис. 3. Прогнозирование объема ввода жилья с помощью модели SARIMA

Что касается прогноза объема выдач ипотечных кредитов, то по результатам модели ожидается его падение (рис. 4)

Рис. 4. Прогнозирование объема выдач ипотечных жилищных кредитов с помощью модели SARIMA

Обсуждение

В совокупности из прогнозов видно, что ожидается падение реализации жилья при том же объеме ввода. Это может привести к переизбытку предложения

на рынке, и, как следствие, падению цен. Проекты застройщиков не будут окупаться, стройки будут замораживаться, таким образом, сегодня существует риск кризиса перепроизводства аналогично 2008 г. Из статистики действительно видно, что многие дома остаются недостроенными: на 2024 год доля недостроенного жилищного фонда к годовому вводу жилья возросла на 10% по сравнению с предыдущим периодом [4]. Все это в совокупности может вызвать для девелоперов трудные времена и депрессию на рынке. Опыт 2020 года показал, что введение льготных программ и поддержание рынка жилья только стороны спроса приводит к перегреву. Поэтому, необходимо стимулировать рынок именно со стороны предложения. Например, такие меры, как введение налоговых льгот для проектов с ценой ниже рыночной и госзакупка части жилья могли бы поддержать девелоперов и стабилизировать ситуацию на рынке.

Заключение

Таким образом, было выявлено, что по прогнозу на рынке жилья ожидается падение деловой активности: платежеспособный спрос на жилье в связи с высокими процентными ставками и ценами падает при прежнем объеме предложения, что может привести к росту доли незавершенного строительства и банкротству девелоперов. Поддержка жилищного рынка с помощью введения льготных ипотечных программ в 2020 году привела к перегреву рынка, поэтому в сегодняшней ситуации стабилизироать рынок необходимо именно со стороны предложения. В дальнейшем планируется расширить данное исследование детализацией методов государственной поддержки рынка, а также изучением макроэкономических параметров, влияющих на рост цен со стороны спроса и предложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Объём ввода стандартного жилья. ЕМИСС. URL: https://fedstat.ru/indicator/57532 (дата обращения: 16.04.2025).

2. Сведения об ипотечных жилищных кредитах, предоставленных кредитными организациями физическим лицам-резидентам, и приобретенных правах требования по ипотечным жилищным кредитам в рублях. ЕМИСС. URL: https://fedstat.ru/indicator/59343 (дата обращения: 16.04.2025).

3. Прусакова В. С. Прогнозирование временных рядов методом SARIMA //Труды студенческого центра прикладных математических исследований, 2019. – 28-31 с.

4. В России выросла доля нераспроданных новостроек. URL: https://realty.rbc.ru/news/668148da9a7947527e9e0758 (дата обращения: 16.04.2025).

© В. И. Канафьева, В. Б. Шовтак, 2025

УДК 339.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-36-41

А. О. Киселев[1], А. Ю. Новиков[1]✉

Подходы к учету международной интеграции в гравитационной модели торговли

[1] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

Аннотация. Целью данного исследования является изучение различных подходов к включению переменных международной интеграции в гравитационную модель торговли. В ходе теоретического исследования было выявлено две основных методики. Учет фактора на основе фиктивных переменных или расчетных показателей интенсивности торговли. Практическая часть исследования включала в себя сбор данных показателей и построение гравитационной модели с включением факторов международной интеграции. В результате были выделены наиболее значимые международные союзы, которые были включены в модель. Вычисления показали, что нахождение стран в составе Европейского Союза (ЕС), Евразийского экономический союза (ЕАЭС), Лиги арабских государств (ЛАГ) приводит к повышению объемов торговли с партнерами. Таким образом, используя свои преимущества на мировых рынках и выявляя свои конкурентные преимущества страны способны достичь более высоких экономических показателей.

Ключевые слова: международная интеграция, международная торговля, торговый союз, экспорт, импорт, гравитационная модель

A. O. Kiselev[1], A. Y. Novikov[1]✉

Approaches to accounting for international integration in the gravity model of trade

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

Abstract. The purpose of this paper is to examine various approaches to including international integration variables in the gravity model of trade. In the course of the theoretical study, two main methods were identified. Accounting for the factor based on dummy variables and calculated indicators of trade intensity. The practical part of the study included collecting data indicators and building a gravity model with the inclusion of international integration factors. As a result of the study, the most significant international unions were identified, which were included in the model. As a result, the most significant international unions were identified and included in the model. Calculations showed that the presence of countries in the European Union (EU), the Eurasian Economic Union (EAEU), the League of Arab States (LAS) leads to an increase in trade volumes with partners. Thus, using their advantages in world markets and identifying their competitive advantages, countries are able to achieve higher economic indicators.

Keywords: international integration, international trade, trade union, export, import, gravity model

Введение

Международная экономическая интеграция — это процесс экономического и политического объединения стран, основанный на глубоких, стабильных отно-

шениях и разделении труда между национальными экономиками, взаимодействии их воспроизводительных структур на разных уровнях и в разных формах. Экономическая интеграция предоставляет ряд благоприятных условий для взаимодействующих сторон, например снижение торговых барьеров за счет частичной или полной отмены пошлин и квот на товары.

Анализом международной интеграции между странами занимался большой круг авторов. Гурова И.П., Дробот Е.В. исследовали экономический потенциал Евразийского экономического союза. Костюнина Г. М., Корытова В. С. анализировали конкурентноспособность внешней торговли России при помощи расчетных индексов. Рузиева Д. И., Растопчина Ю. Л. и др. проводили структурно-динамический анализ внешнеэкономической деятельности.

Целью данного исследования является оценка влияния международной интеграции на торговые потоки между странами.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы международной интеграции и всевозможные способы включение фактора в модель.

2. Определение подходящие методики учета международной интеграции.

3. Получение количественную оценку влияния международной интеграции на торговые потоки стран.

Методы и материалы

Введение переменной международной торговли в эконометрические модели зачастую осуществляется двумя способами. В первом способе переменная включается в качестве фиктивной переменной. Фиктивные переменные представляют собой категориальные переменные, которые принимают значения 0 или 1 для указания принадлежности к определенной категории. Если торгующие страны принадлежат к одному и тому же торговому союзу, то переменная принимает единичное значение, в противном случае нулевое.

В качестве альтернативы фиктивным переменным могут использоваться различные индексы, оценивающие степень интеграции между парами или группами стран [1]. Существует множество различных индексов, которые оценивают степень международной интеграции стран, но большая их часть расчитывается на информации о торговых показателях. В основе лежит логика, что страны, стремящиеся к интеграции, за счет различных экономических механизмов наращивают объемы торговли друг с другом. В отличии от фиктивных переменных, отбор подходящих индексов требует более сложного содержательного анализа.

Относительный показатель экономического масштаба

Относительный показатель экономического масштаба страны представляет собой процентную долю в валовом мировом продукте и рассчитывается по формуле:

$$GDPS_i = \frac{GDP_i}{GDP_w} * 100\% \quad (1)$$

где $GDPS_i$ – доля ВВП страны i в валовом мировом продукте; GDP_i – ВВП страны i; GDP_w – валовой мировой продукт.

По аналогии также может быть расчитана доля для населения, однако оба показателя скорее используются для базового анализа роли стран в мировой экономике. Для оценки степени интеграции необходимо учитывать показатели взаимодействия стран друг с другом, например, через экспортные и импортные потоки.

В работе Е.В. Дробот особое внимание уделено анализу показателей открытости экономики стран ЕАЭС. Автор обращает внимание на степень открытости стран ЕАЭС и приводит критерии их стран. Для оценки степени открытости экономики используются такие показатели, как импортная квота, экспортная квота и внешнеторговая квота [2].

Экспортная квота

Она рассчитывается как отношение объема экспорта за год к величине годового валового внутреннего продукта:

$$Exp_i = \frac{Ex_i}{GDP_i} * 100\% \quad (2)$$

где Exp_i – доля экспорта в валовом продукте страны i; Ex_i – экспорт страны i; GDP_i – ВВП страны i.

Импортная квота

Представляет собой показатель, рассчитываемый как отношение объема импорта за год к величине годового валового продукта:

$$Imp_i = \frac{Im_i}{GDP_i} * 100\% \quad (3)$$

где Imp_i – доля импорта в валовом продукте страны i; Im_i – импорта страны i; GDP_i – ВВП страны i.

Индекс открытости экономики

Индекс открытости экономики или внешнеторговая квота рассчитывается как отношение суммы объемов экспорта и импорта за год к величине годового ВВП

$$FT_i = \frac{(Im_i + Ex_i)}{GDP_i} * 100\% \quad (4)$$

где FT_i – доля импорта в валовом продукте страны i; $(Im_i + Ex_i)$ – сумма импорта и экспорта страны i; GDP_i – ВВП страны i.

Перечисленные виды квот характеризуют степень ориентированности страны на международную торговлю и в некотором смысле степень интегрированности в неё. Также данные показатели могут быть модифицированы для от-

дельных отраслей или направлений поставки для анализа степени зависимости национальной экономики от конкретных видов продукции или партнеров.

Следует отметить, что все вышеперечисленные методы могут использоваться только в том случае, если в модели отсутствует переменная, используемая в индексе. Одновременное включение независимых переменных, используемых в индексе и отдельно в уравнение приводит к проблеме мультиколлинеарности (коллинеарности) регрессоров. Высокая корреляции между предикторами дает смещенные оценки коэффициентов, делая их крайне чувствительными к небольшим изменениям в данных. Поэтому коэффициенты могут принимать неожиданные значения (некорректное влияние на зависимую переменную), а переменные терять свою значимость. Во избежание нарушения гипотезы о линейной независимости регрессоров используются более сложные торговые индексы.

Например, Г. М. Костюнина для своего исследования о внешней торговли России со странами АСЕАН использует индекс интенсивности торговли (Trade Intensity Index) [3]:

$$TII_{ij} = \frac{X_{ij} / X_i}{X_{wj} / X_w} \quad (5)$$

где X_{ij} – экспорт страны i в страну j; X_{it} - совокупный экспорт страны i; X_{wj} – экспорт из всех государств мира в страну j; X_w – совокупный мировой экспорт. Индекс интенсивности торговли показывает, насколько активно торгуют друг с другом две страны по сравнению с их общей торговлей с остальным миром. Оценить степень торговых отношений между странами можно следующим образом. Если $TII_{ij} > 1$ — торговля между странами i и j более интенсивна, чем в среднем по миру. Если $TII_{ij} = 1$ — торговля соответствует среднемировому уровню. Если $TII_{ij} < 1$ — торговля слабее, чем в среднем в мире.

Аналогичных индекс интенсивности торговли существует и для импортных значений [4, 5]:

$$TII_{ij} = \frac{M_{ij} / M_i}{M_{wj} / M_w} \quad (6)$$

где M_{ij}– импорт страны i из страны j; M_i – совокупный импорт страны i; M_{wj} – импорт всех государств мира из страны j; M_w – совокупный мировой импорт.

Результаты

Был проведен расчет базовой гравитационной модели с добавление факторов международной интеграции (табл. 1) в виде фиктивной переменной и индекса интенсивности торговли на основе формулы (6).

Из переменных международной интеграции наибольшее влияние на экспорт оказывает участие страны в Евпропейском союзе, что может быть объяснено наибольшей глубиной интеграции данного объединения. Влияние остальных интеграционных объединений также положительно, но коэффициент для Европейской ассоциации свободной торговли (ЕАСТ) оказался не значим.

Таблица 1

Оценка факторов гравитационной модели с международной интеграции

Переменная	Модель за 2022г.
Логарифм ВВП экспортирующей страны, долл.	1.042*** (0.004)
Логарифм ВВП импортирующей страны, долл.	0.864*** (0.003)
Логарифм расстояния между странами, км.	-0.075*** (0.010)
Европейский союз (ЕС)	0.998*** (0.041)
Европейская ассоциация свободной торговли (ЕАСТ)	0.352 (0.387)
Евразийский экономический союз (ЕАЭС)	0.463** (0.212)
Лига арабских государств (ЛАГ)	0.259*** (0.062)
Логарифм торгового индекса	0.939*** (0.003)
Константа	-30.357*** (0.147)
Число наблюдений	18,099
R-квадрат	0.946
Стандартная ошибка	0.947 (df = 18090)
F-статистика	39,654*** (df = 8; 18090)

Примечание: В скобках указана стандартная ошибка; *** p < 0,01, ** p < 0,05; * p < 0,1.

Источник: расчеты автора

Из базовых переменных наибольшее влияние оказывает переменная ВВП страны экспортера. Коэффициенты при факторах ВВП экспортера и импортера близки к единице, а при расстоянии отрицателен, что согласуется с теоретическими предпосылками модели.

Заключение

Основным результатом исследования является включение в гравитационную модель фактора международной интеграции как в виде фиктивной переменной, так и в качестве расчетного индекса. Среди рассмотренных интеграций, наибольшее влияние на товарооборот оказывает вхождение в состав Европей-

ский союз (ЕС). Коэффициент при ЕАСТ оказалася незначим, но сохраняет положительное влияние на зависимую переменную. В соответствии с результатами исследования, участие в международных торговых организациях положительно влияет на торговые потоки между странами. Снижая торговые барьеры и создавая благоприятную торговую среду, международные союзы способствуют экономическому процветанию. Используя свои преимущества на мировых рынках и выявляя свои конкурентные преимущества страны способны достичь более высоких экономических показателей, чем страны, не принимающие участия в международных взаимоотношениях.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-78-10157.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурова И.П. Измерение глобальной и региональной торговой интеграции. Евразийская Экономическая Интеграция. – 2009. – № 3 (4). – С. 60-73.
2. Дробот Е.В. Исследование экономического потенциала Евразийского экономического союза: факторы конкурентоспособности и угрозы экономической безопасности. Российское предпринимательство. – 2016. – № 17 (12). – С. 1407-1428.
3. Костюнина Г. М. Внешняя торговля России со странами АСЕАН: основные тенденции развития // Российский внешнеэкономический вестник. – 2019. – №3. – С. 43-59.
4. Корытова В. С. Способы анализа конкурентоспособности экспорта // Торговая политика. – 2015. – №2. – С. 163-174.
5. Рузиева Д. И., Растопчина Ю. Л. и др. Структурно-динамический анализ внешнеэкономической деятельности Узбекистана и оценка интенсивности российско-узбекских торговых отношений // Научный результат. Экономические исследования. – 2018. – №2. – С. 19-28.

© А. О. Киселев, А. Ю. Новиков, 2025

УДК 332.146
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-42-48

В. Е. Морозова[1]✉, М. В. Мишенин[2]

Экологический мониторинг регионов России

[1] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: v.morozova2@g.nsu.ru

Аннотация: В статье представлен подход к построению экологического рейтинга регионов России, рассчитанного с применением метода главных компонент на основе экологических и социально-экономических показателей за 2023 год, отражающих уровень антропогенной нагрузки, степень природоохранной деятельности и состояние окружающей среды в регионах. Итоговое значение рейтинга рассчитывалось как сумма произведений значений переменных на соответствующие веса и доли объяснённой дисперсии. Проведённый анализ позволил выявить закономерности пространственного распределения экологического благополучия: в число регионов-лидеров вошли преимущественно малонаселённые и слабо индустриализированные субъекты с высокой долей природных территорий и минимальной нагрузкой на окружающую среду. В числе аутсайдеров оказались высоко урбанизированные и промышленно развитые регионы, характеризующиеся высокой концентрацией загрязняющих выбросов и интенсивным использованием природных ресурсов. Полученные результаты могут быть использованы при формировании экологической политики, а также при территориальном планировании и оценке устойчивого развития.

Ключевые слова: экологический рейтинг, экологическая устойчивость, мониторинг, метод главных компонент

V. E. Morozova[1]✉, M. V. Mishenin[2]

Ecological monitoring of Russian regions

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: v.morozova2@g.nsu.ru

Abstract. The article presents an approach to creating the ecological rating of Russian regions, calculated using the principal component method based on ecological and socio-economic indicators for 2023, reflecting the level of anthropogenic pressure, the degree of environmental protection activities and the state of the environment in the regions. The final rating value was calculated as the sum of the products of the values of the variables by the corresponding weights and fractions of the explained variance. The analysis revealed patterns in the spatial distribution of environmental sustainability: the leading regions included mostly sparsely populated and poorly industrialized regions with a high proportion of natural territories and minimal environmental impact. Highly urbanized and industrialized regions, characterized by high concentrations of polluting emissions and intensive use of natural resources, were among the outsiders. The results obtained can be used in the formation of environmental policy, as well as in territorial planning and assessment of sustainable development.

Key words: ecological rating, ecological sustainability, monitoring, principal component analysis

Введение

Актуальность данного исследования определяется необходимостью комплексного анализа экологического состояния регионов Российской Федерации с целью выявления их сильных и слабых сторон в контексте устойчивого развития. Углубляющееся антропогенное воздействие на природные системы актуализирует потребность в создании объективных и комплексных подходов к оценке экологической обстановки, направленных на достижение баланса между растущими потребностями общества и сохранением природных экосистем [1]. Одним из эффективных инструментов анализа выступает экологическое ранжирование, позволяющее оценить уровень экологической устойчивости территорий и проанализировать эффективность природоохранной политики.

Применение метода главных компонент при построении экологического рейтинга позволяет не только выделить регионы с наиболее и наименее благоприятной экологической ситуацией, но и выявить взаимосвязи между ключевыми экологическими и социально-экономическими индикаторами [2, 3]. Полученные результаты могут служить основой для формирования обоснованных рекомендаций по совершенствованию региональной экологической политики, обеспечению рационального природопользования и снижению техногенного давления на окружающую среду [4-6].

Цель исследования: разработка экологического рейтинга регионов России с использованием метода главных компонент.

Методическая часть

Метод главных компонент представляет собой эконометрический механизм анализа данных, применяющийся для уменьшения размерности пространства и линейной аппроксимации изучаемых наблюдений.

Пространство *Z* представляется как линейная комбинация стандартизированных исходных переменных и коэффициентов, отражающих вклад *X* в *Z*. Преобразование имеет следующий вид:

$$z_j = \sum_{i=1}^{n} \delta_{ji} x_i,\ i = \overline{1,k},$$

где z_j – главная компонента (j=$\overline{1,m}$); x_i – стандартизированная исходная переменная, δ_{ji}– весовой коэффициент, отражающий долю переменной z_i в главной компоненте z_j [2].

Результаты расчетов

Для проведения анализа в качестве исходных данных были отобраны 17 количественных эколого-экономических показателей по 85 регионам России за 2023 год. Перечень используемых переменных и их обозначение в модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень используемых переменных

Атмосферные выбросы и их контроль	
a	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от стационарных источников (тысяч тонн)
b	Улавливание загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников (тысяч тонн)
c	Доля уловленных и обезвреженных загрязняющих атмосферу веществ в общем количестве отходящих загрязняющих веществ от стационарных источников (%)
Водные ресурсы и загрязнение воды	
d	Использование свежей воды (млн куб. м)
e	Объем оборотной и последовательно используемой воды (млн куб. м)
f	Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты (млн куб. м)
Финансирование и инвестиции в экологию	
g	Расходы на охрану окружающей среды (млн руб.)
u	ВРП на душу населения
Промышленная деятельность и инфраструктура	
i	Степень износа основных фондов (%)
j	Добыча полезных ископаемых
k	Обрабатывающие производства
l	Производство электроэнергии (млрд кВт·ч)
r	Электроемкость ВРП
Лесные ресурсы	
n	Доля площади лесных и нелесных земель, пройденная пожарами, в общей площади региона (%)
o	Доля площади зеленых насаждений в пределах городской черты в общей площади городских земель (%)
Транспорт	
q	Грузооборот автомобильного транспорта (млн т-км)
Социально-демографические показатели	
v	Среднесписочная численность населения

Матрица исходных данных была унифицирована в зависимости от направленности влияния факторов на экологическую обстановку регионов и центрирована для дальнейших расчетов, так как исходные данные были представлены в разных единицах измерения [7]. Вычисления главных компонент производилось с помощью программы R, предназначенной для анализа и визуализации многомерных данных.

Были рассчитаны значения главных компонент, которые не интерпретируются прямо [8] и используются для дальнейших вычислений. Так же были получены основные статистические характеристики ГК (табл. 2):

Таблица 2

Основные характеристики главных компонент

	Собственные числа	Объясняемая дисперсия, %	Кумулятивная дисперсия, %
ГК 1	0,181	34,236	34,236
ГК 2	0,082	15,443	49,679
ГК 3	0,061	11,631	61,310
ГК 4	0,045	8,434	69,744
ГК 5	0,038	7,153	76,896
ГК 6	0,026	4,856	81,752
ГК 7	0,021	3,974	85,726
ГК 8	0,019	3,504	89,230
ГК 9	0,014	2,626	91,856
ГК 10	0,012	2,360	94,215
ГК 11	0,011	2,082	96,298
ГК 12	0,007	1,370	97,667
ГК 13	0,005	0,899	98,567
ГК 14	0,004	0,673	99,240
ГК 15	0,002	0,321	99,561
ГК 16	0,001	0,268	99,829
ГК 17	0,001	0,171	100,000

На рисунке 1 показаны вклады каждой компоненты в общую дисперсию исходного набора данных. По критерию Кайзера для отбора оптимального количества главных компонент, необходимо определить количество главных компонент, для которых их собственные числа корреляционной матрицы превосходят среднее собственных чисел. В данном случае для дальнейшего анализа достаточно оставить в модели первые пять главных компонент, при этом они суммарно объясняют 76,9% вариации исходных данных.

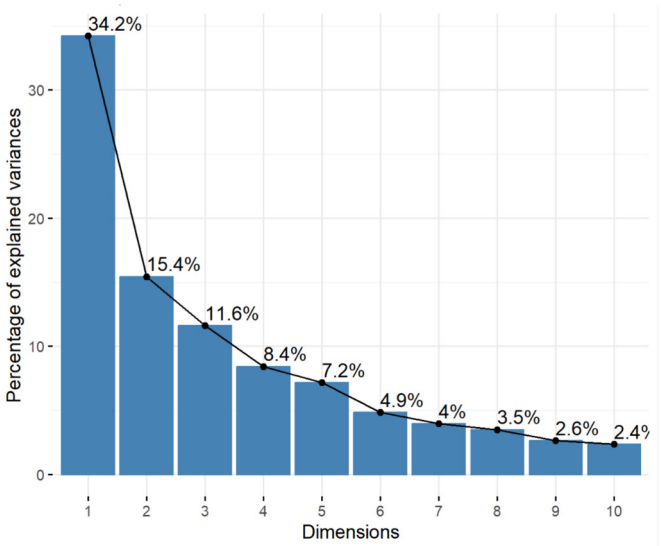


Рис. 1. Объясняемая главными компонентами дисперсия исходных данных.

Была рассчитана матрица весовых коэффициентов, с которыми унифицированные и стандартизированные исходные данные входят в главные компоненты (табл. 3):

Таблица 3

Матрица весов

	ГК 1	ГК 2	ГК 3	ГК 4	ГК 5
a	0,086	0,014	0,038	-0,075	-0,021
b	-0,102	0,045	-0,019	0,056	0,041
c	-0,135	0,246	0,030	-0,015	-0,011
d	0,133	0,044	0,047	-0,002	0,165
e	-0,169	-0,016	-0,077	-0,006	0,027
f	0,126	0,046	-0,075	0,045	-0,001
g	-0,108	-0,031	0,000	0,050	0,033
i	-0,005	0,003	0,183	0,091	-0,044
j	0,040	0,008	0,007	-0,002	-0,023
k	0,092	0,044	-0,059	0,046	-0,017
l	0,178	0,037	0,037	-0,048	0,000
n	0,003	-0,027	-0,012	-0,022	-0,017
o	-0,031	-0,039	0,033	0,047	0,024
q	0,132	0,032	-0,041	0,073	-0,049
r	0,021	-0,051	0,024	-0,032	0,006
u	-0,006	0,051	-0,007	-0,075	-0,024
v	0,103	0,040	-0,054	0,060	0,001

По взвешенному на доли объясненной дисперсии вкладу переменных в главные компоненты, наиболее значимыми оказались переменные, связанные с водными ресурсами и загрязнениями воды, автомобильным грузооборотом и производством электроэнергии. Наименее значимыми – электроемкость ВРП, инвестициями в ОК и лесными ресурсами.

Способ расчёта экологического рейтинга представляет собой взвешенную сумму произведений унифицированных и стандартизированных исходных значений показателей на соответствующие веса, с которыми эти показатели входят в главные компоненты, а также на доли дисперсии, объясняемой каждой из выбранных компонент [7]. Результаты расчетов представлены в таблице 4 и на рисунке 2.

Таблица 4

Экологический рейтинг регионов России за 2023 год

№	Регион	Рейтинг
1	Республика Алтай	100,00
2	Еврейская автономная область	99,14
3	Чукотский автономный округ	98,60
4	Республика Калмыкия	97,86

Окончание табл. 4

5	Камчатский край	97,73
6	Республика Ингушетия	96,87
7	г. Севастополь	96,63
8	Карачаево-Черкесская Республика	95,66
9	Республика Тыва	95,62
10	Ненецкий автономный округ	95,36
…	…	…
76	Волгоградская область	45,46
77	Ленинградская область	37,18
78	Иркутская область	36,64
79	Челябинская область	34,53
80	Республика Татарстан	34,13
81	Московская область	21,67
82	Ханты-Мансийский автономный округ	10,19
83	Красноярский край	6,78
84	г. Москва	4,04
85	Свердловская область	0,00

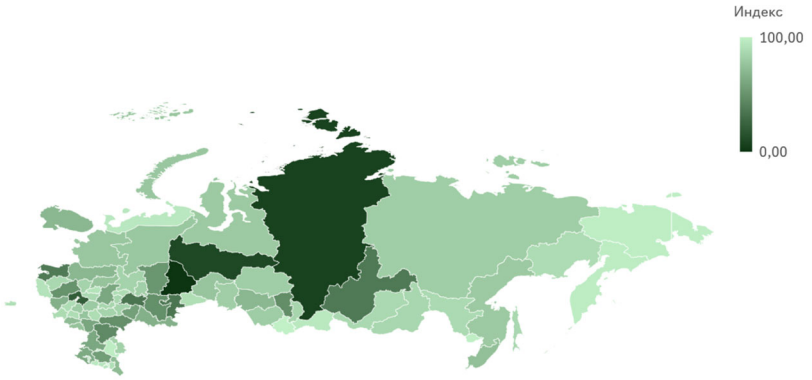


Рис. 2. Экологический рейтинг регионов России за 2023 год

В ходе анализа экологического рейтинга регионов наблюдается отчётливая дифференциация субъектов Российской Федерации по уровню экологической нагрузки. Топ-10 регионов, занявших лидирующие позиции в рейтинге, характеризуются низким уровнем индустриализации и экономической активности. Данные регионы обладают низким уровнем потребления природных ресурсов, а также демонстрируют минимальные объёмы выбросов и сбросов загрязняющих веществ, что обусловлено в том числе слаборазвитой промышленной инфраструктурой. Кроме того, в этих регионах наблюдается малочисленное население, что снижает антропогенную нагрузку на окружающую среду. Таким образом, несмотря на относительно низкие экономические показатели, данные субъекты демонстрируют экологически благоприятные условия, что закономерно отражается в высоких позициях в итоговом рейтинге.

Последние 10 регионов в рейтинге характеризуются высокой степенью индустриализации и урбанизации, а также высоким уровнем потребления природных ресурсов. В данных субъектах наблюдается высокие значения ВРП на душу населения и численности населения, что сопряжено с ростом экологической нагрузки. Существенные расходы на охрану окружающей среды, наблюдаемые в этих регионах, направлены на решение уже имеющихся экологических проблем и выступают скорее следствием высокого уровня антропогенных загрязнений, чем признаком устойчивого природоохранного управления. В совокупности все эти факторы формируют отрицательный экологический баланс, что сигнализирует о необходимости более активного финансирования мер, направленных на охрану окружающей среды, в данных регионах [9].

Таким образом, с помощью метода главных компонент был проанализирован набор факторов, связанный с экологической обстановкой в регионах, при учете информативности и значимости данных факторов. Высокий экологический рейтинг характерен для слабо индустриализированных и малонаселённых регионов с низким потреблением природных ресурсов и низкой антропогенной нагрузкой. В то время как регионы с развитой промышленностью, высокой плотностью населения и урбанизацией, напротив, демонстрируют отрицательные экологические показатели, занимая худшие позиции в рейтинге.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках базового проекта НИР лаборатории 1105 ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерлыгина Е. Г., Штебнер С. В. Экологическая устойчивость в концепции устойчивого развития // Бюллетень науки и практики. – 2022. – № 6.2.

2. Айвазян С. А., Мехтиев М. Е., Стефанюка Е. М. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

3. Николаев И. А., Ануфриева И. Е., Григорьев Л. М. Индекс антикризисной эффективности: аналитический доклад. – М.: Департамент стратегического анализа, 2009. – 34 с.

4. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. О реальных перспективах комплексного освоения ресурсов нефти и газа востока России // Нефтегазовая вертикаль. – 2010. – № 20. – С. 22-26.

5. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Немов В.Ю., Комарова А.В. Структурные изменения в нефтедобыче России // Экологический вестник России. – 2018. – № 1. – С. 1-8.

6. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.Yu. The current state of the petroleum industry and the problems of the development of the Russian economy // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, KTDMUR 2017. – 2017. – С. 012012.

7. Жгун Т.В. Построение интегральной характеристики качества жизни субъектов Российской Федерации с помощью метода главных компонент // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2017. – № 2 (50). – С. 186–202.

8. Поляк Б. Т., Гранат Р. А., Кривулин Н. К. Метод главных компонент: робастные версии // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 3. – С. 130–148.

9. Алешникова В. И., Бурцева Т. А. Интегральный измеритель экологического развития регионов // Российский социально-экологический университет (РСЭУ). – 2023. – № 2 (61).

© В. Е. Морозова, М. В. Мишенин, 2025

УДК 336.761
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-49-53

Н. В. Сальникова[1]✉, И. В. Филимонова[2]

Показатели инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний России

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: n.salnikova1@g.nsu.ru

Аннотация. Нефтегазовый сектор играет ключевую роль в экономике России, обеспечивая значительную долю ВВП и экспортных доходов. Инвестиционная привлекательность компаний данного сектора напрямую влияет на приток капитала, развитие технологий и стабильность экономического роста. В условиях глобальной волатильности цен на нефть и геополитических рисков актуальность оценки инвестиционной привлекательности только возрастает. Существующие методы часто не учитывают специфику нефтегазового сектора и подвержены влиянию краткосрочных рыночных факторов. В данной работе исследуется возможность применения методики Уоррена Баффета для комплексной оценки инвестиционной привлекательности российских нефтегазовых компаний. На основе анализа финансовой отчетности и прогнозирования денежных потоков рассчитывается внутренняя стоимость акций ведущих компаний отрасли. Полученные результаты сопоставляются с рыночной капитализацией, что позволяет выявить недооцененные активы и сформулировать инвестиционные рекомендации. Результаты работы имеют практическую значимость для инвесторов, ориентированных на долгосрочные вложения в нефтегазовый сектор, а также могут быть использованы компаниями при разработке стратегий развития.

Ключевые слова: капитализация, акции, нефтегазовые компании, внутренняя стоимость, инвестиции, оценка стоимости

N. V. Salnikova[1]✉, I. V. Filimonova[2]

Indicators of investment attractiveness of oil and gas companies in Russia

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS
e-mail: n.salnikova1@g.nsu.ru

Abstract. The oil and gas sector plays a key role in the Russian economy, providing a significant share of GDP and export revenues. The investment attractiveness of companies in this sector directly affects the inflow of capital, technological development and the stability of economic growth. In the context of global volatility in oil prices and geopolitical risks, the relevance of assessing investment attractiveness becomes especially important. Existing methods often do not take into account the specifics of the oil and gas sector and are influenced by short-term market factors. This paper examines the possibility of applying Warren Buffett's methodology for a comprehensive assessment of the investment attractiveness of Russian oil and gas companies. Based on the analysis of financial statements and cash flow forecasting, the intrinsic value of shares of leading companies in the industry is calculated. The results obtained are compared with market capitalization, which allows identifying

undervalued assets and formulating investment recommendations. The results of the work are of practical importance for investors focused on long-term investments in the oil and gas sector, and can also be used by companies when developing development strategies.

Keywords: capitalization, shares, oil and gas companies, intrinsic value, investments, valuation

Введение

Россия является одним из крупнейших производителей и экспортеров нефти и газа в мире. Деятельность нефтегазовых компаний имеет значительное влияние на валютные доходы страны, бюджетные поступления и общий экономический рост. Они же являются основой инновационного развития нефтегазового комплекса [1-3]. Акции нефтегазовых компаний составляют значительную часть инвестиционных портфелей российских инвесторов. В условиях нестабильности на глобальных рынках и необходимости диверсификации инвестиционного портфеля, оценка инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний становится особенно актуальной.

Существующие методы оценки часто опираются на текущую рыночную конъюнктуру и не всегда позволяют выявить фундаментально недооцененные активы, что повышает риски принятия неверных инвестиционных решений. В связи с этим, применение методики Уоррена Баффета, основанной на глубоком анализе финансовой отчетности и оценке внутренней стоимости, представляется перспективным подходом для получения более объективной оценки инвестиционной привлекательности российских нефтегазовых компаний.

Выполнение данного исследования базируется на данных Московской Биржи и финансовых отчетов компаний. Теоретической и методологической основой являются работы отечественных и зарубежных специалистов в области экономики (Ахтямов М.Х., Росс Н., Трясцина Н.Ю., Щербакова Н.С., Kruschwitz L. и др.) [4-8].

Целью исследования является оценка инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний России с использованием методики Уоррена Баффета, которая позволит выявить наиболее перспективные компании для инвестирования и предложить соответствующие рекомендации для инвесторов.

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать теоретические и методические основы оценки инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний, включая изучение роли капитализации и внутренней стоимости в этом процессе;
2. Разработать алгоритм применения методики Уоррена Баффета для оценки внутренней стоимости акций нефтегазовых компаний России;
3. Рассчитать внутреннюю стоимость акций ведущих нефтегазовых компаний России на основе их финансовых показателей и прогнозов будущих денежных потоков с использованием разработанной методики;
4. Сравнить полученные значения внутренней стоимости с текущей рыночной капитализацией компаний, оценить их инвестиционную привлекательность и разработать рекомендации для инвесторов.

Методы и материалы

В основу работы положен подход Уоррена Баффета, базирующийся на методе дисконтирования денежных потоков (DCF). Для реализации исследования был разработан следующий алгоритм:

1. *Формирование информационной базы исследования*

В рамках подготовки к анализу была собрана комплексная база данных, включающая: исторические котировки акций, показатели свободного денежного потока (FCF), значения мультипликатора P/FCF, параметры рыночной стоимости собственного и заемного капитала. Данные охватывают 10-летний период (2013-2023 гг.) и включают следующие ключевые компании нефтегазового сектора России: ПАО «НК «Роснефть»; ПАО «Газпром»; ПАО «НОВАТЭК»; ПАО «ЛУКОЙЛ»; ПАО «Газпром нефть»; ОАО «Сургутнефтегаз»; ПАО «Татнефть», ПАО «АНК «Башнефть», ПАО «НК «РуссНефть».

2. Прогнозирование будущих денежных потоков и подсчет ставки дисконтирования

Для дисконтирования стоимости будущих денежных потоков необходимо на основе текущих значений сделать прогноз, какими темпами будут расти денежные потоки. Величина ставки дисконтирования напрямую влияет на величину стоимости, которая будет получена в результате вычислений. Подсчет ставки дисконтирования (WACC) производится по формуле (1). Данный метод позволяет учесть структуру капитала компании: соотношение долга и собственного капитала.

$$WACC = \left(\frac{E}{V}\right) \times Re + (\frac{D}{V}) \times Rd \times (1 - Tc), \quad (1)$$

где E – рыночная стоимость собственного капитала; D – рыночная стоимость долга; V – общая стоимость капитала; Re – доходность собственного капитала компании; Rd – доходность заемного капитала компании; Tc – ставка налога на прибыль.

3. Дисконтирование будущих денежных потоков

Каждый денежный поток нужно дисконтировать по этой ставке к текущему моменту. Общая формула (2) дисконтирования денежных потоков выглядит следующим образом:

$$DCF = \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \cdots + \frac{P/FCF}{(1+r)^n}, \quad (2)$$

где DCF- общая текущая стоимость всех будущих денежных потоков, которая рассчитывается с учетом дисконтирования; CF_t - денежный поток в периоде t; P/FCF– соотношение капитализации и свободного денежного потока компании; n - общее количество периодов, в течение которых ожидаются денежные потоки.

4. Анализ полученных в ходе расчётов значений

Полученные значения DCF сопоставляются с рыночными ценами акций для выявления недооцененных активов и формирования инвестиционных выводов.

Результаты и обсуждение

Шесть из девяти компаний являются недооценёнными и, как следствие, инвестиционно привлекательными. Анализ стоимостных показателей акций показывает, что наиболее выгодными для инвестирования являются: ПАО «Газпром», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «НК «РуссНефть». Наибольший потенциал демонстрирует ПАО «НК «РуссНефть» (*разрыв между DCF и рыночной ценой составил 829%*). В то же время, вложения в ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Татнефть» и ПАО «АНК «Башнефть» могут оказаться наиболее убыточными. Полученные внутренние и рыночные стоимости внесены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение внутренней и рыночной стоимости акций

Компании	DCF	Стоимость акции в 2023 г.	Разница, %	Разница, раз
ПАО «НК «Роснефть»	907	551	**65**	**1,65**
ПАО «Газпром»	301	160	**89**	**1,89**
ПАО «НОВАТЭК»	1 208	1 469	**-18**	**0,82**
ПАО «ЛУКОЙЛ»	12 793	6 761	**89**	**1,89**
ПАО «Газпром нефть»	1 040	847	**23**	**1,23**
ПАО «Сургутнефтегаз»	133	27	**395**	**4,95**
ПАО «Татнефть»	591	711	**-17**	**0,83**
ПАО «АНК «Башнефть»	258	2 197	**-88**	**0,12**
ПАО «НК «РуссНефть»	1 226	132	**827**	**9,27**

Источник: составлено автором на основе расчётов

Заключение

Инвестиции играют ключевую роль в функционировании современной экономики, обеспечивая компании необходимыми ресурсами для роста и регулирования денежного потока. Однако на фондовом рынке цены активов не всегда отражают их истинную стоимость. Это создает уникальные возможности для инвесторов, которые ищут недооцененные акции. В ходе данного исследования на основе методики Уоррена Баффета была рассчитана внутренняя стоимость акций ведущих компаний нефтегазового сектора России. Путем сопоставления полученных значений внутренней стоимости с их текущей рыночной капитализацией была проведена оценка инвестиционной привлекательности. Затем были разработаны конкретные инвестиционные рекомендации, определяющие целесообразность покупки, продажи или удержания акций исследованных компаний.

Таким образом, было проанализировано девять нефтегазовых компаний. Результаты показали, что шесть из них: ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром нефть», ПАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «НК «РуссНефть», обладают инвестиционной привлекательностью. Однако важно помнить, что метод DCF основан на прогнозах и допущениях, которые могут не

оправдаться в будущем. Поэтому результаты, полученные с помощью этого метода, следует рассматривать как ориентировочные.

Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) «Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности» № 121040100281-8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Nikitenko S.M. New directions for sustainable development of oil and gas industry of Russia: innovative strategies, regional smart specializations, public-private partnership // В сборнике: 17TH international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings. – 2017. – С. 365-372.

2. Эдер Л.В., Саблин К.С., Проворная И.В. Научные подходы к обоснованию приоритетных инновационно-технологических направлений пространственной специализации ресурсных регионов России // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 5. – С. 220-224.

3. Эдер Л.В., Проворная И.В. Основные направления инновационного развития нефтегазовой промышленности России // В сборнике: Инновационный потенциал экономики России: состояние и перспективы. Алексеев А.В., Казанцева Л.К. сборник научных трудов. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. – Новосибирск, 2013. – С. 165-183.

4. Ахтямов М. К и др. Концепция оценки внутренней стоимости предприятия //Российское предпринимательство. – 2016. – Т. 17. – №. 14. – С. 1619-1628.

5. Росс Н. Секреты выдающихся инвесторов. Советы от Уоррена Баффета, Бенджамина Грэхема, Фила Фишера, Томаса Роу Прайса и Джорджа Темплтона. – Litres, 2020. 393 с.

6. Трясцина Н. Ю. Комплексная оценка инвестиционной привлекательности предприятий //Экономический анализ: теория и практика. – 2006. – №18. – С. 5-7.

7. Щербакова Н. С. и др. Способы оценки инвестиционной привлекательности компаний топливно-энергетического комплекса России //Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2018. – №. 5. – С. 65-65.

8. Kruschwitz L., Löffler A. Discounted cash flow: a theory of the valuation of firms. – John Wiley & Sons, 2006.

© С. Н. Сальникова, И. В. Филимонова, 2025

УДК 338.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-54-59

А. П. Саматова[1,2]✉, И. В. Филимонова[1,2]

Методические основы прогнозирования цен на нефть

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

Аннотация. Прогнозы цен на нефть оказывают значимое влияние на экономику большинства стран. Они используются в стратегических документах, обеспечивают уверенность инвесторов, позволяют производителям планировать свою деятельность. В связи с этим чрезвычайно важной задачей является выявление способа, обеспечивающего высокую точность прогноза. Целью исследования является обзор методов прогнозирования цен на нефть. Показано, что существующие методы прогнозирования цен на нефть можно разделить на количественные и качественные методы. Выявлены основные ограничения существующих подходов, показаны преимущества и недостатки наиболее популярных методов. Представлена классификация методов машинного обучения. Показано, что количественные и качественные методы можно применять вместе с целью обогащения исследования и учета влияния факторов, включение которых в модели ранее было затруднено.

Ключевые слова: прогнозирование, цены на нефть, эконометрические модели, машинное обучение

A. P. Samatova[1,2]✉, I. V. Filimonova[1,2]

Methodological foundations of oil price forecasting

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, the Russian Federation
e-mail: a.samatova@g.nsu.ru

Abstract. Oil price forecasts have a significant impact on the economies of most countries. They are used in strategic documents, provide investors with confidence, and allow manufacturers to plan their activities. In this regard, it is extremely important to identify a method that ensures high forecast accuracy. The purpose of the study is to review the methods of forecasting oil prices. It is shown that the existing methods of forecasting oil prices can be divided into quantitative and qualitative methods. The main limitations of the existing approaches are revealed, the advantages and disadvantages of the most popular methods are shown. The classification of machine learning methods is presented. It is shown that quantitative and qualitative methods can be applied together in order to enrich the research and take into account the influence of factors that were previously difficult to include in the models.

Keywords: forecasting, oil prices, econometric models, machine learning

Введение

Все страны в той или иной мере являются участниками нефтяного рынка. От колебаний цен на нефть зависят доходы и расходы государств, предприятий,

использующих нефть в качестве топлива и сырья, инвесторов и других участников. На данный момент в России реализуется и планируется к реализации множество проектов, направленных на развитие нефтегазового комплекса, в том числе в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [1-3], эффект от реализации которых зависит в том числе от цен на нефть. При этом динамика цен на нефть характеризуется высокой волатильностью, цены способны измениться достаточно сильно за относительно короткий период времени. Так, с июня 2022 г. по июнь 2023 г. цены на нефть марки Brent упали с 117,69 до 74,98 долларов за баррель. То есть, всего за год цены на нефть упали на 36,29%, что значительно снизило доходы стран-экспортеров нефти. Динамика цен на нефть зависит от множества факторов, причем наиболее ярко на цены влияют геополитические события, часто служащие причинами резкого роста или падения цен (рис. 1). Таким образом, возникает необходимость хеджирования рисков, связанных с изменениями цен на нефть. Неотъемлемой частью этого процесса является прогнозирование цен на нефть.

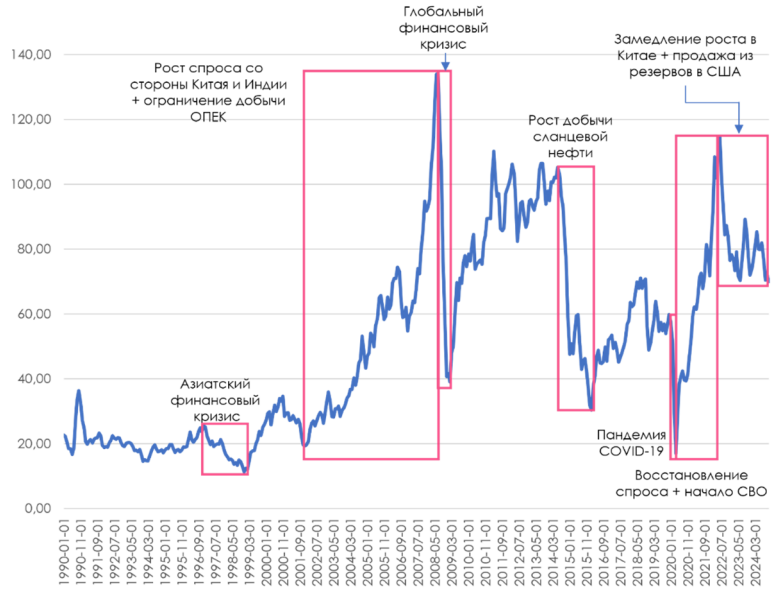


Рис. 1. Динамика цен на нефть марки WTI, долл. за барр. и основные события, объясняющие снижения и повышения цен

Источник: составлено автором по данным Federal Reserve Bank of St. Louis (FRED)

Подходы, применяемые при прогнозировании цен на нефть, весьма разнообразны и используются для решения разных задач. Так, например, [4] использовали модификацию модели ARIMA для прогнозирования цен биржевых товаров, в том числе нефти. [5] использовали модификацию модели GARCH, чтобы оценить влияние геополитических рисков на волатильность цен нефти. А в [6] используется модель коррекции ошибок для моделирования долгосрочных равновесных отношений между ценами на нефть и природный газ. Таким образом,

понимание особенностей, преимуществ и недостатков тех или иных подходов позволит более точно определить модель при выполнении определенной задачи и добиться лучших результатов.

Целью данного исследования является обзор методов прогнозирования цен на нефть для упрощения ориентирования в системе существующих подходов.

Для достижения цели был поставлен ряд задач:

4. Изучить теоретические основы прогнозирования цен на нефть;
5. Систематизировать существующие методы прогнозирования цен на нефть;
6. Выявить особенности, преимущества и недостатки крупных групп методов;
7. Сформировать выводы по полученным результатам.

Результаты и обсуждение

Выделяют *количественные* и *качественные* методы прогнозирования цен на нефть. Количественные методы основаны на использовании математических моделей в процессе прогнозирования, обычно в результате получается конкретное значение будущей цены или других связанных прогнозируемых параметров (волатильности, темпов роста и т.д.). Количественные методы намного более распространены в исследованиях, среди них выделяются эконометрический анализ, машинное обучение и смешанные подходы, призванные соединить преимущества первых двух групп методов.

Эконометрические модели совсем недавно были доминирующим методом прогнозирования и до сих пор активно применяются в исследованиях. К их преимуществам относится высокая интерпретируемость, возможность получить конкретные оценки влияния факторов (коэффициенты модели). Такие модели прекрасно справляются с выявлением линейных взаимосвязей, многие из них относительно просты в реализации. Одним из наиболее распространенных ответвлений эконометрического анализа является анализ временных рядов, в частности модели ARIMA, GARCH, VAR и их модификации. Однако анализ с помощью эконометрических моделей ограничен необходимостью выполнения строгих предположений, например, о стационарности рядов, экзогенности предикторов, нормальности ошибок и т.д. Помимо этого, большинство моделей очень чувствительны к наличию пропусков и выбросов в данных, что требует от исследователя тщательной работы с данными перед построением модели. Одним из наиболее существенных ограничений является предположение о линейности взаимосвязей.

Стремление зайти дальше и выявить нелинейные взаимосвязи в данных привело к развитию и росту популярности машинного обучения. Нелинейные модели позволяют избавиться от основных ограничений эконометрических методов, они хорошо справляются с наличием выбросов и пропусков. Однако и они имеют свои ограничения. Так, например, машинное обучение лучше всего работает при использовании большого количества данных, получение которых затруднено при анализе энергетических рынков. В случае, если исследователь хо-

чет учесть влияние фундаментальных факторов, таких как уровень добычи или запасов, ему придется использовать данные с ежемесячной периодичностью, так как данные публикуются не так часто. Таким образом, обучение будет проводиться на очень ограниченной, по меркам машинного обучения, выборке. В результате может возникнуть проблема переобучения, при возникновении которой модель излишне подстраивается под обучающую выборку и плохо обобщает закономерности на тестовой выборке. Справиться с этим помогает регуляризация, использование неглубоких деревьев и ранняя остановка обучения.

На рисунке 2 представлена распространенная классификация методов машинного обучения. Обучение с учителем предполагает использование размеченных данных, содержащих значение целевой переменной, которое модель будет обучаться предсказывать. Обучение без учителя применяется в случае, если «правильный ответ» заранее неизвестен и требуется найти взаимосвязи в данных. Часто обучение без учителя применяется для решения задачи кластеризации. Еще одним подходом к обучению моделей является обучение с подкреплением, в ходе которого модель взаимодействует с окружающей средой и получает вознаграждения в случае выполнения правильных действий, стремясь максимизировать общий выигрыш. Этот способ обучения особенно популярен в сферах, где присутствует высокая степень вариативности возможных правильных и неправильных действий, например, в робототехнике или транспортных системах.

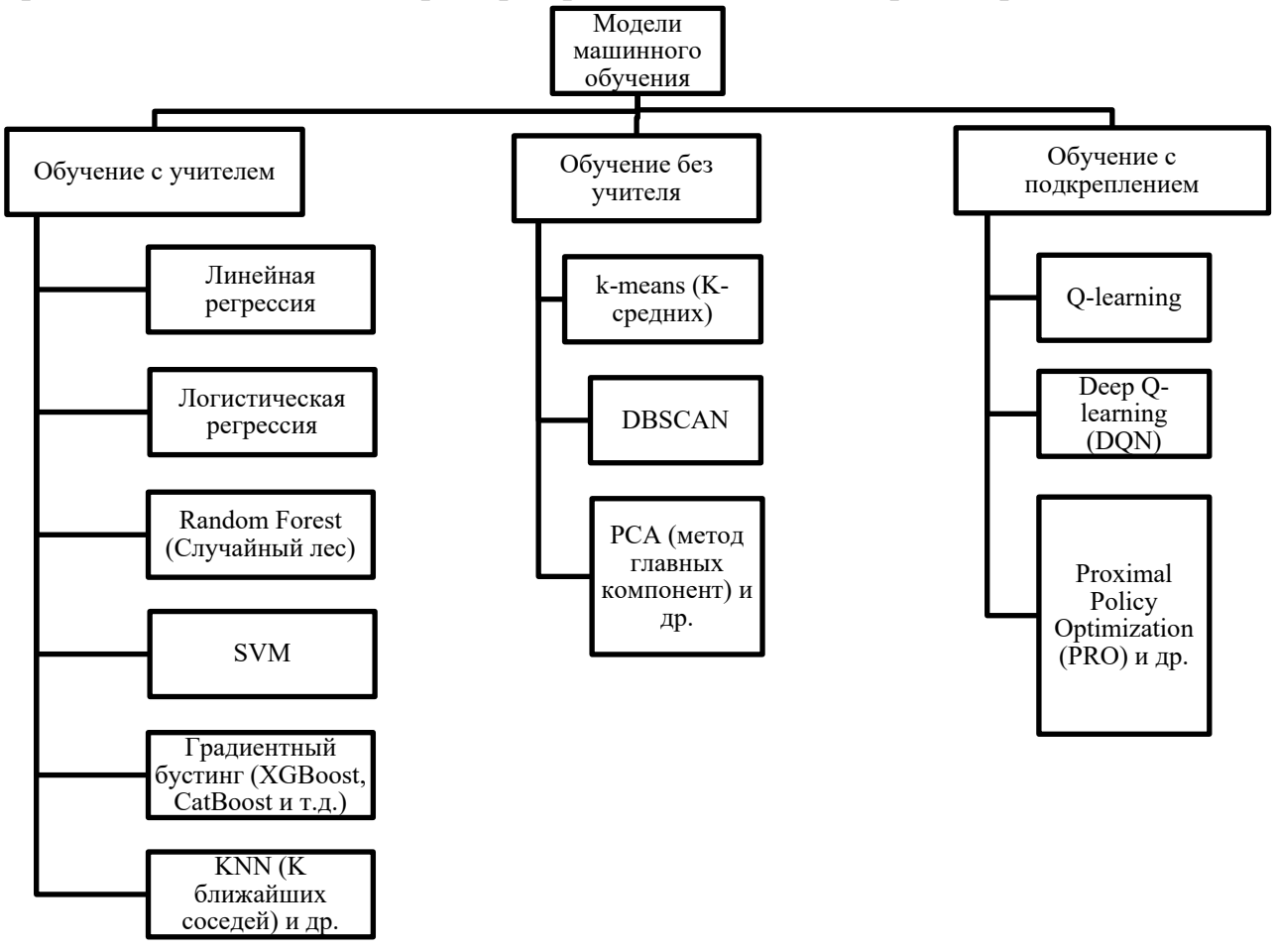


Рис. 2. Классификация моделей машинного обучения

Источник: составлено автором

Применительно к задаче прогнозирования цен на нефть решается задача регрессии, которая относится к методам обучения с учителем. В последние годы большинство исследований показывает, что эффективнее всего задачу прогнозирования цен на нефть решают алгоритмы глубокого обучения, в частности, модель LSTM (Long Short-Term Memory). Однако, несмотря на высокую эффективность таких алгоритмов, существует ряд ограничений их использования. Во-первых, глубокое обучение требует еще большего объема данных для эффективной работы, чем классическое машинное обучение. В контексте прогнозирования цен на нефть с помощью LSTM проблема решается путем использования только высокочастотных данных (например, данные о прошлых ценах на нефть, ценах на золото, серебро и т.д.). Однако в случае, если исследователь хочет оценить влияние и других факторов, данные о которых публикуются реже, ему лучше обратиться к классическому машинному обучению. Другим ограничением является низкая интерпретируемость таких моделей, что может быть критичным ограничением при исследовании влияния факторов на прогноз. Таким образом, глубокое обучение имеет свои преимущество и недостатки и часто применяется в исследованиях, ставящих целью получение прогноза, а не интерпретацию влияния факторов.

Наиболее высокой эффективностью среди классических методов машинного обучения характеризуются модели, основанные на градиентном бустинге, такие как XGBoost и CatBoost. Эти модели основаны на использовании большого количества небольших «слабых» моделей (обычно в качестве таких моделей используются деревья решений), обучающихся последовательно и стремящихся исправить ошибки предыдущих моделей. Таким образом, ошибки отдельных деревьев меньше влияют на результат и точность прогноза повышается.

Смешанные подходы встречаются реже, однако используются для устранения ограничений эконометрических методов и методов машинного обучения. Это позволяет совместить высокую точность прогноза моделей машинного обучения и интерпретируемость эконометрических моделей.

Качественные подходы применяются для учета факторов, влияния которых сложно моделировать: влияние войн, новостей, доступности рынка и т.д. Распространенным качественным методом, часто применяемым в контексте нефтяных цен, является метод Дельфи, основанный опросах экспертов. Другим методом, основанным на опросах экспертов, является метод нечеткого ранжирования предпочтений PROMETHEE, примененный в работе [7]. Результаты качественных исследований часто используются в количественных исследованиях: так, в результате анализа текстов новостей формируются индексы геополитической напряженности, неопределенности экономической политики, климатической неопределенности и т.д., которые могут использованы при моделировании.

Заключение

В ходе исследования были проанализированы методические подходы к прогнозированию цен на нефть. Было выявлено, что количественные подходы более

распространены в литературе, посвященной прогнозированию цен на нефть. Количественные методы можно разделить на эконометрические модели, модели машинного обучения и смешанные подходы. Машинное обучение набирает популярность за счет способности выявлять нелинейные взаимосвязи и большей гибкости моделей, однако требуют большого количества данных и уступают эконометрическим моделям в интерпретируемости. Смешанные подходы позволяют объединить преимущества обеих групп методов, однако это направление пока менее развито. При этом качественные методы позволяют учитывать сложномоделируемые факторы, что существенно обогащает анализ, однако ограничением данного метода является субъективность источников. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости тщательного подбора наиболее подходящей модели в контексте решаемой проблемы, при этом внимание стоит обращать не только на моделируемый параметр, но и на то, с какой периодичностью можно получить данные, каким окажется итоговый размер выборки, важна ли интерпретируемость прогноза. Результаты исследования могут быть полезны при определении наиболее эффективного механизма прогнозирования цен на нефть.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10157, https://rscf.ru/project/23-78-10157/.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Nikitenko S.M. New directions for sustainable development of oil and gas industry of Russia: innovative strategies, regional smart specializations, public-private partnership // В сборнике: 17TH INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2017. Conference proceedings. – 2017. – С. 365-372.

2. Эдер Л.В., Саблин К.С., Проворная И.В. Научные подходы к обоснованию приоритетных инновационно-технологических направлений пространственной специализации ресурсных регионов России // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 5. – С. 220-224.

3. Эдер Л.В., Проворная И.В. Основные направления инновационного развития нефтегазовой промышленности России // В сборнике: Инновационный потенциал экономики России: состояние и перспективы. Алексеев А.В., Казанцева Л.К. Сборник научных трудов. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. – Новосибирск, 2013. – С. 165-183.

4. Gupta H. et al. Forecasting Commodity Prices using Machine Learning //International Journal of Scientific Research in Science and Technology. – 2024. – Vol. 11. – №1. – DOI: 10.32628/IJSRST52411110.

5. Wang L. et al. Forecasting crude oil volatility with geopolitical risk: Do time-varying switching probabilities play a role? //International Review of Financial Analysis. – 2021. – Vol. 76. – №101756. – DOI: 10.1016/j.irfa.2021.101756.

6. Brigida M. The switching relationship between natural gas and crude oil prices //Energy Economics. – 2014. – Vol. 43. – P. 48-55. – DOI: 10.1016/j.eneco.2014.01.014.

7. Abdullah L. et al. Preorder of Factors Affecting Oil Prices: Fuzzy PROMETHEE Approach //Journal of Mathematics. – 2022. – Vol. 2022. – №1. – P. 2766945.

© А. П. Саматова, И. В. Филимонова, 2025

УДК 338.45
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-60-63

А. С. Сеничкина[1], А. В. Комарова[1,2]✉

Эколого-климатические факторы в маркетинговых стратегиях компаний

[1]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

Аннотация. В последнее время компании начинают сталкиваться с давлением со стороны инвесторов и потребителей в части соответствия современным эколого-климатическим стандартам. Для поддержки своей репутации, фирмы используют стратегию ложного информирования об своей деятельности в области климата и экологии, которая называется гринвошинг. Целью исследования были анализ и оценка взаимодействия государства и компании, применяющей гринвошинг, в рамках задачи инспекционного контроля. Осуществлен поиск равновесий Нэша в чистых стратегиях при различных условиях на входящие параметры. В большинстве случаев фирме более выгодно применять стратегию использования гринвошинга, даже в случае наличия контроля со стороны государства. Однако в долгосрочной перспективе могут наблюдаться более сильные потери общества. Таким образом, государству стоит сосредоточиться на увеличении штрафов или снижении издержек контроля.

Ключевые слова: гринвошинг, маркетинговая стратегия, финансовые показатели, изменение климата, загрязнение окружающей среды

A. S. Senichkina[1], A. V. Komarova[1,2]✉

Ecological and climatic factors in marketing strategies of companies

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation
[2] Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS,
Novosibirsk, the Russian Federation
e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

Abstract. Recently, companies have begun to face pressure from investors and consumers to comply with modern environmental and climate standards. To support their reputation, companies use a strategy of false information about their activities in the field of climate and ecology, which is called greenwashing. The purpose of the study was to analyze and evaluate the interaction of the state and a company using greenwashing within the framework of the inspection game. A search for pure strategy Nash equilibria under various conditions for input parameters was carried out. In most cases, it is more profitable for a company to use a greenwashing strategy, even in the case of government control. However, in the long term, greater losses to society may be observed. Thus, the state should focus on increasing fines or reducing control costs.

Keywords: greenwashing, marketing strategy, financial performance, climate change, environmental pollution

Введение

Одним из важных инструментов в управлении бизнеса является маркетинговая стратегия. Она позволяет компании понимать свои цели, определять пути

их достижения и эффективно использовать имеющиеся ресурсы. Сам маркетинг предполагает сложную систему, которая состоит из множества элементов и процессов, взаимодействующих друг с другом для достижения общих целей компании. Основные элементы, из которых состоит маркетинг это: разработка товара, исследования, анализ, управление коммуникациями, установление цен, продвижение товаров и услуг, увеличение объемов продаж, сервисное обслуживание, формирование имиджа и репутации компании [1].

Исследования, проведенные за последние 5 лет, показывают, что потребители обеспокоены эколого-климатическими проблемами и отдают предпочтения более экологичным товарам. Таким образом, фирмы начинают сталкиваться с давлением, чтобы соответствовать требованиям заинтересованных сторон, в первую очередь инвесторов и потребителей. Для поддержки своего имиджа, лояльности, репутации, фирмы используют стратегию, говоря о том, что они заботятся об окружающей среде, когда их действия противоречит этому образу [2]. Такое поведение компании было названо «greenwashing» (гривошинг).

Таким образом, развитием повестки низкоуглеродного развития и устойчивого развития, повлияли на развитие антиэкологичной коммуникации – гринвошинг. Авторы рассматривают ее с разных точек зрения, можно сказать, что у гринвошинга отсутствует единое определение, что усложняет анализ его последствий. Еще одной проблемой является сложность выявления гринвошинга на практике и оценки его последствий. Необходимо отметить, что большинство исследователей оценивают возможные последствия как негативные или нейтральные по отношению к обществу, государству и компании. Таким образом, эффективными представляются превентивные меры, реализуемые в первую очередь государственными органами.

Целью исследования был анализ и оценка взаимодействия государства и компании, применяющей гринвошинг, в рамках задачи инспекционного контроля.

Материалы и методы

Для анализа поведения сторон был использован один из подходов теории игр – одновременная, дискретная игра двух игроков, представляемая в виде матрицы [3]. Теория игр не так часто используется как инструмент для оценки экономических процессов, однако есть ряд публикаций, применяющих усложненные методы, в том числе для описания влияния гринвошинга [4, 5]. Такие подходы обеспечивают более точное описание адаптивных корректировок заинтересованных сторон и динамических процессов принятия решений в сложных средах.

В рамках задачи инспекционного контроля представлена схема игры взаимодействия компании (выбор стратегии применения или отказа от гринвошинга) и государства (выбор стратегии применения или отказа от контроля за недобросовестным поведением – гринвошингом).

Если принять, что Ск – издержки контроля государства (издержки на выявление недобросовестного поведения компании), f – штраф, назначаемый государством, за использование недобросовестных маркетинговых стратегий, Со –

влияние на общество недобросовестных маркетинговых стратегий, В – выручка компании от применения недобросовестных маркетинговых стратегий, то можно составить матрицу игры (рис. 1).

		Государство	
		Контролировать	Не контролировать
Фирма	Не применять стратегию гринвошинг	-Ск 0	0 0
	Применять стратегию гринвошинг	f - Ck B-f	-Co B

Рис. 1. Матрица игры

Результаты и обсуждение

Для оценки взаимодействия фирмы и государства в области применения гринвошинга и контроля за недобросовестным поведением была построена параметрическая матрица игры. В зависимости от соотношения основных показателей: выручки компании, штрафа и издержек контроля государства могут возникать следующие равновесия Нэша в чистых стратегиях, характеризующиеся набором стратегий участников:

1. Если B > f, f < Ck, то равновесие Нэша выражено набором стратегий – (применять стратегию гринвошинг; не контролировать).

В первом случае, если штраф меньше выручки и меньше издержек для регулирования, то для фирмы существует доминирующая стратегия «Применять стратегию гринвошинг». Если штраф меньше издержек контроля, то доминирующая стратегия государства: «не контролировать».

2. Если B < f, f < Ck, то равновесие Нэша – (не применять стратегию гринвошинг; не контролировать).

Во втором случае, если штраф больше выручки, но меньше издержек регулирования, то у фирмы нет доминирующей стратегии, а у государства в этом случае доминирующая стратегия «не контролировать».

3. Если B > f, f > Ck, то равновесие Нэша – (применять стратегию гринвошинг; контролировать).

В третьем случае, если штраф меньше выручки, но больше издержек регулирования, тогда для фирмы доминирующая стратегия – использовать стратегию гринвошинг, а для государства в этом случае нет доминирующей стратегии.

4. Если B < f, f < Ck, то равновесия Нэша в чистых стратегиях нет.

В четвертом случае, если штраф больше выручки и меньше издержек регулирования, то доминирующей стратегии не наблюдается ни у фирмы, ни у государства. Также отсутствует пересечение оптимальных откликов игроков, таким образом, в этом случае равновесия Нэша в чистых стратегиях не устанавливается.

Таким образом, в большинстве случаев фирме более выгодно применять стратегию использования гринвошинга, даже в случае наличия контроля со стороны государства. При этом государству в половине случаев выгодно не применять контроль.

Заключение

Гринвошинг способствует увеличению продаж и доходов в краткосрочной перспективе, но может привести к потере доверия потребителей и снижению конкурентоспособности компании в долгосрочной перспективе. Однако в ряде случаев на практике рыночный механизм может быть несостоятелен при регулировании таких видов экстерналий, т.е. необходимо вмешательство государства. В рамках исследования была проанализирована проблема инспекционного контроля и проведен поиск равновесий Нэша в чистых стратегиях при различных условиях на входящие параметры.

Применение теории игр как инструмента оценки влияния гринвошинга фокусируются в первую очередь на краткосрочных финансовых показателях. Поэтому полученные результаты не являются однозначными выводами для моделируемой ситуации. В долгосрочной перспективе могут наблюдаться более сильные потери общества. Таким образом, государству стоит сосредоточиться на увеличении штрафов или снижении издержек контроля. Это можно сделать через ужесточение регулирования, например, ввести обязательный аудит нефинансовой отчетности компаний или снизить издержки контроля с помощью цифровизации, например, автоматизацию анализа предоставляемой эколого-климатической информации.

Благодарности

Исследование выполнено по плану НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) «Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности» № 121040100281-8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nesterenko V., Miskiewicz R., Abazov R. Marketing communications in the era of digital transformation //Virtual Economics. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 57-70.

2. Santos C., Coelho A., Marques A. A systematic literature review on greenwashing and its relationship to stakeholders: state of art and future research agenda //Management Review Quarterly. – 2024. – Т. 74. – №. 3. – С. 1397-1421.

3. Филимонова И.В., Комарова А.В., Новиков А.Ю. Определение структуры и динамики выбросов парниковых газов сектора "Энергетика" в Новосибирской области //Экология промышленного производства. – 2023. – № 4 (124). – С. 47-53.

4. Avenhaus R., Von Stengel B., Zamir S. Inspection games //Handbook of game theory with economic applications. – 2002. – Т. 3. – С. 1947-1987.

5. Hohzaki R. An inspection game with multiple inspectees //European Journal of Operational Research. – 2007. – Т. 178. – №. 3. – С. 894-906.

6. Xue J. et al. A dynamic evolutionary game to discourage enterprise “greenwashing” //Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 477. – С. 143823.

© А. С. Сеничкина, А. В. Комарова, 2025

УДК 330.322
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-64-67

Е. А. Старыгина [1]✉, Е. А. Кузнецова[1]

Структура мирового рынка торговли услугами

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: elizabeth0803@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые особенности структуры мирового рынка торговли услугами в условиях глобализации и углубляющейся экономической интеграции. Акцент сделан на многообразии видов услуг, что обусловливает методологическую сложность их классификации и анализа. Выделены наиболее значимые сегменты международной торговли — финансовые, страховые услуги и услуги в сфере интеллектуальной собственности. Отмечается устойчивая тенденция роста объёмов экспорта и импорта услуг, а также увеличение их доли в валовом внутреннем продукте государств. Особое внимание уделено роли региональных торговых соглашений и международных организаций, в частности Всемирной торговой организации (ВТО), в формировании институциональной среды мирового рынка услуг. Авторы подчёркивают важность комплексного понимания структуры международной торговли услугами для выработки эффективной экономической политики, укрепления международного сотрудничества и обеспечения устойчивого экономического роста.

Ключевые слова: мировая торговля услугами, ВТО, экономическая интеграция

E. A. Starygina[1]✉, E. A. Kuznetsova[1]

The structure of the global services trade market

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: elizabeth0803@mail.ru

Abstract. This paper examines the key features of the structure of the global trade in services within the context of globalization and deepening economic integration. Particular attention is given to the diversity of service types, which complicates their classification and analysis. The study highlights the most significant segments of international trade, including financial services, insurance services, and intellectual property-related services. A steady increase in the volume of service exports and imports, as well as their growing share in countries' gross domestic product, is observed. The paper emphasizes the role of regional trade agreements and international organizations, particularly the World Trade Organization (WTO), in shaping the institutional framework of the global services market. The author underscores the importance of a comprehensive understanding of the structure of international trade in services for the development of effective economic policy, the strengthening of international cooperation, and the achievement of sustainable economic growth.

