
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ОКТАБРЬ № 4 2025 ДЕКАБРЬ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

д-р физ.-мат. наук *Ю.П. Ампилов*, д-р физ.-мат. наук *И.О. Баяк*, д-р физ.-мат. наук *М.Л. Владов*,
д-р геол.-мин. наук *А.Ф. Глебов*, чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *В.Н. Глинских*, д-р техн. наук
Г.Н. Гогоненков, д-р физ.-мат. наук *М.С. Денисов*, д-р техн. наук *И.Н. Ельцов*, д-р техн. наук
А.Ф. Еманов, д-р техн. наук *А.П. Жуков*, д-р техн. наук *Ю.И. Колесников*, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин.
наук *В.А. Конторович*, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук *Ю.И. Кулаков*, д-р техн. наук *Э.Е. Лукьянов*,
чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *П.С. Мартышко*, д-р физ.-мат. наук *Г.М. Митрофанов*, чл.-к. РАН,
д-р физ.-мат. наук *И.Б. Петров*, д-р геол.-мин. наук *Е.В. Поспеева*, д-р геол.-мин. наук *В.С. Селезнев*,
д-р геол.-мин. наук *В.Д. Суворов*, д-р техн. наук *А.П. Сысоев*, д-р техн. наук *Г.М. Тригубович*,
д-р физ.-мат. наук *В.А. Чевверда*, д-р техн. наук *Г.А. Шехтман*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 4	Октябрь–Декабрь 2025
----------------	-------------------------------	-----	-------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В. Распределение сейсмоплотностных неоднородностей в земной коре и верхах мантии Забайкалья и Прибайкалья (профиль 1-СБ)	4
Костащук Д.И., Митрофанов Г.М. О стохастической инверсии и ее использовании для прогноза характеристик среды	12
Бакеев Р.А., Стефанов Ю.П., Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В., Сальников А.С. Влияние сейсмоплотностных неоднородностей на напряженно-деформированное состояние земной коры и верхов мантии по профилю 1-СБ	30
Колесников Ю.И., Федин К.В. Опыт применения генерируемых сейсмоакустическими шумами стоячих волн для решения задач инженерной сейсмологии	42
Оленченко В.В., Эпов М.И., Напреев Д.В., Салихов В.С., Антонов Е.Ю. Перспективы нефтегазоносности северных флангов Ононской впадины (Забайкалье) по данным электромагнитных зондирований и газовой хроматографии.....	68

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 4	October–December 2025
-----------------	-----------	------	--------------------------

CONTENTS

Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V. Distribution of seismic and density heterogeneities in the crust and upper mantle of Transbaikalia and Baikal region (profile 1-SB)	4
Kostashchuk D.I., Mitrofanov G.M. On stochastic inversion and its use for media characteristics prediction	12
Bakeev R.A., Stefanov Yu.P., Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V., Salnikov A.S. The effect of seismic density irregularities on the stress-strain state of the Earth's crust and mantle tops along the profile 1-SB	30
Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Experience of using standing waves generated by seismoacoustic noise to solve engineering seismic problems	42
Olenchenko V.V., Epov M.I., Napreev D.V., Salikhov V.S., Antonov E.Yu. Prospects of oil and gas potential in the northern flanks of the Onon depression (Transbaikalia) according to electromagnetic sounding and gas chromatography data	68



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМОПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВЕРХАХ МАНТИИ ЗАБАЙКАЛЬЯ И ПРИБАЙКАЛЬЯ (ПРОФИЛЬ 1-СБ)

Елена Александровна Мельник^{1,✉}, Владимир Дмитриевич Суворов², Евгений Владимирович Павлов³

^{1,2,3}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

²SuvorovVD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1724-3095>

³PavlovEV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3064-6879>

Аннотация. На основе комплексной интерпретации сейсмических и гравитационных данных по профилю 1-СБ рассмотрен параметр взвешенной плотности для различных уровней земной коры Забайкалья, Прибайкалья, а также Сибирской платформы. Характер распределения взвешенной плотности в земной коре подчеркивает различие геодинамической природы этих районов. Для складчатых областей, в отличие от Сибирской платформы, наблюдается повышенная контрастность изменения взвешенной плотности в верхнем слое консолидированной коры и в слое верхней мантии.