Keywords: Global trade in services, WTO, economic integration

Введение

Международная торговля услугами представляет собой один из наиболее динамично развивающихся сегментов мировой экономики. На фоне усиливающейся глобализации и интеграции национальных экономик роль услуг в формировании внешнеэкономических связей непрерывно возрастает. В отличие от торговли товарами, роль России в которой обусловлена в том числе наличием широкой ресурсной базы [1-3], обмен услугами характеризуется более сложной

структурой, высокой степенью нематериальности и зависимостью от сопутствующих факторов, таких как технологическое развитие, правовое регулирование и институциональная среда. Современная система мировой торговли услугами охватывает широкий спектр направлений — от традиционного туризма и транспортных услуг до интеллектуальной собственности, финансов и цифровых сервисов. По классификации Всемирной торговой организации в настоящий момент выделяется более 183 видов услуг, что подчёркивает значительное разнообразие и многослойность данного сектора. Изучение структуры мирового рынка торговли услугами позволяет выявить основные центры притяжения спроса и предложения, определить ключевые барьеры и механизмы регулирования, а также оценить перспективы дальнейшего роста и трансформации сектора в условиях цифровизации и смены глобальных экономических ориентиров. В условиях нарастающей конкуренции и усиления межрегиональных связей понимание этих процессов становится неотъемлемой частью выработки эффективной экономической и внешнеторговой политики.

Развитие международной торговли услугами

Активное развитие международной торговли услугами началось с 80-х годов XX в. Из-за быстрого развития международных операций по обмену услугами возродился интерес к созданию многостороннего соглашения по торговле услугами. В результате Уругвайского раунда переговоров (1986–1994 гг.), последнего тура в рамках ГАТТ, 125 участвовавших стран и территорий достигли соглашений по 56 различным мерам регулирования внешней торговли. Одним из ключевых документов этого раунда стало соглашение о создании нового международного экономического института – Всемирной торговой организации (ВТО), которая заменила ГАТТ. В пакет её соглашений, помимо прочего, входило подписание ГАТС (Генеральное соглашение по торговле услугами), которое устанавливает принципы и правила в торговле услугами в целях ее дальнейшего развития и либерализации.

В ГАТС прописаны как общие обязательства членов ВТО, так и специфические, которые предусмотрены для отдельных стран. Одним из важных общих обязательств, является режим наибольшего благоприятствования (РНБ), который гласит о следующем: «В отношении любой меры, охватываемой ГАТС, услугам и поставщикам услуг предоставляется режим, не менее благоприятный, чем тот, который он предоставляет для аналогичных услуг или поставщиков услуг любой другой страны» [4]. Однако ВТО признает, что не все страны смогут сразу выполнить обязательства по РНБ, поэтому предоставляет право сохранять нарушающие его меры в определенных секторах услуг для поставщиков из других стран - членов ВТО.

Роль международной торговли услугами в экономике

Международная торговля услугами играет ключевую роль в современной глобальной экономике. Она стимулирует развитие инноваций и повышение качества услуг, что способствует увеличению их конкурентоспособности и эффективности на рынке. В 2023 году мировой экспорт услуг вырос на 8,3 %. Согласно данным UNTCAD на региональном уровне в Латинской Америке и Карибском бассейне отмечен самый высокий годовой прирост экспорта услуг - 12% [5]. За

ним следуют Африка (почти 9%), далее Европа и Северная Америка (более 8%). В Азии этот показатель увеличился почти на 8%. Также в 2023 году мировой импорт услуг вырос на 9,5 %. Самый быстрый ежегодный рост импорта услуг был отмечен в Азии и Европе, в обоих регионах он превысил 10% в 2023 году. В странах Африки импорт вырос всего на 1% по сравнению с предыдущим годом.

На рисунке 1 представлена диаграмма, отображающая процентное соотношение торговли услугами в мировом ВВП в текущих ценах. Данная величина – это сумма экспорта и импорта услуг в трлн долл., деленная на величину мирового ВВП в трлн долл.

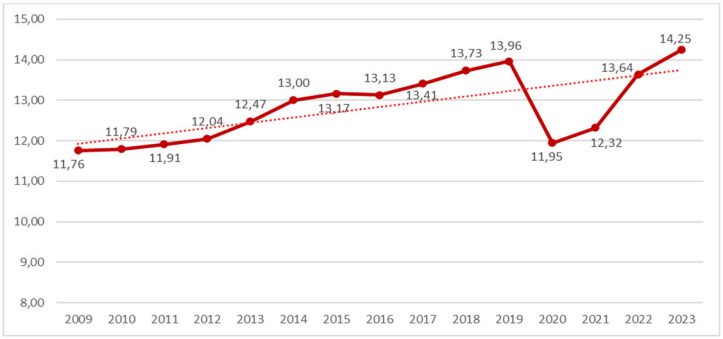


Рис. 1. Динамика мирового оборота услуг (% от ВВП)

Наблюдаемая в настоящее время положительная динамика подтверждает возрастающую роль торговли услугами в глобальной экономике. Единственное сильное снижение данного показателя произошло в 2020 году, однако к 2023 году его объемы не только восстановились, но и превысили допандемийный уровень.

Секторальная структура торговли услугами

Рассматривая мировой рынок услуг, необходимо также обратить внимание на секторальную структуру торговли услугами (рис. 2)

Рис. 2. Структура мирового экспорта и импорта услуг за 2023, % [6,7]

Диаграмма демонстрирует смещение акцентов мировой торговли услугами в сторону высокотехнологичных и деловых сегментов. Лидирующую позицию в импорте и экспорте занимают страховые, финансовые услуги, услуги в области интеллектуальной собственности и другие бизнес-услуги (более 42 %), что указывает на рост значения знаний и финансовых потоков в современной экономике. При этом в экспорте выше доля телекоммуникационных, компьютерных и информационных услуг (13,78 % против 8,25 % в импорте), что свидетельствует о стремительном развитии цифровых технологий и повышении спроса на ИКТ-услуги за рубежом. Относительное сокращение доли транспортных услуг в экспорте по сравнению с импортом также отражает структурные изменения: мировая торговля сдвигается от традиционных услуг (таких как транспорт) к более высокотехнологичным и интеллектуальным услугам.

Заключение

Комплексное понимание структуры мировой торговли услугами является важнейшим условием для выработки эффективной экономической политики, укрепления международного взаимодействия и обеспечения устойчивого экономического роста. Дальнейшее развитие этого сегмента требует согласованных действий на уровне международных организаций, а также гибкости и адаптивности национальных экономик в ответ на меняющиеся условия глобального рынка.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10157, https://rscf.ru/project/23-78-10157/.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буданов В.И., Вальтух К.К., Дементьев Н.П., Кожогулов Б.К., Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Косых Н.П., Кривенко А.П., Кудряшова С.Я., Лившиц В.Р., Минин В.А., Мордкович В.Г., Пузанков Ю.М., Равкин Ю.С., Седельников В.П., Сенькин Н.И., Сергеев М.Г., Соколов А.В., Соколов В.М., Титлянова А.А. и др. Природные ресурсы России: территориальная локализация, экономические оценки // Сер. Интеграционные проекты Том Выпуск 12. – Новосибирск, 2007.

2. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Мишенин М.В., Проворная И.В. Принципиальные подходы к геолого-экономической оценке разномасштабных нефтегазовых объектов // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 15-23.

3. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Стратегия комплексного освоения ресурсов и запасов газа Восточной Сибири и Дальнего Востока // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2009. – № 1. – С. 18-28.

4. Сайт с положениями ГАТС. URL: http://www.rgwto.com/wto.asp (дата обращения: 27.04.2025).

5. UNCTAD. World Trade Report 2024: Key Statistics and Trends in International Trade in Services. — United Nations Conference on Trade and Development, 2024. — 50 с.

6. Breinlich H., Criscuolo C. International trade in services: A portrait of importers and exporters //Journal of International Economics. – 2011. – Vol. 84. – №2. – P. 188-206.

7. Сайт Всемирного банка с данными по объёмам экспорта и импорта услуг. URL: https://data.worldbank.org/ (дата обращения: 27.04.2025).

© Е. А. Старыгина, Е. А. Кузнецова, 2025

УДК 338.512
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-68-76

А. Е. Шеремет[1]✉, В. Ю. Немов[2]

Выявление факторов, влияющих на душевое энергопотребление

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.sheremet1@g.nsu.ru

Аннотация. Все страны мира стремятся к увеличению благосостояния и экономическому росту. Между энергопотреблением и экономическим развитием страны существует сильная корреляция. Однако, важно подчеркнуть, что неравномерное распределение энергопотребления между макрорегионами мира создает дисбалансы, которые ведут к мировой экономической и политической нестабильности. Изучение факторов, определяющих уровень душевого энергопотребления, позволяет понять закономерности развития энергетических систем. В данной статье исследуются основные факторы, влияющие на душевое энергопотребление макрорегионов с помощью многофакторной линейной модели. Применяя методы регрессионного анализа, исследование выявляет значимость экономических, социальных и технологических факторов на душевое энергетическое потребление с учетом различий макрорегионов. Полученные результаты демонстрируют закономерности, которые наблюдаются в различных макрорегионах и странах мира, что позволяет разработать стратегии для повышения энергоэффективности.

Ключевые слова: экономический рост, энергопотребление, энергоэффективность, регрессионный анализ

A. E. Sheremet[1]✉, V. Yu. Nemov[2]

Identification of factors affecting per capita energy consumption

[1]Novosibirsk State Research University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: sheremet1@g.nsu.ru

Abstract. All countries of the world strive to increase prosperity and economic growth. There is a strong correlation between energy consumption and the economic development of the country. However, it is important to emphasize that the uneven distribution of energy consumption between the macro-regions of the world creates imbalances that lead to global economic and political instability. The study of the factors determining the level of per capita energy consumption makes it possible to understand the patterns of development of energy systems. This article examines the main factors influencing the per capita energy consumption of global macroregions using a multifactorial linear model. Using regression analysis methods, the study reveals the importance of economic, social, and technological variables on per capita energy consumption, taking into account differences in macroregions. The results obtained demonstrate patterns that are observed in various macroregions and countries around the world, which allows us to develop strategies to improve energy efficiency.

Keywords: economic growth, energy consumption, energy efficiency, regression analysis

Введение

Все страны мира стремятся к повышению своего благосостояния и экономическому росту. По данным Всемирного банка совокупный объём мирового ВВП увеличивается с каждым годом и за последние 10 лет прирост составил около 35%. Развитие национальной экономики зависит от множества различных факторов и одним из наиболее значимых является объем потребления энергоресурсов. Энергопотребление и экономическое развитие страны тесно коррелируют. Положительная связь между энергией и экономическим ростом очевидна: доход и потребление энергии связаны на каждом континенте и в каждом временном периоде, по которому существуют данные. Нигде в мире нет богатой страны, которая потребляет мало энергии, или бедной страны, которая потребляет много. Однако неравномерное распределение энергопотребления между макрорегионами мира создает дисбалансы, которые влияют на глобальную экономическую и политическую стабильность. Изучение факторов, определяющих уровень душевого энергопотребления, позволяет понять закономерности развития энергетических систем. Актуальность темы обусловлена несколькими основными аспектами:

Прежде всего, детальный анализ структуры и динамики энергопотребления на душу населения поможет спрогнозировать будущие потребности в энергоресурсах и разработать стратегии повышения энергоэффективности.

Кроме того, всестороннее изучение факторов позволит выявить уже существующие несоответствия в структуре энергопотребления и разработать меры их регулирования.

Практическая значимость исследования заключается в комплексном анализе факторов, влияющих на энергопотребление, с учетом различных особенностей макрорегионов.

Целью данного исследования является выявление основных факторов, оказывающих влияние на уровень душевого энергопотребления первичных энергоресурсов.

Исходя из поставленной цели, в задачи исследования будут входить следующие пункты:

1. Анализ литературы для систематизации методов и результатов работы других авторов по тематике исследования факторов, влияющих на уровень душевого энергопотребления первичных энергоресурсов.

2. Выбор и обоснование экономико-математического инструментария для решения поставленной исследовательской задачи.

3. Отбор и обоснование переменных для исследования уровня душевого энергопотребления первичных энергоресурсов с учетом доступности данных и их влияния на результирующий показатель.

Предмет исследования: факторы, определяющие уровень душевого энергопотребления первичных энергоресурсов в макрорегионах мира.

Объект исследования: макрорегионы мира.

Методы и материалы

Для достижения цели выбор был сделан в пользу многофакторной линейной модели.

$$\hat{y}_t = a_0 + a_1 x_{1t} + a_2 x_{2t} + \ldots + a_{it} x_{it+} \epsilon_t, \quad (1)$$

где $\hat{y}_t$ - прогнозируемый показатель;

x_{it} - прогнозируемые значения факторных признаков;

a_{it} - прогнозируемые оценки параметров моделей регрессии;

t - период прогнозирования.

Многофакторная линейная модель – это регрессионная модель, цель которой состоит в том, чтоб оценить коэффициенты a, на основе имеющихся данных. Использование данного экономико-математического инструментария целесообразно по следующим причинам:

1.Учет множества факторов: многофакторные модели представляют собой инструмент для одновременного анализа воздействия нескольких независимых переменных на зависимую переменную.

2. Линейная регрессия позволяет четко количественно оценить вклад каждого фактора через значения коэффициентов.

Для оценки адекватности модели были проведены следующие тесты:

Стационарность. Данный тест проводился с помощью ADF-теста, чтобы убедиться, что временные ряды не содержат единичного корня.

По результатам проведённого этапа тестирования была выявлена нестационарность рядов, т.е. p-value> 0,05. Для избавления от нестационарности, данные были приведены к первым разностям:

$$Y_t = Y_t - Y_{t-1}, \quad (2)$$

где ΔY_t — первая разность для наблюдения на момент времени t,

Y_{t-1} — значение переменной на предшествующий момент времени,

Y_t — значение переменной на момент времени t.

Далее тест на **линейность**. Линейная регрессия предполагает, что связь между переменными линейная, иначе это может исказить данные и модель будет плохо их объяснять. Графический анализ остатков показал их случайное распределение, без выраженной структуры, что свидетельствует о соблюдении линейности.

Корреляция помогла оценить силу и направление связи между переменными и избежать дублирующих факторов с помощью матрицы автокорреляции.

Также была проведена проверка на нормальность **остатков**, с помощью теста Шапиро-Уилка. Определяет насколько сильно остатки отклоняются от нормального распределения (Если p-value> 0.05, то остатки — нормальны. Если p-value $\leq$ 0.05, то нормальность отвергается)

И, наконец, проверка **качества модели** через такие метрики как R^2 и среднеквадратическая ошибка (MSE).

После построения первой модели, показатели оказались слабыми, поэтому была проведена дополнительная очистка данных (убраны отрицательные значения и пропуски) и построена **вторая модель**. В ней качество улучшилось: вырос R^2 и снизилась ошибка, модель стала статистически значимой.

Изучение влияния различных факторов на потребление энергии, получило достаточно широкое представление в литературе. Особенно развито направление, определяющее взаимосвязь между потреблением энергии и экономическим ростом. Многие исследования, в том числе А. А. Карташевич, А. В. Комарова, И. В. Филимонова, D. Stern, Qiang Wang, Min Su, Rongrong Li, Pablo Ponce, Zaharia A. [2,8,9,10,11], как правило, подтверждают положительную взаимосвязь между потреблением энергии и экономическим ростом. Некоторые из исследований показывают, что потребление энергии в долгосрочной перспективе положительно зависит от урбанизации [1,10,], прямых иностранных инвестиций [1,6], ожидаемой продолжительности жизни при рождении и валового национального дохода (ВНД) на душу населения [6]. Множество исследований описывают, что на потребление энергии влияет рост численности населения [1,8,11]. Также в своей научной статье Дегтярёв К.С. упоминает о технологических изменениях и энергоэффективности, как факторах, влияющих на потребление энергии [1].

Детально изучив научную литературу по это теме, удалось выделить ряд факторов, оказывающих влияние на душевое потребление первичных энергоресурсов. Получилось 3 группы факторов:

1. Экономические: ВВП, ВНД, прямые иностранные инвестиции.
2. Социальные: рост численности населения, ожидаемая продолжительность жизни, урбанизация.
3. Технологические: технологические изменения, энергоэффективность

Результаты

Для построения модели было выбрано 7 макрорегионов – Северная Америка, Центральная и Южная Америка, Европа, СНГ, Ближний Восток, Африка, АТР; 4 страны с наибольшим потреблением первичной энергии – Китай, Индия, Россия и США, а также отдельно рассмотрены страны ОЭСР и не ОЭСР.

За период исследования с 1965 по 2023 гг. собраны данные по переменным. Данные были взяты из World Bank.

После проведения расчетов составлена сводная табл.1. показывающая, какие факторы статистически значимо влияют на душевое потребление первичных энергоресурсов в разных странах и регионах.

Таблица 1

Факторы, влияющие на душевое потребление первичных энергоресурсов

Регион	Урбанизация	ВВП	Технологические изменения	Инвестиции	ВНД	Энергоэффективность	Рост численности населения	Ожидаемая продолжительность жизни
Северная Америка	+	0	+	0	0	0	0	0
Центр.и Южная Америка	+	0	+	+	0	+	+	0

Окончание табл. 1

Европа	+	0	+	0	0	-	-	0
СНГ	+	0	+	0	0	0	0	0
Ближний Восток	+	0	+	0	0	0	+	0
Африка	+	0	+	0	0	0	+	0
АТР	+	0	+	0	+	0	+	0
Китай	+	+	+	0	0	0	0	0
Индия	+	+	+	+	+	0	+	0
Россия	+	0	+	0	0	+	0	0
США	+	0	+	0	0	0	0	0
ОЭСР	+	0	+	0	0	-	-	0
Не ОЭСР	+	0	+	0	+	0	+	0

Источник: Составлено автором на основе расчетов.

Знак «+» означает положительное влияние фактора на энергопотребление, «-» — отрицательное, а «0» — влияние статистически незначимо.

Обсуждение

Душевое потребление первичных энергоресурсов значительно различается между макрорегионами и странами мира, что обусловлено комплексом экономических, социальных, институциональных, климатических и ресурсных факторов (рис.1).

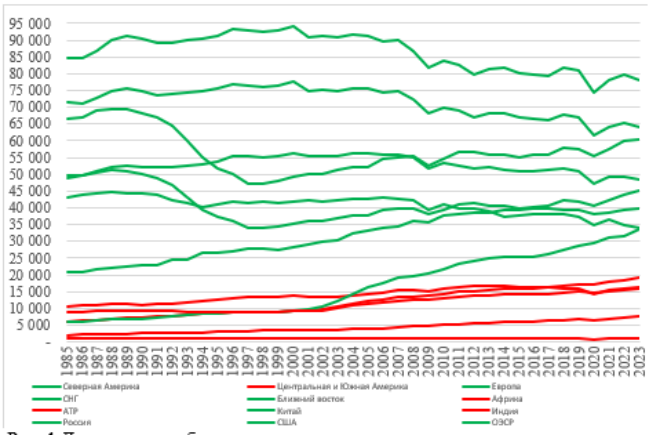


Рис. 1 Душевое потребление первичных энергоресурсов по макрорегионам и странам мира с 1985 по 2023 г., кВТ. ч./чел.

Эмпирические результаты позволяют сделать детальную сегментацию и выделить три группы: развитые макрорегионы и страны, развивающиеся макрорегионы и страны с высоким уровнем душевого потребления и развивающиеся макрорегионы, и страны с низким уровнем потребления.

Таблица 2

Классификация макрорегионов и стран по уровню душевого потребления первичных энергоресурсов

Характеристика региона	Макрорегионы и страны
Развитые макрорегионы и страны с высоким уровнем душевого энергопотребления	Северная Америка, США, Европа, ОЭСР
Развивающиеся макрорегионы и страны с высоким уровнем душевого энергопотребления	СНГ, Россия, Китай, Ближний Восток
Развивающиеся макрорегионы и страны с низким уровнем душевого энергопотребления	АТР, не ОЭСР, Центральная и Южная Америка, Африка, Индия

Источник: Составлено автором на основе данных World Bank

В развитых странах высокие показатели душевого энергопотребления обусловлены энергоёмкой экономикой, однако заметна стагнация потребления, чему способствует активное использование энергоэффективных технологий и расширение использования возобновляемых источников энергии в рамках политики энергетического перехода, проводимой в ЕС и «всеобъемлющей» энергетической стратегии США [14,15].

У некоторых развивающихся стран, таких как Иран, Ирак ОАЭ, Катар и Саудовская Аравия, наблюдается высокий уровень душевого потребления первичных энергоресурсов. Это связано с низкой стоимостью первичных энергоресурсов на внутреннем рынке стран, что является следствием наличия собственной сырьевой базы. Потребление первичных энергоресурсов в этой группе стран составляет больше 50% от общего потребления макрорегиона Ближний Восток. Таким образом, несмотря на наличие только развивающихся государств, совокупный показатель душевого потребления энергоресурсов остаётся высоким. Похожая ситуация наблюдается и у России, где высокое душевое потребление связано с суровым климатом, энергоёмкой промышленностью и относительно низким уровнем цен первичной энергии на внутреннем рынке [17].

В то же время в других развивающихся странах, таких как Индия и Нигерия уровень душевого потребления первичных энергоресурсов остаётся низким. При сопоставимых демографических показателях, уровень потребления значительно различается: так, в Китае и Индии численность населения составляет около 1,41 и 1,44 млрд чел. соответственно, однако уровень удельного энергопотребления в Китае (33 619 кВТ. ч./чел) значительно выше Индии (7 536 кВТ.ч./чел.). Это обусловлено более высоким уровнем урбанизации в Китае - 64,57% городского населения против 36,36% в Индии, а также более развитой энергетической структурой и структурой промышленности [2,16]. Мировые инициативы, в частности цель № 7 в области устойчивого развития ООН, направлены на преодоление барьеров, ограничивающих доступ населения к современным источникам энергии [18].

Заключение

Из проведённого выше анализа видно, что урбанизация и технологические изменения положительно влияют на уровень душевого потребления первичных

энергоресурсов во всех рассматриваемых регионах и странах. Такая тенденция может быть связана с тем, что процесс урбанизации сопровождается развитием инфраструктуры, расширением транспортных систем и, как следствием увеличением транспорта, а также увеличением потреблением бытовой энергии [19-21]. Технологические изменения особенно в таких секторах, как цифровизация, транспорт и производство, часто изначально приводит к увеличению потребностей в энергии из-за широкого внедрения энергоемких инноваций.

Как видно из табл.1, ожидаемая продолжительность жизни наоборот не является статистически значимым фактором, так как само по себе увеличение средней продолжительности жизни не приводит к заметному повышению или снижению уровня энергопотребления. В первую очередь это связано с тем, что продолжительность жизни, хотя и отражает улучшения в области здравоохранения, условий жизни и социальной стабильности, напрямую не влияет на повседневное потребление энергии отдельными людьми. Пожилые люди часто демонстрируют более низкий уровень потребления энергии на производстве и транспорте по сравнению с более молодыми экономически активными группами населения. Более того, увеличение ожидаемой продолжительности жизни, как правило, происходит параллельно с более широкими социально-экономическими преобразованиями, такими как повышение энергоэффективности и переход к менее энергоемкому образу жизни, что может уравновесить или даже уменьшить дополнительные потребности в энергии, связанные со старением общества.

Северная Америка и США: заметна положительная зависимость от урбанизации и технологических изменений. Экономические же факторы не являются статистически значимыми в данном регионе и стране, т.к. не оказывают существенного влияния на уровень потребления энергии на душу населения. Во многом это связано с тем, что регион уже достиг высокой степени экономической зрелости, когда последующее увеличение ВВП не обязательно приводит к росту потребления энергии.

Центральная и Южная Америка: в данном регионе потребление первичных энергоресурсов увеличивается не только под действием урбанизации, и технологических изменений, но и от прямых иностранных инвестиций, однако это в больше степени относится к отдельным странам, например, Бразилия, Чили, а не для всех стран региона. Также, на душевое потребление первичной энергии в данном регионе влияет ещё и рост численности населения. В странах с быстро растущим населением рост потребления энергии, как правило, более выражен, чем повышение технологической энергоэффективности для снижения энергопотребления.

Европа: в отличие от многих других регионов мира, в Европе наблюдаются четко выраженные тенденции к уравновешиванию. Активное продвижение энергоэффективности путем внедрения строгих норм и правил, стандартов энергоэффективности бытовой техники и широкой политики декарбонизации демонстрирует отрицательную зависимость на душевое потребление энергии. Кроме того, демографический фактор, в частности снижение темпов роста населения или

даже его уменьшение в странах, оказывает дополнительное уменьшение давления на уровень потребления энергии.

СНГ: за исключением урбанизации и технологических изменений, прочие факторы оказывают незначимое влияние на душевое потребление энергии, это связано с ограниченностью инвестиционного притока и демографической стабильностью.

Ближний Восток и Африка: в данных регионах воздействие на потребление энергии оказывают одинаковые факторы, помимо урбанизации и технологических изменений ещё влияет рост численности населения. Вместе эти факторы повышают спрос на потребление первичной энергии за счёт увеличения концентрации населения и преобразования городской среды. При этом экономические факторы нейтральны из-за зависимости от нефтяных доходов в некоторых странах регионов.

АТР и не ОЭСР: Азиатско-Тихоокеанский регион и страны, не входящие в ОЭСР характеризуются схожими факторами, влияющими на душевое потребление первичной энергии, что связано с тем, что данные страны с рзвивающейся экономикой и увеличивающимися темпами роста промышленности.

Китай: страна ещё не достигла высокой степени экономической зрелости, поэтому последующее увеличение ВВП приводит к росту потребления энергии.

Индия: ситуация схожа с Китаем, но помимо этого в стране на потребление первичной энергии ещё влияют прямые иностранные инвестиции и ВНД, т.к. приток прямых инвестиций и устойчивый ВНД повышают способность страны финансировать масштабные проекты в области развития и модернизации инфраструктуры, что повышает спрос на энергоносители, поддерживая крупномасштабные промышленные предприятия, развитие городов и усовершенствованные системы предоставления услуг.

Россия: в России на данный момент энергоэффективность только начинает развиваться, что временно сопровождается ростом энергопотребления.

ОЭСР: в страны ОЭСР как правило входят страны, которые уже достигли зрелой стадии экономического развития, они достигли высокого уровня потребления энергии, и теперь энергоэффективность активно влияет на снижение энергопотребления. В данных странах отмечается снижение темпов роста населения, что ограничивает расширение спроса.

Благодарности

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегтярёв К. С. Динамика мирового энергопотребления в XX-XI вв. и прогноз до 2100 года // Окружающая среда и энерговедение. – 2020. – №2. – С. 35-48.

2. Карташевич А. А. Дифференциация факторов, влияющих на уровень энергопотребления // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – №4. – С. 185-191.

3. Петрова Н. А., Проворная И. В. Эффективность использования энергетических ресурсов развитых и развивающихся стран // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – №4. – С. 85-89.

4. Прохорова Н.В. Географические методы исследования в анализе и прогнозировании энергопотребления // Известия российской академии наук. Серия географическая. – 2009. – №3. – С. 48-54.

5. Смелов П.А, Карманов М.В. Бухгалтерский учёт, статистика // Экономические науки. – 2009. – Ч.2(51). – С.258-261.

6. Azam M. and others Factors determining energy consumption: Evidence from Indonesia, Malaysia and Thailand // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol 42. – P. 1123-1131.

7. Demirel Y. Energy Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling // Green Energy and Technology. – 2012.

8. Komarova A. V. and others Energy consumption of the countries in the context of economic development and energy transition // Energy Reports. – 2022. – №8. – P.683-690

9. Stern D. I. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development // World Development. – 1996. – Vol. 24. – №7. – P. 1151-1160.

10. Wang Q. и др. The effects of energy prices, urbanization and economic growth on energy consumption per capita in 186 countries // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 225. – P.1017-1032.

11. Zaharia A. и др. Factors Influencing Energy Consumption in the Context of Sustainable Development // Sustainability. – 2019. – Vol. 11. – №15. – P. 2-28.

12. Диссертация «Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия». Глава 1. Постановка задачи и обзор моделей прогнозирования временных рядов. URL: https://www.mbureau.ru/articles/dissertaciya-model-prognozirovaniya-vremennyh-ryadov-glava-1#p_1.3.2 (дата обращения: 17.04.2025).

13. Основные виды математических моделей. URL: Основные виды математических моделей (дата обращения:17.04.2025).

14. Eurostat, 2023: record-breaking increase in renewable electricity. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250221-3#:~:text=In%202023%2C%20renewable%20energy%20sources,time%20series%20began%20in%202004 (дата обращения: 25.04.2025).

15. U. S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2025. URL: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/ (дата обращения: 25.04.2025).

16. World Bank, Urban population (% of total population). URL: https://data.worldbank.org/indictor/SP.URB.TOTL.IN.ZS?name_desc=false&type=shaded&view=map (дата обращения: 25.04.2025)

17. Министерство энергетики РФ, Обзор энергетики России. URL: https://minenergo.gov.ru/industries (дата обращения: 26.04.2025).

18. Цели в области устойчивого развития, Цель 7: Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/ (дата обращения: 26.04.2025).

19. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Немов В.Ю., Комарова А.В. Структурные изменения в нефтедобыче России // Экологический вестник России. – 2018. – № 1. – С. 1-8.

20. Eder L.V., Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.Yu. The current state of the petroleum industry and the problems of the development of the Russian economy // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, KTDMUR 2017. – 2017. – С. 012012.

21. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Иностранные инвестиции: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2007. – № 3. – С. 77-85.

© А. Е. Шеремет, В. Ю. Немов, 2025

УДК 338.439
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-77-82

Е. А. Шиян[1]✉, А. А. Карташевич[2]

Продовольственная безопасность как основа устойчивого развития экономики страны

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

Аннотация. Целью данного исследования является оценка влияния продовольственной безопасности на экономическое развитие стран через теоретические материалы. В статье собрана теоретическая и законодательная база продовольственной безопасности, созданная на международном уровне и признанная странами. Также приведено описание текущей ситуации в мире по исследуемой теме через статистические данные. На основе приводимых в зарубежной и отечественной литературе аспектов сформировано наиболее полное представление о теоретической базе продовольственной безопасности, её концепциях и составляющих, что оформлено в графических материалах для наиболее доступного восприятия и сравнения в будущем. В качестве результатов исследования представлена полная теоретическая база для проведения дальнейших вычислительных работ в данном направлении.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, продовольствие, безопасное питание

E. A. Shiyan[1]✉, A. A. Kartashevich[2]

Food security as a basis for sustainable development of the country's economy

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation
[2]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.shiyan@g.nsu.ru

Abstract. The purpose of this study is to assess the impact of food security on the economic development of countries through theoretical materials. The article contains a theoretical and legislative framework for food security, created at the international level and recognized by countries. It also provides a description of the current situation in the world on the topic under study through statistical data. Based on the aspects cited in foreign and domestic literature, the most complete understanding of the theoretical basis of food security, its concepts and components has been formed, which is formalized in graphic materials for the most accessible perception and comparison in the future. The results of the study provide a complete theoretical basis for further computational work in this area.

Keywords: food security, food, safe nutrition

Введение

«…Производство продуктов питания является самым первым условием жизни» – писал К. Маркс. Человечество потребляет и увеличивает свои потребности непрерывно, а еще постоянно увеличивается численность населения планеты, что вынуждает процесс производства продуктов питания быть безостано-

вочным, контроль качества продовольствия более четким, уровень стабильности поставок наиболее высоким. Человечество формирует стратегии использования имеющихся ресурсов [1-3], так как осознает их ограниченность и растущие потребности. Однако даже при осознании таких аспектов, общество сталкивается с реальной ситуацией, формирующей неутешительную статистику, даже при учете, что с каждым годом ситуация улучшается. По данным 2024 года каждый 11-ый человек в мире не имеет достаточного доступа к продуктам питания и страдает голодом, каждый 4-ый – не имеет доступа к безопасной питьевой воде, каждый 3-ий – не может позволить себе здоровое питание.

Еще в XX веке большинство стран мира осознавали описываемую проблему. Так, все чаще на научном и правительственном уровнях зарождались разговоры о необходимости контроля продовольственного вопроса. В результате неразрывно с необходимостью управления данным процессом сформировался термин «продовольственная безопасность».

Наравне с развитием понятия большинство стран мира осознали необходимость контроля продовольственной проблемы в рамках цифр, отслеживания тенденций и исполнения планов, что послужило стимулом к разработке стратегий. В XXI веке, веке глобализации, продовольственная тема стала регулироваться главным образом международными организациями, например, Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО). Они выпускают ежегодные отчеты и оценки текущей ситуации.

Как итог, изучая данную темы, мы имеем: международное регулирование, статистику, которая говорит о том, что продовольственная проблема достаточно существенная, а также текущую геополитическую ситуацию, которая значительно усложняет работу в данном направлении. Тогда возникает вопрос: если в настоящий момент мир испытывает нестабильное состояние во многих сферах, что сильно усложняет процесс улучшения показателей продовольственной безопасности, то в каком состоянии на данный момент находится продовольственная безопасность различных стран?

Терминологический аппарат «продовольственная безопасность»

Термин «продовольственная безопасность» впервые был официально употреблен в 1974 году на Всемирной конференции по проблеме продовольствия в Риме, организованной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО). На тот момент мировая экономика столкнулась с удивительной ситуацией – в развитых странах было огромное перепроизводство продовольствия, а в большей части стран третьего мира процветал голод.

Впервые официально термин был расшифрован в Римской декларации по всемирной продовольственной безопасности 13 ноября 1996 года. Согласно данному документу, продовольственная безопасность – это ситуация, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни [4].

Далее в 2009 году термин был уточнен. В Декларации всемирного саммита по продовольственной безопасности к понятию были отнесены следующие элементы:

- социальная доступность достаточного количества безопасного и питательного продовольствия для всех групп населения;
- особое внимание к проблеме получения продовольствия женщинами и детьми;
- отказ от использования продовольствия в качестве инструмента оказания политического и экономического давления [5].

Концепции продовольственной безопасности

Термин «продовольственная безопасность» впервые официально был употреблен в 1974 году. Однако предпосылки его появления зарождались значительно раньше. Люди обращали внимание на текущие проблемы сельского хозяйства, здоровья, недоедания и голода, оформляя их в своих работах. Сейчас, обладая уже достаточным терминологическим аппаратом, мы можем интерпретировать их труды в качестве концепций продовольственной безопасности. Основные их моменты отражены в табл. 1.

Таблица 1

Ключевые события и публикации	Основные аспекты, влияющие на концепции продовольственной безопасности
1935 г. Меморандум Ф.Э. Макдугалла	1. Выход проблемы продовольственной безопасности на международный уровень 2. Признание необходимости международного сотрудничества в области продовольствия
Великая Отечественная война	1. Усугубление проблемы продовольственной безопасности, увеличение количества людей, оказавшихся в ситуации нищеты, безработицы, голода
1943 г. Конференция по вопросам продовольствия и сельского хозяйства, Хот-Спрингс	1. Выдвинута первая официальная концепция ПБ - “свобода от нужды”: “свобода от голода”, “свобода от нищеты”, “соответствующее обеспечение”. 2. Фиксация выхода проблемы на международный уровень
50-60-е гг. XX в.	1. Умеренные попытки на национальном уровне реализации “свобода от голода” и “свобода от нищеты”. 2. Смещение внимания на международном уровне в сторону решение продовольственной проблемы через прямую международную помощь.
1966 г. Международный пакт об экономических, культурных и социальных правах	1. Поднимается вопрос образования населения в сфере здорового и полноценного питания 2. Вновь поднимается проблема доступности продовольствия для населения.

Концепции продовольственной безопасности

Ключевые события и публикации	Основные аспекты, влияющие на концепции продовольственной безопасности
70-е гг. XX в. Кризис производства зерна	1. Обострение проблемы нищеты и безработицы 2. Возвращение к решению базовых вопросов (“свобода от голода”, “свобода от нищеты”) продовольственной безопасности
1974 г. Всемирная продовольственная конференция	1. Официальное закрепление понятия “продовольственная безопасность” 2. Формирование перечня индикаторов продовольственной безопасности, касающихся сельского хозяйства 3. Контроль за запасами зерна.
80-е гг. XX в.	1. Проявление результатов “зеленой революции”: улучшение ситуации достаточности продовольствия.
1983 г. Деятельность комитета по всемирной продовольственной безопасности	1. Корректировка определения “продовольственная безопасность”. Сделан акцент на доступность продуктов питания.
1986 г. Работа Всемирного банка о бедности и голоде	1. Добавлен новый фактор продовольственной безопасности - фактор времени. 2. Добавлены новые индикаторы продовольственной безопасности.
1990 г. и 1991 г. Доклады ЮНИСЕФ	1. Добавление социальный факторов в анализ 2. Добавление антропометрических показателей 3. Акцент на качество продуктов питания
1996 г. Всемирный саммит по продовольственной безопасности	1. Выделены 4 аспекта продовольственной безопасности: наличие, доступность (экономическая и физическая), стабильность, использование.
2009 г. Всемирный саммит по продовольственной безопасности	1. Отдельно выделена социальная доступность

Источник: составлено автором на основе [6]

Развитие подходов к решению проблемы продовольственной безопасности во многом переплетается с развитием общества, изменением геополитической ситуации и научно-техническим прогрессом. За период работы с понятием сделаны значительные шаги: продовольственная безопасность начала рассматриваться не только в рамках государства, но и приобрела международный уровень; исследование ведется как на национальном уровне, так и на уровне домохозяйств и индивидуумов; учитывается не только количество продовольствия, но и его питательность, полезность для здоровья и развития. Продовольственные организации непрерывно ведут работу над контролем ситуации продовольственной безопасности, а также пытаются найти взаимосвязи продовольственной безопасности с другими сферами жизни общества.

Аспекты продовольственной безопасности

В 1996 году прошел Всемирный саммит по продовольственной безопасности, где впервые были сформулированы аспекты продовольственной безопасности: наличие, стабильность, доступность и использование. Разберем каждый из элементов подробнее в тексте и на рис. 1.

Наличие. Подразумевает совпадение темпов роста продовольствия с темпами роста населения.

Стабильность. Способность государства обеспечивать устойчивость во всех сферах в настоящий момент и в будущем.

Доступность. Экономическая доступность - близость к рынкам, источникам продовольствия, состояние инфраструктуру хранения продукции. Физическая доступность – наличие продовольственных ресурсов. Социальная доступность - каждый человек, независимо от своего финансового положения, может получить полноценное питание для поддержания здоровья и благосостояния.

Использование. Наличие питательных веществ в продовольствии, безопасность и чистота потребляемой продукции, а также соблюдение правильного и сбалансированного питания.

Рис. 1. Составляющие аспектов продовольственной безопасности*Источник: составлено автором на основе [7].*

Заключение

Результаты анализа теоретической базы по продовольственной безопасности показали, что её уровень напрямую влияет на экономическое положение страны, ее национальную безопасность, социальные аспекты взаимодействия общества.

Таким образом, аспекты продовольственной безопасности охватывают большинство сфер общественной жизни в рамках их компонент. Высокий уровень продовольственной безопасности является одним из конкурентных преимуществ страны на мировой арене. Стремясь решить продовольственную проблему, государство одновременно улучшает показатели по другим направлениям, которые также влияют на положение страны в мире. Снижая остроту продовольственной проблемы в стране, государство инвестирует в развитие всех сфер общественной жизни.

Благодарности

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Мишенин М.В., Проворная И.В. Принципиальные подходы к геолого-экономической оценке разномасштабных нефтегазовых объектов // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 15-23.

2. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Стратегия комплексного освоения ресурсов и запасов газа Восточной Сибири и Дальнего Востока // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2009. – № 1. – С. 18-28.

3. Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Пак В.А., Удут В.Н., Довгань А.В., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Гелий: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 7. – С. 52-55.

4. Доклад Всемирной продовольственной конференции, Рим, 5-16 ноября 1974 года. URL: https://digitallibrary.un.org/record/701143?ln=en&v=pdf (дата обращения: 20.02.2025).

5. Декларация Всемирного саммита по продовольственной безопасности, Рим, 16 ноября 2009 года. URL: https://www.fao.org/fileadmin/ templates/wsfs/Summit/Docs/Declaration/WSFS09_Draft_Declaration.pdf (дата обращения: 20.02.2025).

6. Белугин А. Ю. Эволюция понятия «Продовольственная безопасность»: история, этапы, современное понимание // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. – 2019. – №2 (32). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-ponyatiya-prodovolstvennaya-bezopasnost-istoriya-etapy-sovremennoe-ponimanie (дата обращения: 28.03.2025).

7. McCarthy U., Uysal I., Badia-Melis R., Mercier S., O'Donnell C., Ktenioudaki A. Global food security – Issues, challenges and technological solutions // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Vol. 77. – P. 11–20.

© Е. А. Шиян, А. А. Карташевич, 2025

УДК 550.370
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-83-89

Е. В. Агеенков[1]✉

Некоторые аспекты переходного процесса после импульсного воздействия заземлённой электрической линии на проводящую поляризующуюся среду

[1]Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Объектом исследования является электромагнитный (ЭМ) переходный процесс (ПП), возникающий в проводящей поляризующейся геологической среде после воздействия на неё низкочастотными разнополярными прямоугольными импульсами, пропускаемыми через заземлённую электрическую линию (ЗЭЛ). Сделан обзор опубликованных исследований, касающихся импульсного режима работы источника ЗЭЛ. Выполнено численное моделирование неустановившегося ЭМ поля для проводящей поляризующейся модели геологической среды в электрической установке.

Ключевые слова: переходный процесс, заземлённая электрическая линия, электрическая установка.

E. V. Ageenkov[1]✉

Features of the transient process after the pulse impact of a grounded electric line on a conductive polarizing medium

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

Abstract. The object of the study is the electromagnetic (EM) transient process arising in a conductive polarizable geological environment after exposure to low-frequency bipolar rectangular pulses passed through a grounded electric line (GEL). A review of published studies concerning the source of GEL is made. Numerical modeling of the unsteady EM field for a conductive polarizable model of a geological environment in a electrical installation is performed.

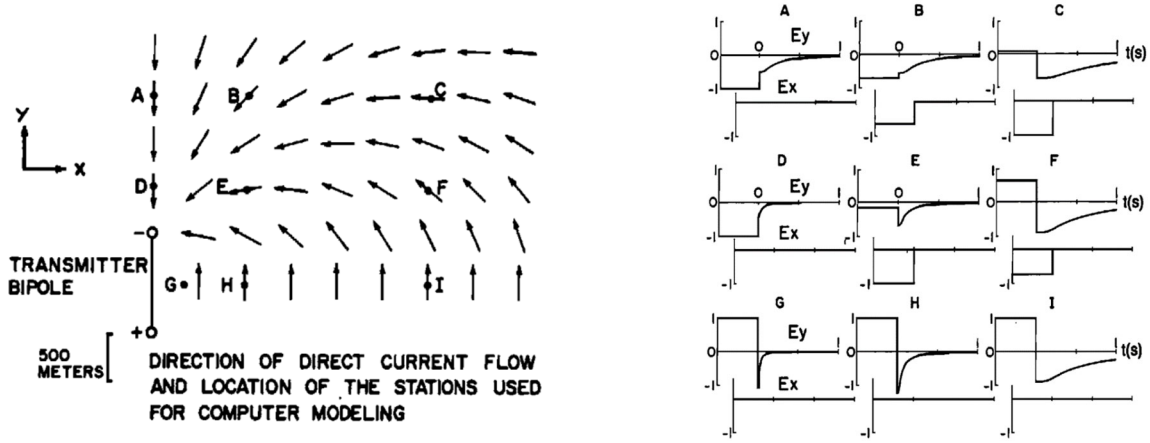
Keywords: transient process, grounded electric line, electrical installation

Введение

ЗЭЛ является одним из искусственных источников ЭМ поля, применяющихся в электроразведке для изучения внутреннего строения земли [1]. В геологической среде под воздействием потенциального электрического поля гальванических контактов (заземлений) возникает гальванический ток, втекающий и вытекающий через заземления. Появление и исчезновение электрического поля в геологической среде, при включении и выключении источника, индуцирует вторичное вихревое электрическое поле, вызывающее вихревой ток. При воздей-

ствии электрического поля (потенциального или вихревого) на полифазную гетерогенную геологическую среду в ней происходят процессы разделения зарядов различной природы – зарядка среды [2, 3, 4]. Возвращение среды в состояние равновесия после исчезновения электрического поля сопровождается эффектами вызванной поляризации (ВП) [3, 4, 5, 6], феноменологически проявляющиеся как ЭМ сигнал [7]. Таким образом, при включении источника в проводящей поляризующейся геологической среде возникает ток проводимости, происходит её зарядка и наблюдается диффузия вихревого электрического поля вширь и вглубь среды от источника (становление ЭМ поля (СП)), сопровождающаяся вихревым током. При выключении источника происходит релаксация (деполяризация) среды, сопровождающаяся ЭМ сигналом ВП, и наблюдается диффузия вихревого электрического поля обратной полярности по сравнению со случаем включения источника.

Для источника ЗЭЛ выделяется осевая и экваториальная области источника, различающиеся направлением электрического поля, а вследствие этого направлением гальванического тока (Рис. 1а) [8]. Направление поля сравнивается с его направлением внутри заземлений источника. Совпадающее направление поля считается положительным, обратное – отрицательным. От него зависит полярность разности потенциалов во время пропускания тока и переходного процесса (Рис. 1б).



а) б)

Рис. 1. Направление течения тока проводимости на поверхности неполяризующегося полупространства земли (а). Напряжённость электрического поля во время течения тока проводимости и во время становления (б). Знак сигнала во время пропускания тока в осевой (точки A, B, C) и экваториальной (G, H, I) области различен [8].

Таким образом, во время ПП в измерителях регистрируется ЭМ сигнал, связанный, по меньшей мере, со становлением ЭМ поля и с ВП. Установлено, что

на поверхности Земли для осевой и экваториальной областей источника вид ПП будет различаться из-за разного знака его составляющих (СП и ВП) [9].

В публикации [9] средствами математического моделирования показано, что для гальванической установки существуют такие положения приемной линии, при которых эффект ВП существенно ослаблен. Рассмотрена модель полупространства с удельным сопротивлением ρ = 100 Ом·м, параметры поляризации: η = 0.05 д.ед., τ = 0.01 с, c = 0.5 б.р.. Моделировались зондирования экваториальной гальванической установкой: питающая линия AB = 100 м, измерительная линия MN = 50 м, разнос (расстояние между центрами линий) r = 50 м.

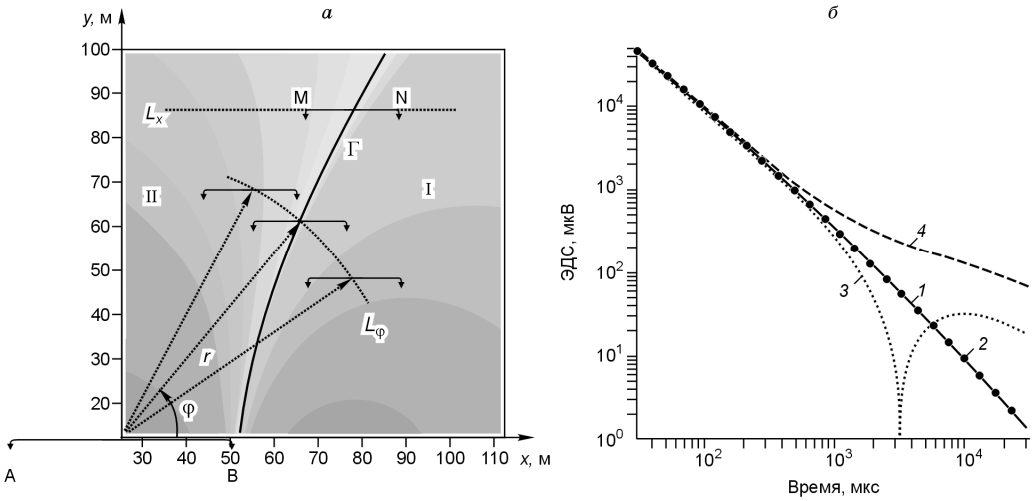


Рис. 2. Поведение откликов поляризующейся среды при гальваническом возбуждении и регистрации: а – области положительного (I) и знакопеременного (II) поведения сигналов (Г – граница областей) для модели поляризующегося полупространства; б – зондирования в точке на границе: 1 – без ВП, 2, 3, 4 – ВП зондирования для азимутальных отклонений относительно положения на границе Г: 3 – (+0.5°), 4 – (–0.5°) [9].

На рис. 2а представлена карта пространственного распределения значений сигнала на фиксированной временной задержке. При расположении приёмной линии на границе Г графики ЭДС, рассчитанные для неполяризующейся и поля ризующейся сред, совпадают (кривые 1 и 2, см. рис. 2б). Сигналы по разные стороны границы Г имеют качественные различия (графики 3 и 4 получены при отклонении от линии Г по азимуту на 0.5°, см. рис. 2б).

В итоге расчёты показали для модели поляризующегося полупространства в осевой области сигнал ВП проявляется в ПП в виде замедления его скорости, сигналы СП и ВП – одинаковой полярности. В экваториальной области сигнал ВП проявляется как ускорение ПП вплоть до смены полярности, это означает, что сигналы СП и ВП разной полярности. Когда в ПП по амплитуде преобладает сигнал СП, наблюдается одна полярность сигнала, затем сигнал СП затухает и преобладающим по амплитуде становится сигнал ВП противоположной полярности, а в ПП наблюдается смена знака сигнала.

Для слоистой модели даже в осевой установке, расположенной на поверхности Земли, получен схожий знакопеременный вид ПП [10, 11]. Для геоэлектрической модели акваторий, при помещении осевой установки внутрь водного слоя, была отмечена зависимость вида ПП от высоты установки над дном [12, 13, 14]. В случае 2-х слойной среды с неполяризующимся водным слоем и поляризующимся основанием, от высоты установки над дном зависит расстояние между установкой и поляризующейся средой [12, 13]. В случае аномально поляризующегося слоя помещённого внутрь геологической среды, покрытой водной толщей, от высоты установки над дном и глубины погружения кровли аномального слоя зависит расстояние между установкой и кровлей этого слоя [14]. Высказывалось предположение, что смена знака ПП в осевой установке связано с проявлением индукционно вызванной поляризации [10, 11, 12, 13]. Однако, в ряде публикаций такое проявление сигнала ВП связывалась не с вихревым, а с гальваническим током [15, 16, 17].

Приведённые ниже расчёты предполагают внести ясность в вопрос с каким воздействием связан сигнал ВП: индукционным или гальваническим.

Методы и материалы

Геоэлектрические модели заимствованы в публикациях [10, 11] и представлены неполяризующейся толщей с УЭС 50 Ом·м мощностью 300, высокоомным неполяризующимся слоем с УЭС 1 кОм·м и 1 МОм·м мощностью 500 м и аномально поляризующаяся толща с УЭС 50 Ом·м мощностью 1000 м (Табл. 1).

Таблица 1

Геоэлектрические модели

Слой	ρ, Ом·м	η, %	τ, с	C, б.р.	h, м
1	50	0			300
2	1e+3; 1e+6	0			500
3	50	50	1	0,5	1000
4	50	0			∞

УЭС высокоомного слоя увеличено до 1 МОм·м для значительного снижения гальванического воздействия на сильно поляризующийся слой, расположенный ниже него.

Расчёты переходного процесса проводились методом линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [18]. Первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получалось решение во временной области. Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависимого УЭС формулой Коула-Коула [8] (1):

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c}\right)\right), \quad (1)$$

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе (Ом·м); η – коэффициент поляризуемости (доли ед.); τ – постоянная времени (с); c – показатель степени; ω – круговая частота ($с^{-1}$).

Расчёт ПП выполнялся для времени с 1 мс до 2 с, учитывалось пропускание четырёх разнополярных импульсов. Для оценки вклада сигнала ВП выполнялся расчёт сигнала СП для неполяризующейся модели и его вычитание из ПП, предполагая аддитивность сигналов СП и ВП в ПП [19].

Результаты

Для осевой установки с AB – 500 м, MN – 1000 м, разнос – 1250 м, полученные ПП, сигналы СП и ВП представлены на графиках (Рис. 3) в абсолютных значениях. Положительные значения показаны тёплыми тонами, отрицательные – холодными.

Для модели с УЭС 1 кОм·м на поздних временах отмечается смена знака сигнала. Сигнал ВП для этой модели на коротком интервале времени представлен положительными значениями (ВП 1к), затем знак сигнала меняется, а на времени около 300 мс он становится больше по амплитуде, чем сигнал СП, что выражается в смене знака ПП.

Для модели с УЭС 1 МОм·м ПП на всём расчётном интервале времени сохраняет положительные значения. Как показывают расчёты он не определяется только сигналом СП, т.к. разность значений ПП и СП достигает значений 1e-4 В/А, однако на поздних временах разность быстро уменьшается и ПП определяется только сигналом СП.

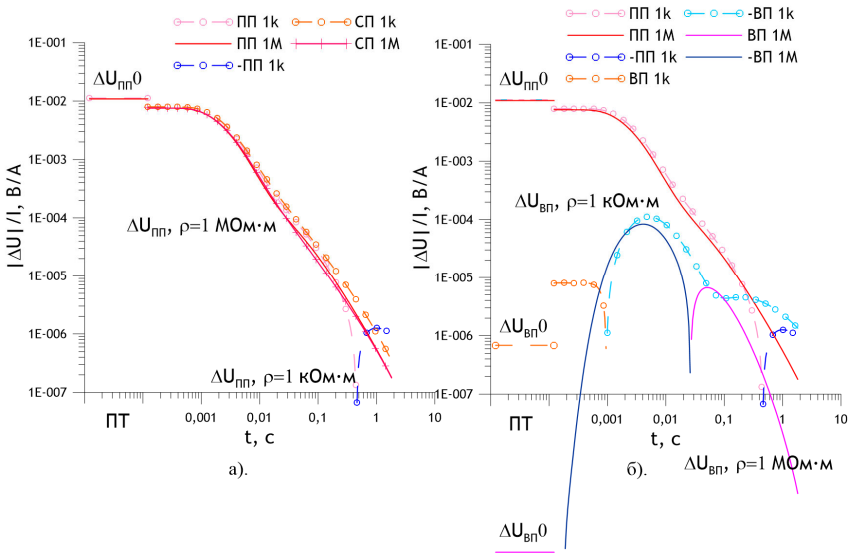


Рис. 3. ПП, СП и ВП от моделей с УЭС высокоомного слоя 1 кОм·м и 1 МОм·м.

Обсуждение

Показанное в предыдущих исследованиях присутствие смены знака ПП в экваториальной области электрического источника для поляризующегося полупространства отмечается и в осевой области для слоистой поляризующейся модели. Сделанное ранее предположение о связи смены знака ПП с проявлением индукционно вызванной поляризации подвержено сомнению, большее влияние на поляризующийся слой, рассмотренной модели, связано с гальваническим током. В моделях сильно поляризующийся слой находится под высокоомным

слоем значительной мощности, сигнал ВП связан только с воздействием источника на этот слой. Заземлённая электрическая линия воздействует на геологическую среду и гальваническим током и индуктивно, создавая в ней вихревой ток. Предполагалось, что ВП связано с воздействием гальванического и вихревого тока. Проявление в измерителях, расположенных в осевой области источника, сигнала ВП, связанного с гальваническим током, предполагалось как замедление скорости спада ПП. А проявление сигнала ВП, связанного с вихревым током, - как ускорение спада ПП, вплоть до смены знака ПП.

При повышении УЭС высокоомного слоя до 1 МОм·м предполагалось только индукционное возбуждение ВП по экраном.

Сравнивая графики ВП (см. рис. 3б) для двух моделей можно отметить их схожесть на временах от 1 мс до 10 мс, здесь наблюдается «импульс» сигнала отрицательного знака. Затем сигнал ВП от модели с УЭС 1 МОм·м меняет знак, затухает и не проявляется в ПП. От модели с УЭС 1 кОм·м сигнал ВП сохраняет отрицательную полярность, но после времени порядка 100 мс замедляется скорость его спада, затем его амплитуда становится превалирующей в ПП, который наследует скорость спада и знак сигнала ВП.

Заключение

Можно предположить, что в графиках сигнала ВП показано проявление индукционно вызванной поляризации в виде «всплеска» сигнала ВП. Для модели с УЭС 1 кОм·м сигнал ВП имеет сложную форму, вероятно, это связано с проявлением гальванически вызванной поляризации на ранних и поздних временах. Остаётся неясным механизм смены знака сигнала ВП в осевой области электрической линии, предположительно возникшего после воздействия гальванического тока.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) №FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. – Новосибирс : НГУ, 2014. – 300 с.

2. Шейнманн М.С. Современные физические основы теории электроразведки – М. : Недра, 1969. – 224 с.

3. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л. : Недра, 1980. – 391 с.

4. Титов К.В. Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике. Дис.. докт. геол.-минер. наук. – СПб. : СПбГУ, 2003.

5. Каменецкий Ф.М, Тригубович Г.М., Чернышёв А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. – Мюнхен: Вела Ферлаг, 2014. – 58 с.

6. Халлбауэр-Задорожная, В.Ю. Процессы, происходящие в горных породах при наложении электрического тока и разности потенциалов: вызванная поляризация // Вопросы естествознания. – 2016. – №3(11). – С. 76–79.

7. Крылов С.С. Геоэлектрика: Поля искусственных источников. – СПб. : С.-Петребургский университет, 2004. – 138 с.

8. West G.F., Macnae J.C. Electromagnetic physics of the electromagnetic induction exploration method // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics–Applications. SEG Investigations in Geophysics. 2008. V. 2. P. 5–46.

9. Антонов Е.Ю., Шеин А.Н. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. – 2008. – № 10. – С. 1046-1062.

10. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. – Иркутск : ИрГТУ, 1998. – 198 с.

11. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В. О проявлении процессов индукционного становления и вызванной поляризации при работе с осевой и симметричной электрическими установками // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 7. С. 976–991. https://doi.org/10.15372/GiG2019151.

12. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. Результаты математического моделирования переходных процессов для условий акваторий морского шельфа // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 7. С. 971—987.

13. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Владимиров В.В., Пестерев И.Ю. Переходный процесс на акваториях морского шельфа при работе с осевой и экваториальной электрическими установками и полевой эксперимент // Физика Земли, 2023, № 2, с. 224–240. DOI: 10.31857/S0002333723020011, EDN: LGSTNS

14. Агеенков Е.В., Иванов С.А. Анализ проявления субаквальной зоны воздействия углеводородов в электромагнитном переходном процессе // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 3. С. 68–78. DOI: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/68–78

15. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. – Новосибирск : Наука, 2002. – 136 с.

16. Агеев В.В., Каринский С.Д., Светов Б.С. Становление электромагнитного поля в поляризующейся среде и определение параметров Cole-Cole // Геофизика. 2006. № 5. С. 40–45.

17. Агеев В.В. К вопросу о природе отрицательных значений вызванной поляризации в переходном процессе при работах с осевой электрической установкой на морском шельфе // Физика Земли. 2023. № 2. С. 241–250.

18. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. – 2000. – №5. – с. 21–26.

19. Патент RU 2 399 931 C2. Способ количественного разделения эффектов электромагнитной индукции и вызванной поляризации. Легейдо П.Ю., Иванов С.А., Агеенков Е.В. и др. 2010.09.20.

© Е. В. Агеенков, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-90-97

Е. Ю. Антонов[1]✉, *Н. О. Кожевников*[1]

Моделирование индукционных переходных характеристик с учётом задержки выключения тока в генераторной петле

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

Аннотация. Получение достоверной информации о верхней части геоэлектрического разреза методом переходных процессов, делает необходимыми измерения отклика среды с очень ранних времен. Снижение начального времени регистрации влечёт за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в источнике или контроль этого процесса. Современная аппаратура МПП позволяет производить цифровую регистрацию переходного процесса во время короткого интервала выключения тока, спадающего от стационарного значения до нуля. После отключения коммутатора тока в петле возникают собственные колебания тока. В статье рассматривается поведение нестационарной ЭДС с учётом колебательных процессов, возникающих при выключении тока в генераторной петле. Основным методом исследования было математическое моделирование. Представлены результаты, полученные с помощью программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей, возбуждаемых петлевым источником с распределёнными параметрами. Работа источника во время выключения моделируется представлением генераторного контура набором электрических диполей, последовательно выключающихся в процессе прохождения прямой и обратной волн тока по периметру петли. Выполнен анализ поведения переходной ЭДС на фоне выключения тока и установлена связь поведения ЭДС с геометрией источника.

Ключевые слова: метод переходных процессов, система с распределёнными параметрами, малоглубинные индукционные импульсные зондирования

E. Yu. Antonov[1]✉, *N. O. Kozhevnikov*[1]

Modeling induction transient characteristics taking into account the delay in the current shutdown in the transmitter loop

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

Abstract. Obtaining reliable information about the upper part of the ground by transient processes (TEM) makes it necessary to measure the response of the medium as early as possible. A decrease in the initial time of registration entails the need to reduce the duration of turning off the current in the source or control this process. Equipment of the TEM allows digital registration of the transient process during a short turning out to turn off the current, which falls from a stationary value to zero. After disconnecting the current switch in the loop, the current fluctuations arise. The article considers the behavior of non-stationary EMF with the study of the oscillatory processes that occur when the current is turned off in the generator loop. The main research method was mathematical modeling. The results obtained using the program for calculating non-stationary electromagnetic fields excited by a loop source with distributed parameters are presented. The source operation during the shutdown is modeled by the representation of the generator circuit with a set of electric dipole, which are se-

quentially turning off during the passage of the straight and reverse waves of the current along the perimeter of the loop. An analysis of the transient EMF behavior against the background of turning off the current was performed and the connection between the EMF behavior with the geometry of the source was established.

Keywords: transient electromagnetic method, distributed parameters system, near-surface induction impulse soundings

Введение

Основными элементами систем возбуждения-регистрации в методе переходных процессов (МПП) являются незаземлённые горизонтальные генераторные (ГП) и приёмные (ПП) петли. При выключении тока в ГП в окружающем её пространстве возникает вихревое электрическое поле, под действием которого в земле возникают вихревые токи, после чего в отсутствии первичного поля с помощью ПП измеряется переходная ЭДС, индуцированная вторичным магнитным полем. В процессе измерения переходная характеристика земли сворачивается с переходными характеристиками генераторной и приёмной петель [1-2]. Поэтому при решении прямых и обратных задач импульсной индуктивной электроразведки необходимо учитывать особенности выключения тока в генераторной петле и собственный переходный процесс – в приёмной петле. В большинстве случаев при моделировании и экспериментальном изучении собственного отклика незаземлённой петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

В последние годы в связи с большой востребованностью малоглубинной электроразведки актуальны измерения переходных характеристик на всё более ранних временах. Снижение начального времени регистрации влечёт за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле или, по меньшей мере, предполагает, что мы в состоянии контролировать этот процесс. Однако на этом пути имеются ограничения как технического, так и принципиального характера. К числу последних следует отнести тот факт, что на ранних временах и/или высоких частотах петля проявляет себя как система с распределёнными параметрами, характеризующаяся свойствами типичными для длинной линии [3]. Благодаря симметрии петля в совокупности с подстилающей её верхней частью разреза (ВЧР) может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, соединённых последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена.

Основные положения теории применительно к анализу и расчёту выключения тока в горизонтальной незаземлённой петле подробно изложены в публикациях [3-4]. Анализу влияния собственного отклика приёмного контура посвящены работы [5-7]. Влияние конечного времени выключения тока в генераторной петле, формы токового импульса и способы учёта этого влияния рассмотрены в [8-9]. В перечисленных работах для моделирования собственного отклика незаземлённой горизонтальной петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

Процесс выключения тока в системе «петля-подстилающая среда» зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными (определяющими характер поведения тока) являются удельное сопротивление среды, индуктивное взаимодействие между образующими петлю длинными линиями, погонная ёмкость провода. Перечисленные факторы, как правило, неизвестны, либо имеется их приближённая оценка, поэтому при разработке алгоритма, описывающего выключение малого тока в ГП рассматривалась модель, в которой контур представлен в виде набора последовательно выключающихся электрических диполей. Такая модель адекватна процессу выключения источника, и обусловлена только продолжительностью спада тока от стационарного значения до нуля. При этом петля рассматривается как две длинные линии: от места выключения тока до точки, удалённой на длину половины периметра ГП. Отключение происходит в два этапа: на половину амплитуды токовой ступени в направлении к средней точки контура и затем полное выключение в обратном направлении к точке разрыва цепи. Таким образом имитируется прохождение прямой и обратной волн. Это описывает затухание тока в сети с согласованным шунтирующим резистором, который применяется при реальных измерениях. Сопротивление шунта призвано гасить колебательные процессы в линии контура генераторной петли. Существенным для исследования являются малые относительно генераторной петли размеры приёмной рамки (типичная установка мало-глубинных измерений). Это позволяет без ущерба для общности исследования изучать переходные процессы, связанные с выключением тока, только в генераторном контуре.

Для успешного подбора экспериментальных данных на ранних временах идеальной была бы ситуация мгновенного выключения источника. Поскольку по причинам технического характера это невозможно, улучшению качества инверсии данных может способствовать внесение поправки, учитывающей длительность выключения тока в источнике. Поправка осуществляется с помощью коррекции начального (нулевого) времени теоретических либо экспериментальных кривых. Этот приём известен [1] и применяется на практике. Однако, как всякое приближение, он имеет ограничения, поскольку даже точная оценка продолжительности выключения тока в ГП t_0 не позволяет использовать данные для инверсии на временах меньших t_0. Неважно, при этом, сдвиг применялся к экспериментальным или модельным ЭДС (рис. 1а). Способом, позволяющим избежать это ограничение, является учёт продолжительности токового спада в решении прямой задачи. При этом предполагается, что ток после отключения коммутатора затухает по линейному закону:

$$I_r(t) = I_0\left(1 - t / t_0\right),\ 0 < t \le t_0, \qquad (1)$$

где I_0 – величина силы тока пропускания; t_0 – продолжительность затухания тока в петле после отключения источника питания.

Решением прямой задачи является свёртка ЭДС мгновенного выключения бесконечной ступени тока – E_s и функции спада – $I_r(t)$ (1), а результат соответ-

ствует ситуации сосредоточенного типа источника. Такие вычисления ЭДС более точны по сравнению с использованием временной поправки, и позволяют выполнять инверсию с момента полного выключения тока в ГП, а отличия E_s и E_r подчеркивают необходимость использования E_r при инверсии (рис. 1а).

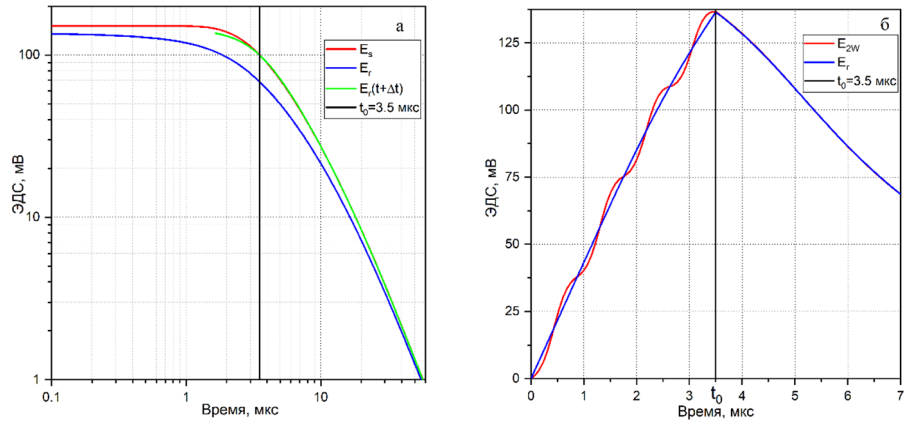


Рис. 1. Расчётные ЭДС: (а) E_s – выключение ступени тока, E_r – выключение с линейным спадом продолжительностью 3.5 мкс; $E_r\left(t+\Delta t\right)$ – скорректированная кривая с положительным сдвигом по времени на 1.6 мкс; (б) – ЭДС, индуцированная источником с распределёнными E_W и сосредоточенными E_r параметрами на фоне тока $0<t<t_0$ и после выключения $t>t_0$.

В настоящее время, измерение ЭДС на фоне токового спада (рис. 1б) используется лишь для определения его (спада) продолжительности t_0. При этом, для нахождения времени t_0 определяется максимальное значение ЭДС на интервале роста после разрыва цепи в источнике. Этот момент считается окончанием токового спада и с него начинается нулевой отсчёт времени для режима становления. Это всегда верно для систем с сосредоточенными параметрами, это почти точно для ситуации больших токов, выключаемых по линейному закону, это хорошее приближение при зондировании низкоомных сред соосными установками, но этого недостаточно для определения длительности выключения на малых токах. Поскольку многие системы первичной подготовки данных (сборки ЭДС для инверсии) основаны на сшивке полной ЭДС, начиная с ЭДС на малом токе исследование этого вопроса представляется актуальным.

Кроме сказанного выше, измерения на фоне тока содержат больше полезной информации, чем используется сейчас, и целью данного исследования является изучение возможностей её извлечения и использования. Для этого за предшествующие несколько лет был выполнен ряд полевых и численных экспериментов [10], направленных на изучение поведения переходных характеристик (ПХ) на ранних временах регистрации, начиная с момента выключения тока в ГП.

Одной из первых особенностей, обратившей на себя внимание, стал колебательный характер поведения ПХ после отключения тока, который в разной сте-

пени заметен на многих результатах измерений. Результаты расчётов ПХ для проводящего однородного полупространства [11] не столько прояснили, сколько озадачили. Получалось, что измерения, правильно согласованной со средой, соосной установкой должны выглядеть на фоне выключающегося тока строго однообразно и демонстрировать на восходящей ЭДС наложенные четыре периода колебаний синусоидального типа (рис. 1б). Поскольку современные малоглубинные исследования и уровень аппаратуры позволил накопить достаточно материала (рис. 2), стало ясно, что в совершенствовании нуждаются средства математического моделирования. Данная статья посвящена первым результатам в этом направлении.

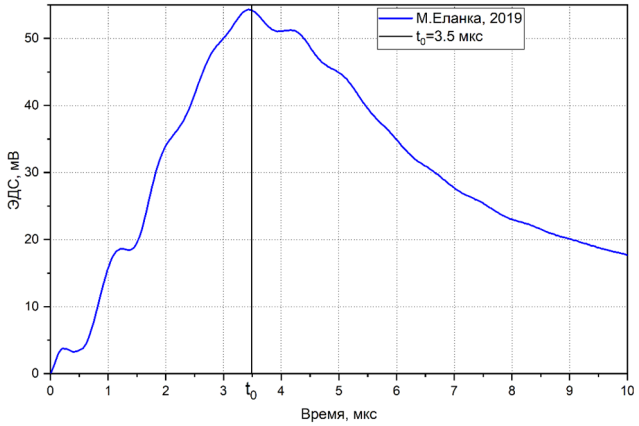


Рис. 2. Колебательный характер переходной ЭДС на малых токах: генераторная петля 100×100 м, соосный приёмный контур 10×10м

Методы и материалы

Основным методом данного исследования является численное моделирование. Первые расчёты ЭДС для случая источника с распределёнными параметрами над проводящим однородным полупространством (программа TurnOff) были приведены в [11]. Возможности для математического моделирования были расширены благодаря компьютерной программе (QqDistrTrans) для расчёта переходных характеристик горизонтально-слоистых сред в методе импульсных индукционных зондирований. Программа допускает задание произвольной геометрической формы как для генераторной (ГП), так и приёмной (ПП) петель. Координаты контуров могут быть расчётными (прямоугольник, окружность), или считываемыми из внешних файлов, содержащих соответствующие треки.

Результаты

В данной работе рассмотрена, часто используемая, при малоглубинных исследованиях установка, состоящая из квадратных ГП – 100×100 м и ПП – 10×10 м. На рис. 2 представлены результаты измерений в окрестностях д. Малая Еланка Иркутской области. Вертикальной линией отмечен момент времени, соответствующий полному затуханию тока в ГП. Данные измерений были количественно инвертированы с помощью системы (TEM-IP, [12]) и в результате была получена геоэлектрическая модель (табл. 1).

Таблица 1

Геоэлектрическая модель

№	□, *Ом*□*м*	*h, м*	*z, м*	*S, См/м*	*S*□,, *См/м*
1	82.3	18.4	18.4	0.2	0.2
2	51.8	39.2	57. 6	0.8	1
3	39.6	96.7	154	2.4	3.4
4	31.1	173	328	5.6	9
5	77.2				

Далее в статье все расчётные примеры выполнялись для модели из табл. 1. Результаты расчётов, приведённые на рис. 3, объясняют причину колебательного поведения ЭДС на фоне выключающегося малого тока в ГП. На рис. 3а приведены результаты расчётов для квадратной и эквивалентной ей по площади круговой ГП. Переходная ЭДС, индуцированная квадратной петлей, демонстрирует колебательный характер из-за того, что элементы контура петли находятся на разном удалении от ПП и при последовательном выключении разные участки контура вносят вклады в суммарный отклик, отличающиеся по амплитуде.

В случае кругового контура все его элементы равноудалены от центра ГП и в результате ЭДС кругового источника (при выключении с запаздыванием) идентичен результату с выключением по линейному закону. Отсюда следует, что «волновое» поведение сигналов определяется геометрией ГП. Для подтверждения этого вывода были выполнены дополнительные расчёты для прямоугольных контуров с площадями равными площади квадратной: ГП1 – (200×25м) и ГП2 – (150×66.7м) (рис. 3б).

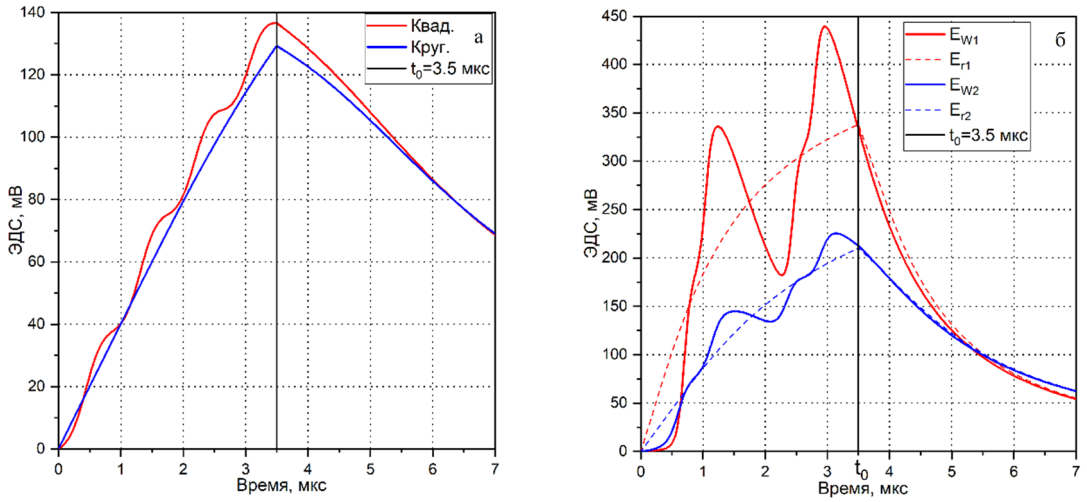


Рис. 3. Расчётные ЭДС для соосных установок ПП 10×10м: (а) ГП – квадратная (100×100 м) и эквивалентная по площади круговая; (б) – ЭДС, индуцированное прямоугольными ГП: E_{W1} – (200×25 м), E_{W2} – (150×67 м) – выключение тока с запаздыванием, E_{r1}, E_{r2} – линейное выключение тока

Из рис. 3б, на котором показаны ЭДС для выключения с запаздыванием и по линейному закону (1), видно, что только за счёт изменения геометрии генераторных петель можно добиться сильных изменений в характере колебаний ЭДС на интервале затухания тока в ГП. Кроме изменений в амплитуде колебаний ЭДС происходит смещение по времени экстремальных точек ЭДС относительно истинного момента выключения тока 3.5 мкс. Для рассмотренной модели, это смещение составляет 0.5 мкс (14% от общей продолжительности интервала затухания тока). Отсюда можно сделать вывод о практическом значении модельных вычислений ЭДС на фоне выключения малых токов, которые позволяют точнее определять момент полного отключения источника, что повышает точность инверсии данных зондирования на ранних временах.

Заключение

Основной задачей исследования была разработка средств программного обеспечения для моделирования переходных характеристик с распределённым источником произвольной геометрической формы, начиная с момента выключения тока в источнике и с учётом позиции точки выключения.

В результате проведённого моделирования можно сделать следующие выводы:

- поведение ЭДС на ранних временах регистрации во время выключения тока в источнике зависит от геометрии источника и положения точки измерения относительно точки выключения тока;

- выполнены сравнительные расчёты для квадратного и кругового источников для объяснения колебательного характера поведения переходных характеристик в процессе выключения прямоугольной генераторной петли.

Основным направление дальнейших исследований предполагается выполнение полевого эксперимента для проверки выводов, сделанных на основе математического моделирования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований ФНИ FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «ЦИКЛ». – Новосибирск, СНИИГГиМС, 1981. – 99 с.

2. Asten M.W. Full transmitter waveform transient electromagnetic modeling and inversion for soundings over coal measures // Geophysics. – 1987. – Vol. 52. – № 3. – P. 279-288.

3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределёнными параметрами: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. –152 с.

4. Кожевников Н.О. Выключение тока в горизонтальной незаземлённой петле: теория и эксперимент // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 3. – С. 631-641.

5. Вишняков А.Э., Вишнякова К.А. Возбуждение и измерение полей в электроразведке. – Л .: Недра, 1974. – 129 с.

6. Ефимов Ф.Д. Переходный процесс приемной рамки и его влияние на результаты наблюдений в дипольном варианте МПП // Методы разведочной геофизики. Электроразведка, НПО «Геофизика». – 1976. – Вып. 26. – С. 72-79.

7. Yu C., Fu Z., Zhang H., Tai H.-M., Zhu X. Transient process and optimal design of receiver coil for small-loop transient electromagnetics // Geophysical Prospecting. – 2014. – Vol. 62. – № 2. – P. 377-384.

8. Raiche A.P. The effect of ramp function turn-off on the TEM response of layered earth // Exploration Geophysics. – 1984. – Vol. 15. – № 1. – P. 37-41.

9. Fitterman D.V., Anderson W.L. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings // Geoexploration. – 1987. – Vol. 24. – P. 131-146.

10. Kozhevnikov N., Sharlov M., Pestyurin T., Antonov E. Testing transient electromagnetics systems on the ice cover of Lake Baikal // Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 212. – P. 104985.

11. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Сравнение двух способов расчёта ранней стадии переходных процессов в методе импульсных индукционных зондирований // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 2. – № 3. – С. 18-25.

12. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А., Эпов М.И. Программа для ЭВМ «TEM-IP v2» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668984, 14.10.2022. Заявка № 2022668128/69 от 07.10.2022.

© Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников, 2025

УДК 550.8.08
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-98-105

А. В. Анчугов[1,2]✉, К. Л. Тарасенко[3]

Анализ экспериментальных данных на соответствие закону Омори для образцов керна горной породы при одноосном нагружении до разрушения: от лабораторных данных к сейсмическим закономерностям

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2]ООО Ситен Технологии, г. Новосибирск, Россия
[3]АО Геологика, г. Новосибирск, Россия
e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается выполнение закона Омори для экспериментальных данных записей акустической эмиссии, полученных в 2-канальном режиме при одноосном нагружении до разрушения 55 образцов керна различной литологии. Сравниваются два варианта обработки данных, по результатам которой определяется время первых вступлений сигналов акустической эмиссии: с применением алгоритма Байера-Крадольфера - для автоматического выделения времени первого вступления и пороговым алгоритмом. Выполнен анализ временного ряда микрособытий. Эксперимент поставлен без нагрева, при комнатной температуре. Для регистрации ультразвуковых волн используется пьезоэлектрический преобразователь.

Ключевые слова: Алгоритм Байера-Крадольфера, ультразвуковой датчик, первые вступления, акустическая эмиссия, керн горной породы, закон Омори

A. V. Anchugov[1,2]✉, K. L. Tarasenko[3]

Analysis of experimental data for compliance with the Omori law for core samples of rock under uniaxial loading before destruction: from laboratory data to seismic patterns

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia
[2] Scieten Technologies, Novosibirsk, Russia
[3] JSC Geologika, Novosibirsk, Russia
e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

Abstract. The article discusses the implementation of Omori's law for experimental data of acoustic emission records obtained in 2-channel mode with uniaxial loading before destruction of 55 core samples of various lithology. Two variants of data processing are compared, according to the results of which the time of the first arrivals of acoustic emission signals is determined: using the Bayer-Kradolfer algorithm - for automatic allocation of the time of the first arrival and the threshold algorithm. Microevent time series was analyzed. The experiment was performed without heating, at room temperature. A piezoelectric transducer is used to detect ultrasonic waves.

Keywords: Bayer-Kradolfer algorithm, ultrasonic receiver, first arrivals, acoustic emission, rock core sample, Omori's law

Введение

Как правило, записи акустической эмиссии на образцах керна горной породы при проведении в лаборатории различных экспериментов делаются в мно-

гоканальном режиме. Для этого применяются специализированные блоки сбора данных, со множеством датчиков, размещаемых на манжете (до 24), в которую помещается образец. Известны системы иностранного производства, такие как MTS (гидравлический пресс с 3-осной ячейкой нагружения, установленный в Сколково), где объём получаемых данных на диске даже в ходе одного нагружения образца до разрушения может достигать значительного объёма, существуют и отечественные многоканальные измерительные системы, используемые, к примеру, в Институте физики Земли, с помощью которых проводятся информативные подобные эксперименты. На протяжении последних десятилетий регулярно проводятся эксперименты по лабораторному моделированию процессов разрушения применительно к сейсмическому режиму, а акустическая эмиссия, наблюдаемая на образцах, рассматривается как модель естественной сейсмичности [3].

Несмотря на это, для проведения экспериментов по нагружению образцов до разрушения и сбора данных акустической эмиссии на установке для проведения геомеханических экспериментов можно использовать и простую двухканальную измерительную систему, когда активные датчики, которыми уже оборудована установка (с излучающей и приёмной продольно поляризованными пьезопластинами), переводятся в режим регистрации и подключаются ко входам двухканального усилителя сигналов. Какие задачи можно решать с помощью лишь двухканальной системы регистрации?

Описание выполненного эксперимента

Эксперимент по исследованию эффекта Кайзера проводится на более чем 50 образцах керна различной литологии размером 60х30 мм в одноосном режиме нагружения до разрушения. При этом используется гидравлически управляемый пресс и плиты нагружения (акустические плунжера) с установленными внутрь пьезопластинами с резонансной частотой 1 МГц. Скорость осевого нагружения составляет 60 МПа/мин, без обжимного давления. При этом ячейка стабилометра оборудована датчиками продольной и поперечной деформации образца и датчиком усилия на оси. Интервал записи данных о текущей деформации образца и его нагруженном состоянии составляет одну секунду.

Цель задуманного Калининым С.А. с коллегами эксперимента состоял в изучении эффекта Кайзера [8]. Для этого были специально подготовлены ориентированные образцы керна и собрана измерительная система для регистрации сигналов акустической эмиссии в двухканальном режиме, состоящая из датчиков, непосредственно контактирующих с образцом (они же передают нагрузку на образец), двухканального усилителя сигнала на 40 Дб, и регистратора Аурис В320 с управляющим компьютером, и проведены необходимые эксперименты. Запись данных на компьютер проводится с помощью специально разработанного М. Романютой программного обеспечения.

Частота дискретизации составляет 1 МГц, разрешение 10 бит, что позволило на имеющемся в наличии блоке регистрации собирать данные в непрерывном режиме, при этом все эксперименты заканчиваются разрушением образца в течение первых минут см. Рис. 2. Описание и результаты экспериментов по иссле-

дованию эффекта Кайзера представлены в публикации [5]. Здесь же рассматривается другой аспект: полученные данные анализируются с точки зрения сейсмологии, считая, что момент разрушения образца — это главное сейсмическое событие, а все сигналы акустической эмиссии, которые следуют после, — это афтершоки основного события, выполняется ли фундаментальный закон Омори для полученных в результате экспериментов данных.

Таким образом, **целью работы** является исследовать временную динамику АЭ до/после макроразрушения и её соответствие закону Омори.

Закон Омори для афтершоков сейсмических событий. Степенная аппроксимация эволюции афтершоков

В 1894 году Фусакичи Омори сформулирован закон, носящий его имя [9]. Законом Омори утверждается, что после сильного сейсмического события частота афтершоков, следующих за главным ударом, в среднем гиперболически уменьшается (рис.1) с течением времени:

$$n(t) = \frac{k}{c+t} \tag{1}$$

В сейсмологии при анализе наблюдений закон Омори, обычно заменяют степенной функцией известной как “закон Омори-Утсу”. Данная формула предложена Хирано в 1924 году [7].

$$n(t) = \frac{k}{(c+t)^p} \tag{2}$$

В работе [2] предложен подход, в котором дифференциальное уравнение (3) точнее аппроксимирует экспериментальные данные, чем алгебраическая формула Омори.

$$\mathrm{d}n/\mathrm{d}t + \sigma n^2 = 0, \tag{3}$$

где σ – т. н. коэффициент деактивации очага землетрясения.
Дифференциальная форма закона позволяет гибко моделировать эволюцию афтершоков.

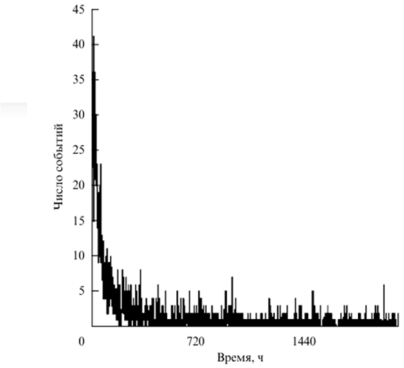


Рис. 1. Зависимость числа афтершоков от времени после главного удара 24.11.1987 в Калифорнии [2]

В общем случае σ зависит от времени вследствие изменчивости состояния горных пород в очаге, стабилизирующемся после главного удара. Общее решение же дифференциального уравнения (3) представлено в виде (4). Это решение с точностью до обозначений совпадает с формулой, предложенной Омори, только в том случае, когда σ = const.

$$n(t) = n_0 \left[1 + n_0 \int_0^t \sigma(t')dt' \right]^{-1} , \quad (4)$$

где n_0 –частота афтершоков в начальный момент времени.

В работе утверждается, что коэффициент деактивации $\sigma(t)$ изменяется с течением времени, отражая сложные процессы релаксации горных пород в очаге землетрясения [2].

Другой подход, учитывающий влияние релаксаторов на обобщённый механизм афтершоковой релаксации описан в работе [4].

Данные, рассмотренные авторами в данной статье, анализируются в классическом понимании закона Омори, то есть с использование формул (1) и (2).

Результаты выполненного эксперимента

Исследовано 55 образцов различной литологии. Получены данные акустической эмиссии для 46 образцов в 2-канальном режиме. Для всех исследованных образцов выделено время каждого события, их максимальные амплитуды, а также отмечен момент разрушения образца.

• Диаметр образцов 30 ±1.5 мм, длина 60 ±1 мм.

• Образцы включали следующие литотипы: алевролит, аргиллит, песчаник с карбонатным цементом, песчаник среднезернистый, песчаник мелкозернистый, песчаник крупнозернистый.

• Плотность образцов варьировалась в диапазоне от 2.21 до 2.62 г/см^3.

• Прочность образцов при одноосном сжатии менялась в диапазоне 42-198 МПа.

• События выделялись независимо двумя алгоритмами: Байера-Крадольфера и пороговым алгоритмом.

• Материалом для проведения экспериментальных работ послужили образцы керна Вертолётной площади с интервала глубин 2276–2604 м.

Результаты эксперимента по разрушению образца 16.1

На верхнем графике рисунка 2 отображена амплитуда записанного сигнала от времени начала нагружения в отсчётах АЦП. На нижнем графике синим цветом обозначено общее количество событий АЭ от времени, выделенных по пороговому детектору, красным обозначен график нагрузки на образец. Максимальное значение графика в верхней точке (в момент слома) соответствует 42.3 МПа.

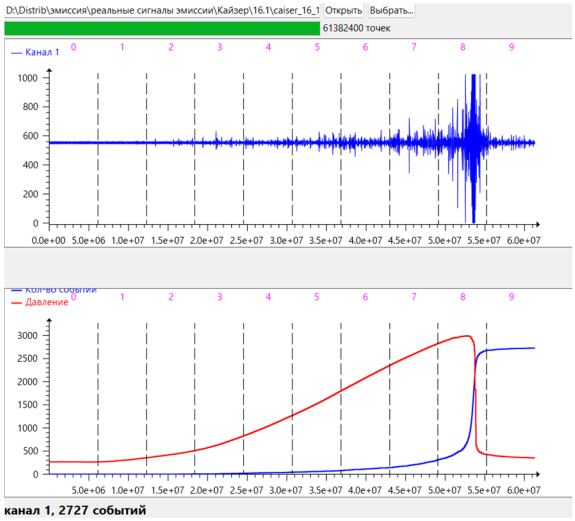


Рис. 2. Окно программы сбора данных АЭ, образец 16.1, автор Романюта М.

Для выделения первых вступлений и составления альманаха событий в обоих каналах, был использован алгоритм Байера-Крадольфера [6] (рис. 3), поскольку уже была его готовая реализация в виде программного пакета для поиска первых вступлений в записанных данных [1].

Так для образца 16.1 из крупнозернистого песчаника после слома (главного события) выделено 164 события в 1-ом канале (всего от начала нагружения 816) и 167 во 2-ом канале (всего от начала нагружения 761). Есть пропущенные события (рис. 3). В верхней части рисунка приведена часть записи после слома образца. В нижней части вся запись от начала нагружения длительностью 61.3 секунды.

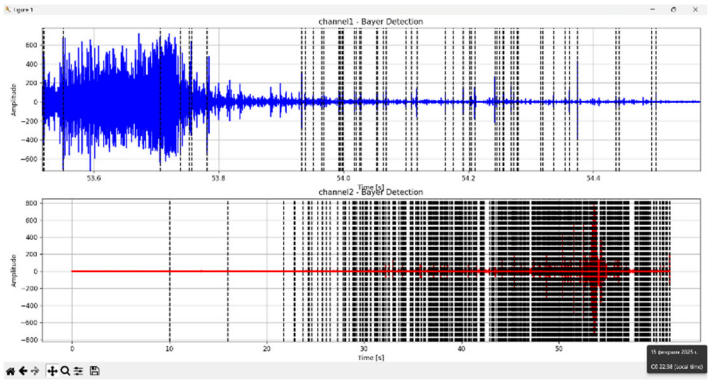


Рис. 3. Выделенные афтершоковые события с использованием алгоритма Байера-Крадольфера

Максимальное усилие слома составляет 42.3 МПа.

В 1-ом канале с помощью алгоритма Байера зарегистрировано 816 событий, по пороговому детектору – 2727 событий. Во 2-ом канале с помощью алгоритма Байера зарегистрировано 761 событие, по пороговому детектору – 2292 события.

Слом образца произошёл на 53.71 секунде. Событий после слома в 1-ом канале по порогу – 647, во 2-ом – 379.

Автоматический алгоритм Байера-Крадольфера универсален, однако, часть событий не распознаётся подобным алгоритмом. Возможно, это связано с большим динамическим диапазоном исходного сигнала и наличием событий разной амплитуды, для обнаружения которых нужно настраивать алгоритм специальным образом. Поэтому для сравнения и поиска событий в данных дополнительно используется простой пороговый алгоритм с установкой порога обнаружения на уровне не более двукратного превышения уровня шума в канале.

Анализ временных рядов событий

При сравнении работы разных алгоритмов установлено, что пороговый алгоритм выделил значительно больше событий чем алгоритм Байера-Крадольфера что в свою очередь помогает проследить выполнение закона Омори для событий акустической эмиссии на образцах керна. Количество афтершоков (и соответственно их частота) оценивается путем подсчета общего числа событий (магнитуд) в каждом временном интервале. Временные окна не фиксированы отдельно в программном коде, так как программа не разбивает данные на равные промежутки времени; вместо этого рассчитываются мгновенные значения частоты афтершоков на основании общей модели распределения. То есть график строится так, что каждое временное значение (каждый момент времени) сопоставляется с количеством зафиксированных событий, происходящих непосредственно в этот момент времени (рис. 4). Таким образом, оценка частоты афтершоков основана на общем наборе временных отметок, а не на разделении временного ряда на отдельные окна фиксированной ширины.

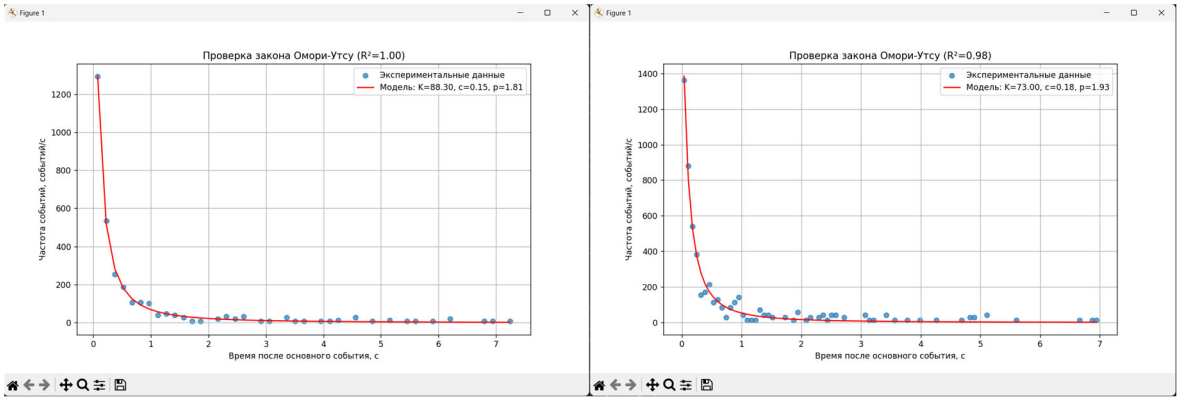


Рис. 4. Временной ряд выделенных с помощью порогового алгоритма афтершоков в 1-ом и 2-ом каналах для образца 16.1 из крупнозернистого песчаника

Обсуждение

Из анализа временных рядов данных следует что:

- Закон Омори применим к лабораторным данным (учитывая условия проведения эксперимента), записанным в 2-канальном режиме.

- Аналогии и различия в параметрах *p*, *c* между результатами, полученными при лабораторном эксперименте и природными сейсмическими явлениями, связаны с разными масштабами времени и энергии. В то же время прослеживается общность механизмов разрушения в разных масштабах. Одноосное нагружение образцов при простом эксперименте позволяет моделировать природные явления.

- Закон Омори можно использовать для прогноза устойчивости пород.

- Экспериментально подтверждена зависимость параметров *p*, *c* от типа породы, скорости нагружения, уровня напряжения.

- Образец имеет конечный размер, и не все события из одного канала также регистрируются в другом канале.

При проведении экспериментов не используется обжимное давление и не исследуется влияние температуры и насыщенности флюидами образцов горной породы, а эти факторы окажут влияние на поведение образца под нагрузкой, что следует учитывать при планировании последующих исследований. Достоинствами проведения подобных экспериментов является наиболее простая схема исследования – требуется только 2 датчика работающих в режиме регистрации, возможность использовать в качестве манжеты обычный термоусадочный рукав, без специальных посадочных мест под дополнительные датчики акустической эмиссии. Что в свою очередь упрощает крепление датчиков (на основе линейного дифференциального трансформатора) осевой и поперечной деформации на образце. Недостатком является то, что даже на образцах небольшого размера становится заметна неоднородность образца и вызванные ею различные количества событий в различных каналах. При исследованиях образцов больших типоразмеров – 38, 50 мм и более в диаметре, некоторая часть событий не будет отражена ни в 1-ом ни во 2-ом каналах. И для получения полной картины разрушения образца следует использовать большее количество датчиков, что в свою очередь повлечёт необходимость применить более сложную уже многоканальную систему регистрации и специальную манжету с посадочными гнёздами для крепления датчиков.

Заключение

Возможности оборудования, разработанного авторами (датчики и измерительная система), позволяют решать различные задачи, встающие перед исследователями. Помимо исследования эффекта Кайзера на образцах горной породы и выполнения закона Омори для данных акустической эмиссии, полученных при лабораторных экспериментах, 2-канальный режим регистрации данных достаточен для проведения многостадийных тестов образцов и построения паспорта прочности горной породы.

Благодарности

Выражаем благодарность коллегам из компании Геологика за предоставленные экспериментальные данные. Отдельно выражаем благодарность д. ф-м. н.

Сибирякову Б. П. за идею проверить полученные экспериментальные данные на выполнение закона Омори для событий афтершоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анчугов А. В. Применение алгоритма Бэра-Крадольфера для автоматического выделения первого вступления отражённой ультразвуковой волны, возбуждаемой излучателем и регистрируемой от границы вода-нефтъ в сепараторе / А. В. Анчугов // Сейсмические приборы. – 2023. – Т. 59. – № 43. – С. 5-17.

2. Гульельми А. В. Закон Омори (из истории геофизики) / А. В. Гульельми // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187. – № 3. – С. 343-348.

3. Смирнов В. Б. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга-Рихтера от напряжений / В. Б. Смирнов [и др.] // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 149-165.

4. Смирнов В. Б. О взаимосвязи параметров Омори и Гутенберга-Рихтера в афтершоковых последовательностях / В. Б. Смирнов [и др.] // Физика Земли. – 2020. – № 5. – С. 3-22.

5. Цветков С. С. Эффект Кайзера в осадочных горных породах на примере отложений вертолётной площади Томской области / С. С. Цветков, Ю. И. Колесников, Д. К. Жарасбаева // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2. – № 2. – С. 196-201.

6. Baer M. An automatic phase picker for local and teleseismic events / M. Baer, U. Kradolfer // Bull. Seism. Soc. Am. – 1987. – Vol. 77. – P. 1437-1445.

7. Hirano R. Investigation of aftershocks of the great Kanto earthquake at Kumagaya / R. Hirano // Kishoshushi. Ser. 2. – 1924. – Vol. 2. – P. 77-83.

8. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques / A. Lavrov // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – Vol. 40 (2). – P. 151–171.

9. Omori F.J. On the after-shocks of earthquakes / F. J. Omori // Coll. Sc. Imp. Univ. Tokyo. – 1894. – Vol. 7 (2). – P. 111

© А. В. Анчугов, К. Л. Тарасенко, 2025

УДК 50.361
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-106-112

Д. Е. Аюнов[1]✉, А. Д. Дучков[1], С. А. Казанцев[1]

Уточненная карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области

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

Аннотация. Первая карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области (АССО) была опубликована в 1987 году. Был выполнен анализ опубликованных и лабораторных материалов для выяснения современной геотермической изученности территории региона. За время, прошедшее после построения первой карты теплового потока АССО (более 30 лет), объем геотермической информации по региону существенно увеличился. К 154-м значениям теплового потока добавилось 67 новых изученных участков, значения теплового потока на которых определены геотермическим методом по измерениям в скважинах, а также изотопно-гелиевым методом в термоминеральных источниках. Данная работа предлагает обновленную карту теплового потока АССО с учетом накопившихся за последние десятилетия новых данных.

Ключевые слова: тепловой поток, карта, Алтае-Саянская складчатая область, изотопно-гелиевый метод

D. E. Ayunov[1]✉, A. D. Duchkov[1], S. A. Kazantsev[1]

Updated heat flow map of the Altai-Sayan region

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

Abstract. The first heat flow map of the Altai-Sayan region was published in 1987. The analysis of published and laboratory materials was carried out to clarify the current geothermal reserch of the region. Since the construction of the first heat flow map of the region (more than 30 years), the volume of geo-thermal information for the region has increased significantly. 67 new reserched sites have been added (to 154 known before), where the heat flow density values were determined by the geothermal method by measurements in wells and by the isotope-helium method in the thermomineral sources. The work offers an updated heat flow map of the Altai-Sayan region, taking into account the new data accumulated over the past decades.

Keywords: heat flow, Altai-Sayan folded region, isotope-helium method

Введение

Внутриземной тепловой поток (q) является важнейшей характеристикой энергетического состояния литосферы. Информация о пространственном распределении q используется для оценки температуры земных недр при тектоническом районировании и интерпретации региональных геофизических материалов.

Измерения температуры (T), геотермического градиента (g) в скважинах Алтае-Саянской складчатой области (АССО), а также теплопроводности (λ) кернов, сотрудники ИГиГ АН СССР (теперь ИНГГ СО РАН) начали в 1960-ых годах. К концу 1980-ых годов уже были накоплены значительные объемы геотермических

данных (значения T, g, λ, q) по скважинам, пробуренным на 80 участках региона. На основании этой информации была построена первая карта теплового потока по АССО [1], см. рис. 1. В качестве геологической основы была использована тектоническая схема АССО из статьи В.А. Кузнецова, опубликованной в 1966 г. [2].

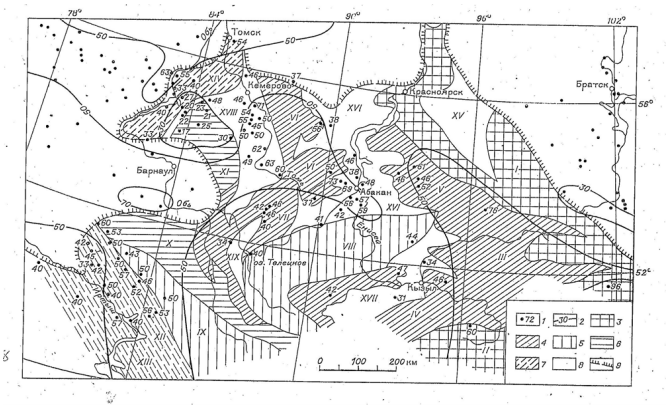


Рис. 1. Карта теплового потока, 1987 г. [1]

Методы и материалы

Тепловой поток, q, в основном определяется по измерениям геотермического градиента (g) в скважинах и теплопроводности горных пород (λ) из тех же скважин в лабораторных условиях [1]:

$$q = g \cdot \lambda, \text{ мВт/м}^2. \quad (1)$$

Существуют также приближенные способы оценки геотермического градиента по сведениям от геотермометров, о термобарических условиях формирования ксенолитов. Приблизительная оценка теплового потока возможна с помощью изотопно-гелиевого метода (рассмотрен подробнее ниже).

С 1990-ых годов произошло значительное сокращение возможностей проведения геотермических исследований вследствие сокращения геологоразведочных работ и уменьшения объёмов бурения в регионе. Уменьшение количества доступных скважин привело к более широкому применению косвенных методов оценки q и в первую очередь изотопно-гелиевого метода, использующего установленную ранее положительную корреляционную связь между отношением количества изотопов гелия $R = {}^3He/{}^4He$ в газовых или водных пробах из термоминеральных источников и q. Становление изотопно-гелиевого метода связано в первую очередь с работами Б.Г. Поляка [3, 4]. Проведенный исследователями глобальный анализ изотопного состава гелия и q в различных геотектонических структурах показал, что мантийный гелий (^3He) поступает в континентальную кору на стадии ее формирования или в процессе ее повторной тектономагматической активизации. Согласно Б.Г. Поляку [4] перемещение летучего гелия из мантии может обеспечить силикатный по составу тепломассопоток, выносящий одновременно в верхние слои континентальной части Земли глубинное тепло и приводящий к корреляции изотопного состава гелия с q в подземных флюидах, поступающих на поверхность в пунктах разгрузки газирующих термоминераль-

ных источников. Наличие корреляции позволило предложить изотопно-гелиевый метод оценки значений q по формуле (2) [4]:

$$q = 18.23 \cdot \lg R + 181.82 \text{ (мВт/м}^2\text{)}, \quad (2)$$

где $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, $r = 0{,}78$ - коэффициент корреляции между параметрами q и R.

Описанная корреляция справедлива для основной части измеряемого диапазона земного теплового потока – от 35-42 до 87-100 мВт/м^2 [4]. Сопоставление близко расположенных скважинных и изотопно-гелиевых определений q показало их неплохое совпадение (в пределах 10-15%) [4].

Изотопно-гелиевый метод реализуется следующим образом. С помощью специальных приемов отбираются газовые или водные пробы с поверхности газирующих термоминеральных источников. Затем пробы отправляются в лабораторию, где в них определяются количества стабильных изотопов гелия ^{3}He, ^{4}He и рассчитываются отношения R. В нашем случае измерения изотопов производились в основном на масс-спектрометре в лаборатории Института геологии КНЦ РАН (аналитик И.Л. Каменский). Полученные таким образом значения R используются для определения значений q по формуле (2).

В целом за последние более чем 30 лет добавилось 67 новых изученных участков, в пределах которых значения q определены геотермическим методом по 72 скважинам [5,6,8] и изотопно-гелиевым методом по 28 термоминеральным источникам [7,9,10]. Новые материалы включены в «Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока» [11], который на данный момент представляет собой наиболее полную базу данных по тепловому потоку регионов Сибири и Дальнего востока, включая северные районы Казахстана, прилегающие арктические и восточные моря. В 2024 году атлас был реализован в современной российской ГИС NextGIS (рис. 2).

С учетом этой новой информации можно отметить, что с 1960-ых годов до настоящего времени оценки q проведены в пределах 40 геологических структур АССО на 147 участках (изучено 312 скважин и 28 термоминеральных источников). Вся накопленная информация использована авторами отчета для построения новой карты теплового потока АССО, занимающей территорию, ограниченной координатами 57-48^0 с.ш. (отчасти включая северные территории Казахстана и Монголии) и 80-102^0 в.д. При построении карты использованы геотермические данные по окружающим АССО территориям из «Геотермического атласа Сибири и Дальнего Востока» [11].

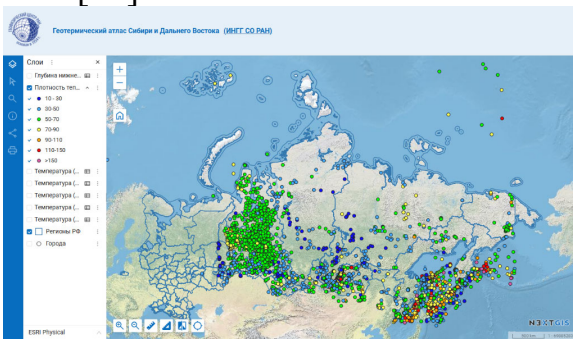


Рис.2. Общедоступная онлайн-версия Геотермического атласа Сибири и Дальнего Востока (http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru)

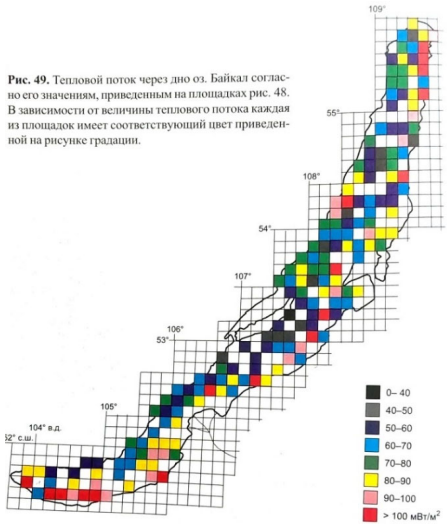


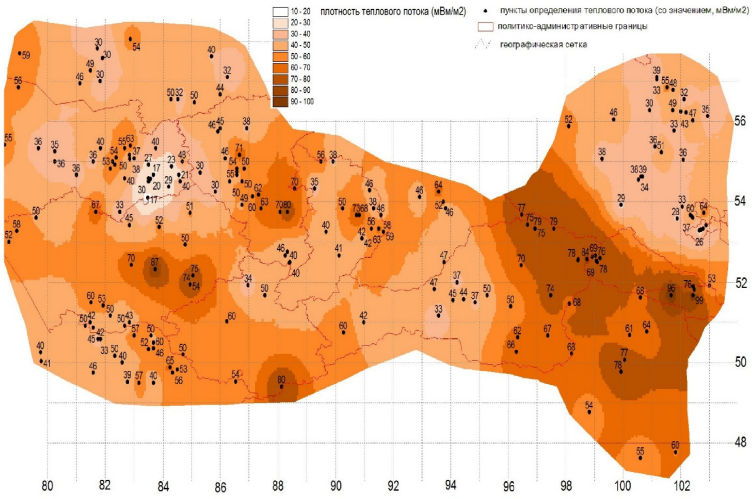
Рис.3. Пример представления карты теплового потока посредством усреднения данных по площадкам [12]

Необходимо отметить, что при построении карт теплового потока существует по крайней мере три способа представления q: 1) точечный (см. рис. 2), 2) в «изолиниях» и 3) способ, не редкий в отечественной геотермии, в котором – в силу специфики самих геотермических данных – территория разбивается на площадки, для каждой из которых расчитывается усредненное значение q, и таким образом карта представляется в виде «лоскутного одеяла» (см. пример на рис. 3). Однако для представления теплового потока АССО было отдано предпочтение второму способу, с помощью изолиний.

Результаты

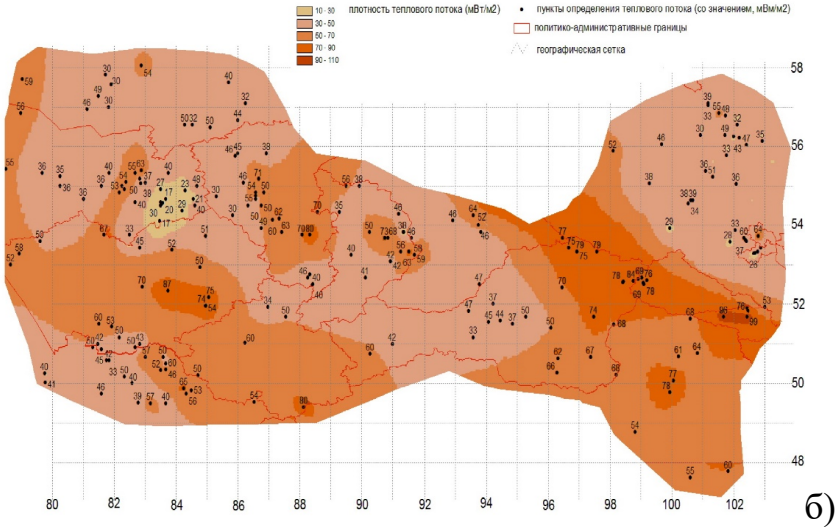
Новая карта теплового потока построена по 221 пункту определения q по сравнению с 154 пунтам, на основе которых построена карта 1987 г. При построении карты теплового потока в изолиниях в качестве опорной использовалась карта, в которой интерполяция данных между пунктами определения q осуществлялась машинным способом, методом обратных взвешенных расстояний (IDW) (рис. 4).

Область АССО покрыта сетью пунктов не равномерно, поэтому для интерполяции значения q использовалось комплексирование с данными тектоники региона. В районах, где отсутствуют измерения q или имеют место единичные измерения, интерполяция осуществлялась с опорой на характер простирания тектонических блоков с допущением того, что блок в своих пределах характеризуется близкими значениями q. Итоговая карта теплового потока АССО представлена на рис. 5 в двух вариантах. На рис. 5.А карта выполнена в изолиниях, проведенных через 20 мВт/м^2. Такое построение пригодно для общей характеристики теплового потока в регионе. На рис 5.Б изолинии проведены через 10 мВт/м^2. Данная карта позволяет различать локальные особенности теплового поля.



а)

Рис. 4. Опорная карта для создания карты теплового потока ACCO, построенная интерполяцией методом обратных взвешенных расстояний (IDW)



б)

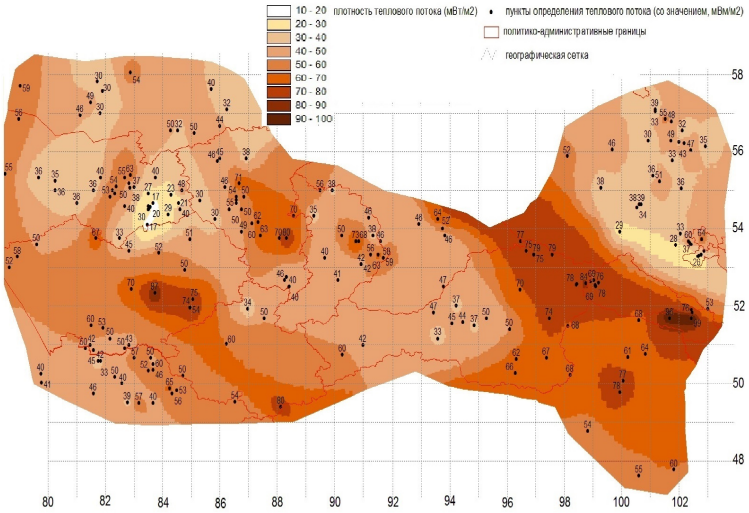


Рис. 5. Новая карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области, 2024 г. **А** – изолинии проведены через 20 мВт/м^2; **Б** – изолинии проведены через 10 мВт/м^2

Обсуждение

Новые карты теплового потока Алтае-Саянской складчатой области (рис. 4-5) показали, что весьма существенной деталью в распределении q является значительная по масштабу аномалия высокого q (порядка 70-90 мВт/м^2) в юго-восточной части АСО (Восточный Саян, Восточно-Тувинский массив), непосредственно примыкающей к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Новые данные позволили более четко оконтурить границы этой аномалии, свидетельствующей о распространении на северо-запад рифтогенных и магматических процессов, развивающихся в недрах БРЗ, вдоль границы АССО с Сибирским кратоном. Тепловой поток в пределах этой аномалии определяется в основном аномальной мантийной составляющей. Можно подчеркнуть, что геотермические измерения картируют распространение на северо-запад горячего астеносферного слоя, наиболее развитого в недрах БРЗ. В пределах выделенной аномалии теплового потока зафиксированы многочисленные проявления кайнозойского вулканизма и источников термальных вод.

Остальная (бóльшая) часть территории АССО характеризуется сравнительно невысоким тепловым потоком, порядка 40-60 мВт/м^2 (в среднем 54 мВт/м^2). Такой средний уровень q присущ геологическим структурам каледонского и герцинского возраста [13], которые и слагают основную часть региона. Данное геотермическое наблюдение фактически подтверждает важный вывод о том, что кайнозойская структура АССО, в отличие от Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), сформировалась в результате передачи деформаций от Индо-Евразийской коллизии (т.е. в результате «холодной» перестройки).

Минимальные значения q зафиксированы на северо-западе области в пределах Салаирского кряжа и Горловского прогиба. Здесь на сравнительно небольшой территории q снижается до 17-30 мВт/м^2 (среднее значение 24 мВт/м^2). Низкий q обычно выделяет блоки литосферы, охлажденные вследствие регионального уменьшения мантийной составляющей q или из-за снижения интенсивности радиогенного тепловыделения (А) в верхнем слое земной коры (известно, что в породах Салаира А в два раза ниже, чем в соседних районах).

Более характерны для АССО значения теплового потока, достигающие или превышающие средний уровень q. Так, весьма прогретой представляется юго-восточная часть Кузнецкого прогиба, где на некоторых участках q достигает 60-80 мВт/м^2. Повышен тепловой поток и в Бийско-Барнаульской впадине. Аномалии q в прогибах могут быть связаны с процессами теплопереноса в осадочном чехле впадин, а также с влиянием погребенных гранитных массивов. Повышенным q (55-65 мВт/м^2) характеризуется Томь-Колыванская складчатая зона, насыщенная высокорадиоактивными гранитными батолитами пермского возраста (Новосибирский, Барлакский и другие батолиты). Известно, что значения радиогенной теплогенерации в пермских гранитах в 4 раза превышают А во вмещающих породах. Сравнительно детально изучен q в пределах Рудного Алтая. Здесь он повышается лишь на нескольких участках до 60 мВт/м^2.

Заключение

Количество геотермических данных по АССО с момента построения последней карты теплового потока [1] увеличилась более чем на 40 %: с 154 пунтов определения q до 22. Это вызвало необходимость обобщить материалы и построить обновленную карту теплового потока региона, которая представлена в данной работе. Кроме того, создана карта теплового потока АССО с шагом изолиний 10 мВт/м^2, что позволяет различать более локальные особенности распределения теплового потока.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ГЦ РАН, совместно с которым в 2024 году «Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока» был реализован в новой общедоступной онлайн-версии [11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловое поле недр Сибири. Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987, 197 с.
2. Кузнецов В.А. Геотектоническое районирование Алтае-Саянской складчатой области // Основы формационного анализа эндогенной металлогении Алтае-Саянской области. – Новосибирск: Наука. 1966.- С. 16-26.
3. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток — геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника, 1979, № 5, с. 1-25.
4. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988, 192 с.
5. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. Москва: Изд-во РУДН, 1996, 289 с.
6. Соколова Л.С., Дучков А.Д. Новые данные о тепловом потоке Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 2008, т. 49, №12, с. 1248-1261.
7. Дучков А.Д., Рычкова К.М., Лебедев В.И., Каменский И.Л., Соколова Л.С. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках // Геология и геофизика, 2010, т. 51, №2, с. 264-276.
8. Дучков А.Д., Рычкова К.М., Аюнов Д.Е. Тепловой поток Центрально-Тувинской котловины // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования: Вып. 12. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2012, с. 115-120.
9. Бадминов П.С., Иванов А.В., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) // Вулканология и сейсмология, 2013, №4, с. 27-39.
10. Рычкова К.М., Аюнова О.Д. Изотопы гелия в подземных водах Тункино-Окинско-Саянской рифтовой зоны (*Восточный Саян*): корреляция с тепловым потоком // Геология и геофизика, 2019, т. 60, №9, с. 1269-1280.
11. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е., Веселов О.В., Соколова Л.С., Казанцев С.А., Горнов П.Ю., Добрецов Н.Н., Болдырев И.И., Пчельников Д.В., Добрецов А.Н. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока. (2012). - 2012 [Электронный ресурс]. - *URL: http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru/*
12. Голубев В. А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск. Изд-во Гео, 2007, 224 с.
13. Смирнов Я.Б. Связь теплового поля со строением и развитием земной коры и верхней мантии // Геотектоника, 1968, №6, с. 3-25.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев, 2025

УДК 551.345, 624.139, 692.115, 536.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-113-122

А. А. Башкова[1,2]✉, А. Н. Шеин,[1] Я. Б. Горелик[2]

Особенности мониторинга геологической среды застраиваемых территорий Приуральского района ЯНАО

[1] Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация
[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация
e-mail: aabashkova@yanao.ru

Аннотация. В работе рассматриваются результаты комплексного изучения современного состояния геологической среды территории центральной части Приуральского района ЯНАО В результате анализа климатических параметров по метеостанции Салехард показано, что за последние 30 лет среднегодовое значение температуры воздуха и количество осадков непрерывно повышается. На практическом примере показано, что кровля мерзлоты в ненарушенных ландшафтах постепенно опускается и происходит ее отрыв от сезонномерлого слоя. В работе приведены результаты изучения гидрогеологических условий и геохимического опробования грунтовых вод, отобранных на территории г. Салехард и административного центра Приуральского района с. Аксарка. Приведены результаты изучения геоэкологических условий урбанизированных территорий. Определены факторы, оказывающие влияние на изменение геологической среды и показана необходимость ее комплексного изучения. В связи с чем возникает необходимость разработки нормативных документов, регламентирующих проведение мониторинга геологической среды для урбанизированных территорий криолитозоны особенно вблизи южной границы.

Ключевые слова: геологическая среда, мониторинг, гидрогеологические условия, строительство, сезонно действующее охлаждающее устройство, мерзлота, климатические изменения

A. A. Bashkova[1,2]✉, A. N. Shein[1], Y. B. Gorelik[2]

Features of monitoring the geological environment of the built-up territories of the Priuralsky district of the YNAD

[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: aabashkova@yanao.ru

Abstract. The paper considers the results of a comprehensive study of the current state of the geological environment in the central part of the Priuralsky district of the Yamalo-Nenets Autonomous District. As a result of an analysis of the air temperature at the Salekhard meteorological station, it has been shown that over the past 30 years, the average annual air temperature and the number of cages have been continuously increasing. A practical example shows that the permafrost roof in undisturbed landscapes gradually descends and it separates from the seasonal layer. The paper presents the results of studying the hydrogeological conditions and geochemical testing of groundwater sampled in the territory of Salekhard and the administrative center of the Priuralsky district of Aksarka village. The results of studying the geoecological conditions of urbanized territories are presented. The factors influencing the change in the geological environment are identified and the need for its comprehensive study is shown. In this regard, there is a need to develop regulatory documents regulating.

Keywords: geological environment, monitoring, hydrogeological conditions, construction, seasonally operating cooling device, permafrost, climatic changes

Введение

Развитие Арктических территорий является одним из приоритетных направлений, обозначенных в плане адаптации экономики Российской Федерации (РФ) до 2035 года. Так как, именно, Арктика играет ключевую роль в обеспечении страны углеводородами. Одним из регионов, являющихся стратегической ресурсной базой РФ, стал Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО). Помимо многочисленных месторождений нефти и газа на территории ЯНАО вдоль восточного склона Полярного Урала простирается Сосьвинско-Салехардский бассейн бурого угля [1-2]. Территория распространения угленосного бассейна преимущественно приходится на северную часть Приуральского района.

Приуральский район расположен на северо-западе ЯНАО, на севере район омывается водами Байдарацкой губы Карского моря, а южная часть простирается на Западно-Сибирской равнине (рис. 1). Наличием обширной гидрографии: более 20 000 озер и 400 рек, обуславливается весьма сложные гидрогеологические условия на территории района.

Рис. 1. Схема расположения Приуральского района ЯНАО

Добыча и транспортировка нефти и природного газа, в том числе газового конденсата, требует не только промышленного освоения территории и создания инфраструктуры, но и сохранение ее работоспособного состояния на продолжительный срок (50-70 лет). Строительство на территориях Приуральского района осложняется наличием многолетнемерзлых грунтов (ММГ), которые здесь широко распространены и имеют неоднородное распространение как по площади, так и по глубине. Северная часть представлена преимущественно сплошным распространением мерзлоты (мощность 100-300 м). Южная часть представлена преимущественно ММГ прерывистого и островного распространения, имеющих мощность до 100 м и до 25 м соответственно. Следует отметить, что городские агломерации Салехарда и Лабытнанги расположены на южной границе криолитозоны, которая постоянно изменяется [3]. При столь изменчивом распространении ММГ на территории района свойства геологической среды (ГС) также явля-

ются неоднородными, что значительно затрудняет организацию мониторинга ее состояния. Проблемы возникают не только из-за сложного строения геологической среды, но и ускорившихся в последнее время, процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата.

Методы и материалы

Анализ климатических параметров выполнялся по данным метеостанции Салехард, где наблюдения ведутся с 1982 г. [4]. По результатам статистической обработки полученных данных построены линейные тренды среднегодовых значений температуры воздуха и количества выпавших осадков за период с 1966 по 2023 гг. Для определения зависимости уровня подземных вод от климатических параметров был построен комплексный график за период наблюдения с декабря 2023 по ноябрь 2024 года.

Измерение уровней грунтовых вод велось в 5-ти гидрогеологических скважинах с периодом в 2-4 недели вручную и с помощью гидрогеологической рулетки РГ-ЛМ-30 производства ООО ПКФ Гидэк-Тензор. Скважина ГС-2 оборудована регистратором данных Solinst Levelogger5 Model 3001, который 3 раза в сутки замеряет уровень воды и ее температуру. Снятие данных с датчика производилось вручную с помощью оптического считывателя. В остальных скважинах температура грунтовых вод определялась с периодом в 2-4 недели в ручном режиме с помощью кондуктометра Hydromaster HM-200.

Измерение температуры грунтов произведено термометрическими косами производства ООО «РУСГЕОТЕХ», г. Москва, в соответствии с п. 6.8 ГОСТ 25358-2020, на глубинах: в пределах первых 5 м – кратным 0,5 м; затем до глубины 10 м – кратным 1 м; свыше 10 м – кратным 2 м, а также на забое скважины [5]. 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 [6, 7].

В процессе осуществления мониторинга состояния грунтовых вод ежемесячно производился отбор образцов для определения физических свойств и их химического состава потенциометрическим, флуориметрическим, фотометрическим, гравиметрическим методами и методом ионной хроматографии. Микрокомпонентный состав водных образцов был определен методами масс-спектральным (ICP-MS) анализа и атомно-эмиссионным (ICP-AES) с индуктивно связанной плазмой. Определение концентрации тяжелых металлов и удельной активности радионуклидов производилось методом атомно-адсорбционной спектрометрии.

Статистическая обработка результатов лабораторных определений химического состава вод, удельной активности радионуклидов и концентрации тяжелых металлов в грунтах производились с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel, Statistica.

Результаты

Изучение текущего состояния ГС застраиваемых территорий Приуральского района выполнялось с целью определения ее геокриологических, гидрогеологических и геоэкологических компонентов, а также определения техноген-

ных факторов, оказывающих на нее своё влияние. Главной особенностью ГС района является неоднородность распространения многолетнемерзлых грунтов и сложное строение геологического разреза, сложенного частым переслаиванием песчанистых и глинистых грунтов, имеющих различную степень льдистости.

Результатом изучения геокриологической составляющей ГС стали данные о температурном состоянии ММГ до глубины 25 м. На примере мониторинга температуры грунта в геотермической скважине, пробуренной на территории Ангальского мыса (г. Салехард) в 1976 г. геологической партией Салехардского комплексного гидрогеологического и инженерно-геологического поста в естественных ландшафтах, можно проследить динамику ее изменения [8]. В 2024 году силами сотрудников «Научного центра изучения Арктики» была пробурена новая скважина в непосредственной близости к скважине, пробуренной в 1976 году, что позволило сравнить результаты измерения температур грунта (рис. 2).

Графики сравнения температурных значений в «архивной» и вновь пробуренной скважинах показали, что за последние 48 лет кровля мерзлоты на территории исследования опустилась с глубины 1 м до 8 м и произошел ее отрыв от сезонномерзлого слоя, а температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м повысилась с -2,3 °С до -0,2 °С. Освоение данных территорий значительно затрудняется, т.к. наличие оттаивающих ММГ в разрезе требует применения дополнительных способов технической мелиорации грунтовых оснований для сохранения работоспособного состояния возведенных зданий и сооружений.

Все чаще при строительстве на ММГ применяется I принцип использования мерзлых грунтов в основании фундаментов объектов с использованием сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ). Данный способ позволяет не только в значительной степени понижать температуру ММГ в основании объектов, но и замораживать изначально талые грунты, что полностью меняет геокриологические условия урбанизированных территорий [9, 10]. Именно замораживание талых грунтов устройствами СОУ является одним из основных факторов антропогенного воздействия на ГС, т.к. при их применении происходит закономерное изменение её водообменных функций, связанных с процессами промерзания водонасыщенных грунтов в деятельном слое [11].

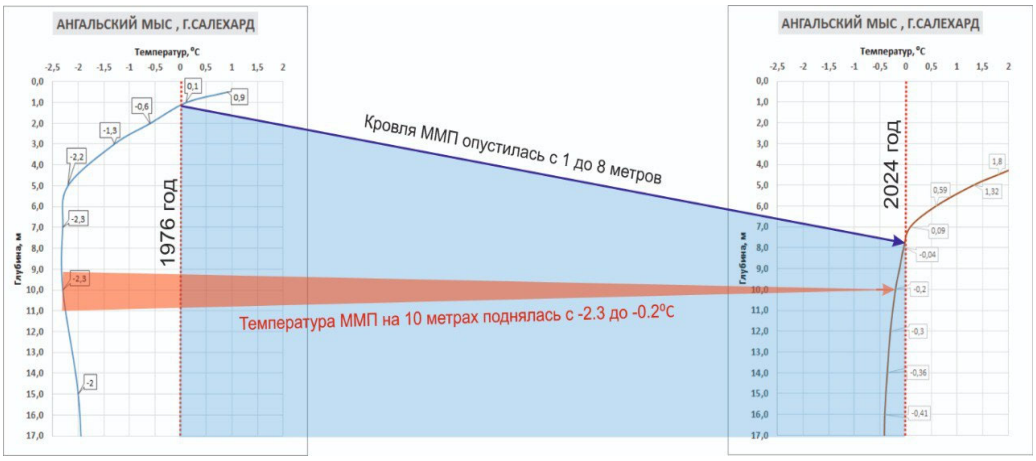


Рис. 2. Сравнительные графики значений температуры грунта в скважинах, пробуренных на территории Ангальского мыса в 1976 и 2024 гг.

Изменение гидрогеологических условий застраиваемых территорий приводит к проявлению таких опасных процессов, как растепление мерзлых пород и размыв грунтового основания объектов при сезонном повышении уровня подземных вод талыми водами, перекрытие путей трассировки и разгрузки подземных вод (барражный эффект), подтопление и заболачивание участков с пониженным рельефом и т.д. Указанные процессы являются еще одним фактором, влияние которого на ГС, меняет ее состояние в значительной степени.

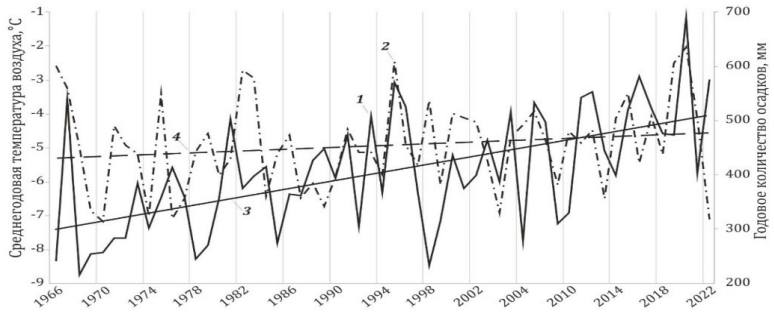


Рис. 3. График многолетней изменчивости (1966–2024 гг.) среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков по данным метеостанции Салехард: 1 – среднегодовая температура воздуха, °С; 2 – среднегодовое количество осадков, мм; 3, 4 – линейные тренды наблюдаемых параметров (температуры и осадков соответственно)

Анализ климатических параметров по данным метеостанции Салехард, позволяет констатировать, что начиная с 1990 года, величина линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха составила +0,09 °С/год, вместе с температурой увеличивается количество осадков (рис. 3) [7]. В настоящее время видимых предпосылок к изменению существующего тренда на потепление не наблюдается. При постепенном повышении среднегодовых температур воздуха и увеличении продолжительности теплого периода года оттаивание ММГ происходит с нарастающей интенсивностью. Это приводит к закономерному образованию таликовых зон, постепенно увеличивающихся в размерах, при этом аккумулируя большое количество подземных вод с последующей их разгрузкой в пониженные формы рельефа, что требует организации регулярного мониторинга гидрогеологической составляющей ГС на урбанизированных территориях.

Результатом изучения гидрогеологической составляющей ГС территории Приуральского района стало получение данных о наличии нескольких выдержанных и невыдержанных горизонтов подземных вод с неоднородным химическим составом. Некоторые из водоносных горизонтов обладают напором.

На основании Методических рекомендаций ВСЕГИНГЕО на территории города Салехард была создана пилотная специализированная сеть наблюдательных гидрогеологических и геотермических скважин для организации регулярного мониторинга состояния подземных вод, их уровенного и температурного режима, а также химического состава. Скважины были организованы на всех гео-

морфологических уровнях. Глубина бурения была выбрана с учетом абсолютных отметок устьев скважин и составляла от 10 м на первой надпойменной террасе до 28 м на четвертой.

В процессе бурения наблюдательных скважин было выполнено опробование грунтов с последующим лабораторным определением полного комплекса физико-механических и теплофизических свойств. По результатам статистической обработки лабораторных определений свойств грунта в геологических разрезах было выделено от 3 до 8 инженерно-геологических элементов, что в соответствии с СП 443.135800.2020 (Приложение А, табл. 1), характеризует инженерно-геокриологические условия территории как II-III категория (средней сложности – сложная) (рис. 4).

Наблюдательными гидрогеологическими скважинами были вскрыты подземные воды: ГС-9 приуроченные к надмерзлотным водоносным горизонтам несквозных таликов озерно-аллювиальных отложений (a^1III-Н), ГС-12 озерно-эстуарных отложений (am^4III), ГС-2 сквозных таликов (a^1III-Н); ГС-6 и ГС-7 локально-водоносного криогенно-таликового харасавэйского аллювиально-морского горизонта (la^3III). Воды, вскрытые скважинами ГС-6 и ГС-7, пробуренные на территории городской застройки, имеют значительный криогенный напор, достигающий 14 м. Стоит отметить, что воды, опробованные в скважине ГС-7, слабосолоноватые. Это объясняет тот факт, что на дату 12.02.2025 г. их температура имела значение минус 0,3 °С, а сами воды находились в талом состоянии (криопеги). По химическому составу данные воды могут быть использованы для бальнеологических целей, т.к. их минерализация колеблется в пределах значений 1,5-2,0 г/дм^3 и в них отмечено высокое содержание органических веществ. Бальнеологические воды с аналогичным химическим составом и свойствами добываются в 450 м от ГС-7, но с глубины 400 м.

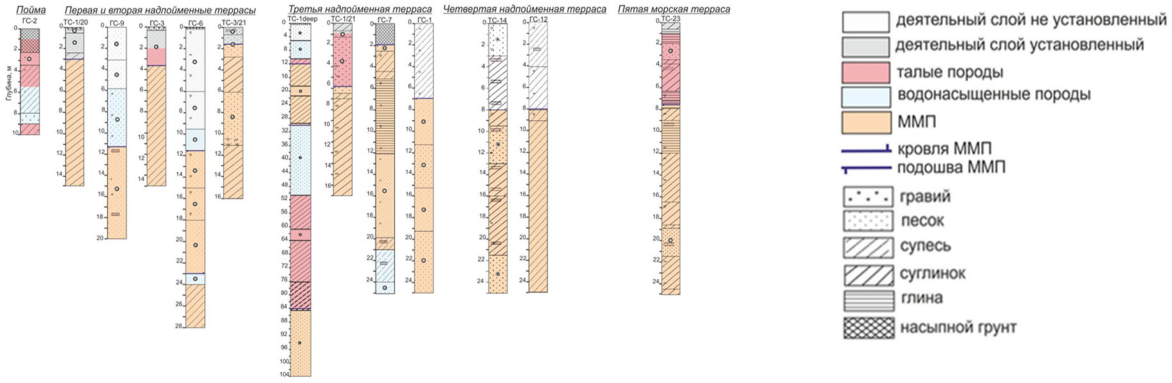


Рис. 4. Литологические колонки наблюдательных гидрогеологических и геотермических скважин, пробуренных на территории г. Салехард и за его пределами, в 2023-2024 гг.

В целом подземные воды, вскрытые и опробованные гидрогеологическими скважинами, преимущественно гидрокарбонатные по анионному составу, по катионному – преимущественно кальциево-магниевые, реже натриево-кальциевые. Минерализация подземных вод изменяется от 100 до 1580 мг/дм^3.

В скважине ГС-1, пробуренной техногенно-нарушенных ландшафтах, было отмечено повышенное содержание аммония (до 3 мг/дм^3), нефтепродуктов (до 2,0 мг/дм^3), фенолов (до 0,109 мг/дм^3). По результатам лабораторных определений микрокомпонентного состава в подземных водах, опробованных всеми гидрогеологическими скважинами, были отмечены повышенные значения Al, Mn, Fe, Ni, Pb, Li, Be, Rb, Nb, Mo, Cd, Sb, W, Tl и Br.

В зимний период 2024-2025 года были отобраны образцы подземных вод, вышедших на дневную поверхность в административном центре Приуральского района с. Аксарка, и образовавших массивные наледи в микрорайоне Брусничный и в переулке Полярников. По водородному показателю воды изменяются от нейтральных до слабощелочных (7,6-8,3), по анионному составу гидрокарбонатные сульфатно-хлоридные, по катионному составу натриево-магниево-кальциевые. Минерализация вод изменяется в пределах 175-272 мг/дм3.

Результатом изучения геоэкологического компонента ГС стало получение информации о удельной активности естественных дозообразующих радионуклидов (ЕРН) (табл. 1) и концентрации тяжелых металлов (ТМ) (табл. 2) в грунтах, отобранных при бурении всех изучаемых наблюдательных скважин с интервалом 1 м от поверхности до глубины забоя. Результаты лабораторных определений ЕРН и ТМ показали, что в скважине ГС-12 концентрация веществ на глубине 10 м, по всем показателям увеличена в 10 раз по отношению к остальным скважинам. Скважина ГС-12 была пробурена и обустроена в ненарушенных ландшафтах за территорией г. Салехард. Уровень грунтовых вод в данной скважине колеблется в пределах 4,5-5,5 м от уровня земли, а кровля мерзлоты зафиксирована на глубинах 8,5-9,0 м. Наименьшее значение удельной активности радионуклидов ^{226}Ra (8,0 Бк/кг) и ^{232}Th (6,0 Бк/кг) в скважине ГС-9 объясняется интенсивным вымыванием надмерзлотными водами в процессе их трассировки в зону разгрузки.

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в породах, отобранных на глубине 10 м

Наименование скважины	^{226}Ra, Бк/кг	^{232}Th, Бк/кг	^{40}K, Бк/кг
ГС-9	8,0	6,0	267,0
ГС-11	17,0	6,0	447,0
ГС-12	39,0	36,0	594,0
ТС-14	13,0	16,0	301,0
ГС-6	21,0	17,0	670,0
ГС-7	15,0	17,0	328,0

Таблица 2

Концентрация (мг/кг) тяжелых металлов в породах, отобранных на глубине 10 м

Наименование скважины	Cr	Mn	Cd	Zn	Cu	Pb
ГС-9	5,09	32,0	0,337	3,34	2,30	0,26
ГС-11	4,50	25,3	0,167	5,38	4,47	2,27
ГС-12	28,9	369,0	0,734	84,9	40,0	10,9
ТС-14	3,9	26,0	0,08	0,05	0,05	1,0
ГС-6	4,3	23,0	0,05	3,5	0,05	1,2
ГС-7	5,3	26,0	0,05	3,0	0,05	1,3

Обсуждение

Основываясь на результатах анализа температурных значений грунтов, распределенных по глубине деятельного слоя до 17 м (рис. 2), можно сделать выводы о том, что при существующем тренде на потепление, кровля мерзлоты в естественных ландшафтах южной части Приуральского района продолжит опускаться. Как следствие, для сохранения объектов на продолжительный период (до 70 лет), потребуется либо разработка новых проектных решений, либо повсеместное применение средств технической мелиорации грунтовых оснований (СОУ). Любой сценарий влечёт значительные социально-экономические риски.

По результатам изучения гидрогеологической составляющей ГС Приуральского района, можно констатировать, что опробованные подземные воды обладают весьма пестрым химическим составом. По анионному составу воды преимущественно гидрокарбонатные, реже нитратно-гидрокарбонатные (ГС-9). По катионному составу воды преимущественно магниево-кальциевые или кальциево-магниевые, реже натриево-кальциевые. Минерализация подземных вод изменяется от 100 до 1580 мг/дм^3. Практически во всех отобранных водных образцах отмечалось повышенное значение аммония (до 3 мг/дм^3), нефтепродуктов (до 2,0 мг/дм^3 в скв. ГС-1) и фенолов (до 0,109 мг/дм^3). Также стоит отметить повышенное содержание нитратов (до 28 мг/дм^3) в скважине ГС-9, что может быть связано, как с результатом многолетней эксплуатации подземных вод на Полуйском месторождении, выраженном в повышении ионов азотной группы, так и с влиянием хозяйственной деятельности на опытном поле, расположенном вблизи скважины. Для получения достоверной информации о гидрогеологической составляющей ГС крайне необходима разработка методических рекомендаций и сводов правил, которые будут регламентировать процесс организации сети наблюдений, обоснования выбора мест расположения наблюдательных гидрогеологических скважин и постов геохимического опробования подземных и поверхностных вод, состав исследований и их периодичность.