Ключевые слова: земная кора, скорость, плотность, Забайкалье, Прибайкалье, Сибирская платформа

Финансирование: работа была выполнена в рамках государственного задания 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».

Для цитирования: Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В. Распределение сейсмоплотностных неоднородностей в земной коре и верхах мантии Забайкалья и Прибайкалья (профиль 1-СБ) // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 4–11. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-4.

DISTRIBUTION OF SEISMIC AND DENSITY HETEROGENEITIES IN THE CRUST AND UPPER MANTLE OF TRANSBAIKALIA AND BAIKAL REGION (PROFILE 1-SB)

Elena A. Melnik^{1,✉}, Vladimir D. Suvorov², Evgeny V. Pavlov³

^{1,2,3}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

²SuvorovVD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1724-3095>

³PavlovEV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3064-6879>

Abstract. Based on the complex interpretation of seismic and gravity data along profile 1-SB, the parameter of weighted density was considered for different levels of the crust in Transbaikalia, Baikal region, and the Siberian Platform. The character of the distribution of weighted density in the crust emphasizes differences in the geodynamic essence of these areas. For folded regions, unlike the Siberian Platform, there is a higher contrast in the variation of weighted density in the upper layer of the consolidated crust and in the upper mantle layer.

Keywords: Earth's crust, velocity, density, Transbaikalia, Baikal region, Siberian Platform

Funding: The study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2022-0021 "Regional structure features of the Earth's crust and upper mantle of platform and folded areas of Siberia, their stress-strain state according to seismological, gravimetric and geomechanical data.

For citation: Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V. Distribution of seismic and density heterogeneities in the crust and upper mantle of Transbaikalia and Baikal region (profile 1-SB) // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 4–11. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-4.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются региональные характеристики земной коры и верхов мантии по результатам обработки сейсмоплотностных данных на профиле 1-СБ, пересекающего Забайкальскую и Прибайкальскую части Центрально-Азиатского складчатого пояса [Сержантов и др., 2013; Кашубин и др., 2016].

Сейсмическая модель земной коры и верхов мантии получена по данным лучевого моделирования [Zelt, 1999; Мельник, Суворов, 2018] (рис. 1.). Особой характеристикой кристаллической коры Забайкалья и Прибайкалья в целом является пониженные значения средней скорости 6.2–6.4 км/с по сравнению с 6.4–6.5 км/с на Сибирской платформе, в нижней коре которой присутствует слой с повышенной до 6.7–6.9 км/с скоростью [Суворов, Мельник, 2021].

Мезокайнозойские осадочные отложения распространены чаще всего в зонах глубинных разломов и в протяженных прогибах в пределах Монголо-Забайкальской (0–180 км) и Муйской рифтогенной впадин с мощностью до 3 км. Осадочный чехол Сибирской платформы в районе Ангаро-Ленской моноклинали характеризуется двухслойным прогибом, в верхней части которого залегают породы со скоростью около 3.8 км/с и более мощного второго слоя (5–8 км), заполненного отложениями, характеризующимися скоростями 5.3–5.9 км/с. В целом мощность осадочной толщи может достигать 7–8 км.

На глубине 10–18 км частично удалось проследить кровлю средней коры с граничной скоростью 6.3 км/с. Граница образует пологий подъем протяженностью около 200 км с апикальной частью на глубине около 10 км в окрестности Монголо-Охотского разлома (250–450 км профиля) и под Селенгино-Яблонево́й складчатой системой (650–900 км).

Кровля нижней коры, где скорость продольных волн скачком изменяется от 6.35 до 6.6 км/с, залегают под Монголо-Забайкальской складчатой системой на глубине 20–23 км и погружается в зоне Монголо-Охотского разлома, образуя локальный прогиб (220–450 км профиля), заполненный линзообразной неоднородностью, со скоростью 6.45–6.5 км/с. Далее к северу под Селенгино-Становой складчатой областью (450–970 км) отмечается пологое поднятие внутрикоровой границы до глубины 20 км с амплитудой около 10 км. Скорость 6.6–6.7 км/с в нижней коре вдоль всего профиля остается практически постоянной.