Область питания подземных вод Приуральского района приурочена к Сибирским Увалам, что обуславливает низкую природную защищенность водоносных горизонтов от загрязняющих веществ техногенного и природного происхождения [12]. Вертикальный перенос ЕРН и ТМ обусловлен наличием в верхней части разрезов песчанистых грунтов (зона аккумуляции), а горизонтальный перенос осуществляется в процессе транзита грунтовых вод в область разгрузки и в пониженные рельефы. При наличии ММГ, которые являются надежным флюидоупором, на участках аккумуляции грунтовых вод, происходит постепенное накопление веществ на кровле мерзлоты и именно на этих участка в разрезе отмечаются наибольшие значения концентраций (скважина ГС-12). Территория расположения данной скважины требует дальнейшего анализа с установлением причин повышенного содержания ЕРН и ТМ с выявлением источников загрязнения.

Заключение

В процессе выполнения данной работы была достоверно доказана необходимость комплексного изучения геологической среды, как единой системы, со-

стоящей из целого ряда отдельных исследований тесно взаимосвязанных между собой. Изменение геокриологических условий на территории криолитозоны в результате климатических или антропогенных воздействий, неизбежно влечет за собой изменение гидрогеологических и геоэкологических.

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. Для оценки экономической целесообразности применения того или иного способа технической мелиорации, необходимо организовать комплексный мониторинг всех компонентов геологической среды на всей урбанизированной территории. Актуализация нормативной документации и сводов правил для строительства вблизи южной границ криолитозоны, а также системный, научно-методический подход при выборе принципов использования ММГ в основании фундаментов объектов позволит продлить срок эксплуатации сооружений.

Благодарности

Работа выполнена ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» в рамках реализации проекта «Методика автоматизированного гидрогеологического мониторинга для расчета и прогноза состояния грунтов основания объектов» при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа, а также госзадания (тема № FWRZ-2021-0007 ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бешенцев В. А., Сальникова Ю. И., Абдрашитова Р. Н., Воробьева С. В. Гидрохимические условия нефтегазовых областей Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона // Нефть и газ. – 2019. – № 5. – С. 10-22.

2. Пронина Н. В., Макарова Е. Ю., Богомолов А. Х., Митронов Д. В., Кузеванова Е. В. Геология и угленосность Российской Арктики в связи с перспективами развития региона // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 42-52.

3. Шеин, А. Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемерзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А. Н. Шеин, Я.К. Камнев // Научный вестник ЯНАО. – 2020. – № 3(108). – С. 42-50.

4. 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.

5. 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.

6. System of automated geocryological monitoring. – URL: https://monitoring.arctic.yanao.ru/ (Accessed 10 March 2025 in Russian).

7. Специализированные массивы для климатических исследований. – URL: http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml (дата обращения: 04.02.2025).

8. Грязнов О. М. Комплексная гидрогеологическая, инженерно-геологическая и геоэкологическая съемка листа Q-42-50-А (г. Салехард) масштаба 1:50000. – Екатеринбург, 2004.

9. 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.

10. Хрусталев Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. – М.: Университетская книга, 2011. – 259 с.

11. Шевелев В. В. Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы // Геология и инженерная геология. – 2021. – Т. 44. – № 2. – С. 180-190.

12. Бешенцев В. А. Ресурсы подземных вод Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона и проблемы их использования // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 2 (30). – С. 15-20.

© А. А. Башкова, А. Н. Шеин, Я. Б. Горелик, 2025

УДК 621.371.3, 537.87
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-123-130

А. Ю. Белинская[1]✉, А. А. Боровко[1]

Возмущения ионосферного радиоканала в период декабрь 2024 г. – январь 2025 г.

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

Аннотация. На основе данных наклонного зондирования, полученных на трассе Норильск – Новосибирск с октября 2023 г. до января 2025 г., анализируются вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) в различных геофизических условиях. Получены суточные вариации максимально наблюдаемой частоты для каждого месяца года в магнитоспокойные периоды при высоком уровне солнечной активности. В осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя, что приводит к более высоким значениям МНЧ. Исследованы особенности проявления гелиогеофизического взаимодействия в декабре 2024 г. и январе 2025 г. Проведенный анализ показал, что в периоды сильной и умеренных магнитных бурь ионосферные возмущения приводят к сильным вариациям МНЧ распространения КВ-радиоволн и даже к отсутствию прохождения радиоволн на субавроральной трассе в вечерние и ночные часы LT.

Ключевые слова: распространение радиоволн, радиоканал, магнитосфера, высокоширотная ионосфера, наклонное зондирование ионосферы, главный ионосферный провал.

A. Yr. Belinskaya[1]✉, A. A. Borovko[1]

Disturbances of ionospheric radio channel the period December 2024 – January 2025

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

Abstract. This paper presents the results of analysis of oblique ionospheric sounding data obtained with continuous chirp signal on the subauroral path Norilsk-Novosibirsk. Variations in the maximum observed frequencies (MOF) are analyzed under various geophysical conditions from October 2023 to January 2025. Diurnal variations of the maximum observed frequency for each month of the year during magnetically calm periods with a high level of solar activity have been obtained. In the autumn-winter season, reflection from the sporadic layer is observed at night, which leads to higher MOF values. The features of the manifestation of heliogeophysical interaction in December 2024 and January 2025 are investigated. The analysis showed that during periods of severe and minor magnetic storms ionospheric disturbances lead to strong variations in the propagation frequency of HF radio waves and even to the absence of radio waves passing along the subauroral path in the evening and night hours of LT.

Keywords: radio wave propagation, radio channel, magnetosphere, high-latitude ionosphere, oblique ionospheric sounding, main ionospheric trough

Введение

Известно, что распространение радиосигналов во многом зависит от электронной концентрации вдоль пути их следования. Одним из крупномасштабных неоднородных образований в субавроральной ионосфере является главный ионосферный провал (ГИП). Он представляет собой устойчивую область, распо-

ложенную на широтах от 52 до 64 градусов. В этой области концентрация электронов значительно ниже, чем в окружающих регионах.

Местоположение ГИП может меняться в зависимости от времени суток и геомагнитной активности. В спокойных условиях его ширина составляет около 10 градусов. Однако при возмущениях ширина провала уменьшается, а его границы смещаются к экватору.

Экспериментальные данные, полученные на трассах наклонного зондирования, проходящих через область ГИП, показывают, что характеристики КВ-сигналов существенно меняются. Наблюдаются уменьшения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) и дополнительные сигналы с задержками, превышающими задержки основных мод распространения. Такие сигналы могут возникать из-за отражения от полярной стенки провала и иметь достаточно высокий уровень, чтобы влиять на работу систем связи. Несмотря на то, что исследования характеристик распространения КВ-радиоволн в области ГИП проводятся уже много лет, обзор работ можно найти, например, в [1, 2], интерес к этой теме не ослабевает. Это связано с тем, что важно знать, как меняются параметры КВ-радиосигналов на трассе, проходящей через область ГИП, как в спокойных, так и в возмущённых условиях. Кроме того, данные наклонного зондирования могут дать информацию для диагностики состояния ионосферы вдоль трассы распространения радиосигналов.

В этой работе проведён анализ изменений МНЧ на трассе Норильск – Новосибирск в различных геофизических условиях.

Максимальная наблюдаемая частота на трассе Норильск – Новосибирск

С октября 2023 г. в Новосибирске установлен новый ЛЧМ–ионозонд, который позволяет проводить наблюдения методом наклонного зондирования. В том числе, с частотой 5 мин ведутся непрерывные наблюдения на трассе Норильск – Новосибирск, которая ориентирована практически в меридиональном направлении, и северный участок трассы примыкает к области главного ионосферного провала (средняя точка трассы имеет координаты 62,2° с.ш. и 85,2° в.д.). Данная радиотрасса функционирует на базе сети ЛЧМ-ионозондов (разработка ИСЗФ СО РАН [3]). За период 2023-2024 гг. была накоплена база данных, которая позволила оценить суточные вариации МНЧ для магнитоспокойных дней [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html] в каждом месяце года (рис. 1, по UT). Для каждого момента времени были посчитаны среднеквадратичные отклонения.

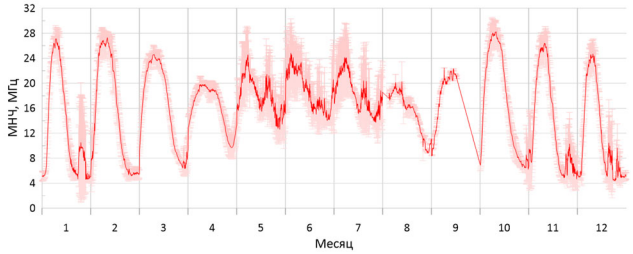


Рис. 1. Суточные вариации МНЧ (красная линия) на трассе Норильск – Новосибирск со средним квадратичным отклонениям для каждого момента времени (светлые линии), LT = UT+5,5

Появление максимума МНЧ наблюдается в околополуденное время суток (12-14 часов по местному времени), минимум – в полночь (00-02 часов по местному времени). В осенне-зимний период значения достигают 28 МГц, в весенне-летний период – 24 МГц, а минимумы – 5 МГц и 13 МГц соответственно.

В летний период наблюдается уменьшение диапазона значений МНЧ. Также проявляются сильные вариации в течение суток. Общий характер среднесуточного хода МНЧ теряется, появляются 2 пика. Возможно, подобные изменения связаны с изменением критических частот слоёв ионосферы и образованием слоя F1 в летний сезон.

В осенне-зимний сезон (в частности, с октября по январь) в ночное время в районе 20-21 UT наблюдается отражение от спорадического слоя, расположенным на высотах 130-150 км (рис. 2).

Также стоит обратить внимание на апрель, август и сентябрь, где наблюдается резкое понижение суточного максимума МНЧ на 4-6 МГц (до 21%). В апреле прослеживается размытие пика и его постепенное разделение на 2 составляющие, диапазон значений уменьшается на 3 МГц (23%). Для августа ситуация противоположная – происходит слияние пиков в один, диапазон значений увеличивается на 6 МГц (100%). Прямолинейный участок суточного хода МНЧ в сентябре (с 12:33 до 23:58 UT) обусловлен недостаточностью данных.

Среднеквадратичное отклонение для осенне-зимнего периода в ночные часы достигает 8 МГц, для летнего сезона – 6 МГц, в остальное время не превышает 3 МГц (рис. 1, светлые линии). Таким образом, для трассы Норильск – Новосибирск вариации МНЧ в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях.

Проведенный анализ максимальных наблюдаемых частот, полученных на меридиональной трассе Норильск – Новосибирск, при высоком уровне солнечной активности, но в спокойных геомагнитных условиях показал:

- отличие суточного хода для различных сезонов;
- вариации в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях;
- в осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя;
- апрель, август и сентябрь характеризуются пониженными значениями суточного максимума.

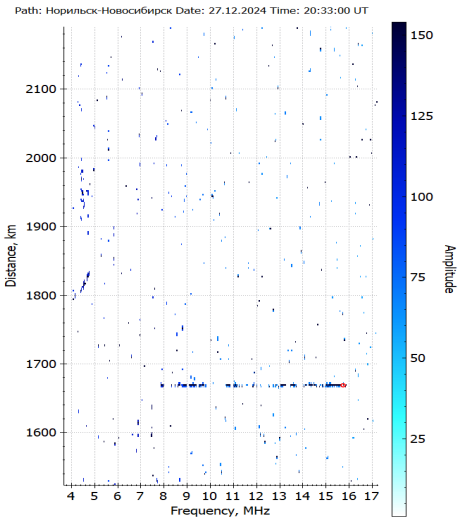


Рис. 2. Отражение радиосигнала на трассе Норильск – Новосибирск 27.12.2024 в 20:33 UT. Красной точкой отмечена МНЧ = 15,6 МГц

Гелиогеофизическая обстановка в декабре 2024 г. – январе 2025 г.

Анализ космической погоды в декабре 2024 г. – январе 2025 г. проводился на основе параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) перед фронтом околоземной ударной волны [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/ istp_public/], которые представлены на рис. 3. Информация о гелиосферных источниках бурь доступна на ресурсе [http://www.solen.info/solar/old_reports/]. В тексте используются следующие обозначения: Vsw – скорость СВ; Psw – динамическое давление СВ; |B| – модуль ММП; Bz GSM – компонента ММП в солнечно-магнитосферной системе координат GSM, которая перпендикулярна эклиптике (положительное значение соответствует направлению на север, отрицательное – на юг). CME (coronal mass ejection) – выброс корональной массы.

В рассматриваемый период наблюдается достаточно спокойная космическая погода, за исключением двух периодов: середина декабря 2024 г. и начало января 2025 г. (см. рис 3).

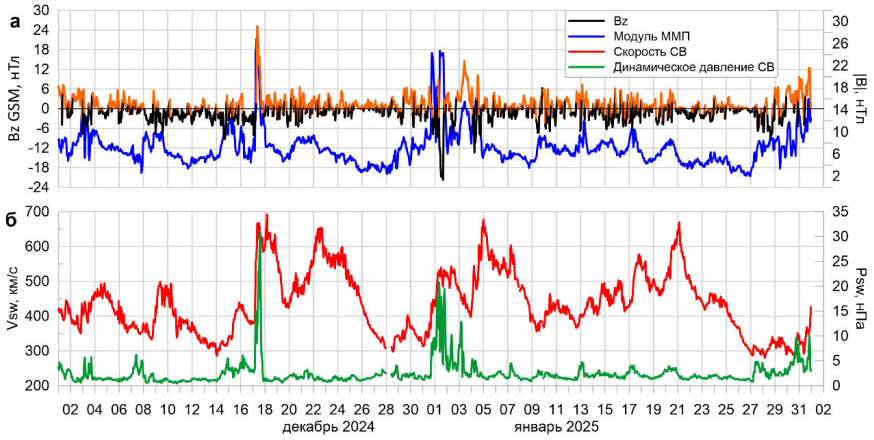


Рис. 3. Параметры межпланетного магнитного поля (а) и солнечного ветра (б). Для вертикальной компоненты ММП Bz оранжевым цветом обозначены положительные значения, а черным – отрицательные

17 декабря наблюдается прохождение через орбиту Земли межпланетной структуры с большим значением |B| (до 28 нТл) и направленной к северу вертикальной компонентой ММП (Bz~ 25 нТл). В это же время резко возрастает Vsw (от ~ 400 км/с до 700 км/с) и Psw (от ~ 5 нПа до 30 нПа). Вероятнее всего это является отголоском слабого, медленного, асимметричного CME 14 декабря, пик которого пришелся на 17:29 UT. Возмущения в этот период носят краткосрочный характер.

С 31 декабря по 4 января наблюдался ускоренный поток солнечного ветра (СВ), вызванный CME в 04:34 UT (после вспышки M2), в 17:08 UT (M3.3) 29 декабря и в 02:00 UT 1 января.

31 декабря до 15 UT скорость СВ была 400-340 км/с, Bz колебалась от -6 до +4 нТ. В 15-17 UT Bz достигла -17 нТ, а скорость СВ увеличилась до 490 км/с.

1 января к 05 UT скорость СВ возросла с 450 до 550 км/с, Bz варьировалась от -23 до +25 нТ.

2 января до 13 UT скорость СВ оставалась 540-500 км/с, Bz колебалась от -11 до +5 нТ. После 13 UT скорость начала снижаться, к 22 UT 3 января достигнув 400 км/с, Bz – от -5 до +15 нТ.

3 января в 22:00 Bz усилилась до -15 нТ, скорость СВ начала возрастать. К 14:00 4 января достигла 670 км/с, к 21:00 – 700 км/с, Bz колебалась от -11 до +5 нТ.

С 21 UT 4 января скорость СВ начала снижаться, достигнув к концу периода 480 км/с. Bz колебалась от -7 до +6 нТ.

Наблюдался проход через орбиту Земли области СВ с высокими значениями |B| (до 24 нТл), Psw (до 21 нПа), Vsw (до 520 км/с) и вертикальной компонентой Bz, направленной сначала на юг (-21 нТл), затем на север (15 нТл).

Анализ магнитных бурь проводился на основе индексов: локального K для геомагнитной обсерватории Новосибирск (ИНГГ СО РАН), планетарного Kp [https://kp.gfzpotsdam.de/en/data] и Dst [https://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/ dst_realtime/ index.html].

Геомагнитная обстановка в декабре 2024 г. – январе 2025 г. представлена на рис. 4.

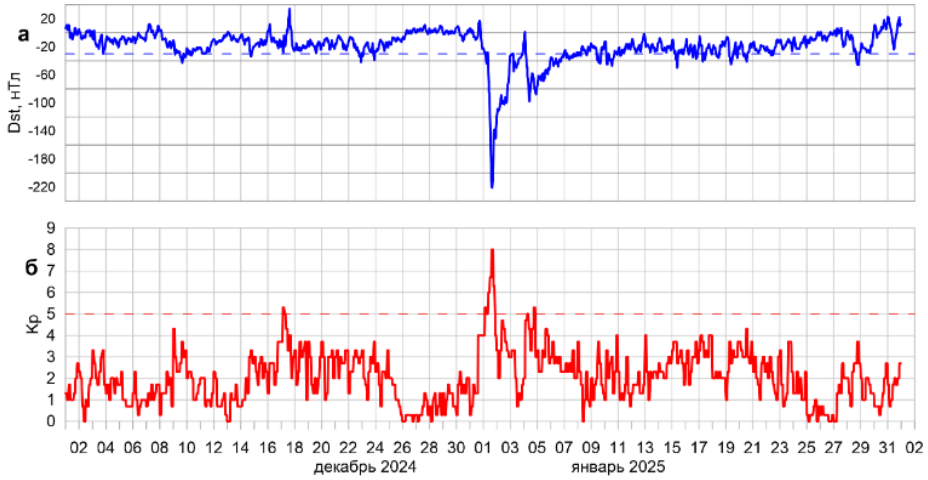


Рис. 4. Геомагнитные индексы в декабре 2024 г. – январе 2025 г.
(а) – Dst; (б) – планетарный трехчасовой индекс Kp

Хорошо видно, что изменение в межпланетном пространстве в середине декабря вызвало небольшое магнитное возмущение, что согласуется с тем, что только во время экстремальных явлений с высокими скоростями СВ возможно появление геомагнитной бури (Kp = 5 или выше) с северным Bz. События начала января вызвали достаточно бурную реакцию геомагнитного поля. Были отмечены 3 большие бури, информация о которых представлена в табл. 1.

Таблица 1

Магнитные бури, зарегистрированные в Новосибирске

Дата	Начало бури	Конец бури	Максимум К	Максимум Dst
31.12.2024	SSC* 16:22		4	-23
01.01.2025		00:00		
01.01.2025	03:00	23:00	8	-221
02.01.2025	SSC 06:30	22:00	4+	-102

*SSC (Storm Sudden Commencement) – внезапное начало геомагнитной бури.

Малая буря 31 декабря имела внезапное начало в 16:22 UT и закончилась к концу дня. В это время наблюдались сильные полярные сияния над европейской частью России. Затем 1 января была зафиксировано очень большая магнитная буря с постепенным началом в 03 UT, которая продлилась 20 часов и имела максимум в 15-17 UT.

Ионосферные возмущения в период геомагнитных бурь

По экспериментальным наблюдениям, полученным в северо-восточном регионе России во время слабых геомагнитных бурь, наблюдавшихся в осенний период 2018–2020 гг. в минимуме солнечной активности, обнаружено, что даже во время слабых бурь уменьшение МНЧ в дневные часы достигало 25–35%, а ночью – 40–50%. [4, 5]. В результате исследования [6] данных наклонного зондирования ионосферы на субавроральных трассах Магадан – Иркутск и Норильск – Иркутск было установлено, что при усилении поля магнитосферной конвекции на ионограммах обнаруживаются дополнительные диффузные отражения. Было выявлено соответствие между вариациями МНЧ и пространственной локализацией двух ключевых ионосферных структур: главного ионосферного провала и экваториальной границы зоны диффузных электронных высыпаний.

Учитывая гелиогеофизическую обстановку в декабре 2024 г – январе 2025 г. и расположение радиотрассы Норильск – Новосибирск, можно ожидать больших возмущений на ней в период 31.12.24 – 04.01.25. Поэтому для анализа были привлечены данные по МНЧ с 30.12.24 по 03.01.25, включая даты с невозмущенным состоянием околоземного пространства.

На рис. 5 приведены вариации МНЧ за рассматриваемый период на фоне средних значений в магнитоспокойные дни декабря и января. Там же обозначены граничные моменты магнитных бурь.

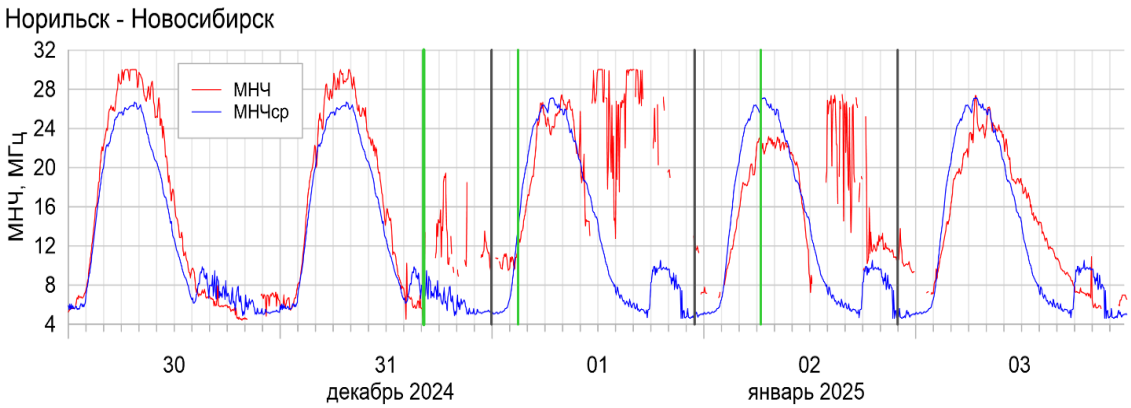


Рис. 5. Суточные вариации МНЧ на трассе Норильск – Новосибирск за период 30.12.2024 – 03.01.2025. Зеленая линия соответствует началу магнитной бури, а серая – окончанию

Анализируемый период наблюдений попадает на максимум солнечного цикла, поэтому МНЧ радиотрассы в дневные часы превышала верхнюю границу частотного диапазона зондирования (30 МГц), например, 30 декабря 04-14 UT, 1 января 12-16 UT. В вечерние и ночные часы местного времени в невозмущенные дни наблюдается уровень МНЧ ниже средних в магнитоспокойные дни.

Совсем другая картина наблюдается в период сильной и двух умеренных бурь. Высыпания электронов низких энергий приводят к возрастанию концентрации электронов в F-области внутри и вблизи полярной стенки ГИП [7, 8], что может объяснять наблюдаемые повышенные значения МНЧ (вплоть до 30 МГц) на трассе Норильск – Новосибирск 31 декабря, 1 и 2 января в вечерние и ночные часы LT, когда регистрировались дополнительные сигналы с задержками и МНЧ, превышающими соответствующие средние значения в невозмущенных условиях. Стоит отметить, что наибольшие отклонения от среднего были именно в максимуме магнитных бурь. Кроме того, в конце бури 1 января и середине бури 2 января наблюдались длительные интервалы «black out». Причем, чем больше было магнитное возмущение, тем больше были отклонения от значений в магнитоспокойные дни. Дневные же значения имели тенденцию к пониженным значениям по сравнению с невозмущенным уровнем.

Заключение

Получены по экспериментальным данным суточные зависимости МНЧ от месяца наблюдения для магнитоспокойных условий при высоком уровне солнечной активности. Вариации МНЧ в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях. В летний период наблюдается уменьшение диапазона значений МНЧ на фоне сильных вариаций в течение суток. В осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя, расположенного на высотах 130-150 км. Такое отражение приводит к более высоким значениям МНЧ, нарушающим плавный ход суточных вариаций. Эти результаты можно использовать для оценки вариаций МНЧ при различных ге-

лиогеофизических условиях. Кроме того, они могут быть эталонами для проверки методов прогнозирования максимально применимой частоты.

Исследованы особенности проявления гелиогеосферного взаимодействия в декабре 2024 г. и январе 2025 г. по данным наклонного зондирования на радиотрассе Норильск – Новосибирск, северный участок которой примыкает к области главного ионосферного провала. Проведенный анализ показал, что в периоды сильной и умеренных магнитных бурь ионосферные возмущения приводят к сильным вариациям МНЧ распространения КВ-радиоволн и даже к отсутствию прохождения радиоволн на субавроральной трассе в вечерние и ночные часы LT.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Для обработки ионограмм наклонного зондирования использовалась программа «IonoView» (ИСЗФ СО РАН, свидетельство № 2024618431 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11 апреля 2024 года).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.В. Высокоширотные геофизтческие явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
2. Мизун Ю.Г. Полярная ионосфера. – Ленинград: Наука, 1980. – 216 с.
3. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 24-31.
4. Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования // Солнечно-земная физика. – 2004. – Вып. 5. – С. 124-127.
5. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. –Т. 62. – № 2. – С. 245-256.
6. Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А. Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 91-105.
7. Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах // Космические исследования. – 1977. – Т. 15. – №. 3. – С. 421-434.
8. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. – М.: Наука, 1988. – 232 с.

© А. Ю. Белинская, А. А. Боровко, 2025

УДК 550.834.08
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-131-137

А. А. Белоусов[1,2]✉, П. А. Дергач[1,2], А. В. Яблоков[1,2], Г. Ю. Зобнин[1,2]

Результаты методических испытаний системы оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация,
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: belousov111222@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено развитию методов инженерной сейсморазведки, а именно сокращению времени полевых измерений без ущерба для качества получаемых данных. Для этого был сконструирован прототип системы оперативной диагностики пород ВЧР, состоящий из подвижной сейсмической расстановки и портативного вибрационного источника поперечных волн. Использование подобных компоновок позволяет оперативно производить сейсмические наблюдения вдоль протяженных линейных профилей используя системы наблюдений характерные для сейсморазведки МОВ ОГТ. Испытания проводились в зимнее время и были максимально приближены к производственным. По результатам анализа волновой картины на полученных сейсмограммах были сделаны выводы о полном подавлении поверхностных волн и выделении отраженных от границы между рыхлыми и плотными грунтами. Построен предварительный временной разрез МОВ ОГТ. Использование системы на порядок сокращает время измерений по сравнению с классической инженерной сейсморазведкой, а минимальное количество сотрудников, необходимое для работы с системой – 2 человека: водитель и оператор сейсмостанции.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, вибрационный источник, метод отраженных волн, поперечные волны, подвижная сейсмическая расстановка

A. A. Belousov[1,2]✉, P. A. Dergach[1,2], A. V. Yablokov[1,2], G. Y. Zobnin[1,2]

Results of methodical tests of the system of diagnostics of near-surface seismic section using reflected SH-waves

[1] A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation,
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: belousov111222@gmail.com

Annotation. The research is devoted to the development of engineering seismic exploration methods, namely, reducing the time of field measurements without compromising the quality of the data obtained. For this purpose, a prototype of an operational rock diagnostic system was constructed, consisting of a movable seismic arrangement and a portable vibrational transverse wave source. The use of such arrangements makes it possible to quickly make seismic observations along extended linear profiles using observation systems typical for CDP seismic exploration. The tests were carried out on concrete and dirt roads and were as close as possible to production ones. Based on the results of the analysis of the wave pattern on the obtained seismograms, conclusions were drawn about the complete suppression of surface waves and the confident separation of reflected waves from the boundary between loose and dense soils. A preliminary time section has been constructed. Using the system significantly reduces the measurement time compared to classical engineering seismic exploration, and the minimum number of employees required to work with the system is 2 people: the driver and the operator of the seismic station.

Keywords: near-surface seismic, vibration source, reflection seismic, reflected wave method, shear waves, land streamer

Введение

Данная работа посвящена развитию методов проведения полевых измерений в области инженерной сейсморазведки. Основной задачей являлось сокращение времени полевых измерений без ущерба для качества получаемых данных. Для её решения авторами был сконструирован прототип системы оперативной диагностики пород верхней части разреза (ВЧР), состоящий из подвижной сейсмической расстановки (аналогичные разработки упоминаются в зарубежной литературе как «Land Streamer» [1], [2]) и портативного вибрационного источника поперечных волн [3]. Использование подобных компоновок позволяет оперативно производить сейсмические наблюдения вдоль протяженных линейных профилей, в частности используя системы наблюдений характерные для сейсморазведки методом отраженных волн МОВ ОГТ [4]. Несмотря на свою распространенность в нефтегазовой отрасли, применение МОВ ОГТ для решения задач инженерной сейсморазведки осложнено в силу особенностей волнового поля, связанных с наличием поверхностных волн Лява и Рэлея, которые, в свою очередь, являются помехами при выделении отраженных волн. Однако ситуация меняется в случае инверсного разреза, когда при возбуждении и регистрации SH-волн поверхностные волны не образуются [5]. Инверсный разрез характерен для северных регионов, где широко распространено сезонное промерзание приповерхностного слоя грунтов. Стандартный для инженерной сейсморазведки метод преломленных волн (МПВ) в таких условиях малоэффективен и для детального изучения ВЧР применяются методы МОВ ОГТ на SH-волнах и MASW.

В данной работе приведены результаты серии испытаний прототипа системы оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн. Испытания проводились в зимнее время на территории Новосибирской области.

Аппаратура

На момент испытаний прототип системы оперативной диагностики состоял из двух основных элементов: 24 канальной двухкомпонентной буксируемой расстановки приемников и портативного вибрационного источника с блоком управления. Буксируемая коса была собрана на основе трехкомпонентных 5-герцовых геофонов GS-ONE LF (12 шт.), подключенных к станции SGD-SEL, причем подключались только вертикальная и одна горизонтальная (поперек линии профиля) компоненты датчиков. Сами датчики были жестко закреплены на стальных подложках с грунтозацепами, обеспечивающими прорезание грунта по мере движения расстановки, для обеспечения её более стабильного положения. Буксируемая расстановка не предполагает дополнительного воздействия на приемники (прижима) для более жёсткой установки со стороны человека. По сравнению с установленными вручную приемниками это может являться недостатком, так как обеспечение плотного контакта датчик-грунт является необходимым условием для хорошего качества полевых данных. Однако, как будет показано далее, конструкция платформ и масса датчика обеспечивают хороший контакт датчика с грунтом и, как следствие, качество полевых данных.

Для генерации сейсмических колебаний использовалась авторская разработка: портативный вибрационный источник поперечных волн, а точнее его усовершенствованная версия [6] состоящая из:

1. Блока излучателей, состоящего из шести низкочастотных акустических преобразователей энергии, жестко закрепленных внутри на противоположных стенках металлического корпуса (по 3 штуки с каждой стороны).

2. Блока питания и управления, в состав которого входят 2 аккумулятора (LiFePO4, 48 вольт, 12 Ач, 30 А), а также 6 усилителей.

3. Аудиоустройства для воспроизведения опорного сигнала и синхроимпульса.

4. Силового кабеля питания РПШ 12х2.5 с разъёмами Р32К3Q 12pin.

В такой компоновке сигнал от виброисточник уверенно прослеживается на удалениях вплоть до 355 метров (SNR>5), чего с запасом хватает для решения задач данного исследования. Чтобы достичь таких показателей, достаточно излучать линейный СВИП-сигнал длительностью 30-60 секунд с разверткой частоты от 5 до 80 Гц.

Методика полевых измерений

В силу ограниченного числа датчиков, для обеспечения значения кратности перекрытия, приемлемого для суммирования отраженных волн, осуществлялось два проезда в противоположных направлениях с возбуждением колебаний на одних и тех же координатах ПВ. Монтаж итоговых виброграмм производился на этапе предварительной обработки данных. При этом шаг между пунктами возбуждения составлял 2 метра. Воздействия производились поперек линии профиля, анализировалась Y-компонента двухкомпонентной записи. В качестве опорного сигнала использовался линейный свип с разверткой частоты от 5 до 80 Гц длительностью 30 секунд. Параметры записи сейсмостанции: частота дискретизации – 1000 Гц; длительность – 32 с; коэффициент усиления – 24 дБ, тип синхронизации – проводная (синхроимпульс в виде ступеньки напряжения).

На (рис. 1) приведены фотографии, демонстрирующие процесс работы с системой оперативной диагностики ВЧР в полевых условиях зимой.

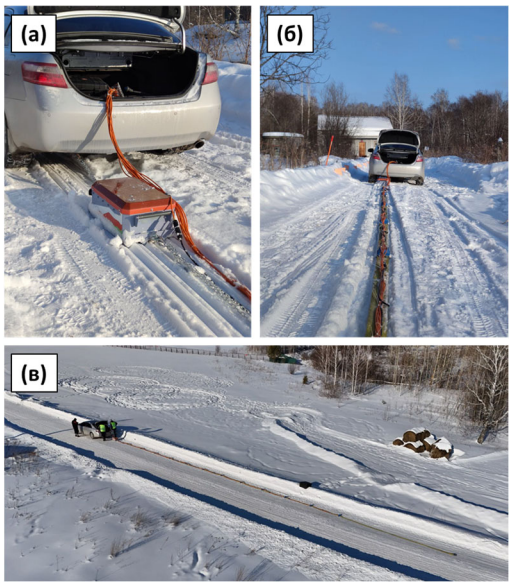


Рис. 1. Фотографии, демонстрирующие процесс работы с системой оперативной диагностики ВЧР в полевых условиях зимой.

На (рис. 1а, б) видно, что при перемещении по зимнику массивный виброисточник уплотняет снег и создает колею, по которой за ним двигаются датчики. Полозья виброисточника и грунтозацепы платформ спроектированы таким образом, чтобы обеспечивать хороший контакт датчика с грунтом.

Зимние испытания системы производились на двух объектах: дорога с бетонным покрытием (рис. 1а, б) и дорога с грунтовым покрытием (рис. 1в). Причем во втором случае измерения производились днем, а вблизи находилась трасса и остановка общественного транспорта. Длинна профилей составила 70 и 142 м соответственно.

Результаты и обсуждение

На (рис. 2) приведен пример монтажа встречных полевых сейсмограмм для двух соседних ПВ. На сейсмограммы наложены расчетные годографы отраженных волн (синие гиперболы) и приведены соответствующие значения t0, эффективных скоростей (v) и угла наклона границы (fi).

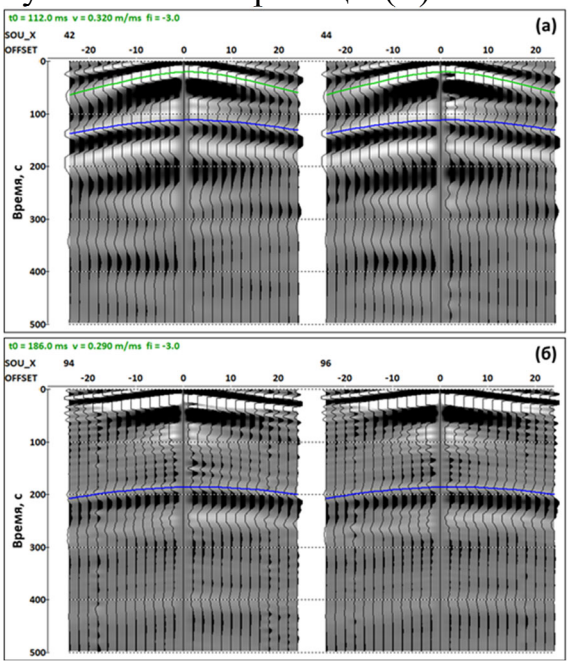


Рис. 2. Пример полевых сейсмограмм ОПВ с соседних ПВ для профилей на бетонной (а) и грунтовой (б) дорогах.

Необходимо отметить, что центральная трасса на сейсмограмме соответствует контрольному датчику, установленному на корпусе виброисточника. На момент проведения испытаний датчик ещё не был смонтирован и поэтому на сейсмотрассе записаны нулевые значения.

По результатам визуального анализа можно произвести интерпретацию наблюдаемого волнового поля и сделать следующие выводы:

1. Наличие инверсного слоя сезонной мерзлоты позволило полностью избавиться от поверхностных волн при наблюдениях на SH-волнах

2. На сейсмограмме четко видна интенсивная отраженная волна. По своим кинематическим характеристикам она соответствует отражению от границы рыхлых и плотных грунтов на глубинах около 20 и 25-30 метров для профилей на бетонной и грунтовой дорогах, соответственно.

3. На сейсмограмме видна прямая волна, распространяющаяся в слое сезонной мерзлоты с кажущейся скоростью порядка 900 м/с.

4. Несмотря на то, что качество установки датчиков на протяжении проведения испытаний намеренно не контролировалось, количество шумящих каналов на приведенных сейсмограммах минимально.

Испытания на грунтовой дороге были максимально приближены к производственным: по ней периодически перемещались люди и автотранспорт, а буквально в 30 метрах от конца профиля была расположена конечная остановка общественного транспорта. Несмотря на это, по нашим оценкам, из 1152 сейсмотрасс всего 53 были признаны непригодными для обработки, что составляет менее 5% от их общего количества. Временной разрез, полученный в результате экспресс-обработки данных с профиля на грунтовой дороге методом МОВ ОГТ приведен на рис. 3.

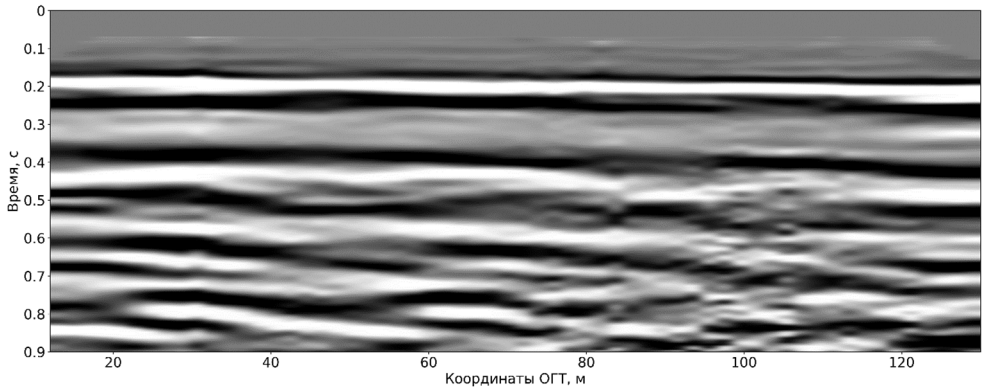


Рис. 3. Результат экспресс-обработки данных с профиля на грунтовой дороге методом МОВ ОГТ.

Экспресс-обработка данных по методу МОВ ОГТ выполнялась с целью построения предварительного скоростного разреза и включала последовательное выполнение следующих этапов:

1. Расчет и бинирование точек ОГТ (шаг между ОГТ - 2 м);
2. Применение F-K-фильтра (скоростное окно от 0 до 300 м/с);
3. Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд (SCAC);
4. Компенсация геометрического расхождения;
5. Скоростной анализ и ввод скоростного закона;
6. Суммирование трасс ОГТ.

На полученном временном разрезе явно выделяется отражающая граница с t0 порядка 200 мс, глубину которой мы оценили в 25-30 метров. Чтобы выделить

более глубокие границы необходима расширенная обработка МОВ ОГТ с использованием процедуры подавления кратных волн.

Заключение

Разработана и успешно протестирована система оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн на основе новой версии портативного вибрационного источника и наземной буксируемой косы. Продемонстрирована высокая производительность работ без ущерба для качества получаемых данных. Использование системы в разы сокращает время измерений по сравнению с классической инженерной сейсморазведкой. Минимальное количество сотрудников, необходимое для работы с системой – 2 человека: водитель и оператор сейсмостанции.

По результатам анализа волновой картины на полученных сейсмограммах были сделаны выводы о полном подавлении поверхностных волн и уверенном выделении отраженных от границы между рыхлыми и плотными грунтами, расположенной на глубинах около 20 и 25-30 метров для профилей на бетонной и грунтовой дорогах, соответственно. Построен предварительный временной разрез методом МОВ ОГТ.

Итоговое время, за которое были произведены измерения на профиле вдоль грунтовой дороги составило около 2 часов, что значительно меньше, чем при классических способах измерений в инженерной сейсморазведке. За это время были произведены монтаж/демонтаж системы, измерения на 96 ПВ, а также перемещения между ними.

Безусловно у такой технологии проведения полевых измерений есть и свои минусы. Основной – это необходимость расчистки и подготовки профиля при помощи снегоуборочной техники, либо использование системы на расчищенных от рыхлого снега дорогах (зимниках). Однако с учетом высокой производительности работ и малого числа сотрудников, задействованных в процессе измерений, возможно такая технология в некоторых случаях окажется экономически выгоднее. Особенно в случае больших объемов выполняемых работ.

Уже после проведения зимних испытаний система была модернизирована. В частности, ориентация двух из 6 излучателей виброисточника была изменена на вертикальную, а блок управления дополнен селектором выбора режимов работы. Благодаря этому появилась возможность осуществлять комбинированные измерения с использованием продольных либо поперечных волн. Таким образом, появляется возможность выбора методов в зависимости от типа сейсмического разреза: на нормальном разрезе можно производить измерения методами МПВ на продольных и поперечных волнах; на инверсном – методом МОВ ОГТ с использованием SH-волн. Кроме того, на всех типах разрезов можно проводить исследования методом MASW, как на волнах Рэлея, а в случае нормальных разрезов – и на волнах Лява.

Дальнейшим развитием данной тематики станет модернизация системы управления вибрационным источником с использованием беспроводной системой передачи данных и контроля параметров вибрационной установки, что зна-

чительно упростит работу с устройством и положительно скажется на производительности. Также планируется доработка буксируемой косы: увеличение количества приемников до 24 штук (2С), а также использование различных сейсмических кос, что позволит в зависимости от задачи выбирать расстояние между датчиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eiken, O., Degutsch, M., Riste, P., & Rød, K. (1989). Snowstreamer: an efficient tool in seismic acquisition. First Break, 7(9), 01 Sep 1989. https://doi.org/10.3997/1365-2397.1989021

2. Inazaki, T. (1999). Land Streamer: A New System For High-resolution S-Wave Shallow Reflection Surveys. In Proceedings of the 12th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (cp-202-00023). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.202.1999_023

3. Дергач, П. А., Яблоков, А. В., Полозов, С. С., Зобнин, Г. Ю., & Дучков, А. А. (2024). Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о земле, 69(2), 237-250.

4. Pugin, A. M., Brewer, K., Cartwright, T., Pullan, S. E., Perret, D., Crow, H., & Hunter, J. A. (2013). Near surface S-wave seismic reflection profiling–new approaches and insights. First Break, 31(2). https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013005

5. Скворцов, А. Г., Царев, А. М., Садуртдинов, М. Р., & Гаврилов, А. В. (2011, October). Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах–опыт применения. In Galperin Readings 2011 (pp. cp-276). European Association of Geoscientists & Engineers.

6. Дергач П.А., Яблоков А.В., Зобнин Г.Ю., Белоусов А.А., Полозов С.С. Разработка портативного вибрационного источника поперечных волн для задач инженерной и рудной сейсморазведки // Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами: Материалы научно-практической конференции (г. Красноярск, 22-25 октября 2024 г.) – Сибирский федеральный университет – Красноярск – С. 37-42 – 2025.

© А. А. Белоусов, П. А. Дергач, А. В. Яблоков, Г. Ю. Зобнин, 2025

УДК 550.34.06.013.3, 550.34.06.013.24
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-138-143

А. В. Беляшов[1]✉, И. П. Шерстюк[1]

Усовершенствование гипоцентрии локальных землетрясений Центрального Байкала

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

Аннотация. В числе событий, задействованных в процессе релокации коровых землетрясений в районе Центрального Байкала за 2001-2003 гг., оказались промышленные взрывы на Черемшанском кварцитовом руднике вблизи пос. Турунтаево. Несмотря на поверхностную природу источников указанных событий, глубина релоцированных гипоцентров составила порядка 7-10 км, что обусловлено усреднением локационного решения при определении T_0 через срединную линию Vp/Vs на суммарном графике Вадати. Проведена оценка отклонений гипоцентрии, которые могут достигать 15 км при разнице между исходными и усредненными значениями T_0 более 1 сек. При этом решения, полученные с использованием исходных значений T_0, зачастую определены через аномально повышенные скорости сейсмических волн и не могут рассматриваться в качестве адекватных, поэтому продолжено лоцирование коровых землетрясений с помощью усредненных значений T_0.

Ключевые слова: коровые землетрясения Центрального Байкала, график Вадати, гипоцентрия

A. V. Belyashov [1]✉, I. P. Sherstyuk[1]

Central Baykal local earthquakes hypocentria development

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

Abstract. Among the events involved in the relocation of crustal earthquakes in the Central Baikal region (for the 2001-2003yy.) were industrial explosions at the Cheremshansky quartzite mine near the Turuntaevo village. Despite the shallow nature of the sources of these events, the depth of the relocated hypocenters was about 7-10 km, which is due to the averaging of the location solution when determining the T_0 through the median Vp/Vs line on the generalized Wadati diagram. The hypocentric deviations were estimated, which can reach 15 km if the difference between the initial and average T_0 values is more than 1 second. At the same time, the solutions obtained using the initial T_0 values are often determined through abnormally elevated values of the velocity of seismic waves and cannot be considered adequate, therefore, the localization of crustal earthquakes is carried out using averaged T_0 values.

Keywords: Central Baykal crustal earthquakes, Wadati diagram, hypocentria

Введение

Представление о сейсмичности того или иного региона базируется, в том числе, на результатах локализации гипоцентров землетрясений, формирующих в изучаемом пространстве сейсмогенерирующие структуры (трещины, разломы). Решающим фактором, при этом, является точность определения положения ги-

поцентров. Качество гипоцентрии прошлых лет ограничено различными методическими условиями обработки данных. Так, например, землетрясения в Центральном Байкале, включенные в базу сейсмологических данных (БД) [1], лоцированы по временам вступления только Р-волн в однородной скоростной модели (Vp = 6.15 км/с). Соответственно, актуальной становится задача релокации давних землетрясений с применением усовершенствованных методов обработки данных.

Релокация архивных землетрясений 2001-2003 гг. проводится в соответствии с методическим подходом, описанным в [2] – по всем событиям строится суммарный график Вадати (с определением промежуточных значений To на этапе предварительной локализации), на котором определяется срединная линия Vp/Vs [3, 4]. С использованием фиксированного угла наклона линии Vp/Vs по каждому из событий рассчитываются усредненные значения To и выполняется локация гипоцентров событий в программе Hypoellipse [5].

Отбор событий для обработки выполнен с использованием Базы сейсмологических данных в соответствии со следующими критериями: каждое событие должно быть зарегистрировано не менее, чем 5 сейсмическими станциями, с максимально возможным азимутальным покрытием и эпицентральными расстояниями не более 110 км [6]. Распределение эпицентров отобранных в обработку события показано на рис. 1.

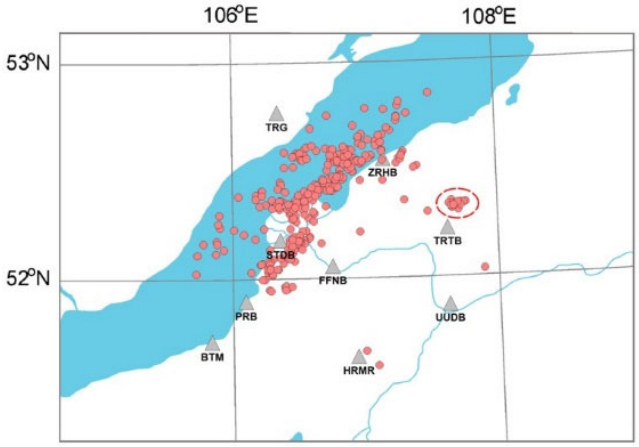


Рис. 1. Распределение эпицентров сейсмических событий (красные кружки) за 2001-2003 гг. в районе Центрального Байкала в соответствии с БД [5] (серые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием)

В работе задействованы данные, полученные на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

По ходу обработки обратила на себя внимание группа событий, выделяющихся по определенным признакам:

- концентрация в одном месте севернее станции TRTB (на рис. 1 отмечено красным пунктиром);

- относительно небольшая глубина гипоцентров (по БД – в основном, в районе 13 км, после релокации – от 7 до 10 км);

По данным из открытых источников, в этом месте расположен Черемшанский кварцитовый рудник, разработка которого ведется открытым способом с использованием промышленных взрывов. Анализ сейсмограмм указанных выше событий (пример на рис. 2) подтвердил предположение об их взрывной природе на основании следующих факторов:

- хорошо выраженная звуковая волна на ближней станции TRTB;

- слабо проявленная S-волна на более дальних станциях и в целом ухудшение качества сигнала с удалением от эпицентра события.

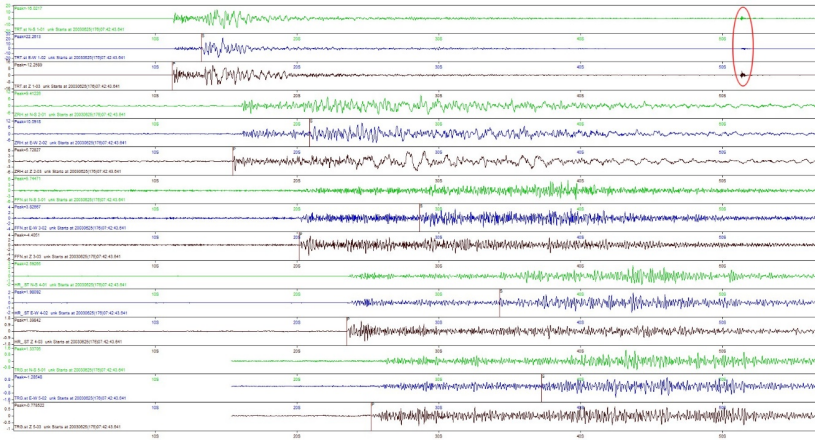


Рис. 2. Сейсмическая запись одного из взрывов на Черемшанском руднике (красным овалом отмечена звуковая волна, зарегистрированная на ближней станции TRTB)

Современная конфигурация рудника имеет нелинейную структуру с горизонтальными размерами порядка 2 км и оценочной глубиной не более 100 м.

Полученная в результате релокации оценка глубины гипоцентров по данным событиям (7-10 км) хоть и снизилась относительно исходных значений (порядка 13 км), тем не менее также является ошибочной.

Релокация карьерных взрывов

Поскольку для взрывных событий известны некоторые из локационных параметров - глубина очага и приблизительные координаты эпицентра (информацию о точных размерах карьера в 2003 году найти не удалось), была выполнена попытка использовать их для калибровки методики локализации. С использованием реальных времен вступлений для фиксированных координат эпицентра и нулевой глубины были определены такие расчетные параметры, как время T_0, средние скорости P-волны (пересчитанные для стартовой модели в скорость на кровле с учетом глубины проникания сейсмического луча) и постанционные зна-

чения Vp/Vs, которые для заданных условий оказались повышенными (с максимальными значениями для ближней станции TRTB).

Проведена релокация карьерных событий в программе Hypoellipse. Результирующие ошибки составили:

- по глубине – средняя 0.97 км (минимальная – 0 км, максимальная – 2.3 км);
- по эпицентрии (относительно центральной точки современного карьера) – средняя 3.73 км (минимальная – 0.37 км, максимальная – 5.48 км).

Столь существенные ошибки локации, особенно по эпицентрии, объясняются, во-первых, отсутствием информации о точных координатах карьерных событий, во-вторых, их неблагоприятными параметрами: расположением за пределами наблюдательной апертуры и невысоким качеством сигнала S-волны из-за импульсного поверхностного источника (см. рис. 2).

Оценка локационных отклонений от усредненных решений

Вернемся к результату стандартной локализации карьерных событий, где ошибки по глубине (до 10 км) обусловлены отклонением исходного значения To от расчетного, полученного через срединную линию Vp/Vs на суммарном графике Вадати – усреднение повышает надежность гипоцентрии, зачастую, в ущерб точности. Для численной оценки ошибок гипоцентрии по каждому из событий рассчитана разница между исходным и усредненным значениями To, которая в среднем для всех событий составила -0.05 сек в диапазоне от -1.35 до 1.05 сек со среднеквадратичным отклонением 0.47 сек. Проведена локализация в программе Hypoellipse и определены отклонения по глубине и эпицентрии между исходными и усредненными результатами. К настоящему времени полноценно обработано порядка 50 коровых землетрясений 2003 г., графики зависимости отклонений по эпицентрии и глубине от разницы между исходными и усредненными значениями T_0 приведены на рис. 3.

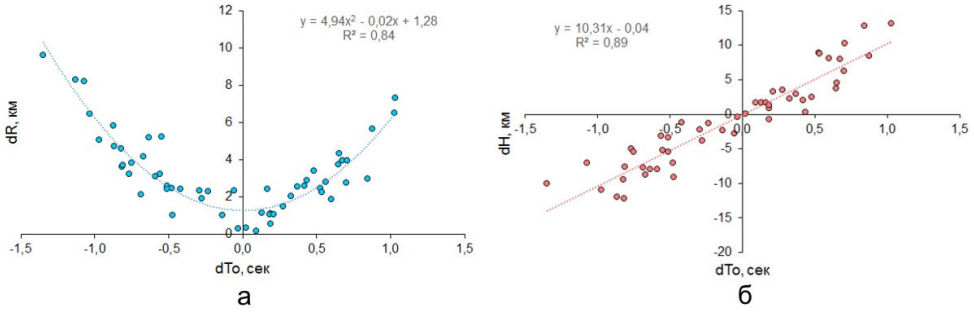


Рис. 3. Графики зависимости отклонений по эпицентрии (dR, а) и глубине (dH, б) от разницы между исходными и усредненными значениями T_0 (dT_0)

Закономерность распределения зависимости по эпицентрии описывается полиномом второй степени (R^2=0.84), по глубине – линейным уравнением (R^2=0.89). Отклонения гипоцентрии могут достигать 15 км при разнице между исходными и усредненными значениями T_0 более 1 сек (рис. 3). При этом решения,

полученные через исходные значения T_0, зачастую характеризуются аномально повышенными значениями скорости сейсмических волн (более 7 км/с для скорости Р-волн на кровле земной коры) и не могут рассматриваться в качестве адекватных. В связи с этим принято решение продолжить локализацию с использованием усредненных значений T_0, рассчитанных через суммарный график Вадати.

Предварительные результаты релокации землетрясений 2003 гг.

К настоящему моменту полноценно релоцированы порядка 200 коровых землетрясений 2003 года, результаты представлены на рис. 4.

Отмечается общее снижение глубины релоцированных гипоцентров в среднем на 6.5 км, отклонение по эпицентрии составило в среднем 2.9 км. Желтым ромбом на рис. 4 отмечено положение центральной точки Черемшанского кварцитового рудника в его современной конфигурации. Хорошо заметно резкое уменьшение переопределенной глубины гипоцентров промышленных взрывов относительно результатов БД с глубиной, в основном, в интервале от 13 до 16 км (отмечено на рис. 4 красным пунктирным овалом).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

Особая благодарность за предоставление исходных сейсмических записей сотрудникам Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

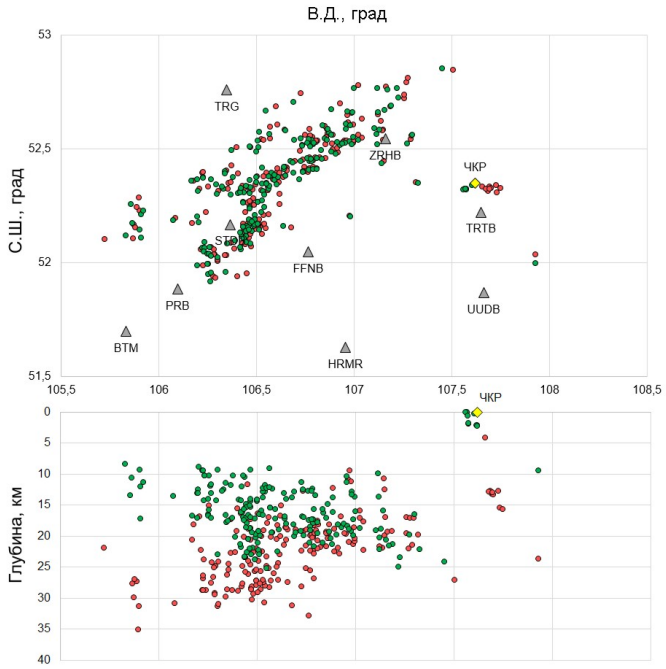


Рис. 4. Результаты релокации коровых землетрясений 2003 года: красные кружки – исходные данные по БД; зеленые – релоцированные; серые треугольники - сейсмические станции с кодовым названием; желтый ромб – Черемшанский кварцитовый рудник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санжиева Д.П.-Д., Предеин П.А., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д База сейсмологических данных Среднебайкальского района Байкальской рифтовой зоны за 2001-2013 гг. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621509; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН. Дата регистрации 27.08.2019 г. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 9.

2. Беляшов А.В. Уточненная гипоцентрия коровых землетрясений в районе Центрального Байкала // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2024. – Т. 51. – № 4. – С. 62-72.

3. Бурмин В.Ю. Некоторые обратные кинематические задачи сейсмологии: теория, эксперименты, результаты. – М.: Наука, 2019. – 276 с.

4. Бурмин В.Ю. Мажорантные оценки погрешностей в определении τ0 и VP/VS по графику Вадати // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы, Минск, 12–16 сентября 2022 г. / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 23.

5. Lahr C. HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern. – U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2012. – 119 p.

6. Bondár I., Myers S.C., Engdahl E.R., Bergman E.A. Epicentre accuracy based on seismic network criteria // Geophysical Journal International. – 2004. – Vol. 156. – № 3. – P. 483-496.

© А. В. Беляшов, И. П. Шерстюк, 2025

УДК 550.34.06.013.3, 550.34.06.013.24
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-144-151

А. В. Беляшов[1]✉, П. А. Дергач,[1,2], Г. С. Чернышов[1], Г. Ю. Зобнин[1,2]

Методическое согласование томографического и лучевого способов построения скоростного малоглубинного разреза

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

Аннотация. В рамках построения малоглубинного скоростного разреза по данным первых вступлений S-волны вдоль профиля на геофизическом полигоне «Ключи» проведена оценка возможностей трех сейсмических методов: томографии, слоистой инверсии и лучевого моделирования. Комплексный анализ полученных структурно-скоростных моделей показал их совпадение на качественном уровне при некоторых количественных различиях, обусловленных методическими возможностями задействованных способов. Природа указанных различий будет изучена в дальнейших исследованиях, в том числе, и на других геологических объектах.

Ключевые слова: скоростной разрез, сейсмотомография, слоистая инверсия, лучевое трассирование

A. V. Belyashov [1]✉, P. A. Dergach[1,2], G. S. Chernyshov[1], G. Yu. Zobnin[1,2]

Methodological coordination of tomographic and ray tracing methods of constructing a velocity shallow section

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

Abstract. As part of the construction of a shallow velocity section based on the data of the first S-wave arrivals along the profile at the “Klyuchi” geophysical polygon, an assessment of the capabilities of three seismic methods was carried out: tomography, layered inversion, and ray tracing modeling. A comprehensive analysis of the obtained structural and velocity models showed their agreement on a qualitative level, with some quantitative differences due to the methodological capabilities of the methods involved. The nature of these differences will be explored in further studies, including at other geological sites.

Keywords: velocity section, seismic tomography, layered inversion, ray tracing

Введение

Существуют различные сейсмические способы построения скоростного разреза по данным первых вступлений, каждый из которых отличается определенными методическими достоинствами и недостатками. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами, позволяет не только оценить их реальные возможности, но и взаимно технически улучшить.

В данной работе описываются результаты скоростного моделирования с использованием трех методов: сейсмотомографии, слоистой инверсии и лучевого трассирования [1]. Скоростной разрез по первым вступлениям S-волн строился по данным с линейного профиля длиной 355 м (шаг ПП – 5м, шаг ПВ – 40м), отработанного на территории геофизического стационара ИНГГ СО РАН «Ключи». В качестве источника упругих колебаний использован портативный вибрационный источник [2].

Геологический разрез участка представлен тремя основными комплексами [3]: складчатым фундаментом палеозойского возраста, перекрывающими его осадочными образованиями верхнепалеогенового, неоген-четвертичного возраста и современными осадочными породами. Фундамент представлен глинистыми сланцами. Выше местами выделяются нерасчлененные неоген-четвертичные отложения, имеющие глинисто-алевролитовый состав. Комплекс современных осадочных отложений сложен субаэральными лессовидными суглинками, супесями, глинами, перекрывающихся или фациально замещающихся аллювиальными, озерно–аллювиальными, делювиальными и эоловыми отложениями. Геологический разрез представлен в табл. 1 [3], данные о глубине залегания геологических границ будут служить ориентиром при анализе результатов сейсмических построений.

Таблица 1

Геологический разрез по скважине на полигоне «Ключи»

№ пп	Описание пород	Глубина подошвы слоя, м.
1	Супесь	2.4
2	Суглинок	7.0
3	Глина	15.0
4	Глина с переслаиванием супеси	35.0
5	Глина с переслаиванием песков с галечником	46.0
6	Сланцы глинистые трещиноватые	77.0
7	Сланцы глинистые окварцованные	-

Предварительная обработка данных (корреляция виброграмм, определение времен прихода целевых волн) производились с использованием авторского программного обеспечения на языке Python и программного пакета SeisPro (ООО «Деко-геофизика СК»). Параметры вибрационного воздействия: линейный свип-сигнал в частотном диапазоне от 5 до 80 Гц длительностью 60 с.

Сейсмическая томография

На рис. 1 представлен скоростной разрез, полученный сейсмотомографическим способом [4]. Для расчетов задана линейно-градиентная стартовая скоростная модель, результирующая гладкая модель описывает пространственное распределение скорости по разрезу при отсутствии выраженных сейсмических границ. Время расчета модели составило 139 сек.

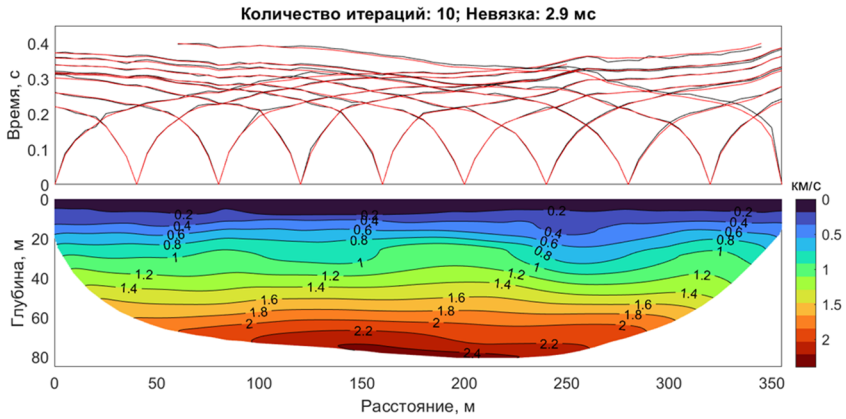


Рис. 1. Гладкая скоростная модель, полученная методом сейсмической томографии: сверху – годографы (черные – наблюденные, красные - модельные); снизу на модели черные линии – изолинии скорости с шагом 0.2 км/с.

Метод слоистой инверсии

Алгоритм слоистой инверсии был разработан и программно реализован в ИНГГ СО РАН и фактически является развитием метода построения пластовой модели по временам пробега головных волн, опубликованного в работе [5]. С его помощью можно выполнять построение слоистых разрезов методом томогафической инверсии времен первых вступлений данных 2D и 3D сейсморазведки. В частности, алгоритм может применяться для задач инженерной сейсморазведки и глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), а также для учета неоднородностей в верхней части разреза (ВЧР) при обработке данных методом общей глубинной точки (МОВ ОГТ) путем расчета статических поправок или включения скоростной модели ВЧР в общую глубинно-скоростную модель (ГСМ) при миграции. Пластовая модель параметризуется значениями скоростей в слоях и глубинами границ с дискретизацией по латерали [dx, dy], задаваемой пользователем. Скорость в слоях изменяется только в горизонтальном направлении, без учета вертикальных вариаций.

В общем случае разработанный алгоритм построения слоистых моделей состоит из трех модулей:

1. **Автоматизированное построение начальной модели.** Обработчик задает количество слоёв, координаты опорных точек, а также радиус, в котором производится осреднение годографов первых вступлений и последующая аппроксимация полученного кросс-плота кусочно-линейной функцией. В результате для каждой опорной точки строится одномерная скоростная модель с использованием способа слоистых скоростей [6], а итоговая скоростная модель (2D или 3D) является результатом их интерполяции.

2. **Лучевое трассирование.** Отличительной особенностью данной реализации является упрощенная параметризация лучей головных волн в предположении локально плоских границ. Сегменты луча падающей волны в рамках одного слоя являются отрезками, соединяющими точки преломления на границах. Скорость падающей волны соответствует скорости в ячейке модели под источни-

ком/приемником. Сегмент луча, скользящего вдоль границы – отрезок соединяющий точки головления в соответствующем слое под источником и приемником. При этом учитывается изменчивость геометрии границы между ними. Скорость головной волны описывается значением в ячейке по середине между точками головления нижнего слоя.

3. **Инверсия по глубинам и скоростям.** Зависимость невязок между наблюденными и рассчитанными для начальной скоростной модели временами прихода является нелинейной функцией. Линеаризация выполняется путем разложения функционала в ряд Тейлора, в предположении небольших невязок параметров восстановленной модели относительно начальной. Инверсия выполняется итеративно, за одну итерацию последовательно и независимо выполняется инверсия с подбором невязок глубин и скоростей. Поиск невязок глубин слоев выполняется путем решения системы линейных уравнений – томографическая матрица производных времен прохода лучей головных волн по глубинам слева и вектором невязок времен справа. Используется регуляризация добавлением в функционал второй нормы первой производной параметров модели с весовым коэффициентом [7]. Упрощенная параметризация луча головной волны позволяет свести поиск невязок скорости в слоях к расчету коэффициентов линейной регрессии в каждой ячейке слоя независимо.

На рис. 2 представлен структурно-скоростной разрез, полученный методом слоистой инверсии. Время расчета модели составило 13 сек.

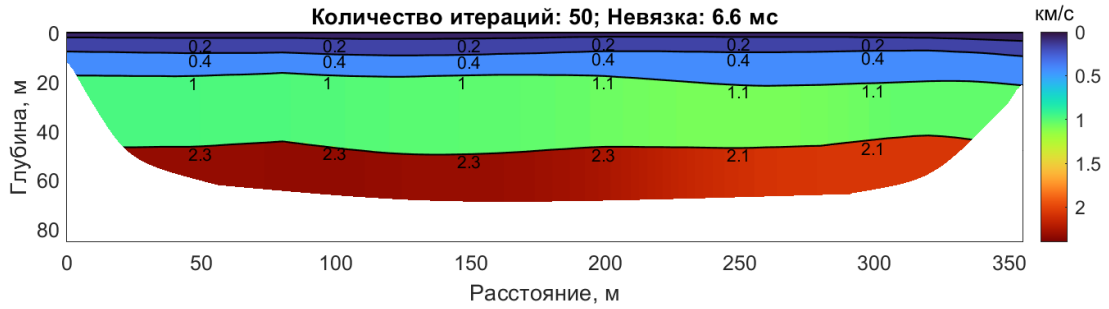


Рис. 2. Слоистая скоростная модель, полученная при помощи авторского алгоритма, разработанного в ИНГГ СО РАН (черные линии на модели – сейсмические границы со скачком скорости, значения скорости в слоях даны в км/с).

Метод лучевого трассирования

Первый этап обработки лучевым методом заключался в анализе волнового поля на системе годографов (рис. 3) для предварительной оценки структурно-скоростного разреза и формирования стартовой скоростной модели.

Выделено 5 интервалов скорости:

- самый верхний слой (светло-зеленый цвет) со скоростью ~60 м/с;
- второй слой (зеленый цвет) со скоростью ~150 м/с;
- третий слой (голубой цвет) со скоростью ~300 м/с;

- четвертый слой (синий цвет) со скоростью ~1000 м/с;
- подстилающее полупространство (коричневый цвет) со скоростью ~2000 м/с;

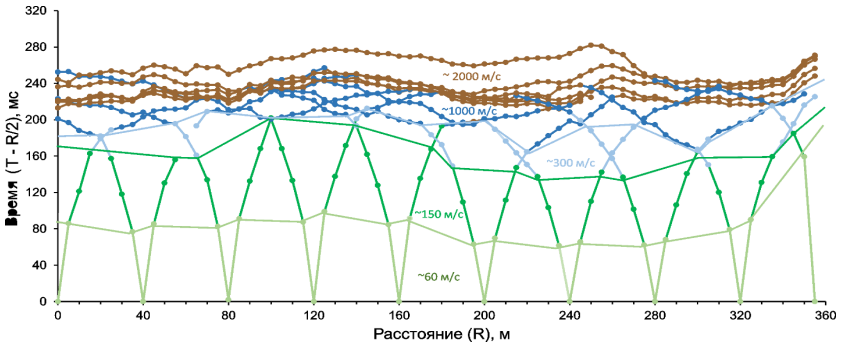


Рис. 3 Система наблюденных годографов S-волн в редуцированном масштабе времени (Vred = 2000 м/с). Цветом выделены интервалы с одинаковой скоростью (на графике приведены соответствующие значения скорости в м/с).

В рамках **второго этапа** обработки происходит формирование стартовой скоростной модели в программе SeisWide (Dr. Deping Chian). На базе информации о скорости и количестве слоев, полученной на первом этапе, формируется стартовая скоростная модель, при этом исходная толщина слоев неизвестна и приблизительно определяется путем подбора по одному из годографов.

Далее, для всех наблюденных годографов вручную осуществляется подбор скоростной модели послойно сверху-вниз путем манипуляций с рельефом границ и скорости внутри слоев, с последовательным решением прямой и обратной задач. Решение прямой задачи состоит в формировании сейсмических лучей (в случае первых вступлений – преломленно-рефрагированных волн), распространяющихся в пределах модели в соответствии с базовыми законами геометрической сейсмики. Полученные по временам пробега модельные годографы сравниваются с наблюденными. Решение обратной задачи заключается в корректировке скоростной модели. Скорость и ее градиент в слое подбирается в соответствии с углом наклона и формой наблюденных годографов (для соответствующих скоростных участков), глубина границы определяется положением модельного годографа по вертикальной оси. Критерием качества подобранной модели служит величина невязок между наблюденными и модельными годографами.

Для чистоты эксперимента подбор скоростной модели осуществлялся независимо от результатов других методов и скважинных данных. Первый вариант был построен с результирующей среднеквадратичной невязкой (RMS) между наблюденными и модельными годографами 3.65 мс. Общее время подбора модели составило порядка 3-4 дней.

Предварительное сравнение полученной модели с результатами томографии, слоистой инверсии и данными из табл. 1 показало количественное совпадение по скорости и структуре в верхней части модели, но существенные различия в нижней – высокая скорость в подстилающем полупространстве (2.7 км/с отно-

сительно 2.3 км/с) и более глубокое залегание нижней границы (55-60 м относительно 45-50 м).

Проведена корректировка скоростной модели – снижен градиент скорости в 4 слое и уменьшена скорость на кровле подстилающего полупространства до 2.3 км/с, в результате чего удалось поднять нижнюю границу до глубинного уровня 45 м (рис. 4). При этом, величина RMS временной невязки (3.59 мс) сопоставима с первоначальным вариантом, что свидетельствует о неединственности решения – основываясь только на критерии временных невязок для одного набора исходных данных можно подобрать разные варианты скоростных моделей, соответственно, желательно обладать априорной информацией об основных особенностях структурно-скоростного строения изучаемого геологического разреза.

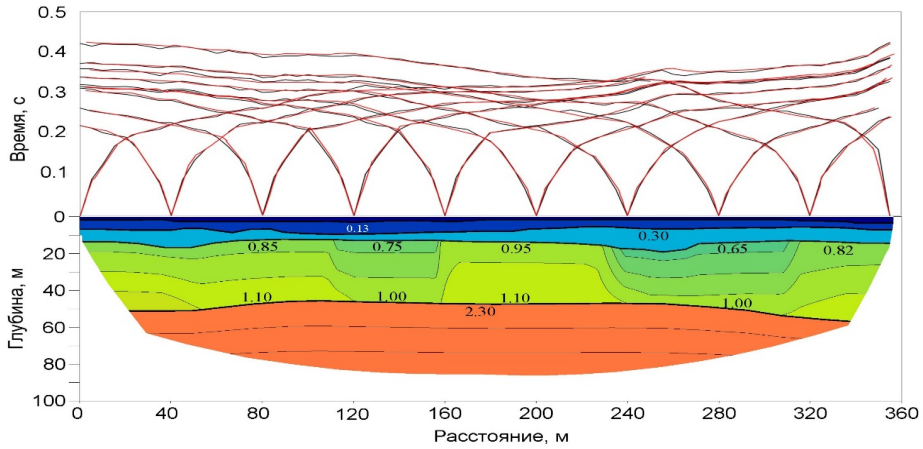


Рис. 4. Финальный вариант скоростной модели, построенной методом лучевого трассирования: сверху – годографы (черные – наблюденные, красные - модельные); снизу на модели толстые черные линии – сейсмические границы со скачком скорости, тонкие – изолинии скорости с шагом 0.1 км/с, значения скорости в слоях даны в км/с.

Сравнительный анализ результатов

Комплексный сравнительный анализ результатов построения структурно-скоростных моделей разными сейсмическими способами и скважинных данных показал их совпадение на качественном уровне при некоторых количественных различиях, обусловленных методическими возможностями задействованных способов.

Сопоставление по скоростным параметрам. Характер распределения скорости S-волн в пределах верхней части разреза (до глубины порядка 40 м) с областями понижения скорости в интервалах профиля 120-150 и 240-300 метров хорошо совпадает для томографической и лучевой моделей (см. рис. 1 и 4). Но на б**о**льших глубинах численные значения скорости начинают различаться – в томографической модели происходит плавное увеличение скорости от 1.6 км/с на глубине ~50 м до 2.3 км/с на глубине ~70 м, в то время как на лучевой модели

скорость резко увеличивается до 2.3 км/с на кровле подстилающего полупространства на глубине порядка 45 м.

Модель слоистой инверсии (см. рис. 2) характеризуется увеличенными до 1.1 км/с (относительно 0.7-0.8 км/с для других моделей) значениями скорости на глубине порядка 20 м. При этом, скорость на кровле подстилающего полупространства (2.3 км/с) полностью совпадает с данными по лучевой модели.

По критерию RMS временной невязки лучший показатель у томографии – 2.9 мс (10 итераций), для лучевого трассирования – 3.6 мс, для слоистой инверсии – 6.6 мс (50 итераций).

Сопоставление по структуре. Положение границ сравнивалось для слоистой и лучевой моделей (рис. 5) с ориентировкой на скважинные данные.

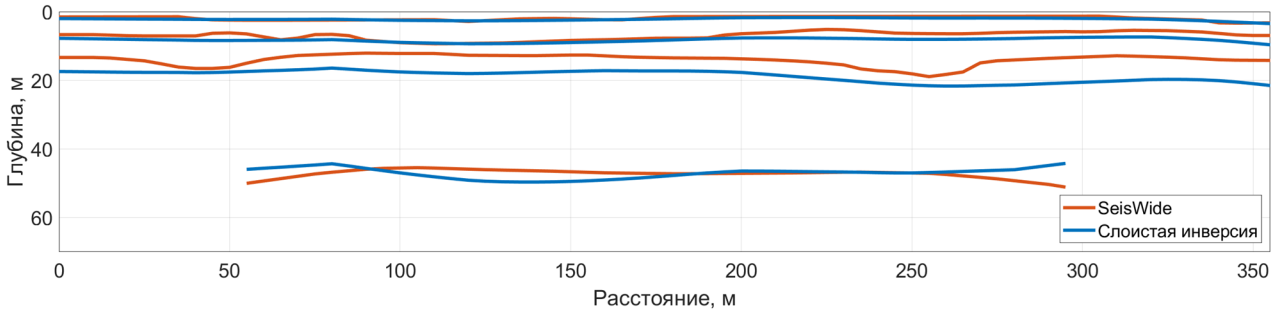


Рис. 5. Сравнение положения сейсмических границ, выделенных слоистой инверсией (синие линии) и лучевым трассированием (красные линии).

Прежде всего, в результатах обоих сейсмических методов отсутствует граница на глубине 35 м, выделяемая по скважинным данным (табл. 1). Предположительно, эта геологическая граница разделяет горные породы, слабо различающиеся по скоростным свойствам.

Далее необходимо отметить, что сейсмические границы, определенные методом лучевого трассирования, хорошо совпадают по глубине с геологическими границами (табл. 1). Для слоистой инверсии 3-я граница оказалась несколько глубже – на уровне 19-20 м относительно 15 м для скважинных данных. Остальные границы по методам слоистой инверсии и лучевого трассирования совпадают.

Изучение природы выявленных структурно-скоростных различий, а также исследования по оценке возможностей сейсмических методов в целом будут продолжены на других участках с разными геологическими условиями.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zelt, C. A. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure / C. A. Zelt, R. B. Smith // Geophys. J. Int. – 1992. – V. 108. - P. 183-204.

2. Дергач П.А., Яблоков А.В., Полозов С.С., Зобнин Г.Ю., Дучков А.А. Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 69 (2), 237–250.

3. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Шапаренко И.О. Применение метода электротомографии для выявления электрической анизотропии разреза на полигоне Ключи // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: Материалы XVI международной конференции (20-24 апреля 2020, Новосибирск) / Сетевое электронное издание. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск. 2020. – с. 718-725.

4. Никитин и др. ST3D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2020.

5. Hampson, D. and Russell, B., 1984, First-break interpretation using generalized linear inversion, J. Can. Soc. Expl. Geophys., 20,40-50.

6. Бондарев В.И. Сейсморазведка. – Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 2007, 703 с.

7. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. // Society for industrial and applied mathematics. – 2005. – P. 342.

© А. В. Беляшов, П. А. Дергач, Г. С. Чернышов, Г. Ю. Зобнин, 2025

УДК 550.34.06.013.3, 550.34.06.013.24
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-152-157

А. В. Беляшов[1]✉, А. В. Яблоков[1], П. А. Предеин[2]

Предварительная оценка структурно-скоростного строения Центрального Байкала методом Накамуры

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На вертикальных компонентах сейсмограмм некоторых станций Центрального Байкала проявляется волна неизвестной природы, опережающая S-волну на фиксированное для каждой станции время. Указанные станции расположены в пределах кайнозойского осадочного чехла, и неизвестная волна, предположительно, имеет обменную природу, когда на границе кровли фундамента и подошвы осадочного слоя S-волна меняет свой тип на SP. В соответствии с оценочной средней скоростью в осадочном слое в 3.6 км/с для P- и 1.9 км/с для S-волны по разнице времени пробега Ts-Tsp его толщина определена приблизительно 8 км для района дельты реки Селенги и в 2-3 км для окраинных областей. С использованием метода Накамуры проведена оценка глубинной структуры района исследований.

Ключевые слова: Центральный Байкал, метод Накамуры, структурно-скоростное строение

A. V. Belyashov[1]✉, A. V. Yablokov[1], P. A. Predein[2]

Preliminary assessment of the structural and velocity framework of Central Baikal by the Nakamura method

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

Abstract. A wave of unknown nature appears on the vertical components of the seismograms of some stations of Central Baikal, which is ahead of the S-wave by a fixed time value for each station. These stations are located within the Cenozoic sedimentary cover, and the unknown wave is presumably of an converted nature – at the boundary of the roof of the foundation and the bottom of the sedimentary layer, the S-wave changes its type to SP. In accordance with the estimated average velocity in the sedimentary layer of 3.6 km/s for the P-wave and 1.9 for the S-wave, its thickness is estimated at 8 km for the delta region of the Selenga River and 2-3 km for marginal areas based on the Ts-Tsp travel time difference. Using the Nakamura method, an assessment of the depth structure of the research area was carried out.

Keywords: Central Baikal, Nakamura method, structural and velocity framework

Введение

Информация о геологическом строении в районе размещения стационарных сейсмических станций важна для оценки станционных поправок с целью правильного определения значений энергетического класса и других динамических параметров землетрясений [1]. В случае размещения станции на мощных нестабильных грунтах (как правило, осадочных), генерирующих резонансные эффекты, необходимо иметь оценку толщины этих отложений. Для станций сей-

смической сети в районе Центрального Байкала геологический разрез описан, в основном, до глубин первых метров [2].

В ходе обработки землетрясений, зарегистрированных в блоке земной коры Центрального Байкала, на сейсмограммах станций «Степной Дворец» (STDB), «Фофоново» (FFNB) и «Заречье» (ZRHB) была обнаружена устойчивая волна неизвестной природы (пример для одного из землетрясений показан на рис.1). Проявляется она на вертикальных компонентах и по времени привязана к S-волне: для всех событий, независимо от эпицентральных расстояний, на станции STDB она опережает S-волну примерно на 2 сек, на FFNB – на 0.7 сек, на ZRHB – на 0.5 сек. Время опережения может немного варьироваться в зависимости от параметров землетрясения: глубины очага и обратного азимута, влияющих на положение точки входа сейсмического луча в осадочную толщу.

Предположительно, эта волна имеет обменную природу – оригинальная S-волна, двигаясь от очага землетрясения вверх к дневной поверхности, на одной из границ, разделяющих среды с резко различными акустическими жесткостями, меняет свой тип на продольный и распространяется в вышележащем слое в виде обменной SP-волны. Подтвердить это предположение можно на примере станции STDB, размещенной в дельте реки Селенги на толще аллювиальных отложений. Селенгинская депрессия характеризуется сложным блоковым строением с мощностью осадков, резко изменяющихся в глубинном диапазоне от 2 до 9 км [3, 4]. Средняя скорость P-волн в этом слое для интервала глубин от 0 до 10 км оценивается в 3.6 км/с [5], скорость S-волн (с учетом повышенного здесь параметра Vp/Vs=1.9 [6]) рассчитана в значении 1.9 км/с. Для указанных значений скорости разница во времени пробега между P- (SP-) и S-волной в 2 сек соответствует толщине слоя порядка 8.0 км. Обменообразующей границей, предположительно, служит раздел между породами фундамента и осадочным чехлом.

По геологическим данным [7] на северо-восточном краю этой кайнозойской осадочной толщи на границе с высокометаморфизованными венд-раннепалеозойскими образованиями расположена станция ZRHB (рис. 2). Станция FFNB размещена на юго-восточной окраине осадочного слоя на границе с позднепалеозойскими гранитоидами (в непосредственной близи к пойме р. Селенги).

Если предположить, что описанные выше скоростные параметры прослеживаются в пределах всего осадочного слоя, то с учетом разницы между S- и SP-волной ~0.5 сек под станцией ZRHB его толщина оценивается ~2.0 км, а для станции FFNB с разницей Tsp-Ts ~0.7 сек - ~2.9 км.

Ранее в районе оз. Байкал проводились детальные сейсмические исследования, в том числе и по оценке толщины осадочного слоя [8, 9], но выполнялись они, как правило, по дну оз. Байкал в пределах его акватории.

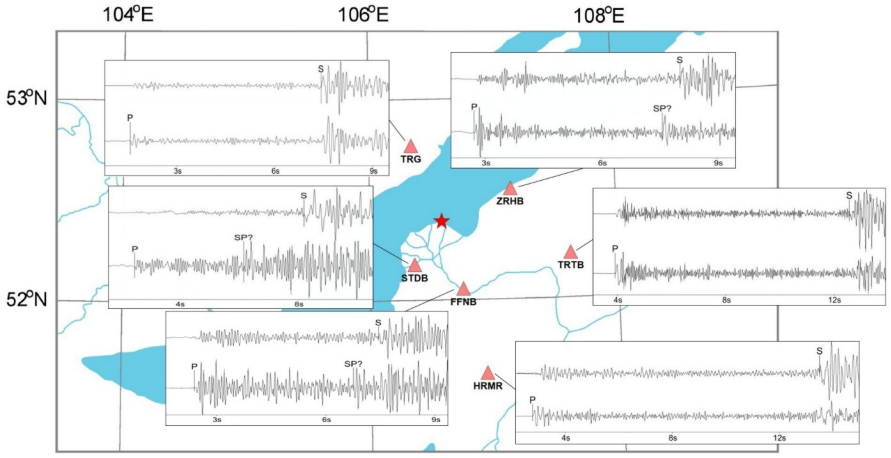


Рис. 1. Пример выделения волны SP на вертикальных компонентах некоторых станций Центрального Байкала (станции обозначены розовыми треугольниками с кодовым названием, красная звезда – эпицентр землетрясения 2003 г. с глубиной около 16 км)

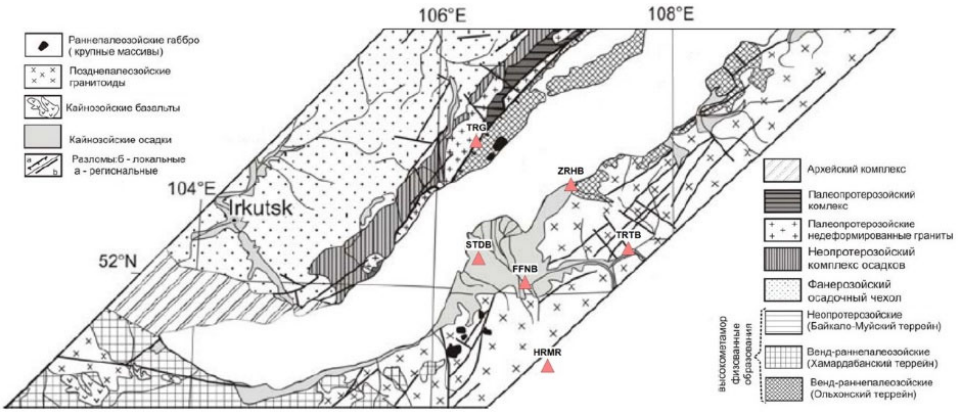


Рис. 2. Фрагмент схемы геологического строения Байкала [5] (розовые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием)

Таким образом, цель данной работы – попытаться определить глубинную структуру верхней части геологического разреза в районе сейсмических станций с использованием метода Накамуры [10].

Материалы

Метод Накамуры (метод H/V) основан на анализе спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмического шума [10]. Из Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН по нашему запросу были получены непрерывные сейсмические записи длиной 1 месяц (за февраль 2020 г.) для станций: FFNB, HRMR, STDB, ZRHB (станция TRG не входит в наблюдательную сеть Бурятского филиала, а станция TRTB была закрыта в 2014 г).

Для полноценного выделения всех частот, особенно в длиннопериодном диапазоне, регистрация данных должна осуществляться, по возможности, на широкополосных сейсмических датчиках, тем не менее, на некоторых станциях за-

действованы короткопериодные датчики. Для усиления сигнала на низких частотах к трехкомпонентным записям применялась процедура низкочастотной деконволюции до 0.01 Гц [11].

Обработка методом Накамуры

Обработка сейсмических данных осуществлялась в рамках следующих этапов:

Отбраковка высокоамплитудных сегментов записи предполагает удаление отрезков 3С-записи, подверженных сильным помехам (техногенные шумы большой длительности). Для этого вычисляется среднеквадратическое отклонение амплитуды (σ) внутри скользящего окна длительностью 60 секунд вдоль каждой компоненты записи. Затем определяется медианное значение σ для вертикальной компоненты (Z). Оно используется в качестве порогового значения для всех компонент. Окна записи, где σ любой из компонент превышает медианное значение σ вертикальной компоненты, удаляются из дальнейшей обработки.

Удаление высокоамплитудных всплесков направлен на детекцию и удаление импульсных помех, не связанных с микросейсмами. Для их поиска применяется алгоритм STA/LTA с коротким окном 0.1 с и длинным 30 с, пороговое значение равно 2. Отбраковывается все окно длительностью 60 с, центрированное в точке максимума всплеска.

Расчет суммарных амплитудных спектров: 3С-запись делится на временные окна (60 с). Для каждого окна и каждой компоненты вычисляется амплитудный спектр Фурье. Каждый амплитудный спектр возводится в квадрат. Это усиливает сигнал регулярных частотных компонент по сравнению со случайным шумом. Квадраты амплитудных спектров суммируются для каждого временного окна. Это позволяет накапливать энергию сигнала, связанного с микросейсмами [12]. Суммарные спектры каждой компоненты сглаживаются с использованием алгоритма Конно-Омачи.

Расчет H/V кривой: вычисляется среднее квадратическое значение горизонтальных компонент (H): $H = \sqrt{(NS^2 + WE^2)/2}$, где *NS* и *WE* – сглаженные суммарные амплитудные спектры горизонтальных компонент. Вычисляется *H/V* спектральное отношение, где *V* – сглаженный суммарный амплитудный спектр вертикальной компоненты (Z). Полученная кривая представляет собой зависимость амплитудного отношения горизонтальной и вертикальной компонент от частоты.

Проверка критериев надежности: значение максимума H/V-кривой и его частота автоматически проверяются по критериям надежности, предложенным в проекте SESAME [13]. Это необходимо для отбраковки некондиционных H/V-кривых, полученных для записей с сильными техногенными помехами.

Интерпретация H/V кривых выполняется вручную для набора H/V кривых, полученных в различный период наблюдения для каждой станции. Частота, соответствующая максимальному значению отношения H/V, интерпретируется как основная мода резонансной частоты SH-волны (f_0) для данного участка (рис.

3). Предполагается, что такая интерпретация корректна при наличии ярко выраженного контраста сейсмических жесткостей между слоем и подстилающим полупространством. В случае однородного упруго слоя со скоростью поперечной волны V_S и мощностью h, залегающего на однородном полупространстве, выражение для определения резонансных частот SH-волны (f_n) записывается следующим образом:

$$f_n = (2n+1)\,V_s/4h\,, \quad n = 0, 1, 2, \ldots . \qquad (1)$$

где n – номер моды резонансной частоты. Резонансы более высокого порядка ($n > 0$), также могут наблюдаться как побочные максимумы на H/V кривой.

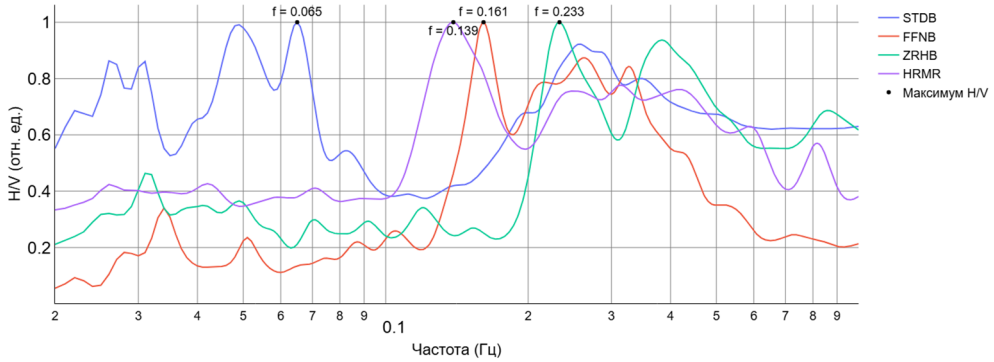


Рис. 3. Графики H/V кривых для станций в Центральном Байкале для первой частотной моды (*n=0*), соответствующей нижней границе осадочного слоя

С использованием выражения для резонансных частот (1) и значений f_0 рассчитана глубина нижней границы осадочного слоя для станций FFNB, STDB, ZRHB. Средняя скорость V_S в этом слое задана величиной 1.9 км/с в соответствии с вышеописанными оценками.

В результате расчетов получены следующие значения глубины нижней границы осадочной толщи в районе станций:

- STDB – 7.3 км;
- ZRHB – 2.0 км;
- FFNB – 2.9 км.

Данные о толщине осадочного слоя по методу Накамуры хорошо согласуются с результатами расчетов по временам пробега с учетом разницы Ts-Tsp для станций ZRHB и FFNB. Для станции STDB отмечается снижение глубины границы до 7.3 км (относительно 8.0 км по разнице Ts-Tsp).

Необходимо отметить, что полученная информация не обязательно отражает конкретную толщину залегающего под станциями осадочного слоя, а говорит в целом о его влиянии на времена пробега сейсмических волн и резонансные явления, фиксируемые на станциях.

В спектре станции HRMR также был выделен пик на частоте 0.14 Гц, тем не менее, глубина границ не рассчитывалась из-за отличающихся геологических и, соответственно, скоростных условий.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в данном направлении при улучшении следующих факторов:

- точности и надежности определения скорости P- и S-волн в осадочном чехле и вмещающих горных породах Центрального Байкала, а также набора статистики по времени прихода волны SP;

- возможности использования технически более совершенных типов аппаратуры с полноценным частотным диапазоном регистрации.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. Оценка станционных поправок для сейсмологической сети KNET на основе анализа отношения спектров *H*- и *V*-компонент сейсмического шума и локальных землетрясений / Геофизические исследования, 2018. – т. 19. - №1. – с. 30-48.

2. Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Тубанов Ц.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 44–50.

3. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Щекаева Е. А. Трехмерная модель Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны //Геофизические технологии. – 2023. – №. 3. – С. 64-76.

4. Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А. Современное напряженное состояние и геодинамика Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 1. С. 87–111.

5. Середкина А.И. Современное состояние исследований глубинного строения земной коры и мантии Байкальского рифта по сейсмологическим данным // Физика Земли, 2021. - № 2. - с. 46–70.

6. Беляшов А.В. Определение скоростной модели блока земной коры Центрального Байкала по данным Кударинского землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51, № 1. С. 5–17.

7. Бухаров А.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Станевич А.М., Скляров Е.В., Федоровский В.С. Эволюция Земли в летописи Байкала // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2008. № 1. С. 88–101.

8. Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholtz C.A., Klitgord K.D. Preliminary results from 1989 multichannel seismic reflection survey in lake Baikal // Russian Geology and Geophysics, 1993. – Vol. 34. - №10-11. – p. 19-27.

9. Brink U.S.t., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, Iss. B7. P. ETG 2-1–ETG 2-15.

10. Nakamura Y. What is the Nakamura method? // Seismological Research Letters. – 2019. – V. 90. – №. 4. – p. 1437-1443.

11. Dergach P.A., Tubanov Ts.A., Yushin V.I., Duchkov A.A. Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // Seismic Instruments. 2019. V. 55, Iss. 3. P. 345–352.

12. Яблоков А.В., Дергач П.А., Лисейкин А.В., Сердюков А.С. Алгоритм обработки микросейсм методом H/V для оценки параметров двуслойной скоростной модели на основе расчета эллиптичности поверхностной волны Рэлея // Вопросы инженерной сейсмологии – том 51 – № 1 – С. 95-108 – 2024.

13. Acerra C. et al. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation // European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME. – 2004.

© А. В. Беляшов, А. В. Яблоков, П. А. Предеин, 2025

УДК 551.4:551.24:550.837:550.372(571,1)
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-158-163

Я. О. Бондарчук[1]✉

Неотектоника и сейсмическая активность Горного Алтая на примере Чуйской и Курайской впадин по данным магнитотеллурических исследований

[1]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Аннотация. Горный Алтай относится к числу наиболее сейсмически и тектонически активных территорий. Для регионов с повышенным уровнем сейсмичности является актуальным изучение новейших структур и геодинамических процессов с помощью геофизических методов, которые позволяют получить знания о глубинного геологическом строении, новейших тектонических движениях и флюидном режиме территории. В результате интерпретации данных магнитотеллурических исследований на территории Чуйской и Курайской впадин Горного Алтая установлено мелкоблоковое строение земной коры. На полученных разрезах прослеженные до глубины 12 км зоны неотектонических нарушений маркируются областями с аномально низкими значениями удельного электрического сопротивления – менее 5 Ом·м. На глубинах 8-10 км зоны новейших разрывных нарушений достигают уровня корового проводящего слоя. Подъем кровли проводящего слоя характерен для территорий, имеющих высокий потенциал тектонической и сейсмической активности. Очаги землетрясений локализуются преимущественно над его верхней кромкой или в его верхних частях.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, Горный Алтай, неотектоника, сейсмичность, геоэлектрические неоднородности, Чуйско-Курайская система впадин

Y. O. Bondarchuk[1]✉

Neotectonics and seismic activity of the Altai Mountains on the example of the Chuya and Kurai depressions based on magnetotelluric studies

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Abstract. The Altai Mountains are among the most seismically and tectonically active territories. For regions with an increased level of seismicity it is relevant to study the latest structures and geodynamic processes by geophysical methods, which allow to obtain knowledge about the deep geological structure, the latest tectonic movements and fluid regime of the territory. As a result of interpretation of magnetotelluric studies in the Chuya and Kurai depressions of the Altai Mountains, the shallow block structure of the Earth's crust was established. On the obtained sections traced to a depth of 12 km zones of neotectonic disturbances are marked by areas with anomalously low values of electrical resistivity - less than 5 Ohm-m. At depths of 8-10 km, the zones of the latest discontinuities reach the level of the crustal conductive layer. Rise of the conductive layer roof is characteristic for the territories with high potential of tectonic and seismic activity. Earthquake sources are localised mainly above its upper edge or in its upper parts.

Keywords: magnetotelluric sounding, Gorny Altai, neotectonics, seismicity, geoelectric inhomogeneities, Chuisko-Kurai depression system

Введение

Высокий уровень сейсмической активности обусловлен взаимодействием крупных литосферных плит, на окраинах которых формируются складчатые пояса. Эти пояса представляют собой неоднородные участки земной коры, которые состоят из различных по природе и возрасту геоблоков и характеризуются высокой тектонической активностью. В настоящее время продолжается процесс коллизии Индостанской и Евроазиатской плит, что вызывает активизацию тектонических движений на территории Горного Алтая, являющегося частью Алтае-Саянского складчатого пояса.

Горный Алтай относится к числу наиболее сейсмически и тектонически активных территорий. Локализация очагов землетрясения зависит от характера неоднородностей земной коры. Причиной возникновения сейсмических толчков является образование новых или возобновление старых тектонических разрывов, поэтому изучение геологического строения, установление и прослеживание разрывных нарушений в земной коре является важным этапом в изучении землетрясений. Неотектонические нарушения в период своей активизации представляют собой флюидопроводники, которые играют важную роль в подготовке очага землетрясения. В сейсмоактивных районах очаги землетрясений располагаются преимущественно над коровым проводящим слоем, формирование которого, согласно современным представлениям, обусловлено присутствием в нем надкритических флюидов [1-7]. Поднятие кровли проводящего корового проводящего слоя до глубин 8-10 км и увеличение его проводимости отмечается под многими известными очаговыми зонами землетрясений, что согласуется с флюидометаморфогенной моделью сейсмогенеза И.Г. Киссина, в которой важную роль в подготовке очага землетрясения играет флюид [5, 6].

Целью исследования является изучение особенностей геоэлектрического строения земной коры в пределах крупных впадин Горного Алтая, и их связь с сейсмическими и неотектоническими процессами.

Методы и материалы

При изучении строения Чуйской и Курайской впадин Горного Алтая для реализации метода магнитотеллурического зондирования применялась аппаратура канадской компании «Phoenix Geophysics Ltd». При помощи измерительных модулей MTU-5 регистрировались четыре компонент магнитотеллурического поля (Ex, Ey, Hx, Hy) в диапазоне периодов 0,003 – 1000 с. Шаг по профилю в среднем составлял 4 – 5 км со сгущением до 1 км в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения. Использовалась крестообразная установка, ориентированная на север – ось X, на восток – ось Y, длина приемных электрических линий составляла 100 м. Пространственная и высотная привязка пунктов зондирований осуществлялась с помощью встроенной системы GPS. Запись на каждой точке наблюдения длилась в среднем 19 – 22 ч. Полевые данные были обработаны с помощью программного обеспечения SSMT-2000 компании «Phoenix Geophysics Ltd». Для дальнейшего редактирования кривых, 1D и 2D инверсий использовался про-

граммный комплекс «WinGLink». Методика качественной и количественной интерпретация подробно рассмотрена в [8-10].

Результаты

Исследуемый профиль располагается в эпицентральной зоне Чуйского землетрясение 2003 года между Южно-Чуйским и Курайским хребтами, обрамляющими Чуйскую впадину, и протягивается с юго-запада на северо-восток.

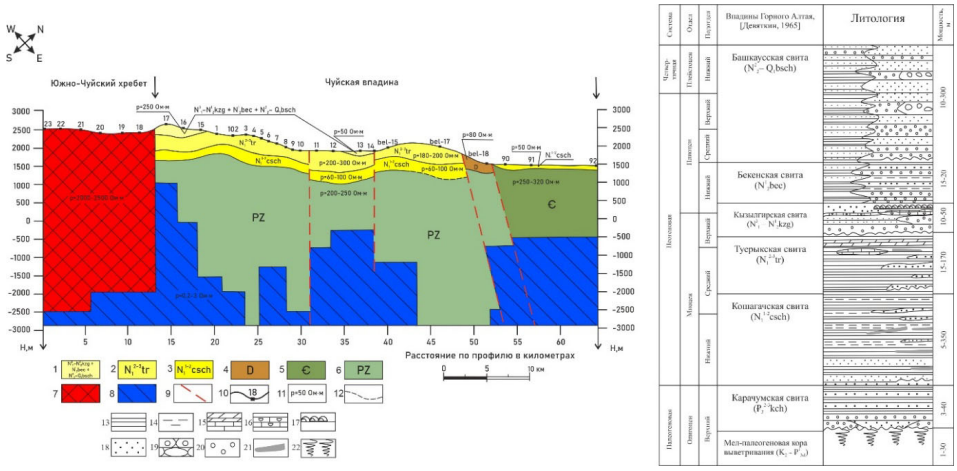


Рис. 1. Геоэлектрический разрез осадочного чехла Чуйской впадины и сводная литологическая колонка Девяткина, 1965 [11]. 1 - отложения башкаусской свиты средне-верхнего плиоцена и нижнего плейстоцена + отложения бекенской свиты нижнего плиоцена + отложения кызылгирской свиты верхнего миоцена и нижнего плиоцена; 2 - отложения туерыкской свиты среднего-верхнего миоцена; 3 - отложения кошагачской свиты нижнего-среднего миоцена; 4 - нерасчлененные отложения девона; 5 - нерасчлененные отложения кембрия; 6 - нерасчлененные отложения палеозоя; 7 - области аномально высоких значений удельного сопротивления; 8 - области аномально низких значений удельного сопротивления; 9 - разрывные нарушения, выявленные по данным МТЗ; 10 - пункты МТ-зондирований; 11 - значение удельного электрического сопротивления в Ом·м; 12 - предполагаемая граница; 13 - глины; 14 - алевролиты; 15 - мергели и известняки; 16 -ракушечники; 17 - строматолитовые известняки; 18 - пески; 19 - галечники и конгломераты; 20 - валунники; 21 - бурые угли; 22 - коры выветривания.

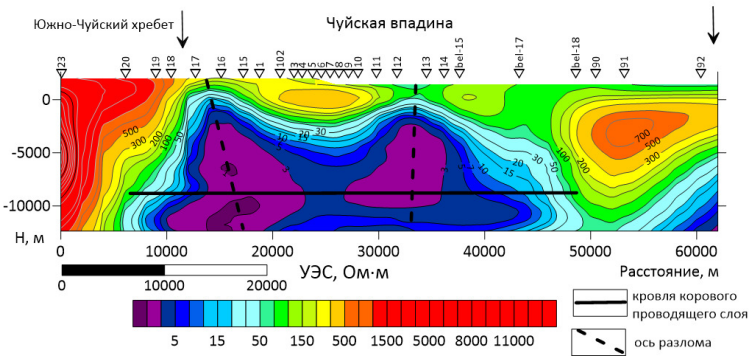


Рис. 2. Глубинный геоэлектрический разрез Чуйской впадины по результатам инверсии данных МТЗ

Второй профиль располагается между Северо-Чуйским и Курайским хребтами, обрамляющими Курайскую впадину, и протягивается с юга на север.

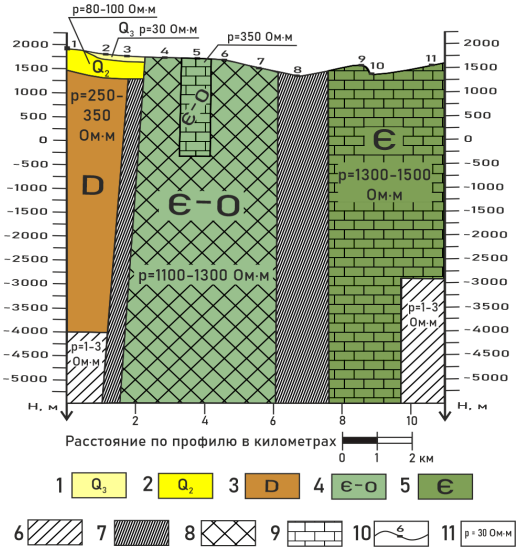


Рис. 3. Геоэлектрический разрез осадочного чехла Курайской впадины. 1 – отложения верхнего отдела четвертичной системы; 2 – отложения среднего отдела четвертичной системы; 3 – нерасчлененные отложения девонской системы; 4 – нерасчлененные отложения верхнего кембрия – нижнего ордовика; 5 – нерасчлененные отложения нижнего кембрия; 6 – области аномально низких значений удельного сопротивления; 7 – области распространения зон дробления; 8 – области аномально высоких значений удельного сопротивления; 9 – мраморизованные известняки; 10 – пункты МТ-зондирований; 11 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м.

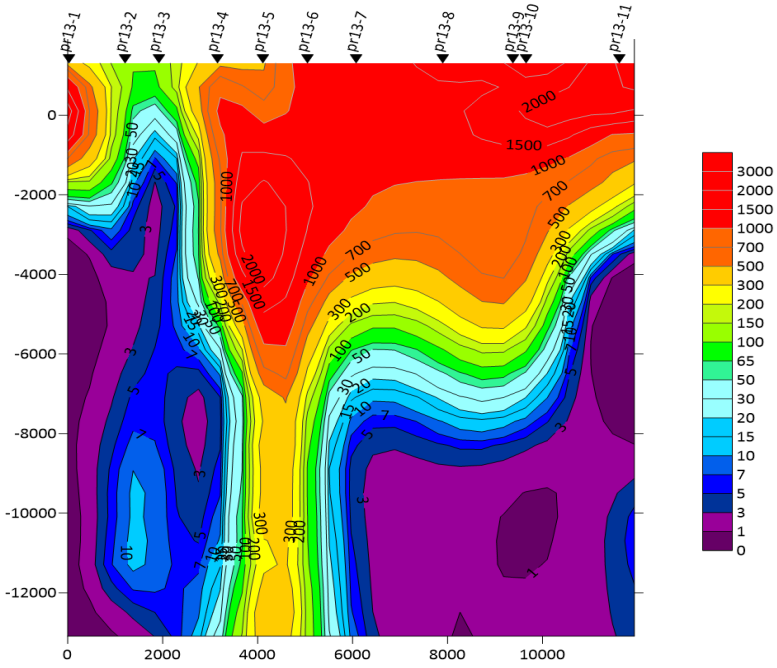


Рис. 4. Глубинный геоэлектрический разрез Курайской впадины по результатам инверсии данных МТЗ.

Обсуждение

Чуйская впадина. При построение геоэлектрического разреза осадочной толщи (рис. 1) было выделено три геоэлектрических горизонта в соответствии с априорными геологическими данными, а также установлены разрывные нарушения, проводящая область и высокоомный блок на юго-западе профиля, соответствующий Южно-Чуйскому хребту.

По результатам инверсии магнитотеллурических данных глубинный разрез земной коры (рис. 2) характеризуется двухслойным строением. Нижней части разреза, до глубин порядка 10 км, соответствует область пониженных значений удельного электрического сопротивлений (3 – 50 Ом·м). Вверх по разрезу, до глубин порядка 3 км, преобладают высокие значения удельного электрического сопротивления – более 300 Ом·м, которые в латеральном направлении нарушаются проводящими зонами. На глубине 10 км выделяется субгоризонтальный коровый проводящий слой, который может свидетельствовать о возможной флюидизации земной коры в этом интервале глубин. Коровый слой осложнен серией разрывных нарушений.

Курайская впадина. При построении геоэлектрического разреза осадочной толщи (рис. 3) в южной части профиля были выделены два геоэлектрических горизонта, соответвующие отложениям среднего (ρ = 80 – 100 Ом·м) и верхнего (ρ = 30 Ом·м) отделов четвертичной системы, которые перекрывают отложения девонской системы (ρ = 250 – 350 Ом·м). В центральной части профиля распространены отложения верхнего кембрия – нижнего ордовика (ρ = 1100 – 1300 Ом·м), а в северной части – отложения нижнего кембрия (ρ = 1300 – 1500 Ом·м). Фрагментарно проявляется область аномально низких значений удельного сопротивления (ρ = 1 – 3 Ом·м), глубина залегания верхней кромки которой составляет – 3000 м и – 4000 м. Эти области аномально низких значений сопротивлений продолжаются вниз по разрезу, глубина залегания верхней кромки погружается до –7000 м.

По результатам инверсии магнитотеллурических данных глубинный разрез земной коры в пределах Курайской впадины (рис. 4) так же характеризуется двухслойным строением. Субвертикальные поводящие зоны маркируют новейшие разломы, а также узлы их пересечения с разломами более раннего этапа заложения (палеозойскими и мезозойскими). Согласно [12] установлены кинематические характеристики разломов: для сбросов и сдвигов – вертикальные падения плоскостей сместителей, для взбросов – наклонные. На профиле наблюдается взбросовая южная граница Курайской впадины.

Заключение

Полученные результаты интерпретации магнитотеллурических данных позволяют сделать вывод о том, что крупные впадины Алтая, такие как Чуйская и Курайская, являются не отдельным погруженным жестким блоком, а имеют мелкоблоковое строение, характеризующееся различными геоэлектрическими типами осадочного чехла и консолидированной коры.

Также установлена кровля корового проводящего слоя на глубине 10 км, а его удельное электрическое сопротивление составляет менее 10 Ом·м. Такой подъем кровли и снижение удельного электрического сопротивления субгоризонтального проводящего слоя обуславливает высокий уровень тектонической и сейсмической активности данной территории. Основные неотектонические нарушения, прослеженные до глубины 12 км на геоэлектрическом разрезе, маркируется областями с аномально низкими УЭС (менее 5 Ом·м) на магнитотеллурических разрезах.

Благодарности

Работа выполнялась под руководством д.г-м.н., ведущего научного сотрудника Поспеевой Елены Валентиновны с использованием материалов предоставленных лабораторией геоэлектрики ИНГГ СО РАН в рамках проекта FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поспеев В.И., Михалевский В.И. Электромагнитные данные об астеносфере в районах Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1981. – № 1. – С. 153-157.
2. Klemperer S.L. and BIRS group. Reflectivity of the crystalline crust: Hypotheses and tests // Geophysical Journal International. – 1987. – Vol. 89. – № 1. – P. 217-222.
3. Adam A. Are there two types of conductivity anomaly (CA) caused by fluid in the crust? // Physics of the earth and planetary interiors. – 1987. – Vol. 45. – № 2. – P. 209-215.
4. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня: Геология и геофизика. – 2001. – № 10. – С. 1566-1573.
5. Киссин И.Г. Метаморфогенная модель сейсмоактивного слоя континентальной земной коры // Вулканология и сейсмология. – 2001. – № 2. – С. 53-59.
6. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. –М.: Наука, 2009. – 327 с.
7. Баталев В.Ю., Баталева Е.В., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Глубинное строение западной части зоны Таласо-Ферганского разлома по результатам магнитотеллурических зондирований // Литосфера. – 2013. – № 4. – С. 136-145.
8. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплексных электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая) // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 63-75.
9. Поспеева Е.В., Витте Л.В., Потапов В.В., Сахарова М.А. Магнитотеллурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности (на примере Горного Алтая) // Геофизика. – 2014. – № 4. – С. 8-16.
10. Эпов М.И., Поспеева Е.В., Витте Л.В. Особенности состава и строения земной коры краевой части Сибирского кратона (в зоне влияния рифтогенных процессов) по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – №3. – С. 380-398.
11. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2004. – 312 с.
12. Новиков И.С., Поспеева Е.В. Неотектоника восточной части Горного Алтая по данным магнитотеллурического зондирования // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – №7. – С. 959-971.

© Я. О. Бондарчук, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-164-170

М. М. Буслов[1]✉, Ю. А. Бишаев[1], А. В. Травин[1]

Взаимосвязи формирования Западно-Сибирского бассейна и горного обрамления в мезозое: U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения и термохронология поднятий

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

Аннотация. На основе U-Pb датирования детритовых цирконов осадочного выполнения Западно-Сибирского, Кузнецкого и Иркутского бассейнов и термохронологии окружающих горных поднятий составлена тектоно-палеогеографическая схема Центральной Азии для мезозоя. Показано, что в мезозое в результате формирования Монголо-Охотского орогена на огромной территории Тянь-Шаня, Алтае-Саянского региона и Забайкалья, а также на южной части Сибирского кратона произошли сдвигово-надвиговые деформации и формирование горных поднятий. Интенсивное разрушение образованного орогена и Сибирского кратона привело к формированию крупнейших мезозойских нефтегазовых и угольных бассейнов Северной Евразии.

Ключевые слова: Монголо-Охотский ороген, Западно-Сибирский бассейн, детритовая термохронология

M. M. Buslov[1]✉, Yu. A. Bishaev[1], A. V. Travin[1]

Interrelations of the West Siberian Basin Formation and Mountainous Framing in the Mesozoic: U-Pb Dating of Detrital Zircons from Sedimentary Filling and Thermochronology of Uplifts

[1] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: buslov@igm.nsc.ru

Abstract. Based on U-Pb dating of detrital zircons of sedimentary fill of the West Siberian, Kuznetsk and Irkutsk basins and thermochronology of surrounding mountain uplifts, a tectonic-paleogeographic scheme of Central Asia for the Mesozoic has been compiled. It is shown that in the Mesozoic, as a result of the formation of the Mongol-Okhotsk orogen, shear-thrust deformations and the formation of mountain uplifts occurred on the vast territory of the Tien Shan, the Altai-Sayan region and Transbaikalia, as well as on the southern part of the Siberian craton. Intensive destruction of the formed orogen and the Siberian craton led to the formation of the largest Mesozoic oil and gas and coal basins of Northern Eurasia.

Keywords: Mongol-Okhotsk orogen, West Siberian basin, detrital thermochronology

Введение

В фундаменте мезозойского Западно-Сибирского нефтегазового бассейна расположены в большей мере позднепротерозойско-палеозойские образования Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), который в результате мезозойских и кайнозойских реактиваций образует горные системы и поднятия к югу от него. В их пределах широко развиты фрагменты мезозойских угленосных об-

разований (Иркутский, Канско-Ачинский, Кузнецкий и другие прогибы), которые представляют собой транзитные зоны предгорного прогиба Монголо-Охотского орогена. Считается, что его формирование связано с коллизией Северо-Китайского и Сибирского кратонов [1-3]. С запада Западно-Сибирский бассейн перекрывает палеозойские образования Уральского складчатого пояса, надвинутого на Восточно-Европейский кратон, с востока – Сибирский кратон (рис. 1).

Для решения проблем палеогеографической и палеогеодинамической эволюции осадочных бассейнов и орогенов в мировой практике используются U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения и термохронология поднятий [4]. Путем корреляции геохронологических, стратиграфических и литологических данных по осадочным бассейнам с данными трекового датирования пород их горного обрамления (питающих провинций) можно уверенно выявлять пути рассеивания осадочного материала, определять области их сноса и объемы осадочного материала (коллекторов), поступающего в бассейн седиментации в различные промежутки времени. Полученные распределения возрастов детритовых цирконов сравниваются с возрастами пород горных обрамлений из предполагаемых питающих провинций. Корреляция данных трекового датирования горообразования с данными сравнительного анализа геохронологии цирконов осадочных бассейнов и их горного обрамления позволяют создать методическую основу построения качественных палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций в эволюции осадочных бассейнов и орогенов.

Методы и материалы

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

систем и поднятий [6]. U/Pb метод датирования цирконов является наиболее точным и надежным геохронологическим методом. Цирконы встречаются в большинстве разновидностей магматических, метаморфических и осадочных пород. В них содержатся относительно большие содержания урана и малые содержания исходного (обыкновенного) свинца. Благодаря химической устойчивости циркон мало подвержен наложенным термально-метасоматическим преобразованиям, поэтому несет важную информацию об условиях и истории формирования пород и позволяет ее реконструировать.

Результаты

Датирование пород различных регионов ЦАСП (Тянь-Шань, Алтае-Саянский регион, Забайкалье, Восточный Казахстан, Восточная Монголия) методом трекового анализа апатитов (AFT) свидетельствуют о крупных мезозойских поднятиях рельефа в поздней юре–мелу (~180-70 млн. лет) [7-12]. Эти поднятия возникли как результат проявления обширного Монголо-Охотского орогена, сформированного при закрытии одноименного океанического бассейна и последующей коллизии Северо-Китайского континента (Амурского супертеррейна) с Сибирским кратоном (рис. 1). Восточное звено орогена (Забайкалье и Восточная Монголия), расположенное в зоне фронтального столкновения Северо-Китайского и Сибирского кратоном, претерпело преимущественно складчато-надвиговые деформации. На южной окраине Сибирского кратона были сформированы Байкало-Патомская и другие складчато-надвиговые структуры, а в Западном Забайкалье – высокогорная область, соизмеримая с Гималаями [11,12], коллизионные граниты и комплексы разрушения орогена: метаморфические ядра и молассы [1,13]. В западном звене, на Тянь-Шане, Восточном Казахстане и Алтае-Саянской области в результате проявления сдвигово-надвиговых деформаций была образована внутриконтинентальная среднегорная область.

Процессы денудации Монголо-Охотского оргена, особенно его восточного звена, привели к образованию обломочного материала, который речными системами [14-16] выносился через транзитные зоны (современные Иркутский, Канско-Ачинский и Кузнецкий и др. прогибы) в шельфовую область Северной Евразии, в том числе крупнейший в мире Западно-Сибирский бассейн.

Для Западно-Сибирского бассейна были изучены детритовые цирконы из керна скважин Северо-Контилорского, Тевлинско-Руссинского, Мишаевского, Северо-Егурьяхского и Нонг-Еганского месторождений, расположенных в его центральной части в северу от г. Сургут. Были исследованы песчаники из верхнеюрских отложений, подстилающих нефтегазоносную баженовскую свиту, собственно породы баженовской свиты, породы «аномальных разрезов» баженовской свиты или подачимовской толщи, и породы нижней части ачимовского комплекса. Образцы отобраны на глубинах 2750-2950 м.

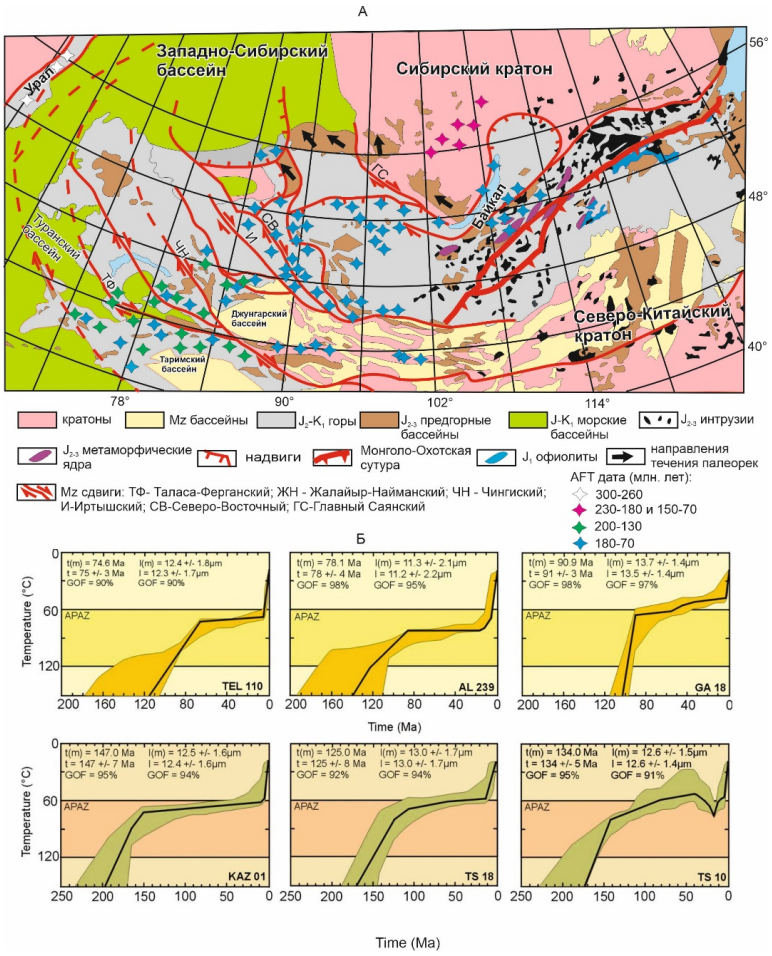


Рис. 1. Мезозойская тектоно-палеогеографическая схема Центральной Азии (А) и результаты трекового датирования апатита Алтая (верхний ряд) и Тянь-Шаня (нижний ряд)

U-Pb датирование детритовых цирконов (боле 500 зерен) указанных бассейнов хорошо коррелируется с возрастами магматических пород, слагающих огромные по размерам гранитойдные массивы Забайкалья и Северной Монголии (Байкало-Витимский, Хангайский и Хэнтэйский), суммарной площадью выходов свыше 300 000 км^2. Датировки имеют ярко выраженные возрастные пики на 300, 259 и 250 млн лет, что характерно для возрастов гранитойдных массивов Западного Забайкалья и Северной Монголии. Также проявлен возрастной пик на 468-482 млн лет, характерный для раннепалеозойских гранитойдов северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса. Древние возрастные пики цирконов в 1800 и 2300-2600 млн лет указывают, что снос в бассейны происходил также с Сибирского кратона.

Сибирским кратоном в результате мезозойской коллизии с Северо-Китайским кратоном претерпел поднятие и мощную денудацию, которая выявляется по данным AFT. В работе [17] представлены результаты AFT из керна скважин, вскрывших кровлю кристаллического фундамента Сибирской платформы в Непско-Ботуобинской антеклизе. Полученные трековые возрасты образуют два ме-

зозойских кластера: 1) поздний триас-ранняя юра (230-180 млн лет); 2) конец поздней юры-ранний мел (150–121 млн лет). Позднетриасово-раннеюрский кластер совпадает с большей частью трековых возрастов, полученных по Гулинскому плутону северной части кратона [18]. Эти датировки маркируют региональный этап воздымания и эрозии на всем Сибирском кратоне, который проявился синхронно с деформациями на Таймыре [19]. Выявление причины позднетриас-раннеюрского воздымания и эрозии Сибирском кратона требует дополнительных исследований. Позднеюрско-раннемеловые трековые возрасты отражают этап коллизии Северо-Китайского континента с Сибирским кратоном.

Обсуждение

В раннем мезозое (среднем триасе-юре) океаническая плита Палео-Тетис, включающая докембрийские тектонические блоки, погружалась под Северную Евразию с юга, что привело к формированию кемерийского орогена [3]. Считается, что столкновение Гондванских континентальных блоков с Евразией вызвало реактивацию разломов и поднятие Тянь-Шаня и частично Восточного Казахстан, расположенных вблизи зоны столкновения (рис. 1). По мнению [1, 2] в позднем мезозое Евразия претерпела интенсивную тектоническую реактивацию, связанную с закрытием Монголо-Охотского океанического бассейна и последующей коллизией с Северо-Китайским кратоном. В результате был сформирован позднемезозойский коллизионный Монголо-Охотский пояс, который протягивается на расстояние свыше 3000 км от Центральной Монголии до Охотского моря. Денудация орогена привела к образованию обломочного материала, который речными системами выносился через транзитные зоны (современные Кузнецкий, Канско-Ачинский и Иркутский [14-16]) в шельфовую область Арктического океана, в том числе крупнейший в мире Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн.

На обобщениях геолого-геофизических данных показано [20], что при заполнении глубоководного палеобассейна Западной Сибири обломочный материал поступал, в основном с Сибирского кратона, Алтае-Саянской складчатой области, в меньшей степени с Урала, Таймыра и Новой Земли. Отмечено, что в раннем мелу (140-125 млн лет) происходило неравномерно заполнение глубоководного бассейна лавинной седиментацией с формированием клиноформ. Эта неравномерность отображена в асимметрии строения разреза. В восточной части бассейна клиноформы значительно более отчетливо фиксируются по сравнению с западной частью вблизи Урала.

На основе термохронологических данных нами показано, что в поздней юре-раннем мелу на месте Уральского складчатого пояса формировался пенеплен, а максимальное горообразование происходило в юго-восточном обрамлении Западно-Сибирского бассейна в Восточной Монголии и Забайкалье. Здесь мощность денудации оценивается до 5-3 км, а высота гор до 8-6 км, что соизмеримо с Гималаями [14-16]. Несомненно, что наличие столь крупного горного сооружения вблизи Западно-Сибирского бассейна явилось основной причиной формирования лавинной седиментации в его юго-восточной и восточной частях,

которая происходила за счет катастрофического сползания дельтовых осадков, формирующихся мощной палеоречной системой, сохранившейся в транзитных бассейнах (Иркутском, Канско-Ачинском и Кузнецком). Вероятно, что быстро поступающие осадки лавинной седиментации перекрыли насыщенные органикой баженовскую свиту (поздняя юра-ранний мел, 150-143 млн лет) и способствовало их катагенезу.

Заключение

Таким образом, в мезозое в результате формирования Монголо-Охотского орогена по южному обрамлению Сибирского кратона произошли складчато-надвиговые деформации его обрамления, а также общее поднятие. Интенсивное разрушение пород образованных орогенов и Сибирского кратона привело к формированию крупнейших нефтегазовых и угольных бассейнов Северной Евразии.

Проведена корреляция полученных результатов и показано, что на Тянь-Шане и Восточном Казахстане AFT пики горообразования проявились в периоды ~ 200-130 и 180- 0 млн лет, в Алтае- Саянской области, Восточной Монголии и Забайкалье в периоды ~ 180-70 млн.лет. Указанные возрастные интервалы горообразования и связанной с ним денудации являются определяющими в формирование Западно-Сибирского, Иркутского, Канско-Ачинского и Кузнецкого бассейнов. Связанные с Монголо-Охотской орогенией максимальные горные системы (до 8-6 км), сопоставимые с Гималайской, существовали в Забайкалье и восточной Монголии, а в пределах Алтае-Саянской области их высота достигала 3-4 км, а на большей части Восточного Казахстана достигала 2 км. Выявлен поступательный рост горных систем с юго-востока на северо-запад, который вызвал деформацию существующего на территории южной Сибири предгорного прогиба (Иркутский, Канско-Ачинский и Кузнецкий бассейны) и смещению береговой линии Западно-Сибирского бассейна к северу.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zorin Yu. A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia // Tectonophysics. – 1999. – V. 306. – № 1. – P. 33-56.

2. Парфенов Л. М., Берзин Н. А., Ханчук А. И., Бадарч Г. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. – 2003. – Т. 22. – № 6. – С. 7-41.

3. *Golonka J. Plate tectonic evolution* of the *southern margin* of *Eurasia* in the Mesozoic and *Cenozoic // Tectonophysics.* – 2004. – V. *381. – P.* 235-273.

4. Sharman G. R., Samuel A. J. Sediment unmixing using detrital geochronology // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 477. – P. 183-194.

5. Травин А. В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // Геология и геофизик. – 2016. – № 57 (3). – С. 553-574.

6. Буслов М. М., Кох Д. А., Де Граве И. Мезозойско-кайнозойская тектоника и геодинамика Алтая, Тянь-Шаня и северного Казахстана по результатам трекового датирования апатитов // Геология и геофизика. – 2008. – № 49 (9). – С. 862-870.

7. Ketcham R. A. Forward and inverse modelling of low-temperature thermochronometry data // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2005. – Vol. 58. – P. 275-314.

8. De Grave J., De Pelsmaeker E., Zhimulev F. I., Glorie S., Buslov M. M. Meso-Cenozoic building of the northern Central Asian Orogenic Belt: thermotectonic history of the Tuva region // Tectonophysics. – 2014. – V. 621. – P. 44-59.

9. Glorie S., De Grave J., Zhimulev F. I., Buslov M. M. et al. Structural control on Meso-Cenozoic tectonic reactivation and denudation in the Siberian Altai: insights from multi-method thermochronometry // Tectonophysics. – 2012. – V. 544. – P. 75-92.

10. Jolivet M., Ritz J.-F., Vassallo R., Larroque C., Braucher R., Todbileg M., Chauvet A., Sue C., Arnaud N. et al. Mongolial summits: an uplifted, flat, old but still preserved erosion surface // Geology. – 2007. – V. 35. – P. 871-874.

11. Травин А. В., Буслов М. М., Бишаев Ю. А., Цыганков А. А., Михеев Е. И. Тектонотермическая эволюция Забайкалья в позднем палеозое-кайнозое: термохронология Ангаро-Витимского гранитойдного батолита // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64 (9). – С.1303-1317.

12. Buslov M. M., Kulikova A. V., Sklyarov E. V., Travin A. V. Mesozoic Tectonothermal Evolution of the Zagan Metamorphic Core Complex in Western Transbaikalia: $^{40}Ar/^{39}Ar$ and FTA Dating // *Lithosphere.* – 2024. – Lithosphere. – Vol. 2023.

13. Donskaya V., Windley B. F., Mazukabzov A. M., Kröner A., Sklyarov E. V., Gladkochub D. P., Ponomarchuk V. A., Badarch G., Reichow M. K., Hegner E. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia // Journal of the Geological Society. – 2008. – V. 165. – P.405-421.

14. Davies C., Allen M., Buslov M., Safonova I. Deposition in the Kuznetsk Basin, Siberia: insights into the Permian-Triassic transition and the Mesozoic evolution of Central Asia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2010. – V. 295. – P. 307-322.

15. Le Heron D. P., Buslov M. M., Davies C., Richards K., Safonova I. Yu. Evolution of Mesozoic fluvial systems along the SE flank of the West Siberian Basin, Russia // Sedimentary Geology. – 2008. – V. 208. – P. 45-60.

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

17. Багдасарян Т. Э., Гайдук А. В., Хубанов В. Б., Латышев А. В., Веселовский Р. В. Первые результаты трекового датирования апатита с применением LA-ICP-MS из кровли фундамента Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская антеклиза) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 510. – № 2. – С. 39-43.

18. Мышенкова М. С., Зайцев В. А., Томсон С., Латышев А. В., Захаров В. С., Багдасарян Т. Э., Веселовский Р. В. Термальная история Гулинского плутона (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11. – № 1. – С. 75-87.

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

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

© М. М. Буслов, Ю. А. Бишаев, А. В. Травин, 2025

УДК 550.372
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-171-176

Н. А. Голиков[1,2,3]✉, Д. М. Евменова[4], М. В. Милованов[3]

Результаты экспериментальных исследований образования глинистой корки на образцах водо-газонасыщенных коллекторов

[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] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[4] Институт вычислительной математики и математической геофизики,
г. Новосибирск, Российская федерация
e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Глинистая корка, образующаяся на стенке скважины, оказывает сильное влияние на формирование зоны проникновения в процессе бурения. Имеющееся в настоящий время инструментальные и программные средства позволяют моделировать это влияние с учетом экспериментальных данных. В интервалах газонасыщенных коллекторов процессы формирования промытой зоны более сложные. При этом отсутствуют экспериментальные данные о свойствах как глинистой корки, так и о параметрах зоны проникновения. Для проведения экспериментальных исследований этого влияния была модифицирована разработанная ранее в ИНГГ СО РАН установка для моделирования процесса образования глинистой корки. На установке была проведена серия экспериментов на образцах песчаных пород пласта $ЮС_2$ Тевлинско-Русскинского месторождения. Впервые получены результаты исследования формирования глинистой корки на образцах с водогазовым насыщением.

Ключевые слова: зона проникновения, глинистая корка, водо-газонасыщенность, пористость, проницаемость

N. A. Golikov[1,2,3]✉, D. M. Evmenova[4], M. V Milovanov[3]

Results of experimental studies of clay cake formation on samples of water-gas-saturated reservoirs

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[3] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
[4] Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The mud cake formed on the borehole wall has a strong influence on the formation of the invasion zone during drilling. Currently available tools and software allow modeling this influence taking into account experimental data. In the intervals of gas-saturated reservoirs, the processes of formation of the washed zone are more complicated. At the same time, there are no experimental data on the properties of both the mud cake the parameters of the penetration zone. In order to conduct experimental studies of this influence, the installation for modeling the process of mud cake formation developed earlier

in IPGG SB RAS was modified. A series of experiments was carried out on the core samples sandstone from the YUS_2 formation of the Tevlinsko-Russkinskoye field. For the first time the results of the study of mud cake formation on samples with water-gas saturation were obtained.

Keywords: invasion zone, mud cake, water-gas saturation porosity, permeability

Введение

При бурении скважин в результате взаимодействия бурового раствора с породой в зоне проницаемых коллекторов на стенке скважины образуется глинистая корка. Часть частиц бурового раствора проникает в пласт, формируя зону кольматации, а фильтрат бурового раствора проникает в пласт и формирует зону проникновения. Процесс вытеснения пластовых флюидов фильтратом бурового раствора моделируется с помощью относительных фазовых проницаемостей [3], вид которых зависит от скорости движения фронта вытеснения. В свою очередь, скорость фронта вытеснения определяется в основном проницаемостью глинистой корки.

В породах с водогазовым насыщением процесс формирования зоны проникновения более сложный из-за большого различия подвижности газа и пластовых жидкостей. Экспериментальные данные о свойствах глинистой корки и параметрах зоны проникновения немногочисленны и получены на искусственных образцах [1]. Поэтому была выполнена модификация ранее разработанной в ИНГГ СО РАН установки для моделирования процесса образования глинистой корки для проведения экспериментов на образцах со смешанным водогазовым насыщением [2] и проведена серия экспериментов.

Модификация установки и методика проведения экспериментальных работ

Схема модифицированной установки приведена на рис. 1. Основным требованием было исключение контакта бурового раствора с образцом в процессе заполнения циркуляционной камеры до начала эксперимента (подачи давления в буровом растворе). В случае преждевременного контакта БР с образцом начинается неконтролируемая пропитка газонасыщенного образца фильтратом бурового раствора, что приводит к искажению экспериментальных данных. Для предотвращения этого процесса установка была переделана таким образом, чтобы исследуемый образец находился выше циркуляционной камеры и не смачивался БР до окончания заполнения камеры и начала эксперимента.

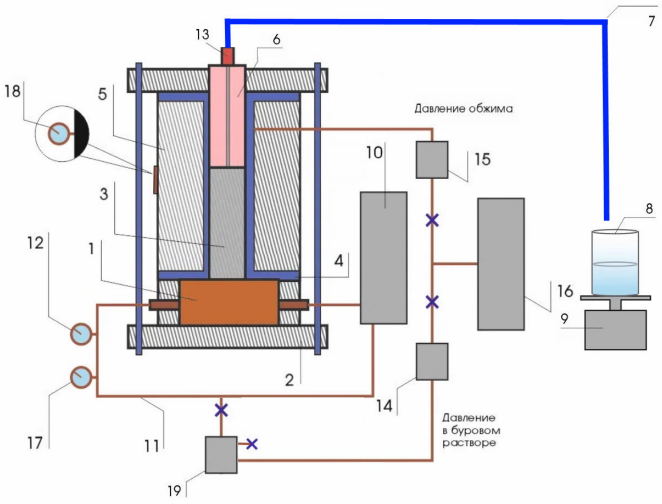


Рис. 1. Схема модифицированной установки для исследования процесса формирования глинистой корки для газонасыщенных образцов: 1 – камера с циркулирующим раствором, 2 – фланец, 3 – образец, 4 – резиновая манжета, 5 – корпус, 6 – проставка, 7 – капилляр, по которому проходит фильтрат, 8 – стакан, 9 – весы, 10 – циркуляционный насос, 11 – система трубопроводов, 12 – манометр, 13 – измерительная ячейка, 14, 15 – регуляторы давления, 16 – пневмостанция; 17 – датчик скорости циркуляции, 18 – датчик температуры; 19 – буферная емкость.

Подготовка образцов включала в себя:

- измерение геометрических размеров и веса образца;
- насыщение образцов моделью пластовой воды с минерализацией См=30 г/л;
- измерение проницаемости по воде при 100% насыщении;
- измерение сопротивления образца при 100% насыщении;
- центрифугирование образца при пошаговом увеличении скорости вращения центрифуги 500, 1000, 3000, и 5000 об/мин;
- измерение текущей водонасыщенности и электрического сопротивления на каждом шаге для получения зависимости параметра насыщения от водонасыщенности Рн(Кв).

Образец после центрифугирования со скоростью 5000 об/мин моделировал зону предельной газонасыщенности.

Подготовленный образец помещался в камеру установки и затем проводился эксперимент. В процессе эксперимента контролировалось давление обжима и записывались следующие параметры эксперимента:

- давление в буровом растворе;
- скорость циркуляции БР;
- температура БР;
- вес фильтрата БР, прошедшего через образец;
- время между началом эксперимента и появлением первой капли БР (время задержки).

После окончания эксперимента проводилось взвешивание образца, глинистая корка отделялась от образца, очищенный образец взвешивался, измерялось его сопротивление. По изменению веса образца рассчитывалась конечная водонасыщенность образца.

На глинистой корке измерялись ее толщина и вес. Глинистая корка высушивалась и взвешивалась повторно для определения веса твердой фазы. По этим данным рассчитывалась пористость ГК.

По данным об изменении веса фильтрата БР и давлении в БР с использованием закона Дарси рассчитывалось проницаемость системы «образец-корка». Кроме того, после эксперимента с глинистой коркой проводилось измерение проницаемости кольматированного образца, после которого оценивалась отдельно проницаемость зоны кольматации и проницаемость глинистой корки.

Результаты экспериментов

Были проведены эксперименты на 10 образцах песчаника, извлеченного из пласта $ЮС_2$ (Тевлинско-Русскинское месторождение) длиной от 35 до 47 мм, диаметром 29-30 мм, проницаемостью 0.2-100 мД (преимущественно 2-10 мД) и пористостью 8-21% (преимущественно 12-15%). Использованы два типа бурового раствора – глинистого (минерализация 4 г/л, плотность 1.11 г/см^3) и полимер-карбонатного (минерализация 70 г/л, плотность 1.15 г/см^3). Результаты экспериментальных работ приведены в табл. 1.

Установлены следующие особенности глинистой корки при использовании различных типов бурового раствора.

Для глинистого бурового раствора характерно:

1. Толщина корки изменяется от 5 до 3 мм, что в основном зависит от проницаемости образца.
2. Плотность корки изменяется по толщине от очень плотной вблизи образца до рыхлой на поверхности. Пористость корки изменяется от 50 до 80%.
3. Средняя проницаемость корки 0,01 мД.
4. Зона кольматации уменьшает проницаемость образца примерно в 2 раза.