При столь контрастных структурах верхней коры отмечается довольно пологий рельеф Мохо, залегающий на глубинах от 39–40 км на участке профиля 0–600 км до 45–47 км под Байкальской складчатой областью. Под Сибирской платформой глубина Мохо уменьшается до 40–42 км. Скорость на Мохо изменяется от 7.9 до 8.5 км/с в пределах блоков с размерами от 100 до 200 км. Наибольшие значения характерны для Монголо-Забайкальской складчатой системы, а наименьшие для Байкальской складчатой области.

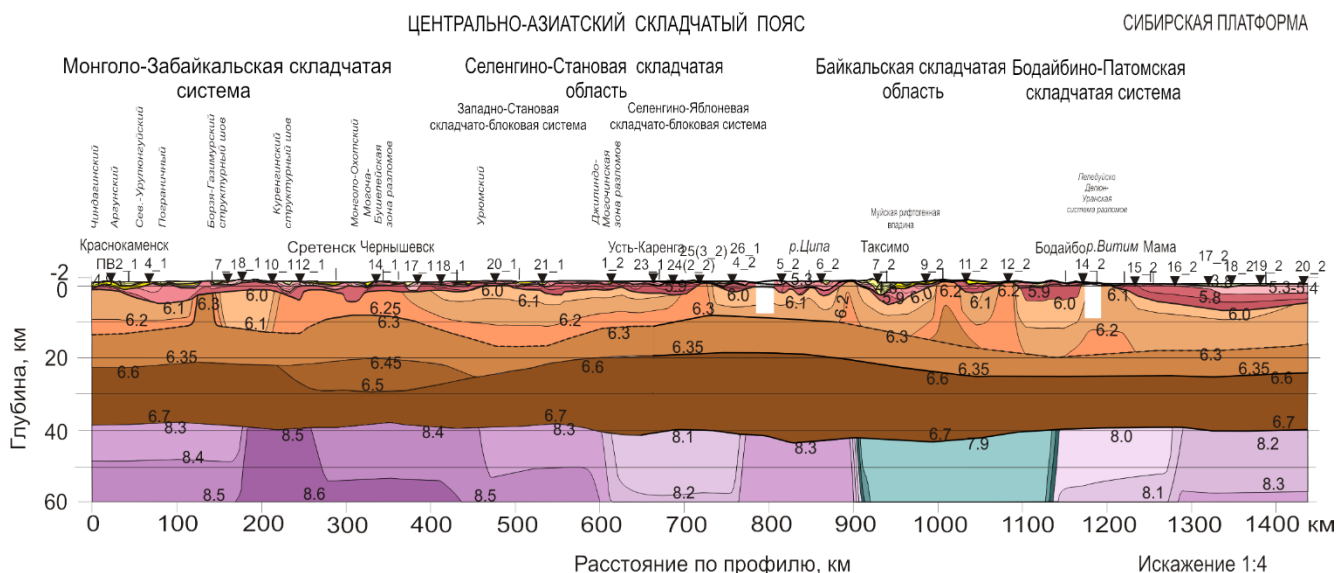


Рис. 1. Сейсмический разрез земной коры [Мельник, Суворов, 2018]. Толстые линии – границы со скачком скорости или с изменениями ее градиента в слоях, тонкие – изолинии в км/с. Структурно-тектонические единицы соответствуют тектонической карте М 1:1 000 000, листы М-50, N-50, O-49, O-50 (интернет-ресурс [ftp://ftp.vsegei.ru](http://ftp.vsegei.ru)).

СЕЙСМОПЛОТНОСТНАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХОВ МАНТИИ

Для изучения распределения плотности в земной коре и условном слое верхов мантии (подошва на глубине 60 км) использованы спутниковые цифровые модели рельефа DNSCO8 и гравитационного поля в аномалиях Буге WGM2012. Разделение гравитационного влияния земной коры и верхней мантии проведено осреднением поля аномалий Буге в радиусе 125 км, отнесенное к влиянию мантийных плотностных неоднородностей. Также использовался сглаженный в круге такого же радиуса рельеф дневной поверхности (рис. 2).