Таблица 1

Результаты экспериментов по исследованию роста глинистой корки

№ обр	Вес образца, г			Кв, %		Rобр, Ом		t зад	h корки, мм	Кп корки, %	Кпр корки, мД
	Кв 100%	до эксп.	после эксп.	до	после	до	после				
2249/ 6109-4	74,88	72,1	74,63	46,78	95,28	1313	2049	3014	1,68	82,59	0,002
6516/ 6254-3	58,98	56,6	58,74	39,19	93,86	1316	1704	3262	3,47	48,34	0,001
6516/ 6255-1	75,97	73,36	75,55	34,68	89,52	1248	2347	3321	1,89	57,65	0,001
6520/ 6242-6	72,96	70,25	72,3	50,07	87,88	1275	1920	2564	3,23	49,5	0,005

На рис. 2 показана глинистая корка на образце 6239-1 (скважина 6758).
Для полимер-карбонатного раствора характерно:
1. Толщина корки меньше, чем для глинистого раствора от 3.5 до 1 мм.
2. Средняя проницаемость корки ниже, чем для глинистого раствора 0.001 мД.
3. Средняя пористость корки 85%, структура корки рыхлая, неоднородная.
4. Зона кольматации уменьшает проницаемость образца примерно в 5 раз.

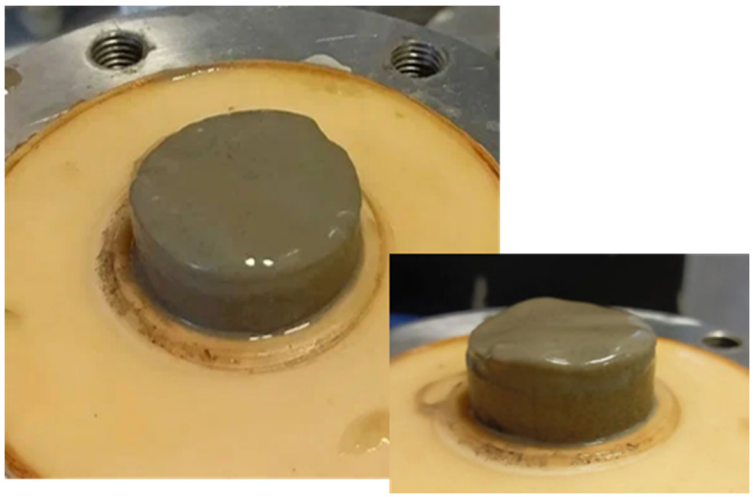


Рис. 2. Глинистая корка, образованная на образце 6239-1 (скважина 6758), глинистый буровой раствор

По результатам эксперимента можно сделать вывод о влиянии газонасыщенности на задержку фильтрации воды. Протекание процесса зависит от пористости и проницаемости используемого керна. Результаты измерения сопротивления образца до и после лабораторного эксперимента показывают, что сопротивление образца после фильтрации увеличивается, это говорит о том, что часть пластовой воды была вытеснена с замещением фильтрата бурового раствора. Также о вытеснении воздуха фильтратом свидетельствует увеличение коэффициента водонасыщенности (Кв) после эксперимента. Оставшиеся 10% в Кв указывают на сохранение газа в поровом пространстве.

Заключение

Впервые проведены экспериментальные работы по получению глинистой корки и зоны кольматации для водо-газонасыщенных образцов. Проведена серия экспериментов на образцах песчаных пород пласта $ЮС_2$ Тевлинско-Русскинского месторождения на модифицированной для этой цели ранее созданной экспериментальной установки. Эксперименты проведены на двух типах бурового раствора: глинистого и полимер-карбонатного. Определены толщина, пористость и проницаемость глинистой корки, а также коэффициент водонасыщенности до и после эксперимента. Результаты экспериментальных работ могут использованы как для повышения достоверности интерпретации данных ГИС, так

и для тестирования различных типов бурового раствора, а также оценки коэффициента извлечения газа.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гридин В. А. Дубенко В. Е. Димитриади Ю. К. Серов А. В. Экспериментальные исследования влияния технологических жидкостей на газопроницаемость песчаных коллекторов // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 1. – С. 141-148.

2. Евменова Д.М., Голиков Н.А., Ельцов И.Н. Экспериментальное исследование образования глинистой корки на образцах песчаника с низкой проницаемостью // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 5. – С. 47-54.

3. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Моделирование зоны проникновения при использовании буровых растворов на водной и нефтяной основе // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 97-104.

© Н. А. Голиков, Д. М. Евменова, М. В. Милованов, 2025

УДК 550.47
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-177-182

А. Ю. Девятова[1]✉, С. Б. Бортникова[1]

Атмосферная эмиссия микроэлементов от хранилищ отходов горнорудных производств

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

Аннотация. Сульфидные отходы обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва представляют собой постоянный источник загрязнения. Объектом исследования был геогаз, выделяющийся с поверхности хранилищ, собранный для оценки уровень концентрации микоэлементов (в том числе и тяжелых металлов) в атмосферном воздухе в окрестностях отвалов. Отбор геогаза производился методом коденсации, с помощью прибора на основе элемента Пельтье. Полученный конденсат анализировался методом АЭС-ИСП на спектрометре iCap 6000 Duo. Сравнение состава конденсатов с составом растворенной частью снегового покрова показало, что конденсация в разработанном устройстве происходит тем же образом, что и конденсация в атмосфере. Результаты исследований показали, что содержание тяжелых металлов над поверхностью хвостохранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва превышает фоновые значения во всех наблюдаемых точках в среднем в 1000 раз.

Ключевые слова: сульфидные отвалы, загрязнение атмосферы, тяжелые металлы

A. Y. Devyatova[1]✉, S. B. Bortnikova[1]

Atmospheric emission of trace elements from mining waste storage

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

Abstract. Sulfide ore processing waste in the Kemerovo region and in the Republic of Tuva is a constant source of pollution. The object of the study was geogas released from the surface of storage facilities, collected to assess the concentration of trace elements (including heavy metals) in the atmospheric air in the vicinity of landfills. Geogas was selected by the codensation method using a device based on a Peltier element. The resulting condensate was analyzed by the NPP-ICP method on an iCap 6000 Duo spectrometer. A comparison of the composition of the condensates with the composition of the dissolved part of the snow cover showed that condensation in the developed device occurs in the same way as condensation in the atmosphere. The research results showed that the content of heavy metals above the surface of the tailing dumps of sulfide ore processing waste in the Kemerovo region and in the Republic of Tuva exceeds the background values at all observed points by an average of 1000 times.

Keywords: sulfide dumps, atmospheric pollution, heavy metals

Введение

Формирование циклов круговорота летучих соединений серы, поступающих в атмосферный воздух, является актуальной проблемой для горнорудных районов на постэксплуатационной стадии.

Сульфидные отвалы – это мощные источники загрязнения компонентов окружающей среды. Хорошо изучено их влияние на гидросферу [1-8], литосферу [9-13], растительность [14-17]. Однако проблема загрязнения атмосферы изучена слабо [18-21].

Известно, что от объектов, находящихся на поверхности или в глубине земной коры, вверх восходит поток подвижных частиц, несущих информацию об объекте. Например, у ряда авторов этот поток называется геогазом, или земным газом, а также – струйной субвертикальной миграцией химических элементов [22-25]. Выделение геогаза из сульфидных хвостов и последующее его рассеивание являются непрерывно происходящими процессами. Таким образом, оценить состав воздуха над этими хвостохранилищами очень сложно.

Целью исследования было определить уровень концентрации микроэлементов в атмосферном воздухе в окрестностях отвалов горнорудных производств.

Тяжелые металлы – это металлы или металлоиды, которые имеют плотность выше 5 г/см^3, не поддаются разложению или разрушению [26].

В зависимости от степени токсикологического воздействия химические вещества в соответствии с ГОСТ 17.4.1.0283 и ГОСТ Р 53381-2009 подразделяют на три класса:

- I класс (высоко опасные) – As, Cd, Hg, Be, Se, Pb, Zn;
- II класс (умеренно опасные) – B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr;
- III класс (мало опасные) – Ba, V, W, Mn, Sr [27].

Результаты данного исследования позволяют по-новому взглянуть на проблему токсического воздействия сульфидных хвостохранилищ на окружающую среду и человека.

Методы и материалы

Полевой отбор образцов осуществлялся методом конденсирования, с помощью специально сконструированного устройства, на поверхности хранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва: Ново-Берикульское, Талмовские Пески, Урской отвал, Хову-Аксы (траншеи Тувакобальт). Помимо этого, была отобрана фоновая проба в лесополосе Кемеровской области вдали от источников загрязнения. Считаем выбор фоновой точки обоснованым, поскольку 75% объектов расположены в Кемеровской области и ее состав может быть взят для сравнения по всем объектам.

Содержания металлов и металлоидов определялось методом АЭС-ИСП на спектрометре iCap 6000 Duo (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) в стандартной конфигурации (аналитик Нечепуренко С.Ф.).

Результаты

Состав парогазовых эманаций был оценен по составу собранного конденсата. Различия в составах конденсатов связанны с исходным составом отвального вещества и показаны на рис. 1. Конденсат геогаза является ультрапресным слабощелочным раствором (pH=8,00), в соответствии с классификацией природных вод, сульфатно-гидрокарбонатного класса, кальций-натриевой группы. Ле-

тучие формы, отделяющиеся от вещества отходов с потоками геогаза, образуют многие элементы, ведущие из которых –катионы (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) и цинк, концентрациикоторого (700-1400 мкг/л) сопоставимы с содержанием катионов (рис.1.). Mn, Cu, Ni, As и Ba определены в конденсатах в меньшем количестве.

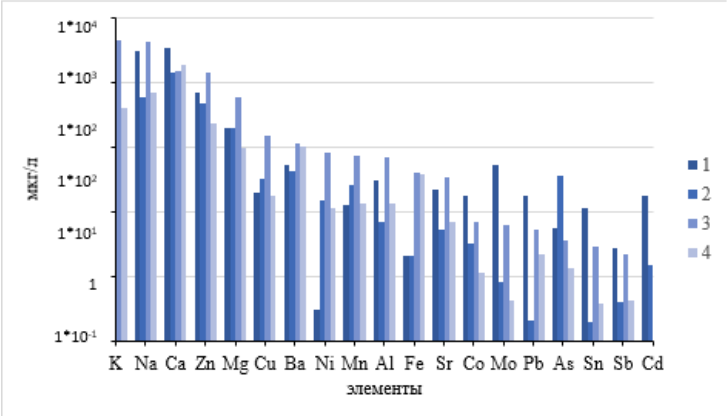


Рис. 1. Химический состав конденсатов. 1 – Урской отвал, 2 – старые траншеи Тувакобальт, 3 – Талмовские Пески, 4 – Ново-Берикульское хвостохранилище.

Обсуждение

Поскольку нормативных документов по индексам опасности и ПДК для микроэлементов в конденсатах геогаза не разработано, авторы провели сравнение с фоновыми значениями.

$$К = \frac{\boldsymbol{C}(конд)}{\boldsymbol{C}\ (фон)}, \qquad (1)$$

где К – коэффициент превышения; $\mathbf{C}\ (конд)$ – средняя концентрация, мкг/л; $С\ (фон)$– фоновая концентрация, мкг/л.

Превышение фоновых значений в конденсатах показаны на рис. 2.

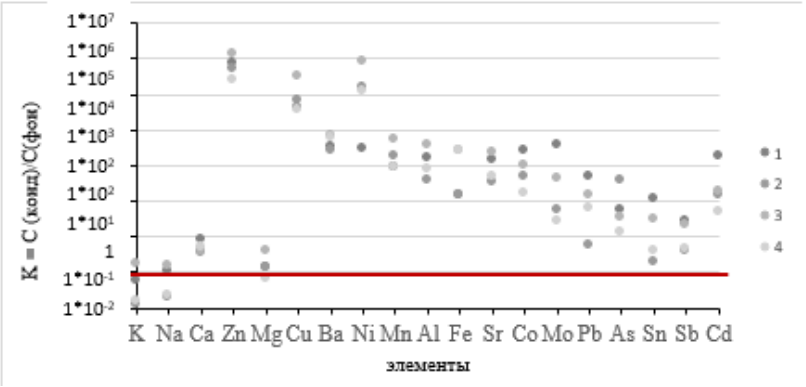


Рис. 2. Превышение фоновых значений в конденсатах. 1 – Урской отвал; 2 – стрые траншеи Тувакобальт; 3 – Талмовские Пески; 4 – Ново-Берикульское хвстохранилище, — – фоновые значения.

Содержание тяжелых металлов над поверхностью хвостохранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва превышает фоновые значения во всех наблюдаемых точках в среднем в 1000 раз.

Особенно выделяется загрязнение опасными металлами 1 класса: содержание мышьяка (As) превышает фон в 15-400 раз, кадмия (Cd) – в 50-2000 раз, свинца (Pb) – в 6-500 раз, а цинка (Zn) – в колоссальные 1000-1000000 раз.

Заключение

Как показали полевые наблюдения, сульфидные отходы обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва представляют собой постоянный источник загрязнения приземного слоя атмосферы. Исследования показали, что концентрация тяжелых металлов в атмосферном воздухе над поверхностью этих хранилищ превышает естественный, фоновый уровень в среднем в 1000 раз.

Особую тревогу вызывает значительное превышение концентрации тяжелых металлов 1 класса опасности, которые оказывают наиболее негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. В частности, содержание мышьяка (As) превышает фоновые значения в 15-400 раз, кадмия (Cd) – в 50-2000 раз, свинца (Pb) – в 6-500 раз. Наиболее критичная ситуация наблюдается с цинком (Zn), концентрация которого превышает норму в диапазоне от 1000 (урской отвал) до 1000000 (Талмовские пески) раз.

Такое масштабное загрязнение представляет серьезную угрозу для экосистемы региона, в том числе для почв, водных ресурсов и растительности. Кроме того, высокое содержание тяжелых металлов может негативно сказаться на здоровье населения, проживающего вблизи хвостохранилищ, увеличивая риск развития различных заболеваний. Необходимы срочные меры по комплексному исследованию масштабов загрязнения, разработке и внедрению эффективных технологий рекультивации хвостохранилищ и минимизации негативного воздействия на окружающую среду и здоровье людей.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИНГГ СО РАН (проект 0266-2022-0028).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. – 2011. – №26 (11). – P. 1777-1791.

2. Lottermoser B., Lottermoser B.G. Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 335 p.

3. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia // Applied Geochemistry. – 2012. – №27 (11). – P. 2238-2250.

4. Bortnikova S., Manstein Y., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Retsky A. Acid Mine Drainage Migration of Belovo Zinc Plant (South Sibiria, Russia) // Water Security in the Mediterranean Region : An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches. – Dordrecht : Springer, 2011. – P. 191-208.

5. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // Applied Geochemistry. – 2015. – №57. – P. 157-177.

6. Minnaar A.Water pollution and contamination from gold mines: acid mine drainage in Gauteng Province, South Africa. // Water, Governance, and Crime Issues. – Cham, Springer, 2020. – P. 193-219.

7. Sun J., Strosnider W.H.J., Nairn R.W., LaBar J.A. Water quality impacts of in-stream mine tailings on a headwater tributary of the Rio Pilcomayo, Potosí, Bolivia // Applied Geochemistry. – 2019. – Vol. 113. – P.104464.

8. Bodenan F., Baranger P., Piantone P., Lassin A., Azaroual M., Gaucher E., Braibant G. Arsenic behaviour in gold-ore mill tailings, Massif Central, France: hydrogeochemical study and investigation of in situ redox signatures // Applied Geochemistry. – 2004. – №19 (11). – P. 1785-1800.

9. Gaskova O. L., Bortnikova S.B. On the quantitative evaluation of the neutralizing potential of host rocks // Geochemistry International. – 2007. – № 45 (4). – P. 409-412.

10. Hiller E, Lalinská B, Chovan M, Jurkovič Ľ, Klimko T, Jankulár M, Hovorič R, Šottník P, Fľaková R, Ženišová Z, Ondrejková I. Arsenic and antimony contamination of waters, stream sediments and soils in the vicinity of abandoned antimony mines in the Western Carpathians, Slovakia // Applied Geochemistry. – 2012. – №27 (3). – P. 598-614.

11. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода - взвешенное вещество - донные отложения речных экосистем. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН, 2001. – 58 с.

12. Батоян В.В., Касимов Н.С. Геохимические исследования донных осадков внутренних водоемов // Круговорот вещества и энергии в водоемах: Материалы докл. VI Всесоюз. лимнол. совещ. – Иркутск, 1985. – Вып. V. – С. 80.

13. Mukherjee A.B., Kabata-Pendias A. Trace elements from soil to human. – Springer, 2007. – P. 368-378.

14. Голубев Д. А., Крупская Л. Т., Морин В. А. Состояние лесной растительности в условиях техногенного загрязнения в границах влияния хвостохранилища // Лесохозяйственная информация. – 2015. – № 4. – С. 87-93.

15. Гудкова О. В., Юргенсон Г. А. Содержание тяжелых металлов в полыни Гмелина на территории Шерловогорского горнорудного района // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование : материалы II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. – Чита: Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет им. Н.Г. Чернышевского, 2008. – С. 56-58.

16. Тамахина А. Я., Локьяева Ж. Р. Мониторинг состояния растительного покрова хвостохранилища Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината // Инновационные технологии в растениеводстве и экологии : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения ученого-микробиолога-агроэколога, заслуженного работника высшей школы России, заслуженного деятеля науки Северной Осетии, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Александра Тимофеевича Фарниева. – Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2017

17. Артамонова В. С., Танасиенко А. А., Бортникова С. Б. Современные аспекты ремедиации биологических свойств городских почв // Сибирский экологический журнал. – 2005. – Т. 12. – № 5. – С. 855-864.

18. Nriagu J.O. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere // Nature. – 1979. – Vol. 279. – P. 409-411.

19. Csavina J., Field J., Taylor M.P., Gao S., Landázuri A., Betterton E.A., Sáez A.E. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. // Science of the Total Environment. – 2012. – Vol. 433. – P. 58-73.

20. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 647. – P. 411-419.

21. Wang Q., Wang X., Cheng Zh. [et al.] Geogas-Carried Metal Prospecting for Concealed Ore Deposits: A Review of Case Studies in China // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – № 12. – P. 1553.

22. Zhou Z., Tao S., Xu F., Dawson R. A physical-mathematical model for the transport of heavy metals and toxic matter from point sources by geogas microbubbles // Ecological Modelling. – 2003. – Vol. 161. – № 1-2. – P. 139-149.

23. Новиков Л. В., Кузьмин А. Г., Титов Ю. А. Анализ многомерных данных по составу газов, выделяемых из разломов земной поверхности // Научное приборостроение. – 2023. – Т. 33. – № 1. – С. 86-94.

24. Алехин Ю. В., Дроздова О. Ю., Завгородняя Ю. А., Мотузова Г. В. Миграция элементов в подзолистой почве Владимирской Мещёры: лабораторный эксперимент // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2013. – № 6. – С. 53-60.

25. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV групп: Справ. изд. / под ред. В. А. Филатова и др. – Л.: Химия, 1988. – 512 с.

26. ГОСТ Р 53381-2009. Почвы и грунты. Грунты питательные. Технические условия.

27. ГОСТ 17.4.1.0283. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.

© А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова, 2025

УДК 550.8.08, 699.842
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-183-189

П. А. Дергач[1,2]✉, Я. Э. Бегич[3], А. А. Белоусов[1,2], А. И. Еникеев[3]

Разработка и апробация методики оценки эффективности вибрационных барьеров с использованием портативного источника сейсмических волн

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке методики экспериментального исследования эффективности вертикальных вибрационных (волновых) барьеров для защиты зданий от техногенных вибраций. Основная идея методики заключается в вибрационном просвечивании барьеров с использованием портативного источника сейсмических волн. При этом система наблюдения проектируется таким образом, чтобы часть сейсмометров фиксировала вибрации после прохождения через барьер, а часть – через неизмененный грунт. После сопоставления спектральных амплитуд гармонических сигналов, на заданных частотах рассчитывается коэффициент подавления вибраций. Апробация методики производилась на специально созданной экспериментальной площадке, где был произведен монтаж вибрационных барьеров из доступных на рынке РФ материалов: керамзит, вспененный и экструзивный пенополистирол (EPS и XPS). Эксперименты проводились в частотном диапазоне от 1 до 450 Гц, соответствующем различным источникам техногенных вибраций. Осредненные значения коэффициента подавления вибраций составили 4.5, 10 и 12.8 для керамзита, EPS и XPS соответственно.

Ключевые слова: виброзащита инженерных сооружений, траншейный барьер, волна Рэлея, пенополистирол, портативный вибрационный источник

P. A. Dergach[1,2]✉, Ya. E. Begich[3], A. A. Belousov[1,2], A. I. Enikeev[3]

Development and testing of a methodology for evaluating the effectiveness of vibration barriers using a portable seismic wave source

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[3] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The work is devoted to the development of a methodology for the experimental study of the effectiveness of vertical wave barriers to protect buildings from man-made vibrations. The main idea of the technique is the vibrational transmission of barriers using a portable seismic wave source. At the same time, the monitoring system is designed in such a way that some of the seismometers record vibrations after passing through the barrier, and some through unchanged soil. After comparing the spectral amplitudes of the harmonic signals, the vibration suppression coefficient is calculated

at the specified frequencies. The methodology was tested on a specially created experimental site, where vibration barriers were installed from materials available on the Russian market: expanded clay, expanded and extruded polystyrene (EPS and XPS). The experiments were carried out in the frequency range from 1 to 450 Hz, corresponding to various sources of man-made vibrations. The average values of the vibration suppression coefficient were 4.5, 10, and 12.8 for expanded clay, EPS, and XPS, respectively.

Keywords: vibration protection, trench barrier, Rayleigh wave, polystyrene foam, portable vibration source

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост числа объектов высокотехнологичного и наукоемкого производства в процессе эксплуатации которых могут возникать серьезные проблемы, вызванные высоким уровнем техногенных вибраций. К таким объектам могут относяться предприятия связанные с производством микроэлектроники, передовых материалов, специализированных датчиков и высокоточных средств автоматизации для научно-исследовательских установок класса «мегасайенс», медицины и космической промышленности. Кроме того, потенциально чувствительными к вибрационным воздействиям объектами являются исторические здания и памятники архитектуры, расположенные в районах плотной городской застройки с развитой транспортной инфраструктурой. В этом случае высокий уровень техногенных вибраций может стать причиной нарушения целостности таких объектов. В связи с этим актуальной является задача защиты объектов, подверженным влиянию техногенных вибраций.

Основными источниками техногенных вибраций, как правило, являются: железнодорожный и автомобильный транспорт, различные промышленные установки (насосные и компрессорные станции), а также интенсивные строительные работы (в частности, процесс забивки свай). В мировой практике, для снижения уровня техногенных вибраций используются стационарные либо временные волновые барьеры различных конфигураций, представляющие из себя траншеи, заполненные вибропоглощающими материалами [1; 2]. Обычно такие вибрационные барьеры устанавливаются в непосредственной близости к источнику либо к объекту, нуждающемуся в виброзащите [3]. Однако универсальные рекомендации по их проектированию отсутствуют т.к. сильно зависят от состава и строения верхней части геологического разреза в конкретной местности. Описанные в актуальных на территории Российской Федерации сводах правил методики по вибрационной защите зданий [4; 5; 6], применяются на этапе проектирования, и не учитывают возможного появления новых источников высокоамплитудных вибраций в процессе эксплуатации объектов.

Исследование посвящено экспериментальному сопоставлению и оценке эффективности различных доступных на Российском рынке материалов, которые уже используются в мировой практике или потенциально могут быть использованы для виброзащиты. Упор сделан на разработку и апробацию методики оперативного определения эффективности вибрационных барьеров в широком частотном диапазоне, которая может в дальнейшем применяться и для других ти-

пов барьеров (например, горизонтальных, расположенных под дорожным покрытием).

Экспериментальная площадка

Экспериментальные исследования производились на территории геофизического полигона ИНГГ СО РАН, расположенного в Новосибирской области. С целью максимального приближения условий проведения эксперимента к реальным, было произведено строительство участка размером 33×3 м, имитирующего дорожное покрытие. Вертикальные барьеры монтировались поочередно с одной из сторон имитации дорожного покрытия. Монтаж производился в несколько этапов:

1. Рытье вертикальной траншеи с использованием траншеекопателя (длина 18 м, глубина 1.5 м, ширина 0.2 м);
2. Установка вибрационного барьера из XPS протяженностью 5 метров (переслаивание листов XPS толщиной 50 и 100 мм);
3. Отсыпка вибрационного барьера из керамзита с геотекстильной прослойкой протяженностью 5 метров;
4. Установка вибрационного барьера из EPS протяженностью 5 метров (переслаивание листов EPS толщиной 50 и 100 мм).

На рис. 1 продемонстрирован процесс монтажа вертикальных вибрационных барьеров.

Рис. 1. Процесс монтажа вертикальных вибрационных барьеров.

Такое взаимное расположение участка, имитирующего дорожное покрытие, и вертикальных вибрационных барьеров позволяет последовательно проводить экспериментальные исследования (в том числе повторные) с целью оценки эффективности вибрационных барьеров из различных материалов.

Методика измерений

Авторами предложена методика оценки коэффициента подавления вибраций на основании записей монохроматических сигналов на различных частотах, генерируемых портативным вибрационным источником поперечных волн [7]. Система наблюдений проектируется таким образом, чтобы сейсмометры располагались симметрично от источника вибраций, а сейсмические волны пересекали две области: при наличии и отсутствии вертикального барьера. На рис. 2 приведена схема измерений в рамках экспериментальных исследований. Серый прямоугольник – участок площадки, имитирующий дорожное покрытие, синими треугольниками обозначены местоположения сейсмометров, черными – местоположение вибрационного источника. Стрелкой показано направление вибрационного воздействия при помощи портативного вибрационного источника. Под «эталонным грунтом» подразумевается участок неизмененного грунта.

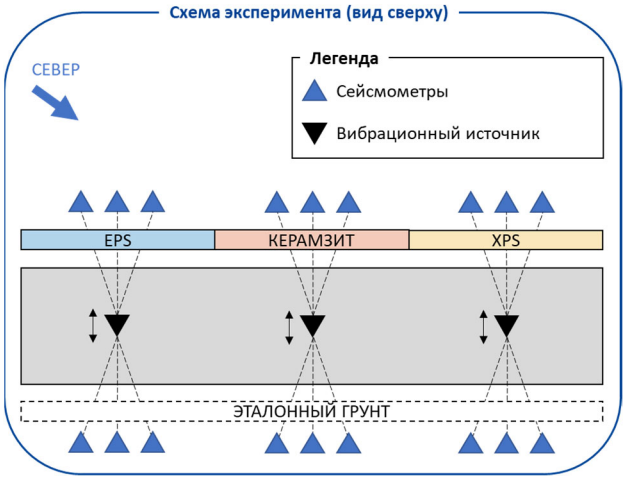


Рис. 2. Схема проведения экспериментальных исследований.

В отличие от методик, в рамках которых производятся и сопоставляются результаты измерений «до» и «после» рытья траншеи и монтажа вибрационного барьера [8; 9], предложенная схема наблюдений позволяет проводить повторные измерения, с учетом того, что свойства грунтов могут изменяться с течением времени. Такие изменения могут быть связаны с изменением влажности грунта, либо его сезонным промерзанием.

В качестве опорного сигнала, излучаемого виброисточником использовалась серия монохроматических сигналов (с постоянной частотой) в частотном диапазоне от 1 до 450 Гц длительностью 30 секунд каждый. Длительность паузы между монохроматическими сигналами составляла 2 секунды. В интервале от 1

до 10 Гц, шаг по частоте составлял 1 Гц; от 10 до 100 Гц – 5 Гц, от 100 до 450 Гц – 50 Гц.

На рис. 3 приведена исходная запись монохроматических воздействий, произведенная датчиками за вибрационным барьером из XPS и за участком с эталонным грунтом (по три датчика).

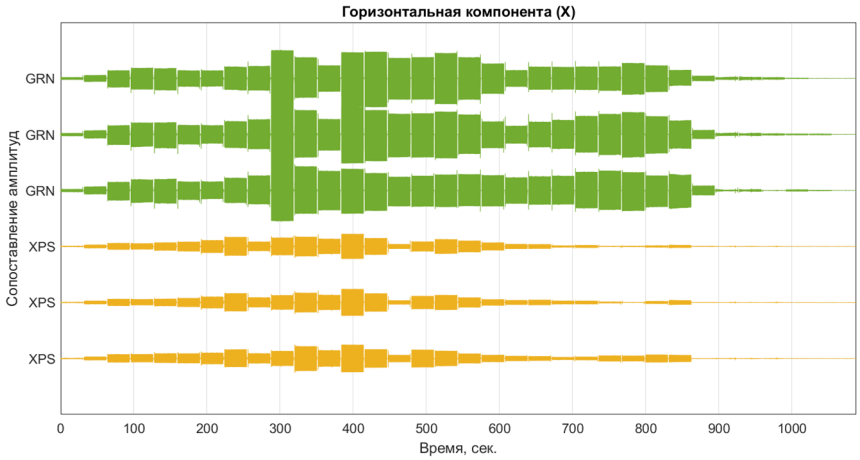


Рис. 3. Пример записи гармонических сигналов на различных частотах датчиками, расположенными за вибрационным барьером из XPS и за участком с эталонным грунтом (GRN).

Обработка экспериментальных записей производилась следующим образом. По данным встроенной в сейсмостанцию системы синхронизации отметки момента воздействия из непрерывных записей всех датчиков вырезались фрагменты, соответствующие воздействию на определенной частоте. Далее анализировались амплитудные спектры единовременных осредненных записей датчиков, находящихся за определенным вибрационным барьером и за участком с эталонным грунтом. В частности, сопоставлялись амплитуды спектральных пиков на определенных частотах.

В результате такого сопоставления амплитудных спектров для монохроматических сигналов во всем исследуемом частотном диапазоне, для каждого вибрационного барьера рассчитывалось распределение коэффициента подавления вибраций как отношение максимальных значений спектральных пиков для датчиков, находящихся за участком с эталонным грунтом и за определенным вибрационным барьером.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведено сопоставление коэффициентов подавления вибраций барьерами из различных материалов (керамзит, EPS и XPS) относительно эталонного грунта.

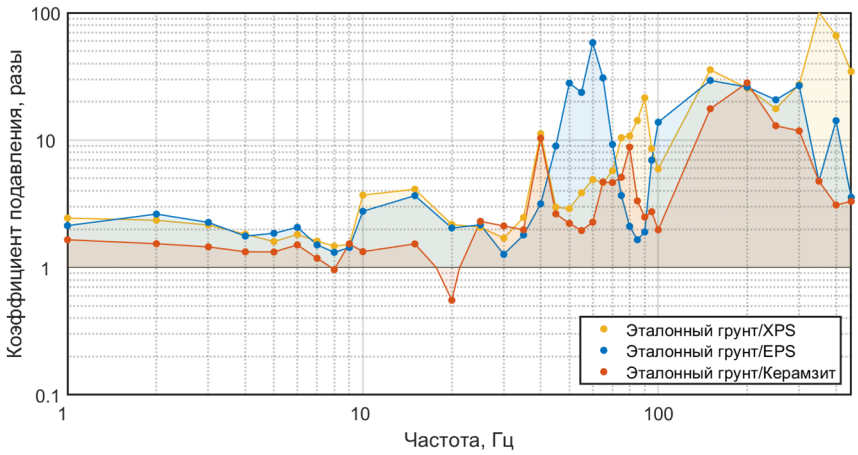


Рис. 4. Коэффициент подавления вибраций относительно эталонного грунта

Для получения количественной оценки произведено осреднение значений в трех частотных диапазонах: низкочастотном (до 10 Гц), среднечастотном (от 10 до 100 Гц) и высокочастотном (от 100 до 450 Гц). Полученные значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Осредненные значения коэффициента подавления вибраций в различных частотных диапазонах (разы)

Материал барьера	Частотный диапазон, Гц			Средний коэфф.
	1-10	10-100	100-450	
XPS	2.1	3.7	23.4	12.8
EPS	2	7.8	16.3	10
Керамзит	1.4	2.7	7	4.5

Как можно видеть из таблицы, во всем исследуемом частотном диапазоне коэффициент подавления вибраций для барьеров из XPS и EPS в несколько раз выше чем у барьера из керамзита. Амплитуда одиночных аномальных выбросов (например, на частотах 8 и 20 Гц) ставится под сомнение и скорее всего связана с неоднородностью исследуемой реальной среды.

Заключение

В результате исследования была предложена и экспериментально подтверждена методика оперативной диагностики и определения эффективности вертикальных вибрационных барьеров с использованием портативного источника сейсмических волн в режиме излучения серии монохроматических сигналов.

В ходе экспериментов была произведена оценка эффективности использования вертикальных вибрационных барьеров из различных материалов для задач виброизоляции зданий и инженерных сооружений от поверхностных волн, распространяющихся в грунтовом массиве. Осредненные значения коэффициента

подавления вибрационных колебаний во всём исследуемом частотном диапазоне составили 4.5, 10 и 12.8 раз для керамзита, EPS и XPS, соответственно. Полученные значения не противоречат результатам, опубликованным в исследованиях по схожей тематике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Murillo C., Thorel L., Caicedo B. Ground vibration isolation with geofoam barriers: Centrifuge modeling //Geotextiles and Geomembranes. – 2009. – Т. 27. – №. 6. – С. 423-434.
2. Sarkar A., Barman R., Bhowmik D. Numerical investigation on vibration screening using geofoam and sand–crumb rubber mixture infilled trench //International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. – 2021. – Т. 7. – №. 4. – С. 84.
3. Lyratzakis, A., Tsompanakis, Y., & Psarropoulos, P. N. (2021). Mitigation of vibrations in high-speed railway cuttings using expanded-polystyrene blocks. Transportation Geotechnics, 29, 100572.
4. СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков (с Изменением № 1), утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 03.12.2016 № 893/пр. // М.: Стандартинформ, 2017. 82 с.
5. СП 338.1325800 Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства, утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 05.02.2018 № 69/пр. // М.: Стандартинформ, 2017. 82 с.
6. СП 441.1325800.2019 Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования (с Изменением № 1), утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 22.01.2019 N 23/пр. // М.: Стандартинформ, 2019. 46 с.
7. Дергач П.А., Яблоков А.В., Полозов С.С., Зобнин Г.Ю., Дучков А.А. (2024) Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 69 (2), 237–250.
8. Ajel H. A., Al-Jubair H. S., Ali J. K. An experimental study on vibration isolation by open and in-filled trenches //Open Engineering. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 555-569.
9. Toygar O., Ulgen D., Fidan N. B. Experimental Study on Reutilization of Waste Rubber Chips with Sheetpiles as a Coupled-Wave Barrier to Reduce Ground-Borne Vibrations //Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2024. – Т. 12. – №. 7. – С. 8451-8463.

© П. А. Дергач, Я. Э. Бегич, А. А. Белоусов, А. И. Еникеев, 2025

УДК 550.34
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-190-195

Д. К. Дмитрачков[1]✉, М. И. Протасов[1]

Синхронная и акустическая инверсии, их преимущества и недостатки на реалистичных примерах

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

Аннотация. В настоящее время существует большое множество алгоритмов сейсмической инверсии, которые отличаются друг от друга по своей сложности и возможностям для определения параметров среды. Акустическая инверсия предлагает наиболее простой и надёжный подход для определения акустической жёсткости среды, в то время как синхронная сейсмическая инверсия, привлекая информацию о ненулевых углах падения волны, позволяет определить скорости продольной и поперечной волн и плотность в среде. Привлечение априорной информации необходимо для получения геологически обоснованного решения, чего можно добиться с помощью регуляризации. В данной работе проводится сравнение алгоритмов акустической и синхронной инверсии на реалистичных синтетических моделях с целью определения их областей применимости и выявления наилучших методов инверсии для различных ситуаций.

Ключевые слова: акустическая инверсия, синхронная инверсия, регуляризация

D. K. Dmitrachkov[1]✉, M. I. Protasov[1]

Simultaneous and acoustic inversions, their advantages and drawbacks on realistic examples

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

Abstract. Currently there are many algorithms for seismic inversion which differ from each other in their complexity and capabilities for determining the parameters of the medium. Acoustic inversion offers the simplest and most reliable approach for determining the acoustic impedance of the medium, while simultaneous seismic inversion makes it possible to determine the speeds of longitudinal and transverse waves and the density in the medium by using the information of non-zero angles of wave incidence. Making use of an a priori information is necessary to obtain a geologically sound solution which can be achieved through regularization. In this paper acoustic and synchronous inversion algorithms are compared on realistic synthetic models in order to determine their areas of applicability and identify the best inversion methods for different situations.

Keywords: acoustic inversion, simultaneous inversion, regularization

Введение

Для прогнозирования коллекторских свойств пластов применяется сейсмическая инверсия. Алгоритмы сейсмической инверсии обычно принимают на вход результат временной обработки, а результатом работы алгоритма сейсмической

инверсии как правило является детальная модель упругих свойств среды [1, 2]. В основе сейсмической инверсии лежит одномерная свёрточная модель сейсмической трассы, согласно которой однократно-отражённое волновое поле во временной области представляется в виде свёртки трассы коэффициентов отражения с зондирующим импульсом. Акустическая сеймическая инверсия работает с данными после суммирования и позволяет восстанавливать детальную модель акустического импеданса среды. Синхронная инверсия работает с данными до суммирования и, благодаря сейсмическим трассам, соответствующим ненулевым углам падения плоской продольной волны, способна восстанавливать отдельно скорости продольных и поперечных волн и плотность в среде. Результат обращения в случае синхронной инверсии зависит от параметризации пространства искомых моделей. Так, например, известно, что наиболее устойчиво восстанавливаются импедансы продольной и поперечной волн [3], при этом восстановить плотность не представляется возможным.

Учёт априорной информации является ключом к получению геологически обоснованной модели среды. Так, требование гладкости модели приводит к инверсии, основанной на модели, требующей решения линейной задачи для восстановления параметров среды. В то же время, если требуется найти модель с ярковыраженными пластами большой мощности, то используется инверсия редких импульсов, которая уже приводит к нелинейной задаче. Большая часть априорной информации учитывается в решении добавлением к целевой функции всё новых регуляризующих слагаемых. Это приводит к необходимости оценки разумных значений параметров регуляризации для того, чтобы обеспечить устойчивость результата обращения вместе с вовлечением априорной информации в решение. В данной работе для подбора параметров регуляризации реализован подход на основе обобщённой L-кривой [4] и адаптирован согласно специфике задачи сейсмической инверсии. Представлен алгоритм синхронной сейсмической инверсии на основе точного решения уравнений Цёппритца. Проведено сравнение алгоритмов сейсмической инверсии на реалистичных синтетических моделях Marmousi и Восточной Сибири.

Прямое моделирование

Связь параметров среды с её отражающей способностью устанавливается системой уравнений Цёппритца. Для ненулевого угла падения для определения коэффициента отражения продольной волны требуется решать систему линейных уравнений размера 4x4, однако для нулевого угла падения волны можно выписать явную зависимость коэффициента отражения от акустического импеданса. То, что для ненулевого угла падения зависимость коэффициента отражения от упругих параметров среды даётся неявной и нелинейной формулой, повлекло за собой развитие многих аппроксимаций для коэффициента отражения, которые дают возможность по явным формулам вычислять значение линеаризованного коэффициента отражения в зависимости от контраста упругих свойств среды.

В основе аппроксимаций лежит предположение о том, что контраст свойств среды от слоя к слою мал, и что рассматриваются небольшие углы падения. Дей-

ствительно, при выполнении этих предположений аппроксимации оказываются близки к истинным значениям коэффициента отражения, полученным из системы уравнений Цёппритца (рис. 1а, б). Однако если искомая модель среды обладает высокими контрастами свойств, то даже для небольших углов падения отличие линеаризованного коэффициента отражения от истинного может быть значительным (рис. 1в, г). Также в большинстве аппроксимаций требуется априорная информация в виде гладкого тренда упругих параметров среды.

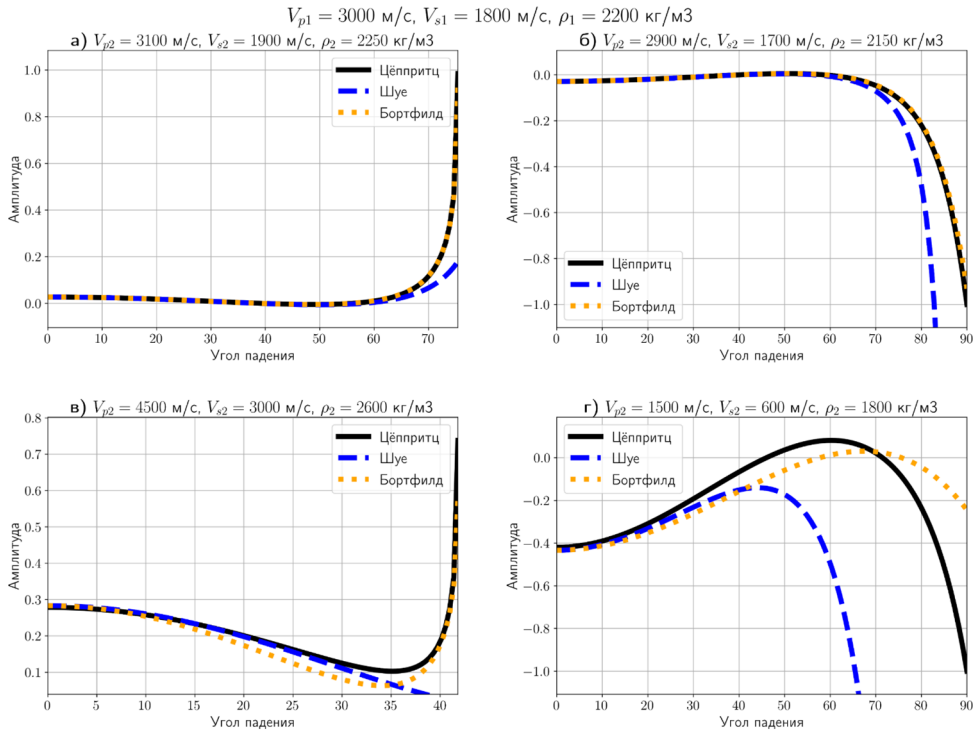


Рис. 1. Сравнение аппроксимаций Шуе и Бортфилда для коэффициента отражения с истинными коэффициентами отражения, рассчитанными по системе уравнений Цёппритца, для различных значений контрастов свойств между пластами 1 и 2

Обратная задача

Решение обратной задачи заключается в минимизации целевого функционала, содержащего норму невязки наблюдённых и синтетических сейсмических трасс, а также регуляризующие слагаемые для учёта априорной информации. В случае, когда оператор прямой задачи и регуляризующие операторы линейны, а в целевом функционале участвует только 2-норма, то решение обратной задачи даётся решением СЛАУ. Этот случай имеет место быть, например, в инверсии, основанной на модели, когда в качестве оператора прямой задачи используется некоторая линеаризация коэффициента отражения, а регуляризация накладывает на решение требование гладкости с помощью стабилизаторов в 2-норме. В противном случае решение обратной задачи сводится к минимизации некоторой нелинейной функции многих переменных. Наиболее подходящими в этом случае

являются градиентные методы оптимизации, поскольку для сейсмической инверсии расчёт градиента целевого функционала по вычислительным затратам сравним с расчётом значения целевого функционала.

Использование точного решения уравнений Цёппритца в качестве оператора прямой задачи качественным образом повлияет на результат обращения, поскольку это расширило бы границы применимости синхронной инверсии, допуская корректное восстановление сред с большими контрастами свойств и использование сеймических трасс, соответствующих большим углам падения, для снижения эффекта неединственности решения обратной задачи и повышения устойчивости определения решения. Для расчёта коэффициентов отражения по системе уравнений Цёппритца в оптимизационном процессе потребуется решать СЛАУ размера 4x4 для каждой границы, а для расчёта производных оператора прямой задачи при использовании градиентного метода оптимизации предлагается использовать технику производной неявной функции. Дифференцируя систему уравнений Цёппритца по каждому параметру модели, приходим к СЛАУ для определения производных коэффициента отражения по параметрам модели, причём матрица этой системы совпадает с матрицей исходной системы уравнений Цёппритца. Для обращения матриц размерности 4x4 существуют эффективные численные формулы обращения напрямую, что позволяет сохранить вычислительную эффективность алгоритма. Использование точного решения уравнений Цёппритца при решении обратной задачи также избавляет от необходимости привлечения гладкого тренда изменения упругих параметров, участвующего в аппроксимациях точного решения, а также от зависимости решения от этого тренда. Для акустической инверсии, имеющей дело с сейсмическими трассами для нулевого угла падения, использовать точное решение не составляет труда ввиду наличия явной зависимости между коэффициентом отражения и акустической жесткостью, при этом переход от одной величины к другой осуществляется по рекуррентным соотношениям.

В результате акустической сейсмической инверсии можно получить трассу коэффициентов отражения или трассу акустических импедансов, а отделить в импедансе скорость от плотности не представляется возможным. В случае же синхронной инверсии имеется возможность выбрать комбинацию упругих параметров среды, которые будут восстановлены в результате инверсии. Известно, что наиболее устойчиво обращаются импедансы [3], что также удаётся получить для синхронной инверсии с использованием точного решения уравнений Цёппритца в параметризации модели через импедансы и плотность (рис. 2). Отметим, что способ расчёта производных коэффициента отражения остаётся прежним.

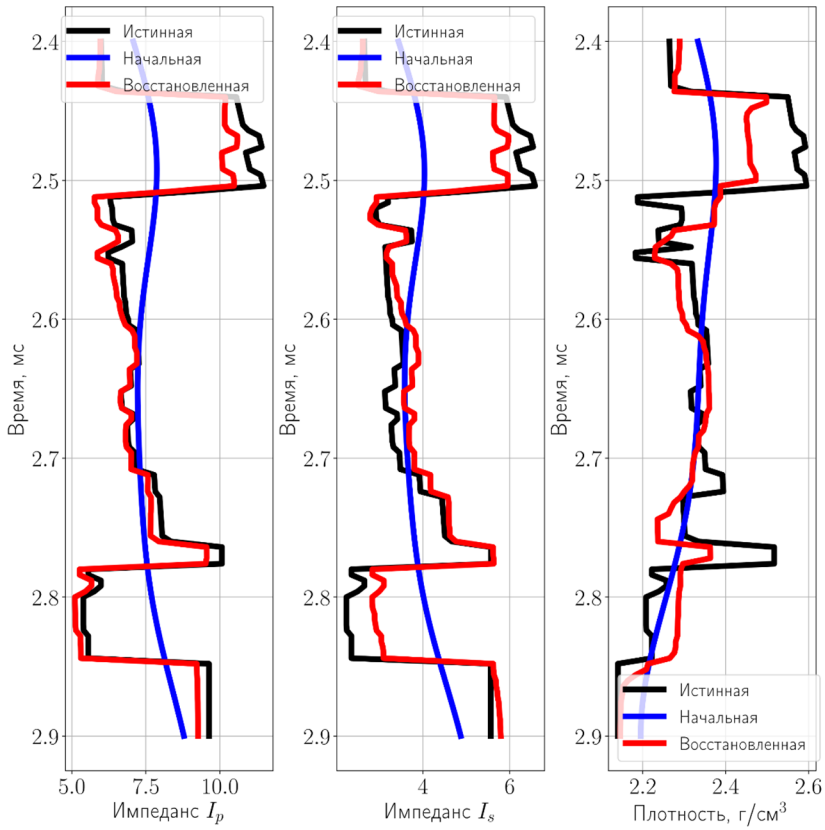


Рис. 2. Результат синхронной инверсии на основе точного решения уравнений Цёппритца в параметризации через импедансы и плотность

Обсуждение и заключение

Использование алгоритмов сейсмической инверсии, приводящих к необходимости решения нелинейной задачи, позволяет найти более физичное решение, в то время как более простые алгоритмы инверсии, приводящие к линейной задаче, обеспечивают более быстрое и устойчивое получение решения. При необходимости привлечения априорной информации может применяться регуляризация, которая может сделать минимизацию целевого функционала эквивалентной решению нелинейной задачи. Это намекает на важность разработки более совершенных алгоритмов сейсмической инверсии, которые хоть и приводили бы к решению нелинейной задачи, но позволяли бы решать её так же быстро и устойчиво, как линейную.

Применение линеаризаций и дополнительных предположений о среде приводит к трудностям при обращении в тех областях, где данные предположения нарушаются. Использование точного оператора прямой задачи позволяет расширить область применимости инверсии ценой усложнения процесса решения и несколько больших вычислительных затрат.

Имеются предпосылки к исследованию иных параметризаций модели в задаче сейсмической инверсии для снижения общего числа неизвестных и обеспечения возможности быстрого и устойчивого получения физически обоснованного решения, включающего в себя разнообразную априорную информацию.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-71-20002-П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1: Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 4. – С. 3–16.

2. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods: Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – 80–101.

3. Silvestrov I., Tcheverda V. SVD analysis in application to full waveform inversion of multicomponent seismic data: Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – Vol. 290, No. 1. – P. 012014.

4. Belge M., Kilmer M. E., Miller, E. L. Efficient Determination of Multiple Regularization Parameters in a Generalized L-Curve Framework: Inverse Problems. – 2002. – № 18. – 1161– 1183.

© Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов, 2025

УДК 550.3
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-196-200

А. А. Землянскова[1,3]✉, В. В. Оленченко[2], О. М. Макарьева[1,3], Е. А. Ахрамеев[4]

Строение наледи на ручье Михалыч вблизи инженерных сооружений по данным георадиолокации (Магаданская область)

[1] Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация
[2] Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[4] МАОУ "Гимназия № 30", г. Магадан, Российская Федерация
e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Аннотация. Наледи часто вызывают деформацию инженерных сооружений, поэтому их исследования с целью выявление факторов и динамики формирования являются акутальной задачей. Объект исследования – наледь на руч. Михалыч – расположен на федеральной трассе Колыма в 30 км от г. Магадана. Целью геофизических исследований 2025 г. являлось изучение строения наледи, выявление границ мёрзлых и талых пород, каналов разгрузки подземных вод и оценка распределения толщины льда. Проведены георадиолокационные зондирования с антенным блоком центральной частоты 250 и 700 МГц. Установлено, что к 20 феврвля 2025 г. максимальная толщина льда составила 1.72 м при среднем значении 0.84 м. С помощью георадара выявлены каналы разгрузки подземных вод из аллювия под лёд, расположенные в руслах проток. Толщина наледи сокращается, а глубина сезонного промерзания увеличивается с удалением от моста.

Ключевые слова: наледь, криолитозона, георадиолокационное зондирование, подземные воды, Магаданская область

A. A. Zemlianskova[1,3]✉, V. V. Olenchenko[2], O. M. Makarieva[1,3], E. A. Akhrameev[4]

Aufeis shape on Mikhalych creek near engineering structures according to ground penetrating radar data (Magadan region)

[1] North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation
[2] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
[3] Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation
[4] MAEI "Gymnasium Nº 30", Magadan, Russian Federation
e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Abstract. Aufeis forming near engineering structures causes annual damage to them. One example is the aufeis on the Mikhalych creek, as a result of which a detour was additionally equipped on the Kolyma highway. It is necessary to understand the causes of aufeis formation in order to further regulate its characteristics. The purpose of the geophysical research in 2025 was to study the structure of the aufeis, identify the boundaries of frozen and thawed rocks, groundwater discharge channels and assess the distribution of ice thickness. Ground penetrating radar sounding with an antenna unit of the central frequency of 250 and 700 MHz were carried out. It was found that by February 20, 2025, the maximum ice thickness was 1.72 m with an average value of 0.84 m. With the help of ground-penetrating radar, channels for unloading groundwater from alluvium under ice located in the channel beds have been identified. The thickness of the ice is decreasing, and the depth of seasonal freezing increases with distance from the bridge.

Keywords: aufeis, cryosphere, ground penetrating radar sounding, groundwater, Magadan region

Введение

В Магаданской области формируется более 2500 наледей, размерами от 0.1 км^2, которые можно обнаружить на спутниковых снимках, оценить их размеры и проследить динамику роста и разрушения льда [1]. Однако, наледи меньших размеров изучить можно только во время полевых работ. Особо опасны наледи, которые выходят на дорогу или образуются под мостами, закупоривают водопропускные трубы [2]. Ежегодное формирование-разрушение наледей приводит к износу мостовых опор. Так, на руч. Михалыч Магаданской области осенью 2023 г. мост был закрыт и сделан объезд, что привело к увеличению стоимости грузоперевозок по федереальной трассе «Колыма» [3]. На ручье Потерянный (пос. Сокол Магаданской обл.) наледь вышла из русла реки и подтопила ближайшие здания и сооружения, а также оказывает давление на трубопровод.

Причиной образования наледей у инженерных сооружений является нарушение естественных условий водно-теплового режима водных объектов, приводящее к затрудненному движению воды в русле и подземных горизонтах в осенне-зимний период [2; 4]. Наблюдения за динамикой формирования и разрушения наледей проводятся локально, в нескольких точках, а информация о гидрогеологических услових объекта чаще всего отсутсвует. Для оценки распределения толщины льда и характеристик мерзлоты по площади используют геофизические методы исследования, в частности георадиолокационную съемку. Она позволяет установить также места разгрузки воды под лед, глубину промерзания и оттаивания пород, что может быть использовано при разработке рекомендаций по борьбе с наледями.

Основным объектом исследования является наледь на ручье Михалыч (федеральная трасса Колыма, Магаданская область).

Целью работы является анализ строения наледи вблизи мостового перехода и на его удалении с помощью метода георадиолокации.

Методы и материалы

Для оценки влияния мощности слоя сезонного промерзания на наледеобразовательный процесс и изучения строения наледи на участке ручья Михалыч проведены георадиолокационные исследования 23 февраля и 10 марта 2025 г. Георадар «ОКО-3», работающий на центральных частотах 250 и 700 МГц, перемещался волоком в контакт с поверхностью льда. Управление работой георадара, визуализация данных измерений и запись полевых материалов осуществлялось в персональном компьютере в специализированной программе «GeoScan32».

Количество профилей составило 14 штук, длиной от 10 до 72 м. Они были проложены паралельно друг друга на некотором удалении от моста, а также несколько профилей между мостом и насыпью, возведенной в 2023 г., и по руслу ручья (длина профиля 16 м).

Для наблюдения за сезонной динамикой мощности наледи, формирующейся под мостовым переходом через руч. Михалыч, были установлены веха и фотока-

мера SEELOCK с автоматизированной фотосъемкой два раза в сутки в период с 10:00 до 14:00.

Результаты

Исследование сезонной динамики толщины наледи, формирующейся под мостовым переходом через руч. Михалыч показало, что в 2024 г. процесс наледеобразования начался в декабре после того, как на ручье образовался речной лед. В начале января 2025 г. наледь достигла тощины 65 см, к 5 января 90 см, а к 15 января – 110 см. В начале февраля дорожными службами в 3 м от моста была установлена противоналедная ограда, из-за чего оценка динамики формирования наледи под мостом несколько занижена. Интенсивный прирост льда отмечался в период с 8 по 13 февраля, средняя скорость составила 10 см/сут. На день проведения георадиолокационной съемки (23 февраля 2025 г.) толщина льда после ограды составила 180 см, а до нее – 205 см. Во время установки ограды в результате расчистки дорожного полотна вблизи моста был сформирован снежный сугроб.

Неравномерное формирование наледи свидетельствует о том, что её объем увеличивался за счет подземных вод, разгружающихся под воздействием криогенного напора. Разгрузка часто происходит вблизи зарослей чозении, которые являются биоиндикатором талика. Можно сделать вывод о том, что наледь на ручье Михалыч имеет смешанный генезис.

На радараграммах, полученных с помощью антенны с частой 700 МГц, отчетливо выделяется подошва наледи, а также видна послойная структура льда. Антенна с частотой 250 МГц позволила дополнительно определить глубину сезонного промерзания и выделить участки, на которых происходит разгрузка подземных вод (рис. 1).

По состоянию на 23 февраля по данным радиолокации средняя толщина наледи на участке работ составила 84 см, а максимальная – 172 см (под мостом). Глубина сезонного промерзания в среднем была 83 см, а максимальная – 208 см. Отмечаются участки сливающегося типа мерзлоты, в результате которого создаются замкнутые системы, препятствующие прохождению воды, как следствие – формируется наледь.

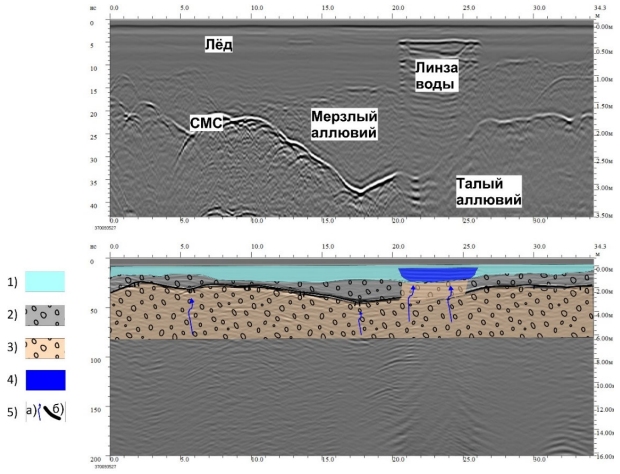


Рис. 1. Фрагмент радарограммы по профилю №3 через долину руч. Михалыч в 20 м выше моста с использованием разных антенн 23 февраля 2025 г.: сверху

700 МГц, снизу 250 МГц с интерпретацией данных: 1 – лёд; 2 – аллювий мёрзлый; 3 – аллювий талый; 4 – вода; 5 – (а) восходящие каналы фильтрации в аллювии, (б) граница сезонного промерзания

В марте была выполнена съемка по трем профилям. Результаты интерпретации радарограмм показали, что средняя толщина льда составила 130 см, а максимальная – 203 см, глубина сезонного промерзания достигла 213 см. При удалении от моста толщина льда уменьшается с 2 до 1 м и возрастает в зоне разгрузки воды, глубина сезонномерзлого слоя ведет себя обратным образом (рис. 2).

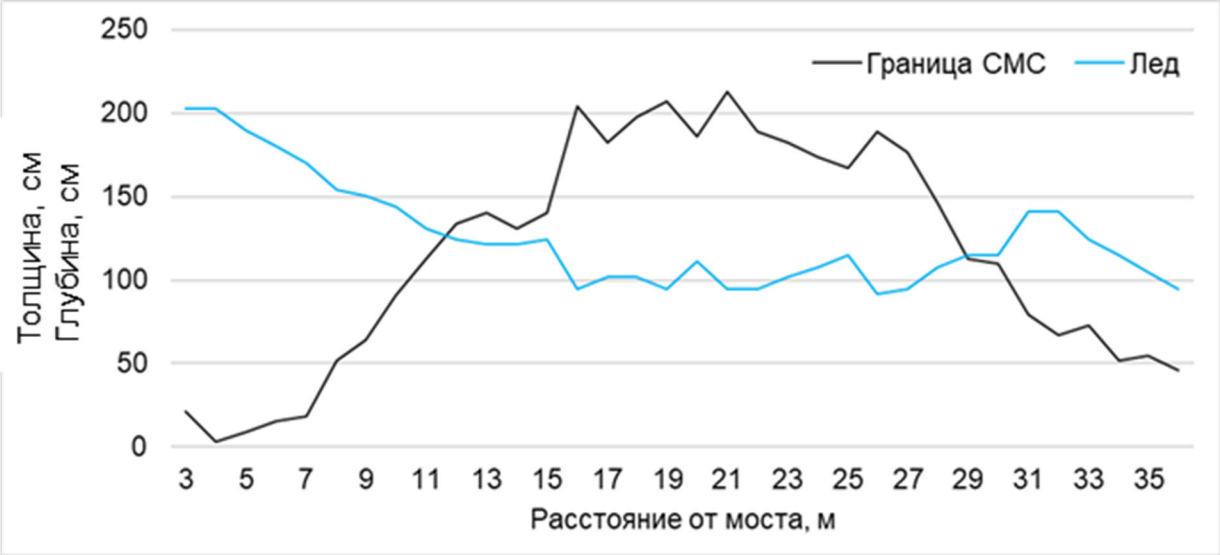


Рис. 2. Изменение характеристик наледи и глубины сезонномерзлого слоя по данным радиолокации, 10 марта 2025 г.

Заключение

В результате современных исследований, выполненных вблизи инженерных сооружений, установлено, что в 2025 г. наледь на ручье Михалыч имела смешанный тип питания. Толщина льда уменьшается при удалении от моста, а глубина сезонномерзлого слоя увеличивается, максимальные значения характеристик составили 203 и 213 см, соответственно. На радарограммах интенсивными гиперболами дифракции выделяются участки разгрузки подземных вод из аллювия под лёд. Строение льда сложное с участками линз воды.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда и Правительства Магаданской области № 23-17-20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород». Для геофизических работ использовалось оборудование Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620332. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Колыма: опубл. 26.02.2021 / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова, А.А. Землянскова, В.Р. Алексеев; заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

2. Рекомендации по изысканиям, проектированию и строительству малых искусственных сооружений на водотоках с процессами наледеобразования / М-во трансп. строительства СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. строительства «ЦНИИС». Москва, 1968, 67 с.

3. Подрядчика для ремонта моста через ручей Михалыч определили в Магаданской области [Электронный ресурс] // Магаданская правда [сайт]: URL: https://magadanpravda.ru (дата обращения 15.09.2024).

4. СП 11-105-97. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, 57 с.

© А. А. Землянскова, В. В. Оленченко, О. М. Макарьева, Е. А. Ахрамеев, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-201-205

С. А. Казанцев[1]✉

Метод динамической автокалибровки термодатчиков

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

Аннотация. Измерение величины теплового потока через дно водоемов требует особо высокой точности определения значения геотермического градиента в илах. Эта точность ограничивается возможностями лабораторной калибровки термодатчиков. Предложен способ автоматической калибровки, позволяющий в 10 раз увеличить точность измерения температурного градиента в донных осадках.

Ключевые слова: датчик температуры, градиент, точность калибровки, донные осадки

S. A. Kazantsev[1]✉

Method of dynamic autocalibration of temperature sensors

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

Abstract. Measuring the value of heat flow through the bottom of water bodies requires particularly high accuracy in determining the value of the geothermal gradient in silts. This accuracy is limited by the capabilities of laboratory calibration of temperature sensors. A method of automatic calibration is proposed that allows increasing the accuracy of measuring the temperature gradient in bottom sediments by 10 times.

Keywords: temperature sensor, gradient, calibration accuracy, bottom sediments

Тепловой поток (q) является одной из важнейших характеристик энергетического состояния земной коры. В настоящее время широкое распространение получили методы измерения параметров теплового поля Земли через дно глубоких водоемов, где термический режим донных осадков определяется исключительно глубинным тепловым потоком. Здесь рассмотрим методические особенности измерения температурного градиента в донных осадках глубоких водоёмов.

Как правило, тепловой поток вычисляется по формуле:

$$q = \lambda \times g,$$

где g – результаты раздельных измерений геотермического градиента; λ – коэффициент теплопроводности донных илов.

Теплопроводность донных осадков можно определить несколькими способами, например, вычислить по весовому или процентному содержанию влаги в

образцах [1] или измерить теплопроводность поднятых образцов в лаборатории на борту судна. Современное оборудование позволяет измерять теплопроводность донных илов и в условиях их естественного залегания [2].

Геотермический градиент измеряется специальным прибором – термоградиентографом [3,4]. К точности измерения градиента температур в осадках, в данном случае, предъявляются особые требования.

Наибольшую чувствительность по температуре имеют полупроводниковые терморезисторы [5]. Их сопротивление изменяется на 4% от номинала при изменении температуры на один градус. Однако при наивысшей чувствительности, термисторам присущ определенный недостаток: они имеют нелинейные и практически индивидуальные характеристики зависимости сопротивления от температуры.

Отсюда высокоточное измерение температурного градиента в донных осадках водоемов осложняется возможностями градуировки полупроводниковых термодатчиков. В подавляющем большинстве случаев лабораторная калибровка термисторов по абсолютной температуре возможна не точнее 0,01°С. Это определяется использованием при калибровке ртутных термометров ТР-1 с минимальным делением шкалы в 0,01°С. Таким образом, точность по измерению абсолютной температуры не может превышать точности калибровки термодатчиков. Но при этом возможности современной измерительной аппаратуры [6] позволяют фиксировать изменения температуры полупроводникового датчика до значений в 0,001°С и выше.

При измерении температурного градиента в донных илах водоемов такая разрешающая способность совершенно необходима. По сути нам необходимо измерить разницу температуры между двух или нескольких датчиков находящихся на разной глубине в донных осадках. Изменение температуры каждого из датчиков современная аппаратура позволяет отследить с разрешением до 0,0001-0,0003°С. Но разница температуры между двумя или несколькими отдельными датчиками определяется возможностями калибровки каждого из них и это ограничение составляет 0,01°С.

Метод динамической калибровки направлен на приведение значений измеренных температур датчиков, физически находящихся в равных для них температурных условиях, к одному определенному значению.

Экспериментальные геотермические исследования в таких глубоких водоемах как Черное море [7,8] и Байкал [9] выявили, что на определенных глубинах существует мощные водяные толщи практически изотермичные по глубине. В момент нахождения измерительного зонда в таком слое воды температура всех датчиков, размещенных на нем, физически идентична.

Предположим, что при регистрации температуры датчиков с разрешением доступной калибровки в таком слое воды получили в результате по всем датчикам одинаковые показания – Т1 (табл. 1).

Таблица 1

Температура датчиков

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7
Т1	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72
Т2	4,720	4,728	4,727	4,729	4,727	4,724	4,722
Поправка	0,002	-0,006	-0,005	-0,007	-0,005	-0,002	0
Т3	4,722	4,722	4,722	4,722	4,722	4,722	4,722

Если же регистрировать измеряемые параметры, используя возможности аппаратуры с точностью до 0,001 доли градуса, получим расхождение показаний начиная с третьего знака после запятой – Т2. Учитывая, что физическая температура всех датчиков в этот момент идентична, рассчитаем поправки для каждого датчика. Для вычисления поправок выберем датчик номер 7 условно базовым и определим температуру всех датчиков равной температуре датчика № 7. Разницу в показаниях результатов измерения определяем, как поправку (табл. 1). После введения поправки температура всех датчиков будет регистрироваться совпадающей – Т3.

С учетом этой поправки измерение температурного градиента в донных илах, а по сути относительной разности температур между отдельными датчиками, можно определить с точность в 10 раз превышающей точность калибровки по абсолютным значениям температуры.

Технический процесс динамической автокалибровки происходит следующим образом. Программы калибровки и расчета поправок записываются в память микроконтроллера. При включении измерительного зонда сразу начинается процесс измерения температуры датчиков и идет запись результатов измерений в память устройства. При спуске зонда на определенной, наперед заданной, глубине сигнал с датчика давления включает процесс вычисления поправки. При этом частота измерения температуры увеличивается до 10 раз в секунду. Глубина включения автокалибровки определяется температурным разрезом водной толщи конкретного водоема заранее. В течении определенного времени поправка для каждого из датчиков вычисляется, усредняется и записывается в оперативную память (ОЗУ) устройства. С этого момента все результаты измерений температуры датчиков записываются в память устройства с учетом этой поправки. После внедрения зонда в осадки процесс измерения температуры датчиков, находящихся на разной глубине в осадках, фиксируется и записывается в память устройства уже с поправками.

После подъема и выключения зонда поправки обнуляются. Это обусловлено тем, что в разных участках водоема могут быть различные температурные условия. Кроме того, обновление поправок при каждом зондировании позволяет учесть как возможную нестабильность, так и вероятное старение датчиков.

Программа автокалибровки предусмотрена для измерителя последней модификации [10]. Измеритель состоит из герметичного контейнера с цифровым регистратором, металлической заостренной штанги, системы термодатчиков,

расположенной в тонкой трубке, вынесенной за пределы штанги на расстояние 4-5 см и с системой из 7-ми датчиков расположенной в полутораметровой трубке с шагом 25 см. Частота опроса во время измерений составляла 1 раз в секунду, что позволяло достаточно детально отслеживать процесс стабилизации температурного режима зонда после внедрения его в осадки.

Для пояснения работы метода и наглядности в качестве примера приведены реальные графики измерения температур при спуске № 105 на озере Байкал в 2021 году [11] (рис. 1). Хотя в этих работах на Байкале в 2021 году метод автокалибровки не был применен на практике ввиду малых глубин и практически отсутствующего изотермичного слоя воды.

Обработка была проведена в лаборатории на реальных термограммах. На графиках, на участке времен измерений с 500 по 600 секунд, вручную сделана врезка температур, вычисленных с поправкой.

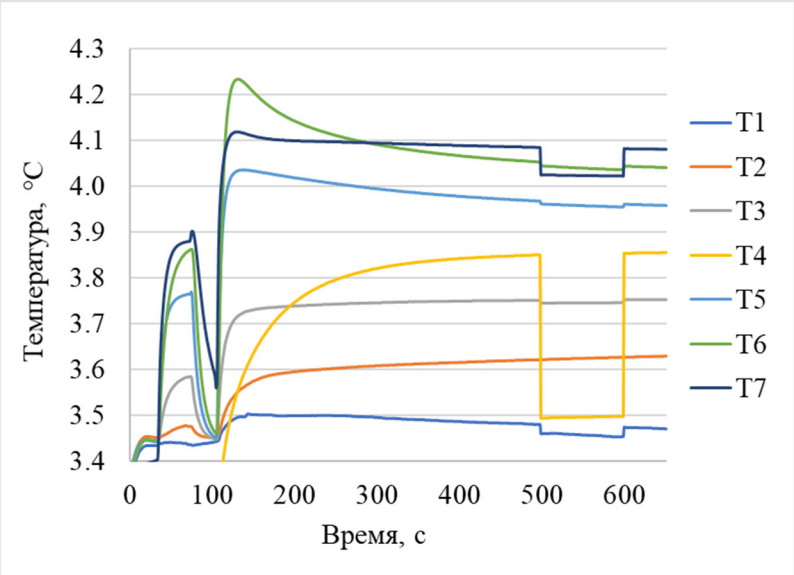


Рис.1. Температура воды и осадков точке №105, оз. Байкал

Расчет поправок, также вручную, произведен во временном интервале с 20-й по 30-ю секунду измерений Т в воде. Окончательное внедрения зонда в осадке произошло на 104-й секунде измерений. По графику так же можно сделать вывод, что датчик Т4 неисправен и его показания не учитываются. В реальных условиях поправка будет учитываться в измерениях сразу после ее вычисления и до выключения регистратора.