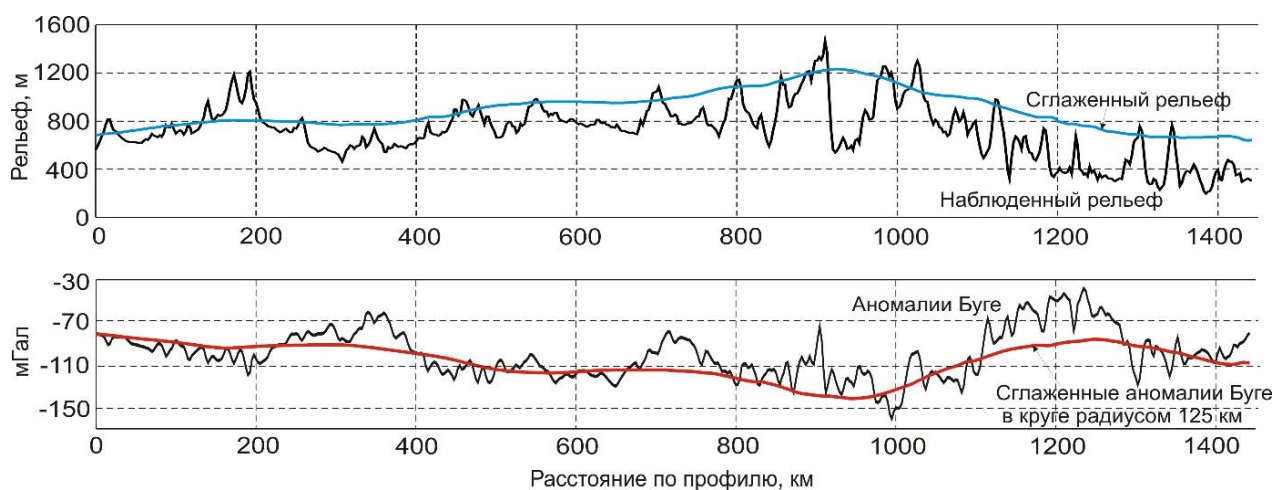


Рис. 2. Наблюдаемые и сглаженные в круге радиусом 125 км рельеф дневной поверхности (вверху) и гравитационное поле в аномалиях Буге (внизу).

Наблюдаемая уверенная корреляционная связь между сглаженными рельефом и гравитационным полем описывается соотношением $h = -8.3256g + 16.83$ при $R^2 = 0.9463$ (h – рельеф в метрах, g – аномалии Буге, мГал), что свидетельствует об изостатическом состоянии литосферы в модели Эйри–

Хейсканена. Остаточные аномалии Буге в виде разности между полным аномальным полем и сглаженным можно отнести к влиянию плотностных неоднородностей коры.

Плотностная модель для гравитационного моделирования сформирована на основе сейсмической структурно-скоростной модели коры (см. рис. 1). Для расчета стартовых значений фоновой плотности в каждом слое использована корреляционная зависимость скорость–плотность по [Brocher, 2005], при этом ее значения для каждого слоя определены средней величиной. Далее проведен итерационный подбор значений плотности в земной коре, соответствующих остаточным аномалиям Буге по программе ADG-3D [Кочнев и др., 2011]. Результат характеризуется среднеквадратическим расхождением между модельными и экспериментальными значениями поля, не превышающими 2 мГал. Finalный шаг заключался в подборе плотности в верхах мантии (слой с подошвой под Мохо на глубине 60 км) по полному полю в аномалиях Буге с учетом распределения плотности в земной коре (рис. 3).