Таким образом, выполнив такую автокалибровку, получаем возможность определить геотермический градиент в донных осадках, то есть разницу температур между отдельными датчиками, с разрешением, приближенном к возможностям современной аппаратуры, и на порядок большим, чем возможная точность лабораторной градуировки датчиков по измерению ими абсолютных значений температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bullard E.C., Day A. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean // Geophysical Journal International. – 1961. – Vol. 4. – P. 282-291.

2. Казанцев С.А., Дучков А.А. Измерения теплопроводности донных осадков "in situ" автономными зондами. Тепловое поле Земли и методы его изучения: Сб. научн. Трудов. – М.: Изд-во РУДН, 1997. – С. 153-157.

3. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратурное обеспечение высокоточного температурного мониторинга // Геофизические технологии. – 2018. – № 3. – С. 39-47.

4. Казанцев С. А., Дучков А. Д. Автономная аппаратура для геотермических исследований в озерах. В кн.: Применение геотермии в региональных и поисково-разведочных исследованиях. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983.

5. Шефтель И.Т. Терморезисторы. – М.: Наука, 1973. – 415с.

6. Дмитриенко А. Г. Пискаев К. Ю., Гудков К. В., Тюрин М. В. Методы совершенствования метрологических характеристик ΣΔ-АЦП // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2024. – № 3. – С. 5-16.

7. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток впадины Черного моря // Геофизические поля Атлантического океана. – М.: Наука, 1988. – С. 121-130.

8. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток через дно западной части Черного моря // Геология и геофизика. – 1985. – Т. 26. – № 8. – С. 113-123.

9. Голубев В.А. Геотермия Байкала. – Новосибирск: Наука, 1982. – 150с.

10. Казанцев С.А., Кальяк А.А. Устройство для температурного мониторинга. Патент на полезную модель № 231782. 2025 г.

11. Аюнов Д.Е., Кальяк А.А., Казанцев С.А. Выявление аномалий теплового режима в придонном слое осадков. – XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направление и технологии поиска, разведки и разработки месторождения полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. –Т. 2. – Вып. 2. – С. 25-30.

© С. А. Казанцев, 2025

УДК 553.9
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-206-214

В. А. Какуля[1], *М. Н. Балдин*[1]✉

Полевая градуировка комплекса «ЭХО» для задач геохимической съемки

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

Аннотация. В настоящей работе представлена методика полевой градуировки хроматографического комплекса ЭХО для задач поверхностной геохимической съемки по газам почвенного покрова. Изложен порядок приготовления парофазного источника следовых концентраций толуола (C_7H_8). Подробно описан процесс градуировки, результат которой заключается в определении градуировочных откликов «*Ч*» (концентрация на единицу высоты или площади пика) аренов бензольного ряда. Данная работа является прямым руководством по проведению текущей поверки газового хроматографа ЭХО-В-ФИД в полевых условиях, где подробно и пошагово изложены все аналитические процедуры и манипуляции, которые должен проделать специалист перед началом измерений. Определена совокупная ошибка проведения градуировки, а также рассчитаны погрешности на каждом этапе аналитических процедур.

Ключевые слова: полевая градуировка, парофазный источник, следовые концентрации толуола, геохимическая съемка по аренам

V. A. Kakulya[1], *M. N. Baldin*[1]✉

The Field Calibration of ECHO Complex for Geochemical Survey Tasks

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

Abstract. The main idea of the article is the methodology of field calibration of the ECHO chromatographic complex for the tasks of surface geochemical survey on soil cover gases. The text gives valuable information on the procedure for preparation of a vapor-phase source of trace concentrations of toluene (C_7H_8). The calibration process is meticulously delineated, culminating in the determination of calibration responses «*Ч*» (concentration per unit of peak height or area) of benzene series arenes. This work is a direct guide to the contemporary verification of the gas chromatograph ECHO-V-PID in the field. It meticulously delineates the analytical procedures and manipulations that must be executed by the specialist prior to the initiation of measurements. The cumulative error of calibration is determined, as well as the errors that occur at each stage of the analytical procedures.

Keywords: field calibration, vapor-phase source, trace concentrations of toluene, geochemical survey on arenas

Введение

Полевая геохимическая съемка проводится, как на начальном этапе поисковых работ для оценки перспективности исследуемой площади на нефть и газ, так и на заключительном этапе поисково-разведочных работ для оконтуривания

залежи, уточнения мест закладки разведочных и эксплуатационных скважин. Представленная в настоящей статье методика градуировки разработана в рамках развития геохимической съемки по таким аренам бензольного ряда как: бензол (C_6H_6), толуол (C_7H_8), и ксилолы (C_8H_{10}). Источником аренов, в отсутствии техногенного фактора, является преимущественно газонефтяная залежь. Помимо этого, скорость биодеградации аренов ниже, чем у алканов [1], а значит отобранные пробы аренов имеют бóльшую сохранность. Применение пассивного концентрирования и полевого портативного аналитического оборудования ЭХО-В-ФИД, в свою очередь, позволяет получать информацию о проявлениях геохимических полей еще на этапе полевых работ, что значительно сокращает время съемки.

Для обеспечения воспроизводимости и повышения информативности результатов съемки в полевых условиях необходимо ежедневно перед началом работы с ГХ проводить его градуировку, т.е. «соотносить» измеряемые значения к эталону с известной концентрацией. Градуировка позволяет сопоставлять результаты измерений, полученные в различное время.

Существуют различные типы градуировочных эталонов (стандартов) и методик: хромато-мембранное генерирование [2], микропотоки из полимерных ампул [3]; хромато-десорбционные методы получения смесей [4], а также парофазные источники газовых смесей [5]. Методы [2 - 4] громоздки для полевых работ, поэтому в настоящей работе представлена градуировка на базе парофазного анализа толуола с его известным количеством, внесенным в замкнутую систему вода-воздух.

Цель исследований: определение порядка аналитических процедур по приготовлению парофазного источника следовых концентраций толуола; создание методики полевой градуировки портативного газового хроматографа ЭХО-В-ФИД.

Экспериментальная часть

Аналиты и растворители. В качестве аналита использовался толуол (ГОСТ 5789-78). Толуол растворяли в 95%-ном этаноле (ГОСТ 32036-2013) в соотношении: 2 мкл толуола на 5 мл этанола. В качестве источников эталонных концентраций бензола, толуола и ксилолов на этапе работ в лаборатории использовались источники микропотоков производства ООО «Мониторинг» [6]. Растворитель – дистиллированная вода, в количестве 400 мл.

Приборы и аналитическое оборудование. Непосредственно сам объект градуировки – портативный поликапиллярный газовый хроматограф ЭХО-В-ФИД (далее ГХ) с воздухом в качестве газа-носителя (разработка ИНГГ СО РАН) [7, 8]; эталон 1 разряда, источник микропотоков «Микрогаз-ФМ40» (далее «ФМ40») производства ООО «СКБ-хроманалитик» [9]; электронный термометр ИТ17 компании ЗАО «ЭКСИС»; микрошприц «HAMILTON» - 1 мкл; пипетка «ЛЕНПИПЕТ» - 5 мл; стандартная стеклянная бутылка из-под физраствора объемом 500 мл; мензурка на 500 – 1000 мл (ГОСТ 7571798913); градуировочное устройство, состоящее из: стальной крышки, двух фторопластовых трубок,

уплотнительных фторкаучуковых колец, фторопластовой подкладки и отверстия для термощупа ИТ17; стеклянный флакон 7 мл производства «Supelco» (volume 7 mL, clear glass vial, O.D. × H 17 mm × 60 mm, tan PTFE/silicone septum).

Результаты и их обсуждение

1. Подготовительный этап в лаборатории перед полевыми работами

a) Приготовление *спиртового раствора толуола*:

- Внести 5 мл 95%-ного этанола (ГОСТ 32036-2013) пипеткой производства «ЛЕНПИПЕТ» в стеклянный флакон от «Supelco» объемом 7 мл с силиконовой прокладкой, покрытой тефлоном с внутренней стороны;
- Затем с помощью микрошприца «HAMILTON» в две итерации вносится 2 мкл толуола (ГОСТ 5789-78). Перед каждым вводом толуола в спирт, необходимо протирать шприц батистовой салфеткой так, чтобы не коснуться кончика иглы и не впитать тем самым отобранный толуол.
- В завершении, плотно закрыть флакон, тщательно перемешать смесь и оставить на 4-5 часов для установления равновесной концентрации.
- Рекомендуется приготовить 3 таких флакона со спиртовым раствором толуола (один – рабочий, другие два – запасные).

Оценка при *23℃* показала, что при каждодневном использовании спиртового раствора толуола (раз в день), он теряет на 30-тый день около 30 мкл спирта (без учета конвекции и движения воздуха); т.о. можно считать, что спиртовой раствор обеспечивает стабильную концентрацию на уровне 10^{-10} г/см^3 на 30-ый день с потерей 0,6-1% спирта (отбор раствора микрошприцом не учитывался, так как при нем отбирается равновесное количество спирта и толуола); потерями толуола можно пренебречь.

b) Подготовка стеклянных бутылок из-под физрастора.

Необходимо заранее в лаборатории нанести метки на стеклянных бутылках из-под физраствора на уровне 400 мл. Для этого, используя мензурку на 500 – 1000 мл (ГОСТ 7571798913), нужно отмерить по 400 мл воды и перелить в каждый сосуд, а затем нанести клейкую (инертную) ленту по нижнему уровню мениска. Рекомендуется приготовить 3 таких бутылки.

c) Определение времени установления равновесной концентрации толуола.

Время установления равновесия «$t_{равн}$ = *40 мин»* между концентрациями толуола в газовой и жидкой фазах раствора было ранее определенно экспериментально, исходя из зависимости СКО площадей пиков толуола по трем измерениям от времени покоя *«t»* раствора [10].

d) Определение коэффициентов Генри.

Коэффициент Генри *«$K_{тол}$»* для толуола – отношение концентраций толуола в газовой фазе к концентрации толуола в воде в замкнутой системе вода-воздух при текущей температуре. *«$K_{тол}$»* в диапазоне температур (15 - 28 °C) получен на основе прямых измерений концентраций толуола в газовой фазе - в воздухе над водным раствором толуола с известной концентрацией толуола и температурой.

Измерения концентраций толуола в воздухе проведены относительно его эталонной концентрации из источника микропотоков «ФМ40» [10]:

$$K_{тол} = \frac{C_L}{C_G}, \quad (1)$$

где: C_G – концентрации толуола в газовой фазе раствора; C_L – концентрация толуола в жидкой фазе раствора.

Экспериментально установлено, что для приготовления раствора подходит дистиллированная, бутилированная негазированная вода или кипяченая чистая вода из-под крана, без видимого осадка.

е) Определение отношений чувствительностей (откликов) детектора по измерениям эталонных концентраций из системы «ФМ40».

Необходимо заранее в лаборатории, перед полевыми работами, определить с помощью измерения эталонных концентраций аренов из «ФМ40» отношения откликов бензола, м-ксилола и о-ксилола к отклику толуола:

$$ч_{Бенз;Ксилол} = \frac{Ч_{МГ(Бенз;Ксилол)}}{Ч_{МГ(Тол)}}, \quad (2)$$

$$Ч_{МГ(Бенз;Ксилол)} = \frac{C_{МГ(Бензол;Ксилол)}}{H_{(Бенз.;Ксилол)}}, \quad (3)$$

$$Ч_{МГ(Тол)} = \frac{C_{МГ(Тол)}}{H_{(Тол)}}, \quad (4)$$

где: $ч_{Бенз;Ксилол}$ – отношения откликов бензола, м-ксилола и о-ксилола $Ч_{МГ(Бенз;Ксилол)}$ к отклику толуола $Ч_{МГ(Тол)}$, полученные с помощью «ФМ40»; $C_{МГ(Бензол;Ксилол)}$, $C_{МГ(Тол)}$ – концентрации бензола, ксилолов и толуола, соответственно, из системы «ФМ40»; $H_{(Бенз.;Ксилол)}$, $H_{(Тол)}$ – значения высот пиков бензола, ксилолов и толуола, по результатам измерений эталонной газовой смеси из системы «ФМ40».

2. Полевой этап градуировки

Для проведения градуировки в полевых условиях потребуются: заранее приготовленный флакон со *спиртовым раствором толуола* и две стеклянных бутылки из-под физраствора с заранее нанесенными метками на уровне 400 мл; микрошприц «HAMILTON» - 1 мкл; 2 градуировочных устройства; измеритель температуры ИТ-17; пластиковая инертная пробка; батистовые салфетки.

2.1. Порядок приготовления *парофазного источника толуола*:

• В стеклянную бутылку из-под физраствора налить до заранее отмеченной метки 400 мл воды (см. пункт 1.b). При этом объем газовой фазы *«$V_{газ}$»* с присоединенным градуировочным устройством составит около 80 мл. При таком соотношении $V_{ж} \gg V_{газ}$ достигается буферный эффект замкнутой гетерогенной системы близкий к единице ($B_{23°C} \approx 0{,}96$), что обеспечивает стабильность концентрации в газовой фазе $\Delta C_{Газ} \approx 0$ [11, 12].

• Оставить воду в бутылке на ночь, чтобы ее температура пришла в равновесие с комнатной.

• Внести микрошприцом «HAMILTON» в середину объема 400 мл заранее приготовленной воды 1 мкл *спиртового раствора толуола* (~$3{,}47\times10^{-7}$г толуола). Перед введением раствора в воду, необходимо также протереть шприц батистовой салфеткой, не касаясь при этом кончика иглы.

• После этого, герметично закрыв бутылку пластиковой инертной пробкой (с фторопластовым покрытием), интенсивно взбалтывать раствор в течение двух-трех минут.

• Затем – заменить пластиковую пробку устройством для градуировки и замкнуть систему вода-воздух (рис. 1).

• Оставить замкнутою систему вода-воздух в покое на 40 мин [10] для установления равновесной концентрации (отчет времени – с момента ввода *спиртового раствора толуола* в воду).

Примечание: уплотнительные кольца «Viton» градуировочного устройства изготовлены из фторкаучука, который не поглощает аренов;

2.2. Полевая градуировка портативного газового хроматографа ЭХО-В-ФИД

Портативный газовый хроматограф ЭХО-В-ФИД в режиме анализа с М-АПД инжектором [13], и подсоединенным к нему парофазным источником толуола, представлен на (рис. 1).

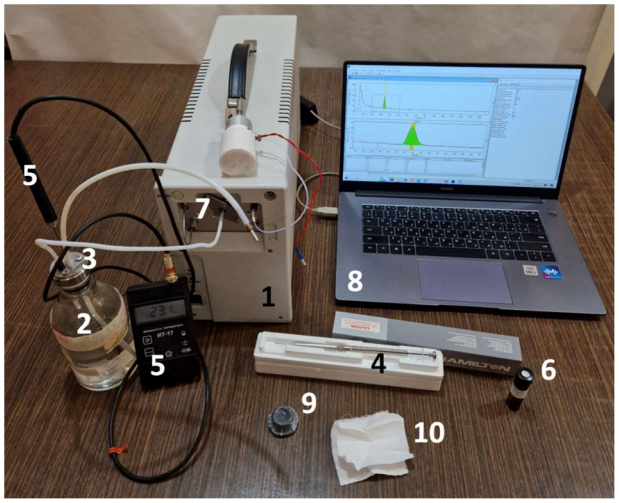


Рис. 1. ГХ ЭХО-В-ФИД с присоединенным парофазным источником толуола 1 – газовый хроматограф ЭХО; 2 – парофазный источник; 3 – градуировочное устройство; 4 – микрошприц “HAMILTON”; 5 – измеритель температуры

ИТ-17; 6 – спиртовой раствор толуола; 7 – М-АПД инжектор; 8 – ПК с ПО «СОРБАТ»; 9 – пластиковая инертная пробка; 10 – батистовые салфетки.

Условия измерений: тип детектора – ФИД; температура колонки – 40 °С; скорость газа-носителя ~ 40 см^3/мин; температура инжектора – 120°С; температура детектора – 120 °С; тип инжектора – М-АПД; время анализа – 150 секунд; частота дискретизации – 50 Гц; время инжекции – 3,5 секунды.

Ниже приведен подробный порядок аналитических операций по проведению градуировки:

- Включить хроматограф ЭХО-В-ФИД.
- Через 20 мин после включения – внести 1 мкл спиртового раствора толуола в 400 мл воды согласно порядку приготовления парофазного источника толуола (см. пункт 2.1.).
- Через 40 минут, парофазный источник толуола подсоединяется к М-АПД инжектору (рис. 1). Система готова к измерению.
- В режиме анализа с М-АПД инжектором оператор в программе «СОРБАТ» ровно через 1 час после включения прибора нажимает на кнопку «Анализ» и проводит 3 измерения. СКО площадей пиков толуола по трем измерениям не должно превышать 3%, а значение площади пика толуола первого измерения должно быть всегда больше последующих. Если произошел сбой, и первое измерение раствора было проведено позже, чем через 1 час, то можно восстановить «часовую» амплитуду высоты пика толуола с помощью корректировочного уравнения согласно [14]:

$$k = A \times ln(t) + B, \tag{5}$$

$$H_{Гр\ вост} = {H_{Гр\ факт}}/{k}, \tag{6}$$

где: k - корректировочный коэффициент компенсирующий падение амплитуд УВ в результате падения интенсивности светового потока лампы в ФИД к значениям полученным через 1 час после включения прибора (ВУФ-лампы); коэффициенты A и B находятся экспериментально для конкретной конфигурации ФИД-лампа-генератор-термостат в ГХ [14].

- После этого измерить газовую фазу во второй заранее приготовленной бутылке с водой с тем же объемом и при той же температуре с помощью второго градуировочного устройства. Обозначить хроматограмму, как «фоновую», и провести корректировку аналогично (5) и (6). Значение «фонового» пика толуола затем вычитается из градуировочных высот $H_{Гр}$.
- Рассчитать градуировочную концентрацию толуола (в газовой фазе), используя определенные ранее коэффициенты Генри для текущей температуры раствора [10]:

$$C_{Гр} = \frac{C_{ж}}{K_{t°C}}, \quad (7)$$

$$C_{ж} = \frac{m_{тол}}{\left(V_{ж} + {V_{газ}}/{K_{t°C}}\right)}, \quad (8)$$

где: $C_{Гр}$ [г/см^3] – градуировочная концентрация толуола (в газовой фазе); $C_{ж}$ [г/см^3] – концентрация толуола в жидкой фазе; $K_{t°C}$ – коэффициент распределения толуола для текущей температуры [10]; $m_{тол} = 3{,}47\times10^{-7}$ [г] – масса толуола, внесенного в систему; $V_{ж}$ = 400 [мл] – объем жидкой фазы раствора; $V_{газ}$ = 80 [мл] – объем газовой фазы раствора.

• Определить значения откликов детектора (концентрация на единицу высоты пика) для всех аренов для конфигурации, где источником эталонной смеси является *парофазный раствор толуола*. Значения откликов детектора для бензола, м-ксилола и о-ксилола определяются относительно толуола с помощью отношения «$ч_{Бенз;Ксилол}$» (2):

$$Ч_{Гр\ тол} = \frac{C_{Гр}}{H_{Гр} - H_{фон}} \quad (9)$$

$$Ч_{Гр(Бенз;Ксилол)} = Ч_{Гр\ тол} \cdot ч_{Бенз;Ксилол}, \quad (10)$$

где: $C_{Гр}$ [г/см^3] – градуировочная концентрация толуола (в газовой фазе парофазного источника); $H_{Гр}$ [мкА] – значение градуировочной высоты пика толуола по результатам первого измерения парофазного раствора через 1 час после включения прибора; $H_{фон}$ [мкА] – высота фонового пика толуола над водой; $Ч_{Гр(Бенз;Ксилол)}$ [г/см^3/мкА] – градуировочные отклики для бензола, м-ксилола и о-ксилола.

На этом этапе градуировка завершена. Далее рабочие, полевые концентрации определяются с помощью рассчитанных откликов $Ч_{Гр\ тол}$ и $Ч_{Гр(Бенз;Ксилол)}$.

Полевые хроматограммы сложны, не всегда удается корректно измерить площадь пика, поэтому расчет концентраций целесообразнее проводить по высотам пиков УВ.

Погрешности. Погрешности приготовления спиртового и водного растворов толуола относятся к инструментальным погрешностям.

а) Погрешность приготовления спиртового раствора толуола

Погрешность приготовления спиртового раствора толуола складывается из относительных погрешностей объема спирта $\sigma_{спирт} \approx \pm 2\%$ и объема толуола $\sigma_{толуол} \approx \pm 2\%$ (вносится два раза по 1-му мкл):

$$\sigma_{спирт.раст.} = \sqrt{(\sigma^2{}_{спирт} + \sigma^2{}_{толуол})} \approx 2,8\% \quad (11)$$

b) Погрешность при приготовлении парофазного источника толуола

Погрешность приготовления водного раствора толуола складывается из относительных погрешностей: объема воды $\sigma_V \approx \pm 1,25\%$; объема газовой фазы $\sigma_{Vg} \approx \pm 2,5\%$; погрешности спиртового раствора толуола $\sigma_{спирт.раст} \approx 2,8\%$ и еще одной погрешности микрошприца «HAMILTON» $\sigma_{шприц} \approx \pm 1\%$, так как спирто-вой раствор толуола вносится с его помощью в 400 мл воды. В итоге:

$$\sigma_{парофаз} = \sqrt{(\sigma^2{}_V + \sigma^2{}_{Vg} + \sigma^2{}_{спирт.раст.} + \sigma^2{}_{шприц})} \approx \pm 4; \quad (12)$$

c) Погрешность определения коэффициента Генри σ_K и измерения градуировочной концентрации толуола:

Погрешность определения коэффициента Генри и градуировочного отклика толуола (в режиме работы прибора с М-АПД инжектором) была уточнена от полученной ранее [10]. Она складывается из погрешностей: раствора $\sigma_{раствор} \approx \pm 4\%$; температуры $\sigma_T = \pm 1,3\%$; погрешности системы микропотоков «ФМ40» и ампул производства ООО «Мониторинг» (Санкт-Петербург) $\sigma_{МГ+Амп} \approx \pm 10\%$ [6, 9]; относительных погрешностей высот хроматографических пиков толуола по результатам трех измерений смеси из «ФМ40» $\sigma_{АизМГ} \approx \pm 1\%$ и из парофазного раствора $\sigma_{АизБут} \approx \pm 3\%$ (случайной погрешностью ε здесь можно пренебречь).

Просуммировав, получим:

$$\sigma_{(К,Ч_{Гр})} = \sqrt{(\sigma^2{}_{парофаз} + \sigma^2{}_T + \sigma^2{}_{МГ} + \sigma^2{}_{АизМГ} + \sigma_{АизБут}{}^2)} =$$
$$= \sqrt{(4^2{}_{парофаз} + 1,3^2{}_T + 10^2{}_{МГ} + 1^2{}_{АизМГ} + 3_{АизБут}{}^2)} \approx \pm 11,3\% \quad (13)$$

Погрешности определения градуировочных откликов бензола, м-ксилола и о-ксилола на 2% выше, т.к. были найдены относительно толуола (10).

Заключение. Определен порядок приготовления спиртового раствора толуола в лаборатории. Изложен порядок аналитических процедур для приготовления парофазного источника следовых концентраций толуола на уровне 10^{-10} [г/см^3] для градуировки портативного газового хроматографа ЭХО-В-ФИД в полевых условиях для задач геохимической съемки по аренам бензольного ряда. Определен необходимый набор оборудования для проведения полевой градуировки. Представлено руководство и определен порядок аналитических процедур для проведения полевой градуировки ГХ ЭХО-ФИД. Совокупная погрешность градуировки составила ±11,3%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Walker, J. D., L. Petrakis, and R. R. Colwell. 1976. Compari son of the biodegradability of crude and fuel oils. Can. J. Microbiol. 22:598-602.

2. Горбачева А.Р., Родинков О.В. Хромато-мембранное генерирование стандартных газовых смесей летучих органических соединений на уровне ppm // Аналитика и контроль. 2018. Т. 22, № 1. С. 75-82.

3. [Электронный ресурс]: http://catalog.vniim.ru/files/raz06-06.pdf / Каталог эталонных материалов ВНИИМ 06. Газы и газовые смеси (дата обращения 27.04.2023 г.)

4. Платонов [и др.] Получение газовых смесей известного состава динамическими методами ПИ.А. Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 3. С. 378-387.

5. Витенберг А. Г., Конопелько Л. А. Парофазный газохроматографический анализ: метрологические приложения // Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66, № 5. С. 452-472.

6. [Электронный ресурс]: Источники микропотоков газов и паров ИМ. http://www.ooo-monitoring.ru/products/calibr/pmt/im/(дата обращения 28.03.2025).

7. Руководство по эксплуатации ИЦ 421541.805.Сб00 РЭ Хроматограф газовый с фотоионизационным детектором «ЭХО-В-ФИД».

8. Грузнов В.М., Филоненко В. Г., Балдин М. Н., Шишмарёв А. Т. Портативные экспрессные газоаналитические приборы для определения следовых количеств веществ // Российский химический журнал. 2002. Т. 46. № 4. С. 100.

9. Установки динамические «Микрогаз-ФМ» - рабочие эталоны 1-го разряда. Руководство по эксплуатации СКБД. 229655.016 РЭ.

10. Какуля В. А., Балдин М. Н., Грузнов В. М. Исследование характеристик парофазного источника толуола для полевой градуировки портативного газового хроматографа // Трофимуковские чтения – 2023. Т.76. с. 181-185.

11. Иоффе Б. В., Резник Т. Л. К теории парофазного газохроматографического анализа методом дискретной газовой экстракции // Журн. аналит. химии. 1981. Т. 36. № 4, с 2191-2198.

12. Витенберг А.Г., Конопелько Л. А. Парофазный газохроматографический анализ: метрологические приложения // Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66. № 5. С. 452. (Vitenberg A.G., Konopel'ko L.A. A Gas Chromatographic Headspace Analysis: Metrological Aspects // J. Analyt. Chem. 2011. V. 66. № 5. P. 438.).

13. Балдин М. Н., Грузнов В.М., Симаков В. А. Устройство ввода пробы в газовый хроматограф / Свидетельство о гос. регистрации, патент RU 2399044 C1 от 10.09.2010 Бюл. № 25.

14. Балдин М. Н., Грузнов В. М., Науменко И. И. / Полезная модель: Газовый хроматограф с фотоионизационным детектором с безэлектродной лампой с текущей корректировкой калибровки / Свидетельство о гос. регистрации, патент RU 204 530 U1 / дата подачи заявки: 09.03.2021, опубликовано: 28.05.2021 Бюл. № 16.

© В. А. Какуля, М. Н. Балдин, 2025

УДК 550.834.08
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-215-220

В. В. Карстен[1]✉

Неоднозначности при определении наклона отражающих границ по данным непродольного ВСП

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

Аннотация. Анализ алгоритма построения изображения показывает, что при ВСП с выносным источником всегда существует такой критический наклон отражающей границы, что её изображение не может быть получено. Кроме того, для каждого не равного критическому наклона отражающей границы всегда существует другой наклон, при котром годографы отражённой волны совпадают и эти два наклона при построении изображения не различимы.

Ключевые слова: непродольное ВСП, сейсмическое изображение

W. V. Karsten[1]✉

Ambiguity in resolving reflector dip angle from offset VSP data

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

Abstract. Analysis of the VSP imagimg algorithm demonstrates that in offset VSP geometry there always is a specific critical reflector dip angle that this reflector cannot be imaged altogether. Moreover, every dip angle other than critical has its different conterpart with similar reflected wave traveltimes, and these two dips cannot be distinguished in VSP imaging.

Keywords: offset VSP, seismic imaging

Введение

Наблюдения ВСП с выносных ПВ освещают среду на значительном, в сравнении с каротажными методами, удалении от скважины, что даёт возможность получить изображение околоскважинного пространства [1]. Однако, данные ВСП на суше, как правило, получаются для весьма небольшого числа источников, что затрудняет применение для этого миграционных преобразований.

Радиус r зоны Френеля для отражённой волны можно оценить [2] как

$$r \approx \sqrt{\frac{H\lambda}{2}}, \qquad (1)$$

где H – глубина отражающей границы; λ – длина волны.

Для частоты f = 50 Гц и скорости v = 3000 м/с длина волны $\lambda = \frac{f}{v}$ составит 60 м, и радиус зоны Френеля на глубине H = 3000 м будет около 300 м, что срав-

нимо с размером освещённой области. Поэтому применение миграционных преобразований, разработанных для метода ОГТ, даёт весьма интенсивные артефакты, связанные с размыванием энергии по эллипсам равных времен [3,4].

Представление о границах как о совокупности объектов, рассеивающих падающую волну равномерно во все стороны, работает только тогда, когда имеется достаточно высокая кратность системы наблюдения. В случае ВСП, при наличии одного пункта возбуждения на профиле, кратность системы наблюдения равна единице, и для подавления артефактов миграции необходимо использование априорной информации о свойствах границ.

Устранения артефактов, связанных с размыванием энергии, можно добиться путём ограничения апертуры миграции, вплоть до отказа от суммирования [1]. Такая процедура сводится к взаимно-однозначному отображению разреза околоскважинного пространства на сейсмограмму ВСП, и иногда называется лучевой миграцией. Это название представляется неверным, поскольку миграция является контактным отображением [5], которое не даёт взаимно-однозначного соответствия. Предпочтительнее называть такую процедуру преобразованием ВСП-ОГТ [1], или изображением разреза околоскважинного пространства [4]. Для выполнения этой процедуры необходимо задать скоростную модель среды, которая получается методом кинематической инверсии данных ВСП [1].

Алгоритм построения изображения

Совместить построение изображения и уточнение скоростной модели можно в алгоритме с ограничением апертуры путём задания диапазона допустимых углов наклона отражающих элементов [4], разработанном в ИНГГ СО РАН и реализованном в обрабатывающей системе ВСП.

Изображение строится последовательно для всех точек двухмерной сетки, при этом в каждом узле сетки задаётся значение угла наклона отражателя. При ненулевой апертуре задаётся диапазон возможных углов. Построение изображения включает в себя трассировку луча через горизонтально-слоистую скоростную модель до точки отражения методом пристрелки [6], отражение, соответствующее отражению от наклонной границы с нормалью, лежащей в заданном ограниченном диапазоне, и трассировку отражённого луча. Данная схема легко обобщается для случая построения изображения по отражённым обменным волнам путём задания двух различных скоростных моделей для падающего и для отражённого луча.

При задании диапазона допустимых значений углов нормали отражающего элемента отображаемое значение накапливается в соответствующем узле сетки. Однако практика обработки данных ВСП показала, что задание ограниченного диапазона углов, не позволяя провести контактное отображение, приводит лишь к заглаживанию изображения отражающщих границ (рис. 1). Такое заглаживание можно выполнить более контролируемым образом путём направленного суммирования поля отражённых волн, или в *f-k* области, и задание диапазона углов на практике признано неэффективным. При отказе же от суммирования заданный угол отражения однозначно определяет глубину и время на сейсмограмме.

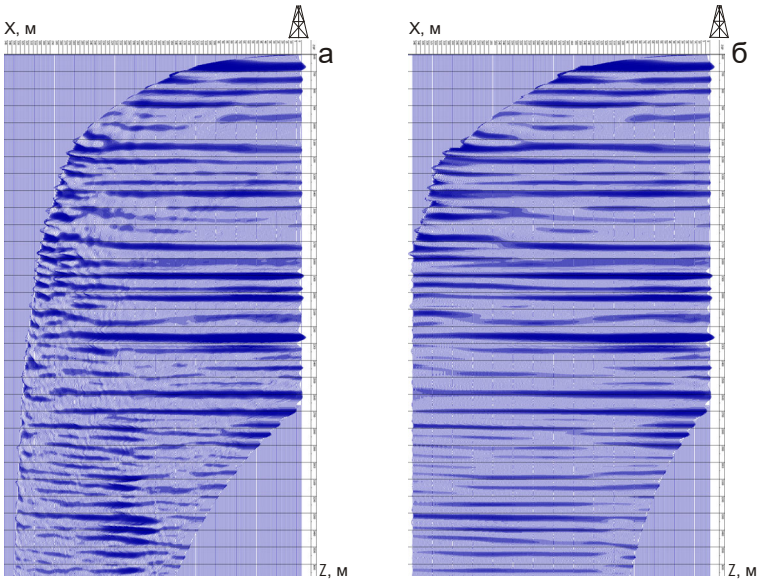


Рис. 1. Сопоставление двух режимов построения разреза: а) без суммирования по углам отражения; б) суммирование в диапазоне углов ±2°

Анализ алгоритма

Для анализа алгоритма построения изображения рассмотрим модель с одной наклонной границей, в которой проведены наблюдения ВСП с выносного ПВ в вертикальной скважине (рис. 2).

Начало координат поместим на устье скважины, ось x направим на ПВ, ось z вниз. По анализу падающих волн определена глубина границы в скважине z_0 и установлена однородность вышележащего слоя со скоростью v. Удаление источника x_s, глубина приёмника z_g лежит в интервале от нуля до глубины границы. Наклон границы α отсчитываем от горизонтали по часовой стрелке.

Повернём теперь систему координат, чтобы ось x' была параллельна границе. В этой системе источник имеет координаты $x_s' = -x_s \sin\alpha$ и $z_s' = x_s \cos\alpha$, приёмник – $x_g' = z_g \sin\alpha$ и $z_g' = z_g \cos\alpha$, а граница горизонтальна и имеет глубину $z_0' = z_0 \cos\alpha$.

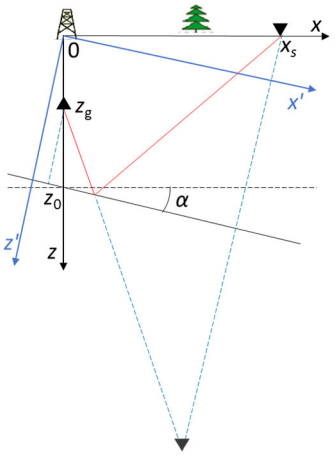


Рис. 2. Анализ алгоритма построения изображения

В этой системе координат легко найти положение мнимого источника и расчитать время пробега t отражённой волны

$$v^2t^2 = \left(x_s' - x_g'\right)^2 + \left(2z_0' - z_g' - z_s'\right)^2, \qquad (2)$$

Подставив значения в новой системе координат, после преобразований получим:

$$v^2t^2 = x_s^2 + z_0^2 + \left(z_0 - z_g\right)^2 + 2\left(z_0 - z_g\right)\left(x_s\cos\alpha + z_0\sin\alpha\right). \qquad (3)$$

Эта формула имеет понятный геометрический смысл, если заметить, что треугольники ABS и ABS^+ (рис. 3) равны, и поэтому мнимые источники при различных углах наклона отражающей границы располагаются на окружности. Центр её находится в точке пересечения границы скважиной, а радиус равен расстоянию до источника $x_s^2 + z_0^2$.

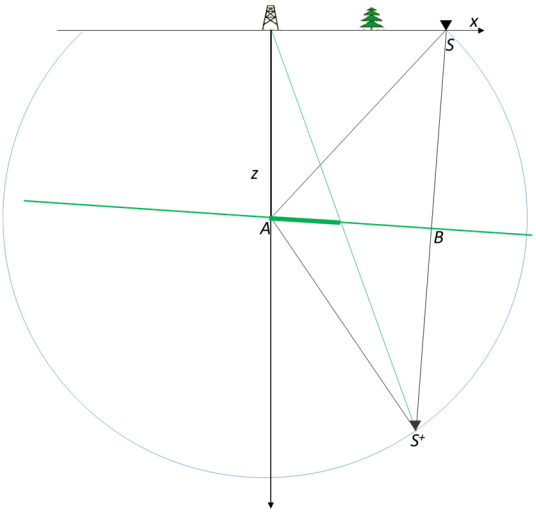


Рис. 3. Расположение мнимых источников на окружности

Расположение мнимых источников на окружности означает, что для заданного положения источника существует такой критический угол наклона границы $\alpha^* = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{x_s}{z_0}$, при котором мнимый источник S^* располагается точно под скважиной (рис.4). Лучи, попадающие во все приёмники, отражаются в одной точке и направлены вертикально вдоль ствола скважины, и изображение такой границы, показанной на рисунке 4 красным, не может быть получено. При этом время прихода отражённой волны во все приёмники максимально.

Критическим углом наклона вся окружность разделяется на две ветви. При углах наклона меньше критического изображение строится на интервале между

скважиной и источником, при углах больше критического – за скважиной. Время прихода отражённой волны в каждой ветви монотонно уменьшается по мере удаления от критического угла.

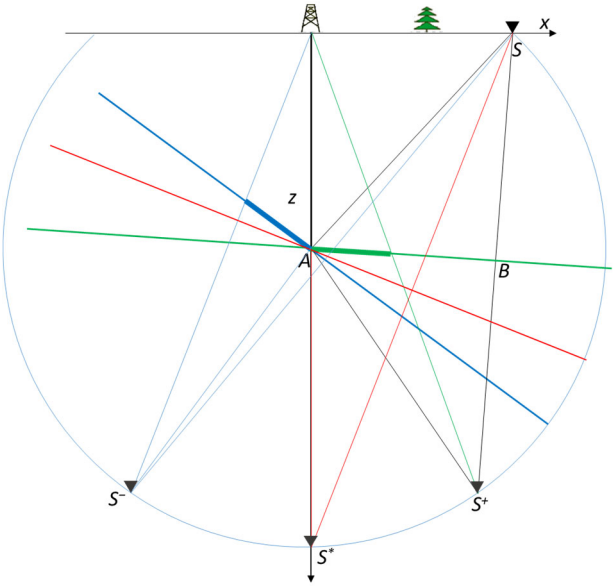


Рис. 4. Построение изображения при различных наклонах отражающей границы

При этом для каждого положения границы с углом наклона меньше критического найдётся сопряжённое ему положение с углом наклона больше критического, что мнимые источники S^+ и S^- будут расположены симметрично относительно вертикали. На рисунке 4 эти положения показаны синим и зелёным. В силу симметрии, времена на всех приёмниках для этих двух различных наклонов границы будут совпадать, и, таким образом, эти два положения границы будут не различимы по данным отражённой волны. Для их различения можно привлечь априорную информацию, провести анализ времён регистрации кратных отраженных волн, поскольку у них положения мнимых источников будут по-разному смещены по горизонтали [7] и уже не будут симметричны, или использовать дополнительный источник с другим выносом. Кроме того, различить эти положения границы можно по анализу знака отражения на горизонтальной компоненте.

Заключение

Таким образом, показано, что при ВСП с выносным источником всегда существует такой критический наклон отражающей границы, что её изображение не может быть получено. Кроме того, для каждого не равного критическому наклона отражающей границы всегда существует другой наклон, при котром годографы отражённой волны совпадают и эти два наклона при построении изображения не различимы.

Для разрешения этой неоднозначности можно использовать априорную информацию или усложнять методику работ. Можно также использовать горизонтальные компоненты отражённых волн, или кратные отражения, при условии их

выделения в данных. Кроме того, необходимо разработать итерационный подход к подбору углов наклона.

Благодарности

Эта работа посвящена памяти моего учителя С.Б. Горшкалёва.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0022 «Разработка численных методов и алгоритмов, ориентированных на высокопроизводительные вычислительные системы, для моделирования и инверсии геофизических полей: от петрофизики к сейсмологии».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. – М: EAGE Геомодель, 2017. – 286 с.

2. Yilmaz Ö. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. – Tulsa, OK : SEG, 2001. – Vol. I. – 1000 p.

3. Grech M.G.K., Lawton D.C., Cheadle S. Integrated prestack depth migration of vertical seismic profile and surface seismic data from the Rocky Mountain Foothills of southern Alberta, Canada // Geophysics. – 2003. – Vol. 68 – P.1782-1791.

4. Карстен В.В., Черноиванов А.И. Построение изображения по данным ВСП путём Кирхгофовской миграции с контролем угла отражателя. – К эффективности через сотрудничество: Материалы международной конференции геофизиков и геологов. – Тюмень, 2007.

5. Гольдин С.В. Геометрический подход к сейсмовидению: реализация контактных отображений // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2003. – Т. 6. – № 4 – С. 323-345.

6. Карстен В.В. Быстрое решение двухточечной задачи для горизонтально-слоистой среды. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Международный научный конгресс: Сборник материалов в 9 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 131-134.

7. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. – М: Недра, 1980. – 551с.

© В. В. Карстен, 2025

УДК 550.837
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-221-228

Н. О. Кожевников[1]✉

Электроразведочные исследования в устье реки Сармы (Приольхонье, Западное Прибайкалье)

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

Аннотация. В статье представлены и обсуждаются результаты работ методами зондирования становлением поля, ВЭЗ и электропрофилирования в устье реки Сармы. Бо́льшая часть площади работ находится в пределах конуса выноса, в наземной части дельты. Как показали электроразведочные исследования, геоэлектрический разрез здесь включает СЗ и ЮВ тектонические блоки. СЗ блок, примыкающий к уступу Приморского сброса, сложен метаморфическими породами с удельным электрическим сопротивлением порядка 103 Ом·м. В ЮВ блоке выделены полого залегающие границы, разделяющие слои, удельное сопротивление которых уменьшается с глубиной от 103 до единиц Ом·м. Предположительно, верхний слой мощностью около двухсот метров сложен осадками конуса выноса. Низкое удельное сопротивление пород на глубине свыше 750 м указывает на их принадлежность к Чернорудской зоне и объясняется присутствием в них графита, образующего электрически-связанные протяженные системы.

Ключевые слова: Приольхонье, река Сарма, Приморский сброс, конус выноса, геоэлектрическая модель

N. O. Kozhevnikov[1]✉

Electrical and electromagnetic surveys at the mouth of the Sarma River (Olkhon region, Western Gisbaikalia)

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

Abstract. The article presents and discusses results of the transient electromagnetic sounding, VES and electrical profiling methods at the mouth of the Sarma River. Most of the survey area is located within the alluvial fan, on the terrestrial part of the delta. According to the survey results, the geoelectric section here includes NW and SE tectonic blocks. The NW block, adjacent to the Primorsky fault scarp, consists of metamorphic rocks with resistivity of about 103 ohm· m. In the SE block, gently sloping boundaries are identified, separating layers with resistivity decreasing with depth from a thousand to less than ten ohm·m. Presumably, the upper layer with a thickness of about two hundred meters is composed of the alluvial fan sediments. Low resistivity of rocks at a depth exceeding 750 m, indicating that they belong to the Chernorud zone, is due to graphite forming an extended, electrically connected network.

Keywords: Olkhon region, Sarma River, Primorsky fault, alluvial fan, geoelectric model

Введение

Современные представления о геологии Приольхонья основываются на результатах наземного геологического картирования и дистанционных съемок [8].

Однако при изучении структуры Приольхонья возможности таких съемок, особенно, при экстраполяции их результатов на глубину, ограничены. В связи с этим привлекают внимание геофизические методы, позволяющие осуществлять объемное геологическое картирование. В 1979–2010 гг. в Приольхонье в рамках НИР и учебных геофизических практик, которые здесь проходили студенты геологических специальностей ИрНИТУ, проводились съемки методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), симметричного электропрофилирования (СП), естественного электрического поля (ЕП), сверхдлинноволнового электропрофилирования (СДВР) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Основной объем исследований выполнен методами ЗСБ и ЕП в центральном Приольхонье [4]. В настоящей статье представлены не публиковавшиеся ранее результаты электроразведочных исследований в устье реки Сармы.

Методика и результаты электроразведочных съемок

Участок работ находится в Приольхонье, в устье реки Сармы (рис. 1а). Съемки проводились вблизи уступа Приморского сброса и в дельте реки, в пределах конуса выноса. Комплекс методов включал ЗСБ, ВЭЗ и СП. На рис. 1б приведена схема, где показаны установки ЗСБ, точки ВЭЗ и профиль СП.

Работы методом ЗСБ включали два этапа. В 1990 и 1992 гг. были выполнены 8 зондирований симметричной установкой «петля в петле» 200×50 м. Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась разработанная автором аппаратура [2]. В 2006 г. выполнено зондирование с мощным источником: использовалась генераторная петля размером 400×400 м, ток в которой составлял около 100 А. Приемные петли размером 18×18 м располагались на линиях, ориентированных по простиранию (50, 48, 45, 49, 51) и вкрест простирания (43, 44, 45,46, 47) уступа Приморского сброса. Одна из приемных петель размещалась в центре генераторной, остальные – на расстоянии 400 м и 750 м от центра. Для измерения индукционных переходных процессов применялась цифровая многоканальная аппаратура SGS-TEM [9].

Съемки методами ВЭЗ и двухразносного профилирования проводились для оценки параметров верхней части геоэлектрического разреза. Центры установок ВЭЗ находились рядом с генераторными петлями 90-01 и 90-02 метода ЗСБ (рис. 1б). Направление размотки линий AB и MN показано стрелками на рис. 1б. Максимальный разнос между питающими электродами составлял 500 м. Симметричное профилирование выполнено с питающими линиями 20 м и 100 м вдоль профиля, ориентированного по пространию уступа Приморского разлома.

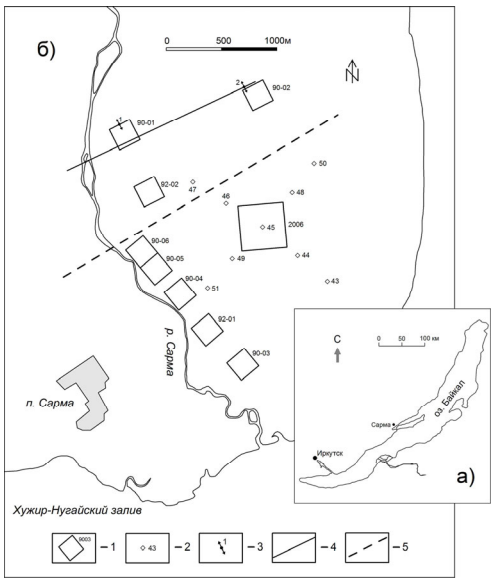


Рис. 1. Озеро Байкал (а) и схема электроразведочных работ в устье реки Сармы (б): 1 – генераторная петля, год и номер зондирования; 2 – приемная петля размером 18м х 18м и ее номер; 3 – точка ВЭЗ, ее номер и направление размотки линий; 4 – профиль СЭП; 5 – граница между СЗ и ЮВ блоками.

На рис. 2 приведены полевые кривые кажущегося удельного сопротивления $\rho_к$ (ВЭЗ) и ρ_τ (ЗСБ); кривые ρ_τ измерены симметричными установками «петля в петле». Кривые $\rho_к$ и ρ_τ согласованы по уровню; так горизонтальная ось кривых ВЭЗ с отметкой $\rho_к = 10^3$ Ом·м совмещена с горизонтальной осью кривых $\rho_\tau = 10^3$ Ом·м. По горизонтали кривые расположены таким образом, что левые ветви кривых ρ_τ являются «продолжением» правых ветвей кривых $\rho_к$ метода ВЭЗ.

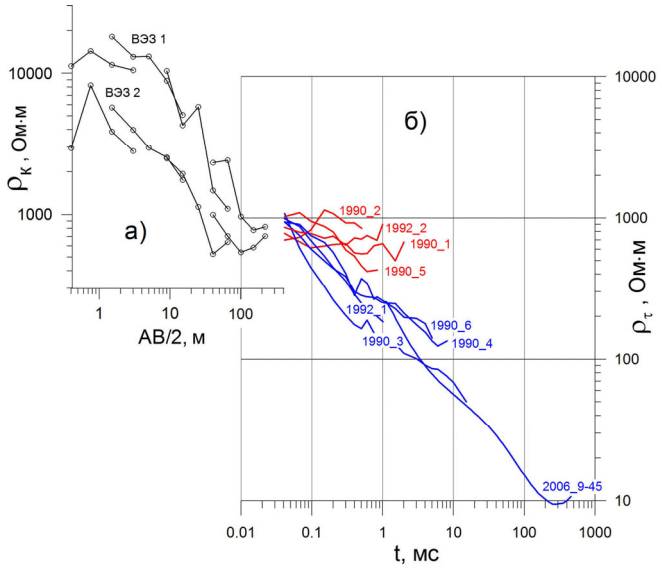


Рис. 2. Полевые кривые $\rho_к$ метода ВЭЗ (а) и ρ_τ метода ЗСБ (б)

Кривые ρ_τ образуют две группы. Вблизи уступа Приморского сброса кажущееся удельное сопротивление практически не изменяется с увеличением временной задержки, оставаясь в интервале от нескольких сотен Ом·м до тысячи Ом·м. Соответствующие кривые ρ_τ показаны на рис. 2 красным цветом. Для остальных кривых ρ_τ, выделенных синим цветом, характерно неуклонное убывание кажущегося удельного сопротивления со временем. С учетом данных ВЭЗ кажущееся удельное сопротивление убывает от 104 до 10 Ом·м.

На рис. 3 приведены все кривые кажущегося удельного сопротивления, полученные в результате зондирований с мощным источником (см. рис. 1б). Как видно на рис. 3а, при ориентации линии разносов вкрест простирания уступа Приморского сброса кривые ρτ изменяются в зависимости от положения приемной петли. Сильнее всего это проявляется на ранних временах, при этом среди кривых ρτ выделяется измеренная приемной петлей 09-47, которая располагалась вблизи уступа Приморского сброса (см. рис. 1б). На поздних временах различие между кривыми уменьшается; это указывает на то, что по мере увеличения глубины геоэлектрическое строение исследуемого участка земной коры становится более однородным и/или изотропным.

В целом кривые ρτ на рис. 3 (за исключением измеренной приемной петлей 09-47) отличаются незначительно. Это означает, что удельное электрическое сопротивление на б*о*льшей части исследуемой площади изменяется преимущественно по вертикали. Данный факт послужил обоснованием для инверсии кривых ρ_τ на основе горизонтально-слоистой модели.

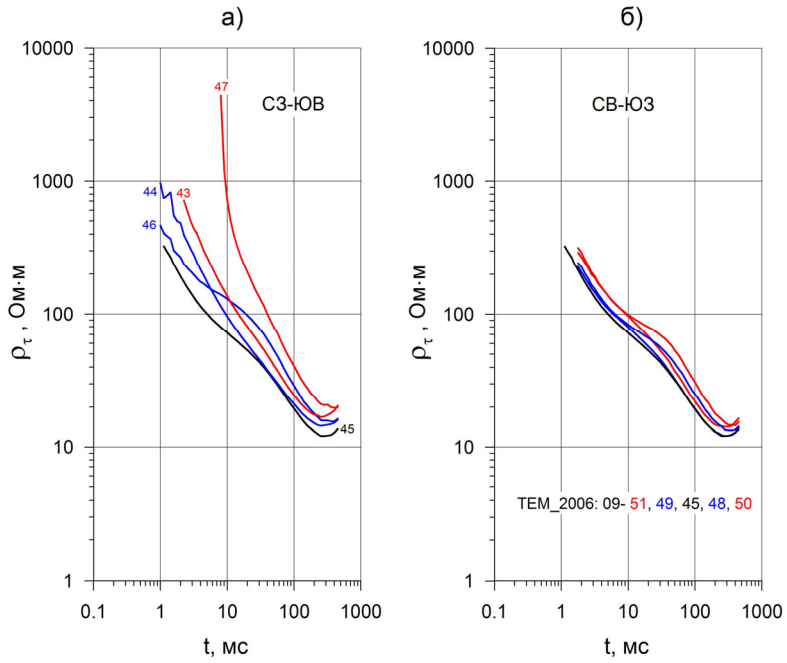


Рис 3. Кривые ρ_τ, измеренные с мощным источником в дельте реки Сармы. Приемные петли располагались на линии, ориентированной в направлении СЗ-ЮВ (а) и СВ-ЮЗ (б). Черным цветом показана кривая ρ_τ для соосной установки, синим – кривые ρ_τ на разносе 400 м, красным – 750 м.

На рис. 4а показаны полевая и модельная кривые ρ_τ для соосной установки с генераторной петлей 200×200м, а на рис. 4б – 400×400м. Результаты инверсии для всех кривых ρ_τ, измеренных соосными установками, приведены на рис. 4в.

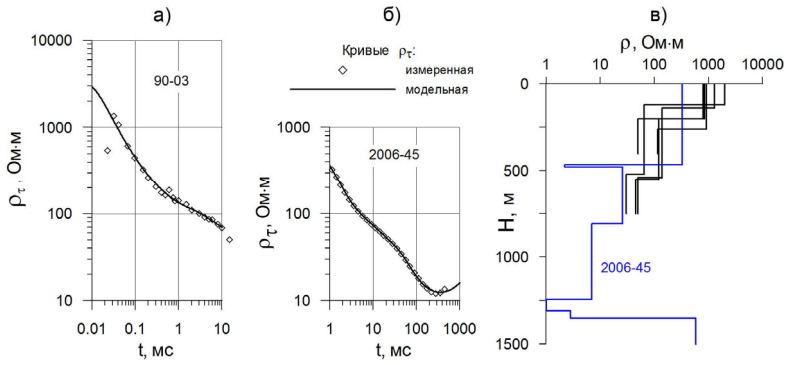


Рис. 4. Примеры, иллюстрирующие измеренные и модельные кривые ρ_τ (а, б) и результат инверсии для всей совокупности кривых ρ_τ (в)

Геоэлектрический разрез, построенный по результатам интерпретации ЗСБ с генераторными петлями размером 200×200м (рис. 5), включает северо-западный и юго-восточный блоки. Северо-западный блок, однородный по геоэлектрическому строению, образован породами с удельным электрическим сопротивлением около 10^3 Ом·м. В юго-восточном блоке прослеживаются пологозалегающие геоэлектрические слои, или горизонты, сопротивление которых понижается от одной-двух тысяч Ом·м в верхнем слое до 30–50 Ом·м в нижнем. Согласно результатам зондирования с генераторной петлей 400×400 м (см. рис. 4в) на глубине свыше 750 м, удельное сопротивление понижается до единиц Ом·м. Как уже отмечалось, при выполнении зондирований с генераторной петлей 400×400м кривая ρ_τ, измеренная приемной петлей 09-47, резко отличается от остальных (см. рис. 3а). Этот факт учитывался при проведении границы между ЮВ и СЗ блоками (см. рис. 1).

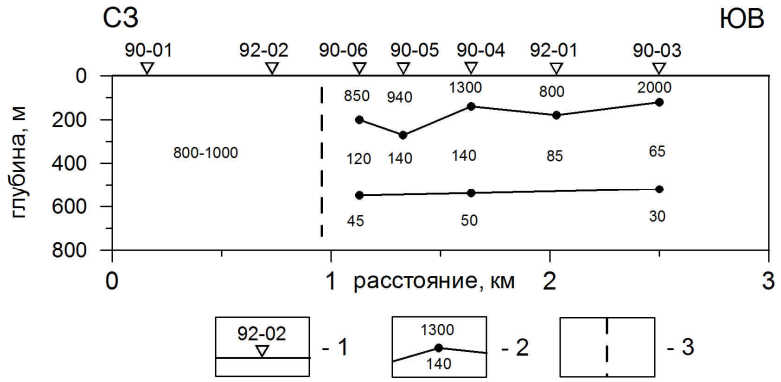


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по данным ЗСБ с генераторными петлями размером 200м х 200м: 1 –центр установки ЗСБ и ее номер; 2 – геоэлектрическая граница и удельное сопротивление, Ом·м; 3 – граница между СЗ и ЮВ тектоническими блоками.

Интерпретация кривых $\rho_к$ ВЭЗ (рис. 6а) дает следующие параметры верхней части геоэлектрического разреза: $\rho_1 = (3.2 \cdot 10^3 – 10^4)$ Ом·м, $h_1 = (8–10)$ м, $\rho_2 = (600–800)$ Ом·м. Рис. 6б иллюстрирует результаты двухразносного симметричного профилирования. На малом (20 м) разносе кажущееся удельное сопротивление $\rho_к$ примерно на порядок больше, чем на большом (100 м). Изрезанность графиков профилирования и кривые ВЭЗ свидетельствуют о влиянии на результаты съемок приповерхностных неоднородностей. Вместе с тем данные ВЭЗ и СП показывают, что в региональном плане, или «в целом», верхняя часть геоэлектрического разреза на участке, где располагались точки ВЭЗ и профиль СП соответствует двухслойной модели с относительно проводящим основанием. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя составляет $(5–10) \times 10^3$ Ом·м, основания – около 10^3Ом·м.

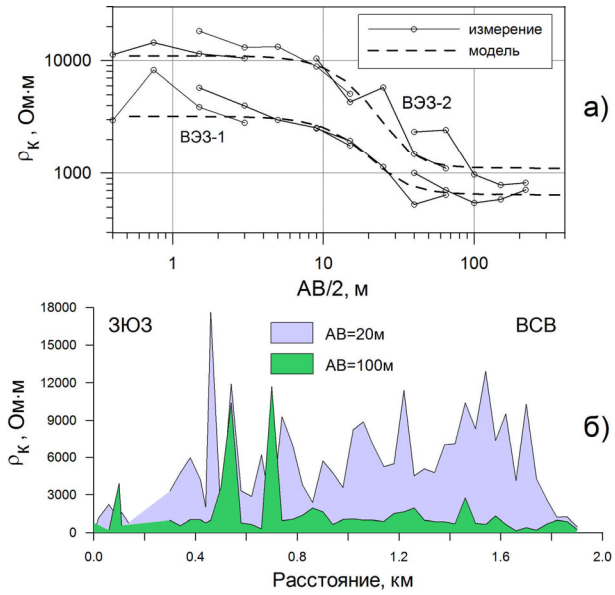


Рис. 6. Кривые ВЭЗ (а) и графики двухразносного симметричного электропрофилирования (б)

Обсуждение результатов

Приведенные результаты электроразведочных исследований представляют собой: 1) экспериментальные данные, т.е. *объективные факты*; 2) интерпретацию фактов, которая является заведомо *дискуссионной*.

В публикациях, в которых рассматриваются вопросы геологии участка в устье р. Сармы, приводятся результаты геологических и геофизических съемок, проводившихся с целью изучения приповерхностных проявлений современной тектоники в зоне влияния Приморского разлома [3, 6, 7]. С учетом этих публикаций, а также собственных наблюдений представляется обоснованным следующий вариант геологической интерпретации данных ВЭЗ и СП. Верхний слой с удельным сопротивлением $(5 \times 10^3 – 10^4)$ Ом·м и толщиной (8–10) м сложен маловлажными крупно-глыбовыми отложениями с гравийно-галечным наполнителем. Удельное сопротивление подстилающего основания составляет (600–800)

Ом·м, т.е. совпадает с удельным сопротивлением СЗ блока по данным ЗСБ (см. рис. 4, 5). Поскольку тонкий высокоомный слой не проявляется в индукционных переходных характеристиках, логично предположить, что основание, которое «видит» метод ВЭЗ, сложено теми же породами, из которых по данным ЗСБ состоит СЗ блок.

Дефицит априорной информации о строении дельты и подстилающих ее коренных породах затрудняет геологическую интерпретацию данных ЗСБ, особенно с учетом того факта, что участок работ находится в зоне влияния Приморского и Сарминского разломов. Тем не мене, некоторые соображения по поводу геологической интерпретации могут быть высказаны уже на данной стадии изученности.

Так, граница между СЗ и ЮВ блоками на рис. 5, скорее всего, является тектонической. С учетом материалов работы [1] можно предположить, что ЮВ блок сформировался за короткий промежуток времени (в геологическом масштабе) в результате или, точнее, процессе сброса, амплитуда которого составляет сотни метров. По-видимому, верхний слой толщиной около 200 м (см. рис. 5) сложен неконсолидированными отложениям дельты. Однако, в таком случае остается невыясненным, с чем связано их высокое, порядка 10^3 Ом·м, удельное электрическое сопротивление.

Если принять, что верхний слой сложен рыхлыми осадками дельты, то скорее всего расположенный ниже слой с удельным сопротивлением около 10^2 Ом·м и постилающее его основание с сопротивлением десятки Ом·м (см. рис. 5) образованы породами ольхонского метаморфического комплекса.

Как показали работы методом ЗСБ с мощным источником, на глубине свыше 750 м удельное электрическое сопротивление снижается до значений, не превышающих десяти Ом·м (см. рис. 4в). В этой связи привлекает внимание Чернорудская, или Чернорудско-Баракчинская тектоническая зона (ЧБТЗ). Она представлена узкой (до 5 км) и протяженной (более 50 км) структурой северо-восточного простирания, прослеживающейся в северо-западной части Приольхонья в метаморфическом комплексе ольхонской серии, рядом с границей краевого выступа фундамента Сибирской платформы [5]. Согласно результатам региональных съемок методом ЗСБ, Чернорудская зона включает породы низкого (от долей единицы до первых десятков Ом·м) удельного сопротивления, кровля которых залегает на глубине от 100 до 400 м. Причиной высокой электропроводности этих пород является присутствие в них графита, образующего протяженные электрически-связанные системы. Поскольку участок работ в устье р. Сармы находится в пределах Чернорудской зоны [5], логично предположить, что залегающие здесь на больших глубинах проводники идентичны обнаруженным в ней ранее в других местах. По-видимому, содержащие графит проводники, когда-то залегавшие на меньшей глубине, в результате сброса переместились вниз на несколько сотен метров.

Заключение

Электроразведочные исследования в устье р. Сармы дают первое представление о геоэлектрической модели участка работ в интервале глубин от единиц

метров до километра. Их результаты могут оказаться полезными в качестве основы для проектирования будущих работ по изучению геоэлектрического разреза и геологического строения этого участка Приольхонья.

Возможно, наиболее важным результатом проведенных исследований являются вопросы, возникающие при геологической интерпретации электроразведочных данных. Для ответа на них необходима постановка специально спланированные масштабных работ комплексом геофизических методов.

С позиций сегодняшнего дня представленные в статье материалы являются уникальными: работы проводились в то время, когда в устье р. Сармы еще не началась интенсивная застройка и не была проложена высоковольтная ЛЭП.

Благодарности

Автор признателен Ю.А. Агафонову за организацию и проведение зондирований становлением поля с мощным источником.

Представленные в статье результаты получены при поддержке программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахромеев Г.С., Дмитриев А.Г., Канайкин В.С., Кожевников Н.О. Физические свойства горных пород Приольхонья // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Труды первой Байкальской молодежной школы-семинара. – Иркутск: ИрГТУ, 1999. – С. 110-127.

2. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1988. – 224 с.

3. Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморского разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // Geodynamics and Tectonophysics. – 2020. – Vol. 11. – № 3. – С. 548-565.

4. Кожевников Н.О., Бигалке Ю., Кожевников О.К. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // Геология и геофизика. – 2004. – Т.45. – № 2. – С. 253-265.

5. Летников Ф.А., Савельева В.Б., Заири Н.М. Эндогенные процессы и графитовая минерализация в Чернорудско-Баракчинской тектонической зоне (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 3. – С. 661-666.

6. Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома // Геология и геофизика. – 2002. – Т.43. – № 5. – С. 446-455.

7. Павлов М.В., Ильичева Е.А. Морфогенез Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // Вестник Бурятского Государственного Университета: Биология География. – 2017. – Вып. 4. – С. 116-127.

8. Федоровский В. С., Скляров Е. В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические карты высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Geodynamics and Tectonophysics. – 2010. – Vol. 1. – № 4. – С. 331-418.

9. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – Т. 31. – № 1. – С. 27-31.

© Н. О. Кожевников, 2025

УДК 550.380
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-229-234

Е. С. Коняев[1,2]✉

Улучшенный метод астрономической привязки при помощи немагнитного теодолита

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
email: konyaeves@ipgg.sbras.ru

Аннотация. При абсолютных измерениях компонент вектора магнитной индукции при помощи немагнитного теодолита с феррозондовым датчиком на пунктах векового хода предъявляются высокие требования к точности установки теодолита над реперной точкой, особенно если расстояние до наземного ориентира составляет 100-200 метров. Но если при каждом сеансе наблюдений выполнять точное измерение направления на наземный ориентир, то требования к точности позиционирования теодолита снижаются. Точный азимут ориентира можно получить при помощи астрономических методов (например, привязка по Солнцу). Однако, визуальный метод определения азимута имеет большую среднеквадратическую погрешность (20 угловых секунд). В данной статье представлен улучшенный метод астрономической привязки при помощи цифровой видеокамеры, позволяющий добиться уменьшения ошибки в 4 раза по сравнению с визуальным методом.

Ключевые слова: астрономическая привязка, теодолит, абсолютные измерения, пункты векового хода, наземный ориентир

E. S. Konyaev[1,2]✉

An improved method of astronomical referencing using a non-magnetic theodolite

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
email: konyaeves@ipgg.sbras.ru

Abstract. In absolute measurements of magnetic induction vector components using a non-magnetic theodolite with a flux-gate sensor at secular variation points, high requirements are imposed on the accuracy of theodolite installation above the reference point, especially if the distance to the ground reference is 100-200 meters. But if the direction to the ground object is accurately measured during each observation session, the requirements for the accuracy of theodolite positioning are reduced. The exact azimuth of a ground object can be obtained using astronomical methods (solar referencing). However, the visual method of azimuth determination has a large mean square error (20 arcseconds). This article presents an improved method of astronomical referencing using a digital video camera, which allows for an error reduction of up to 4 times compared to the visual method.

Keywords: astronomical reference, theodolite, absolute measurements, secular course points, reference ground object

Введение

При абсолютных наблюдениях элементов геомагнитного поля (склонение D, наклонение I) при помощи немагнитного теодолита с феррозондовым датчиком, необходимо знать истинный географический азимут наземного ориентира (миры) для корректной привязки измеренных компонент поля в пространстве. Как правило, наземный ориентир располагают на удалении от первых сотен до 2000 метров от пункта измерения. При большем удалении видимость ориентира сильно зависит от погодных условий, при меньшем возникают повышенные требования к точности позиционирования теодолита на пункте измерения. Например, для измерения склонения с погрешностью $\delta D = 0.1'$ при расстоянии до ориентира в 100 метров, необходимая точность установки теодолита на пункте наблюдения составляет 3 мм [1]. Данное требование легко достижимо при наблюдениях на вариационных столбах (например, в магнитных обсерваториях). Для точного позиционирования теодолита на столбе достаточно отметить на нем контур установочной площадки [2].

Однако, при выборе мест для расположения пунктов векового хода (ПВХ) геомагнитного поля, возникают некоторые ограничения. Зачастую из-за промышленных помех, развитой сети автомобильных и железных дорог, в местности с густой растительностью (например, в Западной Сибири) приходится располагать ПВХ непосредственно в лесу. В таких случаях для наблюдения наземного ориентира рекомендуется прорубать просеку [2]. Однако, незаконность вырубки, а также большие затраты труда и времени на поддержания состояния просеки вынуждают устраивать наземный ориентир на расстояниях, не превышающих 100 метров. К тому же, весьма затратно обустраивать на всех ПВХ столбы для наблюдения, поэтому зачастую абсолютные наблюдения при помощи теодолита проводятся на немагнитной треноге, располагаемой над реперной точкой. В этом случае установить теодолит точно над точкой становится гораздо сложнее, часто возникает погрешность более 1 см. Поэтому появляется необходимость при каждом сеансе измерений с высокой точностью измерять азимут наземного ориентира.

Для определения азимутов наземных ориентиров используют следующие методы: астрономическая привязка, ГНСС и гиротеодолитные измерения. Гиротеодолитные измерения позволяют получить азимут с точностью 15 - 30 угловых секунд, а аппаратура имеет высокую стоимость. При использовании ГНСС можно добиться точности определения азимута в $2''$, однако, продолжительность одного сеанса измерения составляет несколько часов [3]. Астрономическая привязка может осуществляться как визуальными методами [2], так и при помощи цифровых камер. Обычно визуальные методы имеют погрешность определения азимута в первые десятки угловых секунд. Для достижения точности в первые угловые секунды (определение по Полярной звезде) необходимы продолжительные и трудозатратные наблюдения, которые могут провести только высококвалифицированные наблюдатели [3]. Использование электронных тахеометров с цифровой фотокамерой позволяют заметно упростить астрономический метод

привязки и исключить влияние человеческого фактора, при этом достигнув высокой точности (порядка 1-2″) [4].

Для абсолютных измерений полного вектора магнитной индукции применяются немагнитные теодолиты, не имеющие встроенных фотокамер. Поэтому возникает необходимость поиска метода астрономической привязки повышенной точности при помощи немагнитного теодолита.

Методы и материалы

В рамках данной статьи была произведена астрономическая привязка методом измерения горизонтального направления на Солнце. Данный метод имеет ряд преимуществ, а именно: возможность работы в дневное время, отсутствие необходимости введения поправок за атмосферную рефракцию (например, как в методе определения азимута по наблюдениям Солнца на равных высотах), относительная простота взятия отсчетов и обработки полученных данных.

Рассмотрим две схемы измерения горизонтальных направлений на Солнце.

1) Оператор наводящим винтом горизонтального круга приближает вертикальную нить сетки зрительной трубы к изображению диска Солнца со стороны видимого движения (правый край). В момент касания диска Солнца вертикальной нити зрительной трубы наблюдатель подает помощнику команду «Есть!». Помощник фиксирует время команды и отсчет по горизонтальному кругу в журнале наблюдений. Сохраняя неподвижность алидадной части теодолита, аналогичным образом фиксируется время касания противоположного края диска. Время прохождения вычисляется как среднее из двух отсчетов [2].

2) Второй метод подразумевает визирование только по одному краю Солнца. Для этого дополнительно необходимо знать высоту Солнца z в момент наблюдения. Затем ввести поправку за видимый радиус Солнца:

$$L_{\odot} = L - R_{\odot}\cos(z), \qquad (1)$$

где $L_{\odot}$ - отсчет, приведенный к центру Солнца, L – отчет по левому краю, $R_{\odot}$- видимый радиус Солнца, z – высота Солнца над горизонтом.

Второй метод был использован в данной работе, поскольку позволяет проводить наблюдения в разрывах облаков, а также экономит время.

Точность подобных наблюдений напрямую зависит от опытности наблюдателя и его помощника. Для избавления от ошибок, вызванных человеческим фактором, было принято решение фиксировать моменты касания вертикальной нити с краем диска Солнца и горизонтальный отсчет при помощи цифровой камеры. В работе использовался теодолит 3Т2КП (рисунок 1). Технические характеристики теодолита и камеры представлены в таблице 1. Связка зрительной трубы теодолита и камеры позволили получить угловое разрешение около 4″/пиксель.

Для позиционирования камеры перед окуляром зрительной трубы и окуляром микроскопа было изготовлено специальное устройство, позволяющее снимать отсчеты через окуляр микроскопа. На рис. 2 показан вид солнечного диска в зрительную трубу и вид в микроскоп теодолита, полученные при помощи камеры.

Все наблюдения Солнца проводились при помощи апертурного солнечного фильтра.

Рис. 1. Теодолит 3Т2КП

Таблица 1

Технические характеристики теодолита 3Т2КП и использованной видеокамеры.

Характеристики теодолита	
Среднеквадратическая погрешность	
измерения горизонтального угла	2"
Увеличение зрительной трубы	30х
Поле зрения зрительной трубы	1°35'
Наружный диаметр оправы объектива	48мм
Характеристики видеокамеры	
Разрешение матрицы	1920*1080
Угол обзора	78°
Угловое разрешение	2.2'
Частота кадров видео	25

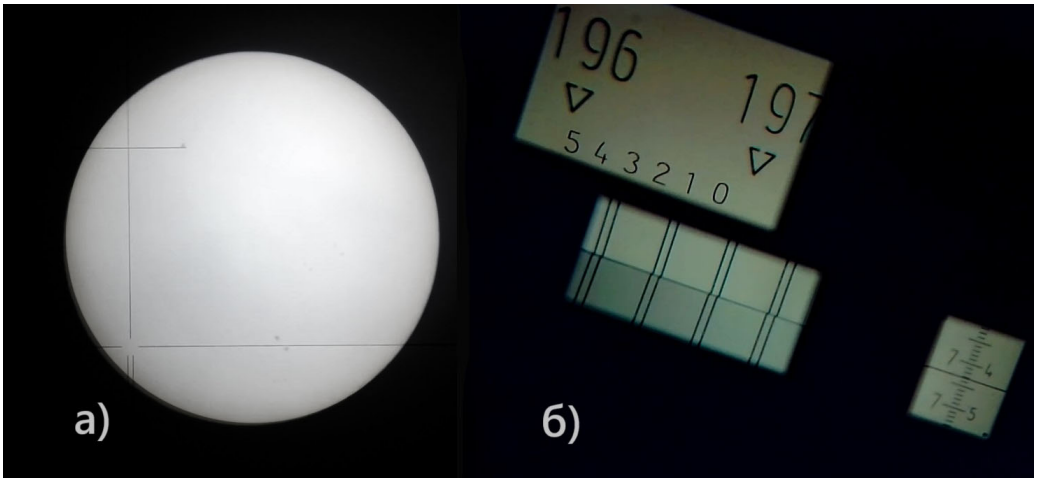


Рис. 2. Вид в зрительную трубу (а) и микроскоп (б) теодолита 3Т2КП.

Результаты

Эксперимент проводился 2.04.2025 и 9.04.2025. Горизонтальные отсчеты на Солнце выполнялись по левому краю с приведением к центру диска. В первый день выполнялись визуальные наблюдения с ассистентом, во второй день наблюдения выполнялись новым методом с фиксацией моментов прохождения изображения диска Солнца цифровой видеокамерой.

Для оценки точности методов были рассчитаны разности отсчетов горизонтального круга теодолита и реального азимута Солнца в момент измерения, полученные с помощью программы Stellarium. Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2

Оценка точности методов астрономической привязки

Дата, время	Метод	Число отсчетов	СКО разности, угл. сек.
2.04.2025 14:30	Визуальный	10	21.6″
9.04.2025 17:40	Цифровой	14	5.1″

Заключение

Новый метод астрономической привязки по Солнцу при помощи цифровой камеры позволил снизить среднеквадратическую ошибку в серии измерений примерно в 4 раза. Это стало возможным благодаря более точной фиксации времени касания вертикальной нити зрительной трубы теодолита краем изображения диска Солнца. При использовании визуального метода привязки результат сильно зависит от опыта наблюдателей, а погрешность определения может превышать 20 угловых секунд.

Новый метод привязки имеет ряд преимуществ: удобен в использовании, точность привязки мало зависит от опытности операторов, имеет повышенную точность, нет необходимости использовать дополнительные инструменты (средства ГНСС, гиротеодолиты, электронные тахеометры).

К недостаткам метода можно отнести зависимость от погоды, что является характерной особенностью всех астрономических методов. В случае отсутствия возможности наблюдать астрономические объекты, а теодолит нельзя установить точно над реперным знаком, то необходимо измерить и записать в журнал наблюдения элементы центровки: расстояние от проекции центра теодолита до центра знака и угол между направлением на точку проекции и направлением на наземный ориентир для введения поправки за неточность установки теодолита на точке [2].

В дальнейшем автором статьи планируется проведение экспериментов с привязкой по другим астрономическим объектам: Луна, яркие планеты, звезды. Также для повышения точности взятия горизонтальных отсчетов до уровня погрешности теодолита (2″) необходимо подобрать камеру с большим разрешением. Для обоснования применимости данного метода в полевых условиях пла-

нируется проведение эксперимента по многократной привязке наземного ориентира.

Автор выражает благодарность инженеру лаборатории динамических проблем сейсмики Белоусову Андрею за помощь в изготовлении устройства для позиционирования камеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечаев, С. А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений / под ред. Жан Л. Рассон. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2006. 92 с.

2. Пандул И.С. Астрономические определения по Солнцу для географов, геологов и топографов. Москва: Недра, 1983. 128 с.

3. Кафтан, В. И., Р. И. Красноперов. Геодезические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 123-129.

4. Луповка, В. А., А. А. Брагин. Определение астрономического азимута с помощью электронного тахеометра с цифровой фотокамерой // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 3. С. 51-58.

© Е. С. Коняев, 2025

УДК 550.837
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-235-240

З. Я. Кузина[1]✉, А. М.Санчаа[1], А. Е. Шалагинов[1], И. О. Шапаренко[1]

Обновленная геоэлектрическая модель серии выходов коренных пород Уймонской впадины по данным методов постоянного тока (ЭТ, ВЭЗ)

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

Аннотация. В статье представлены новые результаты изучения геоэлектрического строения серии выходов пород фундамента в западной и центральной частях Уймонской впадины Горного Алтая методами постоянного тока: элекротомографии (ЭТ) и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). В полевые сезоны с 2020 по 2023 года были проведены измерения по 13 профилям, 6 из которых, приурочены к выходу коренных пород, расположенному в западной части впадины (Объект №1), остальные 7 – к выходу коренных пород в центральной ее части (Объект №2) [4]. В полевой сезон 2024 года выполнен ряд дополнительных измерений по профилям ЭТ на этих объектах и проведены измерения на выходах коренных пород, расположенных между исследуемыми объектами, но ранее не исследованных. Кроме того, было выполнено 5 пунктов ВЭЗ, с целью определения геоэлектрического строения целевых объектов на больших глубинах. Была проведена двумерная инверсия данных для всех профилей 2024 года и построены геоэлектрические разрезы, а также трехмерная инверсия с учетом всех данных ЭТ для объекта исследования №1. Учитывая данные метода ВЭЗ, полученные раннее, а также новые пункты зондирования, была проведена одномерная интерпретация данных по профилю.

Ключевые слова: электротомография, ВЭЗ, 2D-3D инверсия, Горный Алтай, Уймонская впадина

Z. Y. Kuzina[1]✉, A. M. Sanchaa[1], A. E. Shalaginov[1], I. O. Shaparenko[1]

Updated geoelectric model of a series of bedrock outcrops in the Uimon depression based on direct current methods (ERT, VES)

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

Abstract. The article presents new results from studying the geoelectric structure of a series of basement rock outcrops in the western and central parts of the Uimon Basin in the Altai Mountains using direct current methods: electrical resistivity tomography (ERT) and vertical electrical sounding (VES). During field seasons from 2020 to 2023, measurements were conducted along 13 profiles, six of which were associated with a bedrock outcrop in the western part of the basin (Site No. 1), while the remaining seven were tied to a bedrock outcrop in its central part (Site No. 2) [4]. In the 2024 field season, a series of additional ERT profile measurements were carried out at these sites, as well as measurements on previously unstudied bedrock outcrops located between the investigated sites. Additionally, five VES stations were completed to determine the geoelectric structure of the target sites at greater depths. Two-dimensional inversion of the data was performed for all 2024 profiles, and geoelectric cross-sections were constructed. A three-dimensional inversion incorporating all ERT data was also conducted for research Site No. 1. Taking into account previously obtained VES data, as well as new sounding stations, a one-dimensional interpretation of the profile data was carried out.

Keywords: electrical resistivity tomography (ERT), VES, 2D-3D inversion, Gorny Altai, Uimon depression

Введение

Уймонская впадина расположена в центральной части Горного Алтая, с протяженностью вдоль субширотной оси около 35 км при средней ширине 15 км. Исследования комплексом методов геоэлектрики ВЭЗ и ЗСБ в Уймонской котловине проводились с 2011 по 2019 года [7]. По результатам интерпретации данных глубинных методов геоэлектрики за разные годы была построена геоэлектрическая модель впадины, в которой не учитывались особенности верхней части разреза в виде выходов метаморфических пород ордовикского возраста на дневную поверхность [3]. Можно рассмотреть несколько предположений образования выходов коренных пород. По мнению специалистов-геологов – это либо обрывки верхушек антиклиналий, сдвинутые мощными тектоническими движениями, либо верхняя часть антиклинальных складок кровли фундамента, поднятая на дневную поверхность в местах его относительно неглубокого залегания во время резкой активизации орогенных процессов в четвертичном периоде, которая образует внутривпадинную перемычку. Таким образом, стало очевидным, что нужно привлекать в исследование метод электротомографии. На рисунке 1 представлена схема расположения профилей ЭТ и пунктов ВЭЗ в Уймонской впадине, используемых в данной работе.

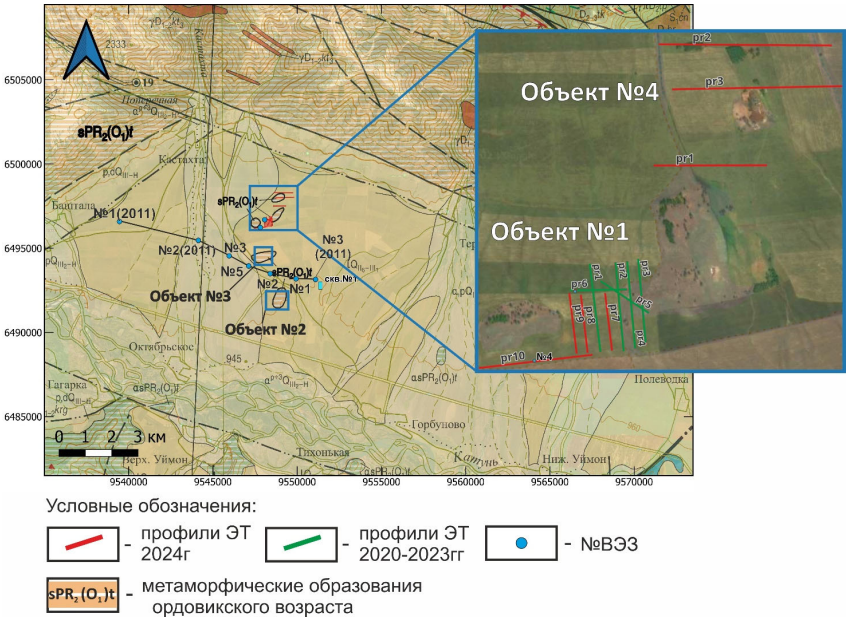


Рис. 1. Обзорная карта района работ в Уймонской впадине на подложке космоснимка и геологической карты (1:200 000) Уймонской впадины, созданная с использованием программных комплексов QGis и CoralDraw [2]

Методы и аппаратура для проведения работ

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры “Скала-48” [1] [8]. Использовалась установка Шлюмберже, 48 электро-

дов, шаг между электродами составлял 5 и 10 метров. Также применялась нагоняющая установка, с целью непрерывного увеличения длины профилей до 355 и 710 метров. Измерения методом ВЭЗ проводились также установкой Шлюмберже. Размеры питающей линии AB/2 находятся в интервале значений 1.5–480 м. Для проведения измерений методом ВЭЗ использовался электроразведочный генератор Астра-100 и измеритель SGD-EET «MEDUSA».

Дополнительные профили на Объекте №1 (Профили 7, 8 и 9) были проведены с целью проверки предположения о его строении, как единого выхода коренных пород, соединяющегося с соседним выходом на западе более меньшего размера на некоторой глубине. Таким образом, была создана регулярная сеть из параллельных профилей с шагом 50 метров.

Для Объекта №4 использовался шаг между электродами 10 метров, с целью увеличения глубины исследования до 90 метров. Данные измерения были направлены на выявление характера погружения выхода коренных пород, а также возможное соединение Объекта №1 и №4 (pr1).

Расположение пунктов ВЭЗ №1, 2, 3 и 5 было выбрано таким образом, чтобы проследить наличие предполагаемой перемычки между Объектами №2 и №3, а также дополнить уже имеющийся профиль ВЭЗ субширотного простирания. В данной статье будет представлена интерпретация профиля ВЭЗ, состоящего из 7 пунктов зондирований.

Фильтрация полевых данных производилась с помощью программы Xeris.

Для решения обратной задачи использовались программы для ЭТ - DiInSo [6] и Res2D(3D)inv; для ВЭЗ – Zondip.

Результаты и обсуждения

Как отмечалось выше, для Объекта №1 по 7 параллельным профилям была проведена трехмерная инверсия и построены карты распределения УЭС по глубинам (рис. 2).

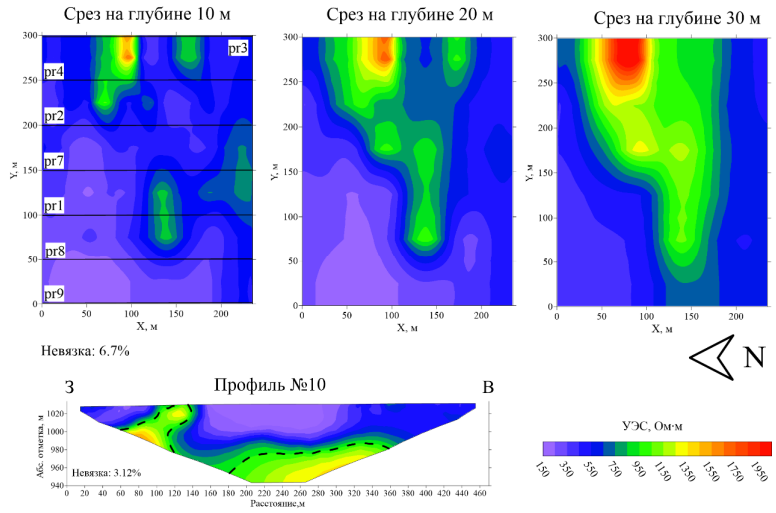


Рис. 2. УЭС на глубинах 10, 20 и 30 м, построенные по результатам 3D инверсии, а также геоэлектрический разрез по профилю №10

На рисунке 2 на всех трех срезах наблюдается ярко-выраженная высокоомная аномалия (УЭС более 900 Ом·м), которая, вероятно, характеризует метаморфические образования ордовикского возраста. Данная аномалия протягивается в западном направлении, в сторону соседнего выхода коренных пород меньшего размера. Однако на профиле №9 (на рис. 2 Y = 0 м), расположенном в 35 метрах от соседнего выхода, высокоомная аномалия не прослеживается, что может указывать на крутой угол погружения его западной части или же ограниченной глубинностью выбранной установки. Также была проведена двумерная инверсия по профилю №10 (рис. 2), который расположен вдоль южного окончания соседнего к Объекту №1 выхода коренных пород на расстоянии 65 метров от него. На геоэлектрическом разрезе штриховой линией выделена изолиния 900 Ом·м. Аномалия высоких значений УЭС прослеживается на отметках 180–360 метров от начала профиля, глубина залегания верхней кромки этой аномалии 40 метров. Данная аномалия может указывать на протяжение исследуемой структуры в южном направлении.

Результаты двумерной инверсии для трех профилей Объекта №4 представлены на рисунке 3.

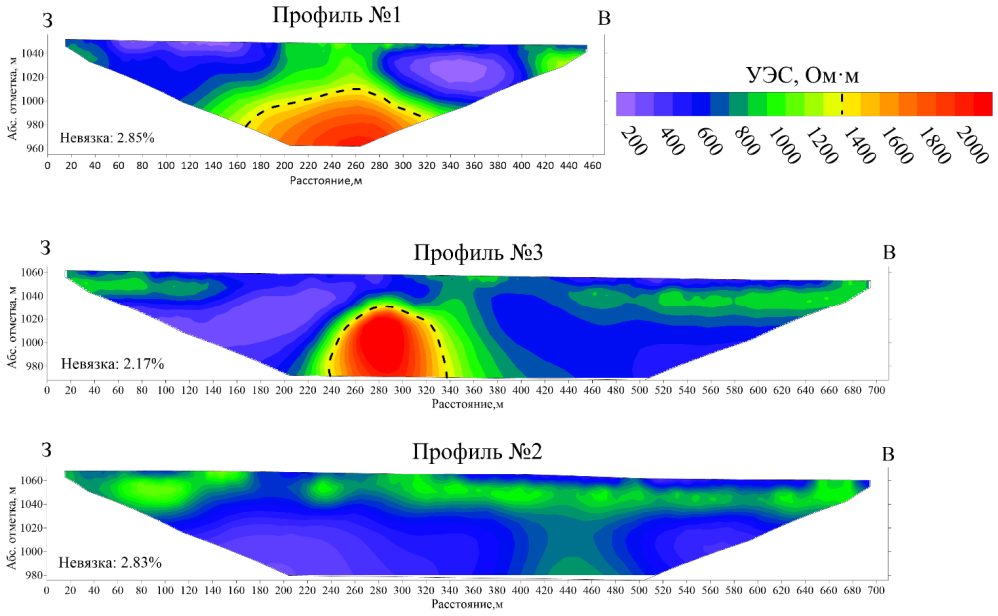


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы для Объекта №4 по профилям 1, 2 и 3. Штриховой линией обозначены предположительные контуры выхода коренных пород (по изолинии 1300 Ом·м)

На профилях №1 и №3 выделены штриховой линией предполагаемые контуры метаморфических образований ордовикского возраста. Профиль №1 расположен на расстоянии 70 метров от Объекта исследования №1. На геоэлектрическом разрезе профиля №1 прослеживается высокоомная аномалия на расстояниях 160–320 метров от начала профиля. Сопоставляя местоположение этой аномалии с данными геологической карты и космоснимка, можно сделать предпо-

ложение, что видимый выход коренных пород №1 протягивается на север, в сторону еще одного выхода, вблизи которого был проведен профиль №3. На геоэлектрическом разрезе по профилю №3 также наблюдается аномалия повышенных значений УЭС на расстояниях 240–340 метров от начала профиля, которая, вероятно, характеризует метаморфические образования ордовикского возраста. Данное предположение согласуется с данными космоснимка. На геоэлектрическом разрезе по профилю №2 наблюдается горизонтально-слоистая среда. Таким образом, можно также предположить, что Объект №1 и №4 представляют собой единую геологическую структуру, которая протягивается на север в сторону горного обрамления.

Далее на основе имеющейся интерпретации по профилю ВЭЗ [7] был построен разрез с добавлением новых данных по четырем пунктам измерений, что позволило значительно уточнить геоэлектрическую модель за счет уменьшения расстояния между пунктами, которое составило менее 1 км. (рис.4).

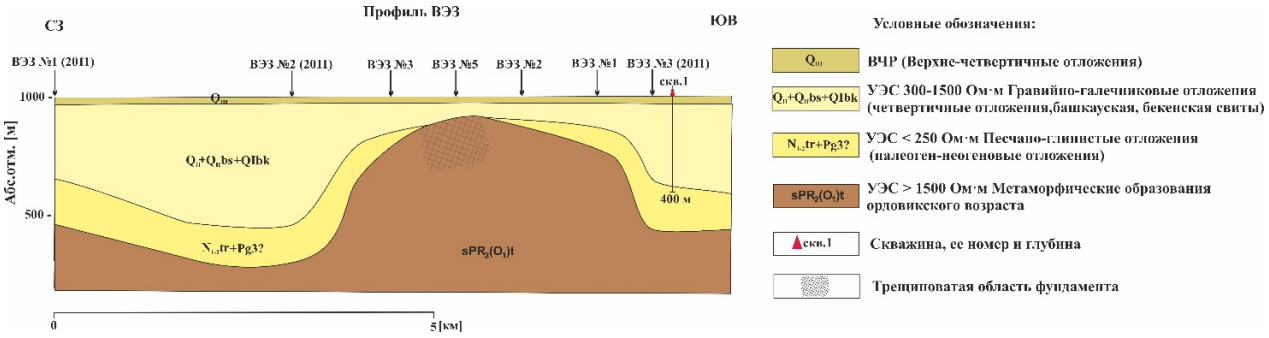


Рис.4. Геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ

Все геоэлектрические модели подобраны с погрешностью менее 5%. В моделях пунктов ВЭЗ №3–№5–№2–№1, которые располагаются между объектами №2 и №3, наблюдается локальное поднятие фундамента до абсолютных отметок 850 метров. По данным космоснимка, пункт ВЭЗ №5 расположен в 100 метрах от выхода коренных пород №3. Геоэлектрическая модель этого ВЭЗа не содержит выраженного низкоомного слоя, который, по данным бурения скважины, соответствует песчано-глинистым отложениям неогенового возраста. Также, значение УЭС пород фундамента занижены, относительно других пунктов, что может указывать на его трещиноватость в этой области. Данное поднятие фундамента может указывать на наличие перемычки между объектами №2 и №3.

Выводы

В статье представлены новые результаты изучения геоэлектрического строения выходов пород фундамента в западной и центральной частях Уймонской впадины Горного Алтая, полученные методами электротомографии (ЭТ) и вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). Обработка данных включала двумерную инверсию данных ЭТ всех профилей 2024 года, трехмерную инверсию данных ЭТ на Объекте №1 и одномерную интерпретацию профиля ВЭЗ с учетом новых и ранее полученных данных. Результаты исследований выявили

наличие высокоомных аномалий для Объекта №1 УЭС> 900 Ом·м, для Объекта №4 УЭС> 1300 Ом·м, интерпретируемых как метаморфические образования ордовикского возраста. Трехмерная инверсия для Объекта №1 показала возможную связь между основным выходом коренных пород и соседним выходом на западе, хотя на некоторых профилях эта связь не прослеживается, что может указывать на крутой угол залегания или нехватки глубины исследования. Полагаясь на результаты двумерной инверсии по профилям для Объекта №4, можно предположить продолжение метаморфических структур в северном направлении, а также его соединение на глубине с Объектом №1. На разрезе по профилю ВЭЗ выявлено локальное поднятие фундамента на пунктах ВЭЗ №3–№5–№2–№1до абсолютных отметок около 850 метров. Полученные результаты поддерживают гипотезу о тектоническом происхождении выходов коренных пород, связанных, вероятно, с внутривпадинными перемычками. Проведенные исследования вносят важный вклад в понимание геологического строения Уймонской впадины и могут быть использованы при геологическом картировании и поисковых работах в данном регионе.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022–0025

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е.В., Панин Г. Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. 2013. N 6. С. 54–63.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000//Издание второе// Серия Горно-Алтайская. Лист M-45-XIV (Усть-Кокса): Объяснительная записка. / сост. О.М. Попова, В.И. Крупчатников, А.Л. Пономарев, Г.Г. Русанов, Е.А. Колпакова. М.: Московский филиал ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2019.
3. Деев.Е.В., Неведрова Н.Н., Русанов Г.Г., Санчаа А.М., Бабушкин С.М., Кречетов Д.В., Ельцов И.Н., Зольников И.Д. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. Т. 9, N 1. С. 15-23.
4. Кузина З.Я., Санчаа А.М., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение выходов коренных пород на дневную поверхность в Уймонской впадине на основе трехмерной инверсии и численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 2 – С. 138-145 – 2024
5. Неведрова Н. Н., Кузина З. Я., Санчаа А. М. Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования //Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 2. – 2025.
6. Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: https://diinso.sourceforge.net
7. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Строение Уймонской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. Т. 43, N 3. С. 66-76.
8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации “Скала-48” – аппаратура электроразведочная многоэлектродная. 2013-2019.

© З. Я. Кузина, А. М. Санчаа, А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко, 2025

УДК 550.51
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-241-246

П. С. Лапин[1]✉, С. Б. Бортникова[1]

Река Малая Талмовая как каскад естественных отстойников отходов (Салаир, Кемеровская область)

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

Аннотация. В последние годы исследованиям, связанным с получением новых данных по процессам, происходящим в отвалах с сульфидным содержанием отходов уделяется пристальное внимание. Определяется вертикальная зональность по элементному составу и содержанию газов в хвостохранилищах, а также осуществляется установление гидрохимических аномалий в ближайшей реке. Такая работа была проведена в пределах заброшенного хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината: Талмовские Пески. Выявлены места концентрации тяжелых металлов и распределение легких в соседней с ним р. Малая Талмовая. Выделяя гидрохимические аномалии, исследователи не задаются вопросом, почему тяжелые металлы концентрируются в конкретном месте, а не разносятся течением. В настоящей работе, для исключения данного пробела, проведены исследования, которые позволили предложить один из вариантов концентрации тяжелых металлов в конкретном месте р. Малая Талмовая. С этой целью осуществлен анализ рельефа земной поверхности на основе оценки деятельности эрозионно-денудационных процессов с привлечением показателя общего эрозионно-денудационного расчленения рельефа. Показатель позволяет оценить объем удаленного в процессе развития рельефа материала в рамках модели пенепленизации территории при участии неотектонических движений. В результате выявлены перехваты реки, последовательность которых создает каскад естественных отстойников. Их наличие и не позволяет тяжелым металлам распространяться вдоль реки на большие расстояния.

Ключевые слова: хвостохранилище, гидрохимические аномалии, эрозионно-денудационные процессы, морфометрические методы

P. S. Lapin[1]✉, S. B. Bortnikova[1]

Malaya Talmovaya River as a cascade of natural waste settling tanks (Salair, Kemerovo region)

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

Abstract. In recent years, close attention has been paid to research related to obtaining new data on the processes occurring in dumps with sulfide content. The vertical zonation is determined by the elemental composition and gas content in the tailings ponds, and hydrochemical anomalies are being identified in the nearest river. Such work was carried out within the abandoned tailings dump of the Salair Mining and Processing plant: Talmovskie Sands. The concentration of heavy metals and the distribution of light metals in the neighboring Malaya Talmovaya River have been identified. By highlighting hydrochemical anomalies, researchers do not ask why the concentration of heavy metals occurs in a particular location, rather than being carried by the current. In this paper, to eliminate this

gap, studies have been conducted that have allowed us to propose one of the options for the concentration of heavy metals in a specific location of the Malaya Talmovaya River. For this purpose, an analysis of the relief of the earth's surface was carried out based on an assessment of the activity of erosion-denudation processes using an indicator of the total erosion-denudation division of the relief. The indicator allows us to estimate the amount of material removed during the development of the relief within the framework of the model of peneplenization of the territory with the participation of neotectonic movements. As a result, river interceptions have been identified, the sequence of which creates a cascade of natural sedimentation tanks. Their presence prevents heavy metals from spreading along the river over long distances.

Keywords: tailings, hydrochemical anomalies, erosion and denudation processes, morphometric methods

Введение

Ранее в работе [1] в пределах р. Малая Толмановая выделены гидрохимические аномалии, которые сформировались под действием водного потока в результате миграции токсичных элементов из хвостохранилища. Очень часто в бассейнах рек при выделении аномальных зон высокой концентрации токсичных веществ незначительное внимание уделяется обоснованию причин, приводящих к возникновению границ этих зон. Исходя из того, что водосборный бассейн — территория земной поверхности, с которой все поверхностные и грунтовые воды стекают в данный водоём или водоток, включая различные его притоки, актуальным являются исследования по обоснованию границ этих аномальных зон. Особенности развития рельефа могут изучаться с привлечением методов генетической морфологии и морфометрии, которые являются составной частью геоморфологических методов. Их применение позволяет в пределах изучаемого водосборного бассейна оценить неравномерность проявления тектонических движений на основе анализа результата взаимодействия эндогенных и экзогенных сил.

Целью настоящего исследования явилось установление связи между выделенными гидрохимическими аномалиями токсичных элементов и естественными перемычками русла, выявленными по результатам деятельности эрозионно-денудационных процессов в современном рельефе. Для достижения поставленной цели были решены задачи: 1) осуществлено районирование территории на основе анализа эрозионно-денудационного расчленения рельефа земной поверхности с привлечением показателя общего эрозионно-денудационного расчленения рельефа и 2) выделены аномальные зоны, характеризующие перемычки водного потока р. Малая Толмановая.

Объект исследования

На реке Малая Талмовая, расположенной в Кемеровской области у г. Салаир, в следствии продолжительной работы Салаирского горно-обогатительного комбината было сформировано хвостохранилище Талмовские Пески, которое в настоящее время является заброшенным. Проблема связана с его разрушением и освобождением токсичных компонентов в окружающую среду [2-4]. В окрестностях хвостохранилища образуются аномалии металлов и металлоидов, как в поч-

вах [5], так и близлежащих водоемах [6,7]. По результатам проведенного опробования построена схема (рис.1).

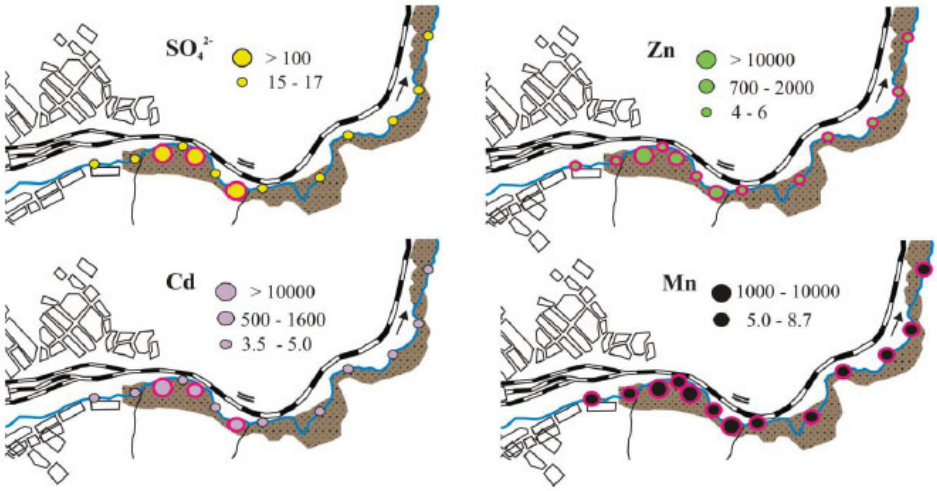


Рис. 1. Превышение концентраций некоторых элементов в воде р. М. Толмовой и в водоёмах на поверхности отходов над фоновыми значениями. Красным обведены точки, в которых содержание элемента превышает ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения [1].

Анализ полученных результатов позволяет выявить одну интересную закономерность, а именно более тяжелые металлы оседают в реке в непосредственной близости от хвостохранилища, а более легкие разносятся водным потоком на большие расстояния. В настоящей статье предложен один из вариантов объяснения данной закономерности.

Для достижения поставленной цели использовали приемы и методы генетической морфологии и морфометрии, направленные на выявление глубинного эндогенного процесса, как составной части развития рельефа. Объектом исследования, в данном случае, выступает современный рельеф, который формируется под действием эрозионно-денудационных процессов от пенеплена до пенеплена при активном участии неотектонических движений.

Метод и обсуждение результатов

В работе действие эрозионно-денудационных процессов оценивается с привлечением показателя общего эрозионно-денудационного расчленения рельефа. Применение этого показателя для решения ряда геоморфологических задач имеет давнюю историю [8-12]. В большинстве исследований этот показатель применялся для анализа приповерхностных процессов [13], что иногда приводило к неоднозначным результатам при их верификации с другими данными. В наших исследования этот показатель отражает глубинный процесс [13], поскольку в процессе развития рельефа под действием эрозионно-денудационных процессов вычисляется суммарный объем удаленного материала, который формируется под действием как глубинной, так и боковой эрозии.

Общий показатель эрозионно-денудационного расчленения вычислялся как произведение двух морфометрических показателей, которые традиционно используются в геоморфологии при описании форм рельефа [8], а именно показателей густоты и глубины эрозионно-денудационного рельефа. Показатель густоты рассчитывается как отношение длины всех временных и постоянных водотоков к площади морфотипа. Показатель глубины вреза гидросети рассчитывается как разность абсолютных отметок максимального значения в пределах водораздела к местному базису эрозии, отнесенная к площади морфотипа. В нашем случае морфотип – это комплексная характеристика локального представительного участка, в пределах которого присутствуют анализируемые морфометрические показатели. Представительный участок – это участок рельефа земной поверхности, в котором присутствуют элементы основной морфологической триады: «водораздел – склон – днище долины» [14,15].

В основу вычислений были положены данные о рельефе из каталогов GWRT (https://www.gmrt.org). Поскольку рельеф земной поверхности является непрерывным, а для построения модели проявления глубинного процесса необходим переход к дискретной его составляющей, то в нашем случае переход осуществлялся на основе задания дискретной составляющей – представительного участка, в пределах которого выбираются значения вышеперечисленных показателей. Представительный участок имеет форму квадрата со стороной 0.25 км. Всего выделено 768 квадратов. На основе полученной информации построена схема морфотипов (значения показателя отнесены к его центру) и на её основании - схема проявления глубинного процесса (рис.2).

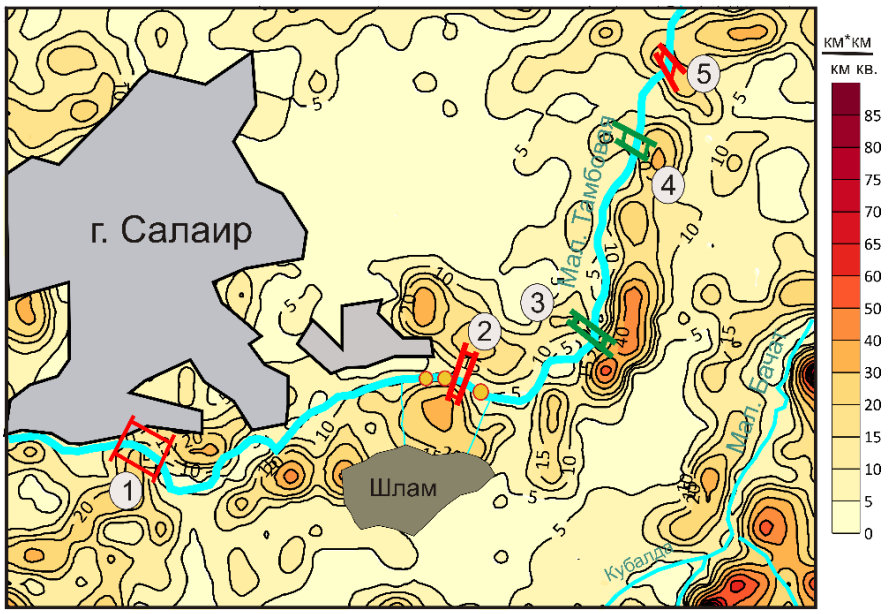


Рис.2. Схема новейших движений в современном рельефе земной поверхности в пределах хвостохранилища Талмановские Пески. Цифрами в кружках обозначены выявленные перехваты реки. Красным четырехугольником отмечены наиболее активно проявляющиеся участки реки. Зеленым четырехугольником – менее активный участки реки.

В пределах объекта исследования было выделено пять перехватов реки разной интенсивности. Перехваты №№ 1,2 и 5 более, а №№ 3 и 4 менее интенсивны. При сопоставлении полученных данных с гидрохимическими аномалиями сульфидных отходов в р. Малая Толмановая (рис. 2) можно отметить, что тяжелые металлы сгруппировались в районе перехвата реки №2, а более легкие распределяются по всему нижнему течению реки.

При этом, бо̀льшее их количество отмечается выше по течению реки от перехвата, а незначительная концентрируется сразу же за ним. Такое расположение металлов возможно и объясняется работой водного потока на перехвате (перекате) (рис. 3).

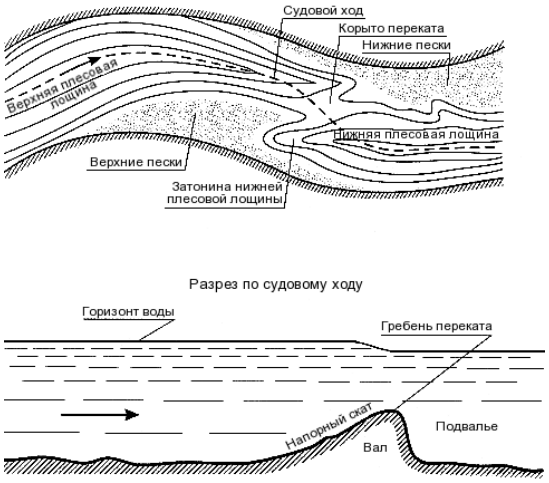


Рис.3. Принципиальная схема переката (перехвата) реки. Пояснения в тексте.

У горизонта воды скорость течения больше, чем у дна реки, что позволяет тяжелым металлам осаждаться на дне. Скорость течения у дна реки также зависит и от расстояния между перекатами. В нашем случае между перекатами №1 и №2. Вместе с тем, тяжелые металлы могут оседать и в подвалье (рис.3), что собственно мы и отмечаем. Можно предположить, что в данном случае осаждение тяжелых металлов связано с существованием перехватов, которые постоянно подновляются под действием глубинного эндогенного процесса. Системы выделенных перехватов можно представить как естественную систему городских очистных сооружений. Последние являются системой больших бетонных емкостей, в которых отстаиваются загрязнённые стоки, а вода постепенно переливается из одной ёмкости в другую.

Заключение

В настоящей работе с привлечением методов генетической морфологии и морфометрии применительно к рельефу земной поверхности и в рамках неотектонического этапа предложен вариант локализации выявленных аномалий. Установлено, что в р. Малая Талмовая выявлена серия перехватов разной интенсивности глубинного эндогенного процесса. Эти перехваты создали систему каска-

дов и к одному из них приурочена аномальная зона тяжелых металлов. Легкие металлы разносятся водным потоком на большие расстояния и их концентрация в воде уменьшается. Нами получены первые результаты, позволившие объяснить локализацию тяжелых металлов в водном потоке. В дальнейшем, мы продолжим исследования на подобных объектах, что позволит набрать определенную статистику выявленной закономерности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) №FWZZ-2022-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бортникова С. Б., Юркевич Н. В., Еделев А. В., Саева О. П., Грахова С. П., Волынкин С. С., Карин Ю. Г. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332 – № 2. – С. 26-35.

2. Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // Journal of Geochemical exploration. – 1995. – V. 52. – № 1–2. – P. 5–23.

3. Skousen J. G., Ziemkiewicz P. F., McDonald L. M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies // The Extractive Industries and Society. – 2019. – V. 6. – № 1. – P. 241–249.

4. Ofori-Sarpong G., Amankwah R. Potential of mine waste rock to generate acid mine drainage – a case study in south-western Ghana // New Frontiers in Natural Resources Management in Africa. – Cham: Springer, 2019. – P. 79–91.

5. Shen Z., Xu D., Li L., Wang J., Shi X. Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26. – № 15. – P. 15698–15709.

6. Minnaar A. Water pollution and contamination from gold mines: acid mine drainage in Gauteng Province, South Africa // Water, Governance, and Crime Issues. – Cham: Springer, 2020. – P. 193–219.

7. Nordstrom D. K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. – 2011. – V. 26. – № 11. – P. 1777–1791.

8. Волков Н. М. Принципы и методы картометрии / Акад. наук СССР. Ин-т географии. Москва, Ленинград: Изд-во и 2-я тип., 1950. – 328 с.

9. Ананьев Г. С. Связь показателя глубины и густоты расчленения рельефа с проявлением новейшей тектоники // Вестник МГУ. Серия V. – 1966. – № 4. – С. 115-131.

10. Геворкян Ф. С. О комплексных морфометрических показателях для характеристики эрозионного расчленения в горных районах (на примере бассейна оз. Севаш в Армянской ССР) // Геоморфология. – 1972. – № 3. – С. 44-49.

11. Якименко Э. Л. Морфометрия рельефа и геология. – Новосибирск: Наука, 1990. – 201 с.

12. Копылов И. С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности: монография. – Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2019. – 131 с.

13.Тимофеев Д. А. Принципы типизации геоморфологических процессов // Геоморфология. – 2004. – №4. – С. 16-20.

14. Лапин П. С., Красавчиков В. О. Морфометрические показатели при анализе направленности эрозионного расчленения рельефа // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 105-114.

15. Лапин П. С. Устойчивое развитие современного рельефа в зоне сочленения Чуйской и Курайской внутригорных впадин (Горный Алтай) // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46. – № 1. – С. 26-39.

© П. С. Лапин, С. Б. Бортникова, 2025

УДК 551.4:551.24:550.837:550.372
DOI 10.33764/2618-981X-2025-2-2-247-252

Е. М. Лобастова[1]✉

Структурно-тектонические особенности Салаирского складчато-покровного сооружения по данным магнитотеллурического зондирования

[1] Новосибирский национальный исследовательский университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: e.lobastova@g.nsu.ru

Аннотация. Изучение глубинного строения литосферы в связи с тектоникой, магматизмом и размещением полезных ископаемых различного генезиса является одной из актуальных задач современной геологии, решение которой имеет важное практическое значение для расширения минерально-сырьевой базы страны. В связи с исчерпанием фонда «легкораскрываемых» месторождений первостепенное значение приобретают исследования «закрытых» территорий, в пределах которых объекты поисков перекрыты образованиями различного генезиса. При этом на передний план выдвигаются структурно-тектонические критерии прогнозирования потенциально рудных территорий на базе геофизических критериев прогнозирования. Одним из эффективных методов, позволяющих изучать структурно-тектонические особенности земной коры потенциально рудоносных территорий, является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Представлены результаты магнитотеллурических зондирований по профилю, пересекающему Западно-Салаирскую зону. Построены и проинтерпретированы глубинный геоэлектрический разрез и разрез верхней части земной коры. Выявлены структурно-тектонические особенности строения Салаира. Определено пространственное положение зоны повышенной электропроводности, ограниченной с двух сторон зонами дробления.

Ключевые слова: магнитотеллурические исследования, геоэлектрический разрез, удельное электрическое сопротивление, проводящие неоднородности, Салаирская полиметаллическая минерагеническая зона

E. M. Lobastova[1]✉

Structural and tectonic features of the Salair fold-cover structure according to magnetotelluric sounding

[1] Novosibirsk National Research University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.lobastova@g.nsu.ru

Abstract. The study of the deep structure of the lithosphere in connection with tectonics, magmatism and location of minerals of different genesis is one of the urgent tasks of modern geology, the solution of which is of great practical importance for the expansion of the mineral resource base of the country. In connection with the exhaustion of the fund of ‘easy-to-discover’ deposits, the research of ‘closed’ territories, within which the objects of prospecting are overlapped by formations of different genesis, is of paramount importance. In this case, structural and tectonic criteria of forecasting potentially ore territories on the basis of geophysical forecasting criteria are brought to the forefront. Magnetotelluric sounding (MTZ) is one of the effective methods that allow studying structural and tectonic features of the Earth's crust of potentially ore-bearing territories. The results of magnetotelluric sounding along the profile crossing the West Salair zone are presented. The deep geoelectric and upper crustal sections are constructed and interpreted. Structural and tectonic features of the Salair structure were

revealed. The spatial location of the zone of increased electrical conductivity, limited on both sides by crushing zones, was determined.

Keywords: magnetotelluric studies, geoelectric section, specific electrical resistivity, conductive heterogeneities, Salair polymetallic mineralogenic zone

Введение

Салаирское покровно-складчатое сооружение (Салаир) расположено на северо-западе Алтае-Саянской складчатой области (АССО) Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). В плане Салаир имеет форму подковы, обращенной выпуклой стороной на северо-восток. Складчатый фундамент сложен интенсивно дислоцированными породами допалеозойского и палеозойского возраста, сформировавшимися в ходе каледонского и герцинского тектогенеза. Осадочный чехол представлен слабо дислоцированными породами мезозоя и кайнозоя [1].

В пределах Салаирского складчато-покровного сооружения обнаруживаются значительные запасы рудных и нерудных полезных ископаемых. Это связано с многоэтапным геологическим развитием территории. Особую промышленную ценность представляют каменный и бурый уголь, железные, полиметаллические, нефелиновые руды, золото [2]. Золото является ключевым полезным ископаемым региона. Здесь известны его эндогенные, элювиальные и россыпные месторождения. На территории Салаирского кряжа установлено широкое распространение мел-палеогеновых кор выветривания и ассоциированных с ними продуктов ближнего переотложения. Представлены они линейными, линейно-площадными и площадными морфологическими типами [3]. Золото аккумулируется в корах выветривания и их переотложенных производных (карстовых и пролювиальных образованиях) в результате дезинтеграции и глубокого химического разложения рудного субстрата. Важно отметить, что существенная доля золота в четвертичных аллювиальных россыпях образовалась за счет эрозии меловых (первичных) и палеогеновых (переотложенных) кор выветривания. Прогнозные ресурсы золота в корах выветривания Салаирской минерагенической зоны весьма значительны [4].

Профиль магнитотеллурических исследований пересекает структуры севера Западно-Салаирской зоны и частично структуры Восточного Салаира в юго-восточном направлении (рис.1). Северо-Западный Салаир является старейшим горнорудным регионом в Сибири [5]. Пункты зондирования 27 и 26 расположены в зоне развития Салаирской полиметаллической минерагенической и пространственно совпадают с контурами Егорьевского рудного узла. Это наиболее известное месторождение коры выветривания Салаирской минерагенической области.

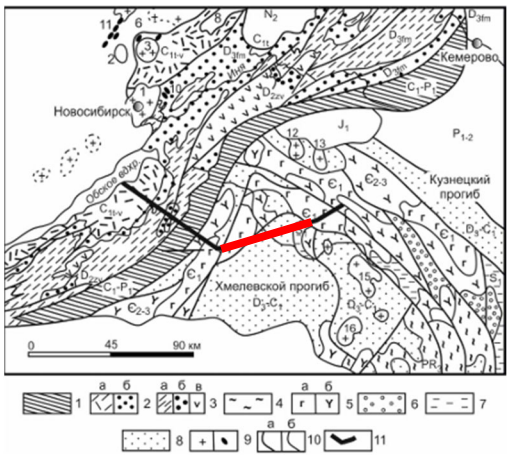


Рис.1. Схема геологического строения Колывань-Томской складчатой зоны и Северо-Западного Салаира [6]. 1 – карбонатно-терригенные отложения Горловско-Зарубинского про гиба (C1-P1); 2 – флишоидные сланцево-песчано-алевролитовые отло жения Новосибирского прогиба (а – C1t-v, б - D3fm); 3 – вулканогенно карбонатно-терригенные отложения Бугокатско-Митрофановского поднятия (а – D3f, б – D2zv2, в – D2zv1); 4-8 – образования Салаира: 4 – карбонатно-кремнисто-вулканогенные (PR3), 5 – терригенно-карбо натно-вулканогенные (а – Є1; б - Є2-O1, 6 – карбонатно-терригенные флишоидные (Є3-O1), 7 - терригенно-карбонатные (S1), 8 – карбонатно терригенные (D3-C1); 9 – массивы гранитоидов (а) и габброидов (б): 1 – Новосибирский, 2 – Колыванский, 3 – Барлакский, 4 – Орловский, 5 – Обской, 6 – Седовозаимский, 7 – Алферовский, 8 – Ташаринский, 9 – Шумихинский, 10 – гусинобродские дайки, 11 – паутовский интрузивы, 12 – Улантовский, 13 – Коуракский, 14 – Елбанский, 15 – Выдрихино Федосеевский, 16 – Залесовский; 10 – границы: а – тектонические, б – стратиграфические; 11 – профиль МТЗ, красная линия – исследуемый профиль.

Целью настоящего исследования является выявление особенностей структурно-тектонического строения Салаира по данным магнитотеллурического зондирования в связи с высоким металлогеническим потенциалом изучаемой территории.

Методы и материалы

В рамках настоящего исследования рассматривается фрагмент профиля (п.п. 37-26) п.Маслянино-п.Бурмистрово [6]. Данный фрагмент имеет протяженность 55 км и полностью располагается в пределах Салаирской полиметаллической зоны. Измерения проводились Российской аппаратурой «Nord Plus» компании «Северо-Запад», обеспечивающей регистрацию компонент магнитотеллурического поля в расширенном диапазоне периодов: 0.0001 – 1000 секунд. Это позволило детально изучить геоэлектрическое строение верхней части разреза земной коры. Расстояние между пунктами зондирований 5 км. На этапе первичной обработки использовались стандартные программы обработки данных, входящие в комплект аппаратуры. Одномерная и двумерная инверсия выполнены в программном комплексе «WinGLink». Качественная и количественная интерпретация проводилась по методике, подробно рассмотренной в [7].

Результаты

По результатам качественной и количественной интерпретации данных магнитотеллурического зондирования определены параметры геоэлектрического разреза (удельное электрическое сопротивление (УЭС) и мощность). Итоговый геоэлектрический разрез верхней части земной коры Салаирского складчато-покровного сооружения построен в рамках двумерной инверсии продольных кривых МТЗ (рис.2)

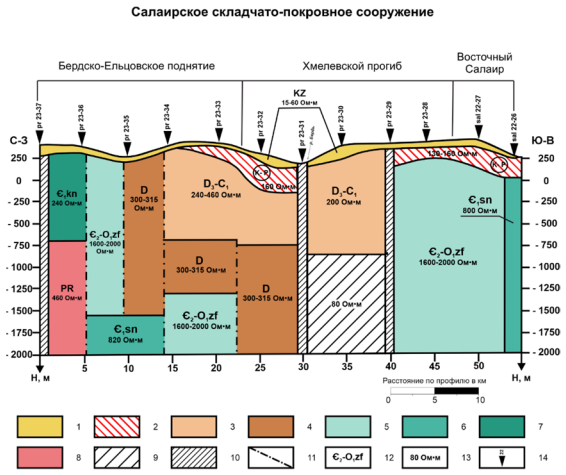


Рис. 2. Геоэлектрический разрез верхней части земной коры Салаирского покровно-складчатого сооружения.1 - кайнозойские отложения, 2 – мел-палеогеновая кора выветривания, 3 – нерасчленённые отложения верхнего девона и нижнего карбона, 4 – нерасчлененные отложения девона, 5 – отложения среднего кембрия и нижнего ордовика, 6 – отложения нижнего кембрия суенгинской свиты, 7 – отложения нижнего кембрия кинтерепской свиты, 8 – протерозой, 9 – области пониженных значений удельного сопротивления, 10 – зоны дробления, 11 – разломные зоны, 12 – геологический возраст отложений, 13 - значения удельного электрического сопротивления в Ом·м, 14 - пункты МТ-зондирований

Глубинный геоэлектрический разрез был построен по алгоритму сглаживающей инверсии Occam в программном комплексе WinGLink (рис.3).

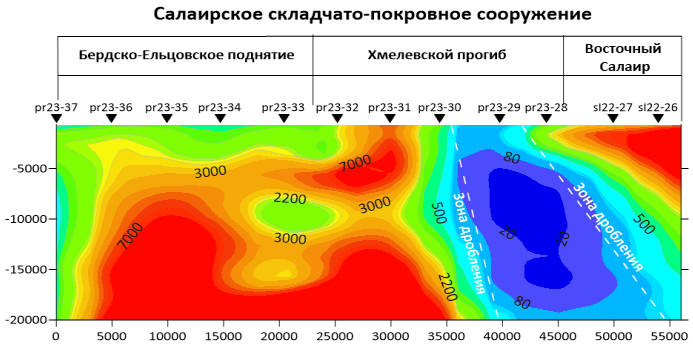


Рис. 3. Глубиный геоэлектрический разрез Салаирского складчато-покровного сооружения.

Обсуждение

Изученный профиль верхней части земной коры пересекает с северо-запада на юго-восток структуры Западного Салаира, частично затрагивая Восточный Салаир (рис.2). Западно-Салаирская зона представляет собой сложноскладчатую структуру регионального масштаба, которая имеет антиформную конфигурацию. Западный Салаир разделяется на Бердско-Ельцовское поднятие и Хмелевской прогиб. Хмелевской прогиб является раннегерцинской наложенной структурой Западно-Салаирской зоны. В пределах этих структур выделяют два яруса: салаирский, представленный кембрийскими и нижнеордовикскими вулканогенно-карбонатно-терригенными отложениями, и герцинский, сформированный девон-нижнекарбонскими вулканогенно-карбонатно-терригенными образованиями. Структурные ярусы разобщены стратиграфическим и угловым несогласиями. Наблюдаемые различия в степени нарушенности пород указывают на их формирование в различных геодинамических обстановках [2].

Первый геоэлектрический горизонт сложен кайнозойскими отложениями незначительной мощности от 50 до 130 м (15-60 Ом·м), перекрывающие мощную мел-палеогеновую кору выветривания (130-160 Ом·м) в области п.п. 33-32 и п.п. 28-26. Структуры Бердско-Ельцовского поднятия и Хмелевского прогиба характеризуются блоковым строением.

В строении Бердско-Ельцовского поднятия преобладает мелкоблоковая тектоника, что отчетливо проявляется в особенностях его геоэлектрического строения. Блоки разделены дизъюнктивными нарушениями. В северо-западной части поднятия (п.п. 37-36) наблюдаются выходы нижнего кембрия кинтерепской свиты ($Є_1$kn), сложенные серыми и темно-серыми известняками с прослоями зеленовато-серых разнозернистых песчаников. На глубине 750 м выявлена зона повышенных значений УЭС 460 Ом·м, предположительно обусловленных наличием метаморфизированных образований. В районе п.п. 36-35 и п.п. 34-33 на глубине 1250 м выявляется серднекембрийская-нижнеордовикская зелёно-фиолетовая серия ($Є_2$-O_1zf), характеризующаяся интенсивно-дислоцированными терригенно-вулканическими отложениями, обуславливающих аномально высокие значения УЭС, которые варьирую от 1600 до 2000 Ом·м. На глубине 1500 м под п.п. 36-34 картируются породы нижнего кембрия суенгинской свиты ($Є_1$sn), удельное электрическое сопротивление которых составляет 820 Ом·м. В юго-восточной части прослеживаются нерасчленённые девонские (D) и верхнедевонские-нижнекаменноугольные (D_3-C_1) отложения, представленные карбонатно-терригенными породами с удельным электрическим сопротивлением от 240 до 460 Ом·м и мощностью более 1750 м (п.п. 35-31).

В пределах Хмелевского прогиба картируются зоны дробления (п.п. 31; п.п. 29), между которыми выявляется зона пониженных значений УЭС 80 Ом·м (п.п.30). Прогиб сложен нерасчленёнными девонскими (D) и верхнедевон-нижнекарбоновыми (D_3-C_1) породами с приведёнными ранее параметрами УЭС. В районе п.п. 29 прослеживаются геоэлектрический горизонт, представленный отложениями зелено-фиолетовой серии ($Є_2$-O_1zf).

Юго-Восточная часть геоэлектрического разреза в области структур Восточного Салаира (п.п. 27-26) выделяются блоки, сложенные породами зеленофиолетовой серии ($Є_2$-O_1zf) и суенгинской свиты ($Є_1$sn). Разрез консолидированной коры характеризуется высокими значениями УЭС, достигающими более 7000 Ом·м (рис.2). В юго-восточной части профиля (п.п. 29) выделяется область аномально низких значений УЭС, контролируемая с двух сторон разломными нарушениями. Она представляет интерес в плане рудной специализации.

Заключение

Полученные результаты позволили выявить основные особенности геоэлектрического строения Салаирской полиметаллической минерагенической зоны.

В строении Бердско-Ельцовского поднятия преобладает мелкоблоковая тектоника, что отчетливо проявляется в особенностях его геоэлектрического строения. Блоки разделены дизъюнктивными нарушениями. В разрезе консолидированной коры в районе п.п. 31-29 выделена проводящая зона со значениями сопортивления менее 80 Ом·м, ограниченная с обеих сторон зонами дробления. Эта область может представлять интерес в плане рудной специализации.

Благодарности

Работа выполнялась под руководством д.г-м.н., ведущего научного сотрудника Поспеевой Елены Валентиновны с использованием материалов предоставленых лабораторией геоэлектрики ИНГГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жимулев Ф.И., Поспеева Е.В., Новиков И.С., Потапов В.В. Глубинное строение Салаирского складчато-покровного сооружения (Северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по данным магнитотеллурического зондирования. Geodynamics & Tectonophysics Volume 12 Issue 1, 2021. – 125-138 с.

2. Беляев В.И., Нечаев В.В., Дергачев В.Б., Зудин А.Н., Дагаев Ю.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. 2-е изд. Серия Кузбасская. Лист N-45-XIII (Маслянино). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2015. – 276 с.

3. Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В. и др. Минерагения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «ГЕО», 2001. – 243 с.

4. Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. – СПб.: картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. – 665 с.

5. Росляков Н. А., Нестеренко Г. В., Калинин Ю. А., Васильев И. П. и др. Золотоносность кор вьmетривания. РАН, Сиб. отд-ние, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1995. – 170 с.

6. Е. В. Поспеева, В. В. Потапов. Глубинное строение верхней части земной коры вдоль профиля п. Бурмистрово – п. Маслянино по данным магнитотеллурических зондирований. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 2: Междуна родная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных иско паемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. № 4. – 266 с.

7. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплекса электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая). Физика земли, 2011 год. №1. – 63-75 с.

© Е. М. Лобастова, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. К. Д. Гладких, Е. А. Кузнецова. Патентный ландшафт технологий извлечения золота из техногенных месторождений 3
2. А. А. Долганов, В. Ю. Немов. Факторный анализ мирового спроса на нефть 8
3. Д. Д. Жаркова, А. Ю. Новиков. Эколого-экономические аспекты деятельности отрасли животноводства..... 15
4. А. Н. Ибрагимова, И. В.Филимонова. Оценка и анализ рынка ипотечного жилищного кредитования с учетом региональных особенностей 21
5. П. И. Ивашнева, А. В. Комарова. Оценка эффектов деятельности добывающих компаний на экономику ресурсного региона 27
6. В. И. Канафьева, В. Б. Шовтак. Рынок жилья: предложение и платежеспособный спрос 32
7. А. О. Киселев, А. Ю. Новиков. Подходы к учету международной интеграции в гравитационной модели торговли 36
8. В. Е. Морозова, М. В. Мишенин. Экологический мониторинг регионов России 42
9. Н. В. Сальникова, И. В. Филимонова. Показатели инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний России 49
10. А. П. Саматова, И. В. Филимонова. Методические основы прогнозирования цен на нефть 54
11. А. С. Сеничкина, А. В. Комарова. Эколого-климатические факторы в маркетинговых стратегиях компаний 60
12. Е. А. Старыгина, Е. А. Кузнецова. Структура мирового рынка торговли услугами..... 64
13. А. Е. Шеремет, В. Ю. Немов. Выявление факторов, влияющих на душевое энергопотребление..... 68
14. Е. А. Шиян, А. А. Карташевич. Продовольственная безопасность как основа устойчивого развития экономики страны 77
15. Е. В. Агеенков. Некоторые аспекты переходного процесса после импульсного воздействия заземлённой электрической линии на проводящую поляризующуюся среду 83
16. Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников. Моделирование индукционных переходных характеристик с учётом задержки выключения тока в генераторной петле..... 90
17. А. В. Анчугов, К. Л. Тарасенко. Анализ экспериментальных данных на соответствие закону Омори для образцов керна горной породы при одноосном нагружении до разрушения: от лабораторных данных к сейсмическим закономерностям..... 98

18. Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев. Уточненная карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области 106
19. А. А. Башкова, А. Н. Шеин, Я. Б. Горелик. Особенности мониторинга геологической среды застраиваемых территорий Приуральского района ЯНАО 113
20. А. Ю. Белинская, А. А. Боровко. Возмущения ионосферного радиоканала в период декабрь 2024 г. – январь 2025 г. 123
21. А. А. Белоусов, П. А. Дергач, А. В. Яблоков, Г. Ю. Зобнин. Результаты методических испытаний системы оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн 131
22. А. В. Беляшов, И. П. Шерстюк. Усовершенствование гипоцентрии локальных землетрясений Центрального Байкала 138
23. А. В. Беляшов, П. А. Дергач, Г. С. Чернышов, Г. Ю. Зобнин. Методическое согласование томографического и лучевого способов построения скоростного малоглубинного разреза 144
24. А. В. Беляшов, А. В. Яблоков, П. А. Предеин. Предварительная оценка структурно-скоростного строения Центрального Байкала методом Накамуры 152
25. Я. О. Бондарчук. Неотектоника и сейсмическая активность Горного Алтая на примере Чуйской и Курайской впадин по данным магнитотеллурических исследований 158
26. М. М. Буслов, Ю. А. Бишаев, А. В. Травин. Взаимосвязи формирования Западно-Сибирского бассейна и горного обрамления в мезозое: U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения и термохронология поднятий 164
27. Н. А. Голиков, Д. М. Евменова, М. В. Милованов. Результаты экспериментальных исследований образования глинистой корки на образцах водо-газонасыщенных коллекторов 171
28. А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова. Атмосферная эмиссия микроэлементов от хранилищ отходов горнорудных производств 177
29. П. А. Дергач, Я. Э. Бегич, А. А. Белоусов, А. И. Еникеев. Разработка и апробация методики оценки эффективности вибрационных барьеров с использованием портативного источника сейсмических волн 183
30. Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов. Синхронная и акустическая инверсии, их преимущества и недостатки на реалистичных примерах 190
31. А. А. Землянскова, В. В. Оленченко, О. М. Макарьева, Е. А. Ахрамеев. Строение наледи на ручье Михалыч вблизи инженерных сооружений по данным георадиолокации (Магаданская область) 196
32. С. А. Казанцев. Метод динамической автокалибровки термодатчиков 201
33. В. А. Какуля, М. Н. Балдин. Полевая градуировка комплекса «ЭХО» для задач геохимической съемки 206
34. В. В. Карстен. Неоднозначности при определении наклона отражающих границ по данным непродольного ВСП 215

35. Н. О. Кожевников. Электроразведочные исследования в устье реки Сармы (Приольхонье, Западное Прибайкалье) 221
36. Е. С. Коняев. Улучшенный метод астрономической привязки при помощи немагнитного теодолита 229
37. З. Я. Кузина, А. М.Санчаа, А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко. Обновленная геоэлектрическая модель серии выходов коренных пород Уймонской впадины по данным методов постоянного тока (ЭТ, ВЭЗ) 235
38. П. С. Лапин, С. Б. Бортникова. Река Малая Талмовая как каскад естественных отстойников отходов (Салаир, Кемеровская область) 241
39. Е. М. Лобастова. Структурно-тектонические особенности Салаирского складчато-покровного сооружения по данным магнитотеллурического зондирования 247

CONTENTS

1. K. D. Gladkikh, E. A. Kuznetsova. The patent landscape of gold extraction technologies from tailings dumps 3
2. A. A. Dolganov, V. Yu. Nemov. Factor analysis of global oil demand 8
3. D. D. Zharkova, A. Y. Novikov. Ecological and economic aspects of the livestock industry 15
4. A. N. Ibragimova, I. V. Filimonova. Assessment and Analysis of the Mortgage Housing Lending Market with Consideration of Regional Specifics 21
5. P. I. Ivashneva, A. V. Komarova. Assessment of the Effects of Extractive Companies' Activities on the Economy of a Resource Region 27
6. V. I. Kanafeva, V. B. Shovtak. Housing market: production costs and effective demand 32
7. A. O. Kiselev, A. Y. Novikov. Approaches to accounting for international integration in the gravity model of trade 36
8. V. E. Morozova, M. V. Mishenin. Ecological monitoring of Russian regions 42
9. N. V. Salnikova, I. V. Filimonova. Indicators of investment attractiveness of oil and gas companies in Russia 49
10. A. P. Samatova, I. V. Filimonova. Methodological foundations of oil price forecasting 54
11. A. S. Senichkina1, A. V. Komarova. Ecological and climatic factors in marketing strategies of companies 60
12. E. A. Starygina, E. A. Kuznetsova. The structure of the global services trade market 64
13. A. E. Sheremet, V. Yu. Nemov. Identification of factors affecting per capita energy consumption 68
14. E. A. Shiyan, A. A. Kartashevich. Food security as a basis for sustainable development of the country's economy 77
15. E. V. Ageenkov. Features of the transient process after the pulse impact of a grounded electric line on a conductive polarizing medium 83
16. E. Yu. Antonov, N. O. Kozhevnikov. Modeling induction transient characteristics taking into account the delay in the current shutdown in the transmitter loop 90
17. A. V. Anchugov, K. L. Tarasenko. Analysis of experimental data for compliance with the Omori law for core samples of rock under uniaxial loading before destruction: from laboratory data to seismic patterns 98
18. D. E. Ayunov, A. D. Duchkov, S. A. Kazantsev. Updated heat flow map of the Altai-Sayan region 106

19. A. A. Bashkova, A. N. Shein1, Y. B. Gorelik. Features of monitoring the geological environment of the built-up territories of the Priuralsky district of the YNAD 113
20. A. Yr. Belinskaya, A. A. Borovko. Disturbances of ionospheric radio channel the period December 2024 – January 2025 123
21. A. A. Belousov, P. A. Dergach, A. V. Yablokov, G. Y. Zobnin. Results of methodical tests of the system of diagnostics of near-surface seismic section using reflected SH-waves 131
22. A. V. Belyashov, I. P. Sherstyuk. Central Baykal local earthquakes hypocentria development 138
23. A. V. Belyashov, P. A. Dergach, G. S. Chernyshov, G. Yu. Zobnin. Methodological coordination of tomographic and ray tracing methods of constructing a velocity shallow section 144
24. A. V. Belyashov, A. V. Yablokov, P. A. Predein. Preliminary assessment of the structural and velocity framework of Central Baikal by the Nakamura method 152
25. Y. O. Bondarchuk. Neotectonics and seismic activity of the Altai Mountains on the example of the Chuya and Kurai depressions based on magnetotelluric studies 158
26. M. M. Buslov, Yu. A. Bishaev, A. V. Travin. Interrelations of the West Siberian Basin Formation and Mountainous Framing in the Mesozoic: U-Pb Dating of Detrital Zircons from Sedimentary Filling and Thermochronology of Uplifts 164
27. N. A. Golikov, D. M. Evmenova, M. V Milovanov. Results of experimental studies of clay cake formation on samples of water-gas-saturated reservoirs 171
28. A. Y. Devyatova, S. B. Bortnikova. Atmospheric emission of trace elements from mining waste storage 177
29. P. A. Dergach, Ya. E. Begich, A. A. Belousov, A. I. Enikeev. Development and testing of a methodology for evaluating the effectiveness of vibration barriers using a portable seismic wave source 183
30. D. K. Dmitrachkov, M. I. Protasov. Simultaneous and acoustic inversions, their advantages and drawbacks on realistic examples 190
31. A. A. Zemlianskova, V. V. Olenchenko, O. M. Makarieva, E. A. Akhrameev. Aufeis shape on Mikhalych creek near engineering structures according to ground penetrating radar data (Magadan region) 196
32. S.A. Kazantsev. Method of dynamic autocalibration of temperature sensors 201
33. V. A. Kakulya, M. N. Baldin. The Field Calibration of ECHO Complex for Geochemical Survey Tasks 206
34. W. V. Karsten. Ambiguity in resolving reflector dip angle from offset VSP data 215
35. N. O. Kozhevnikov. Electrical and electromagnetic surveys at the mouth of the Sarma River (Olkhon region, Western Gisbaikalia) 221

36. E. S. Konyaev. An improved method of astronomical referencing using a non-magnetic theodolite 229
37. Z. Y. Kuzina, A. M. Sanchaa, A. E. Shalaginov, I. O. Shaparenko. Updated geoelectric model of a series of bedrock outcrops in the Uimon depression based on direct current methods (ERT, VES)..... 235
38. P. S. Lapin, S. B. Bortnikova. Malaya Talmovaya River as a cascade of natural waste settling tanks (Salair, Kemerovo region) 241
39. E. M. Lobastova. Structural and tectonic features of the Salair fold-cover structure according to magnetotelluric sounding 247

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»

№ 2

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. 15,05. Тираж 34 экз. Заказ 85.
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.