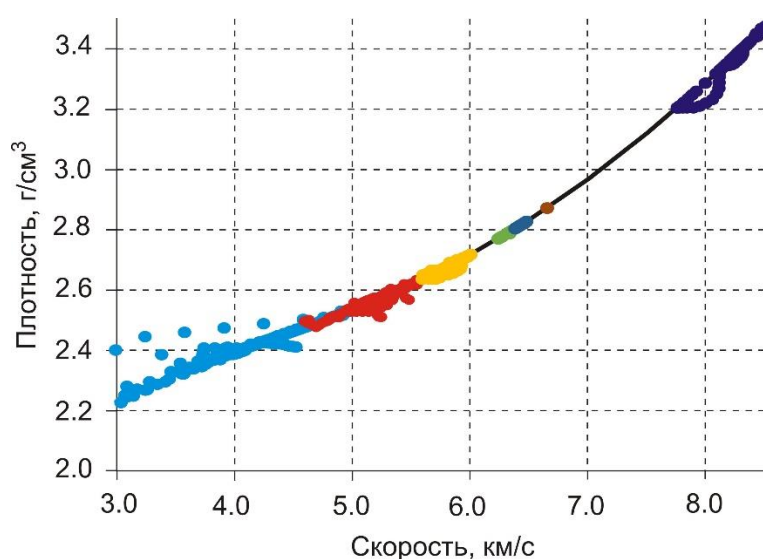


Рис. 3. Послойная корреляция скорость–плотность в земной коре и верхах мантии (сплошной линией показано изменение плотности по [Brocher, 2005], цветом плотность в слоях).

Как видно из рис. 3, слои коры характеризуются значительной латеральной плотностной неоднородностью при общей тенденции увеличения плотности и скорости с глубиной. Наиболее заметно отличающиеся пониженными значениями плотности от корреляции по [Brocher, 2005] наблюдаются для скорости на Мохо. Выделяются четыре блока верхней мантии на участках профиля 0–450, 450–900, 900–1150 и 1150–1420 км со значениями скорости 8.4, 8.2–8.3, 7.9 и 8.1 км/с соответственно, которые в целом отражают крупную блоковость коры (см. рис. 1).

Расчеты изменений плотности в коре по данным остаточных аномалий Буге (разность между аномалиями Буге и их сглаженными значениями, согласованные с сейсмической структурой коры по данным ГСЗ (см. рис. 1), выполнялись по программе [Кочнев и др., 2011]. Результаты представлены на рис. 4, где показан плотностной разрез и послойное изменение плотности. Наблюдаются заметные латеральные изменения плотности в верхней коре с контрастностью, уменьшающейся с глубиной. Нижняя кора характеризуется практически постоянной плотностью. Ее значительные латеральные изменения наблюдаются в мантийной части разреза (слой под Мохо с подошвой на глубине 60 км). Особо контрастное уменьшение плотности в верхах мантии присутствует на интервале профиля 900–1120 км.

В целом разрез кристаллической земной коры представлен трехслойной моделью, исключением является Монголо-Охотская и Могоча-Бушулейская зоны разломов, где в низах средней коры присутствует высокоскоростная линза. Наиболее контрастные изменения плотности наблюдаются в верхней части чехла, где локальные уменьшения плотности от 2.4 до 2.1 г/см³ коррелируют с Монголо-Охотской зоной разломов. Также наиболее контрастные изменения плотности характерны для верхов мантии, где уменьшение плотности от 3.4 до 3.2 г/см³ на участке профиля 900–1100 км, относящегося к Байкальской складчатой области, в целом коррелирует с блоком в верхах мантии со скоростью 7.9–8.0 км/с (рис. 4). В слоях земной коры латеральные изменения плотности значительно меньше, чем в верхней мантии, за исключением слоя верхней коры, где плотность изменяется от 2.4 до 2.55 г/см³.

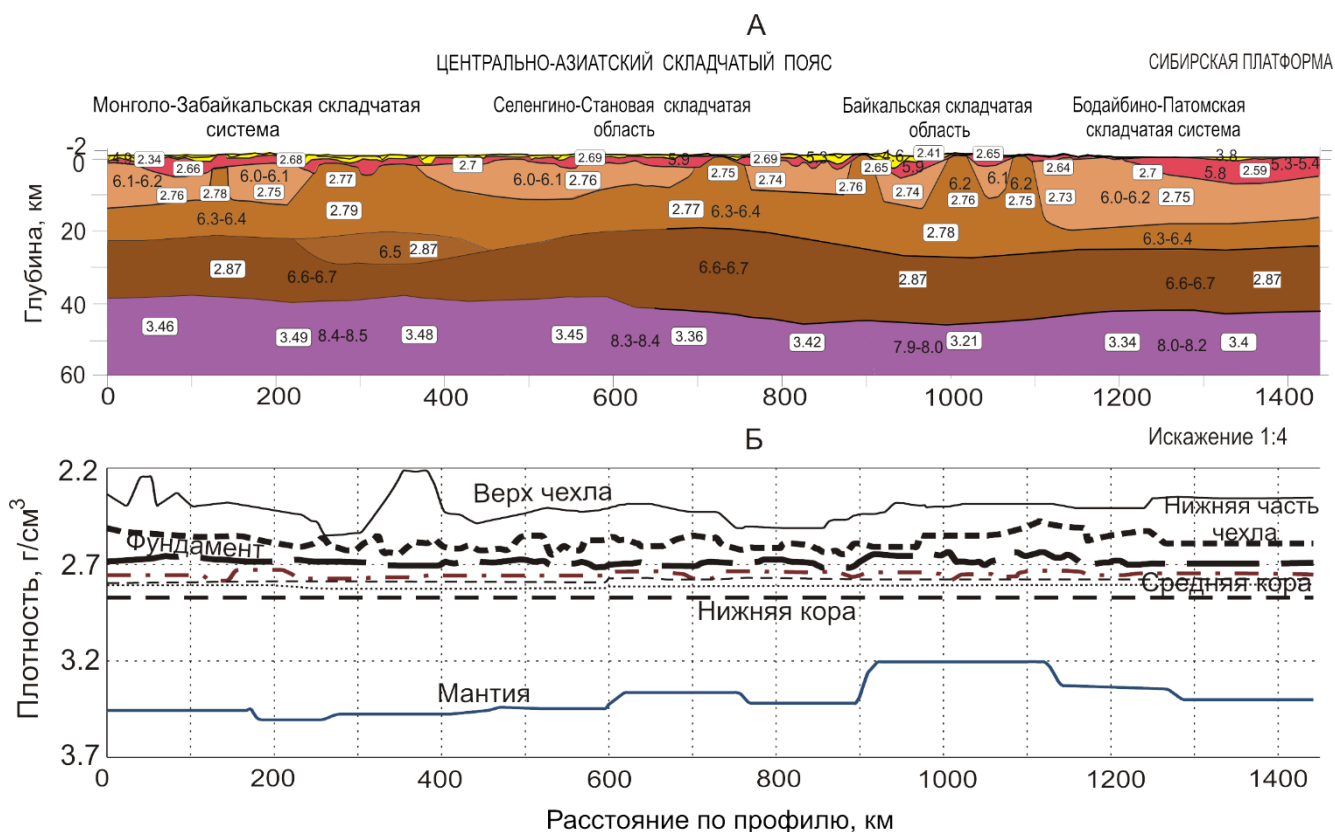


Рис. 4. Плотностной разрез (А) и изменения плотности в слоях земной коры и верхах мантии (Б).

Для учета влияния латеральных изменений переменной мощности слоев на вариации обобщенной плотности можно использовать взвешенную послойную величину $R_o = \sum h_i \rho_i / \sum h_i$, где подстрочный знак i соответствует порядковому номеру слоя [Суворов и др., 2022]. Полученные результаты представлены на рис. 5. Хорошо видна корреляция взвешенной плотности для различных уровней суммирования. В первую очередь, можно районировать Сибирскую платформу, где значения взвешенной плотности не так контрастны. Для Монголо-Охотской и Селенгино-Становой складчатых областей повышенная контрастность изменения взвешенной плотности наблюдается в верхнем слое консолидированной коры, который можно отнести к толще кристаллического фундамента и в слое верхней мантии, ограниченном границей Мохо на глубине 40 км. Для средней коры и для коры в целом таких контрастных изменения не выявлено.

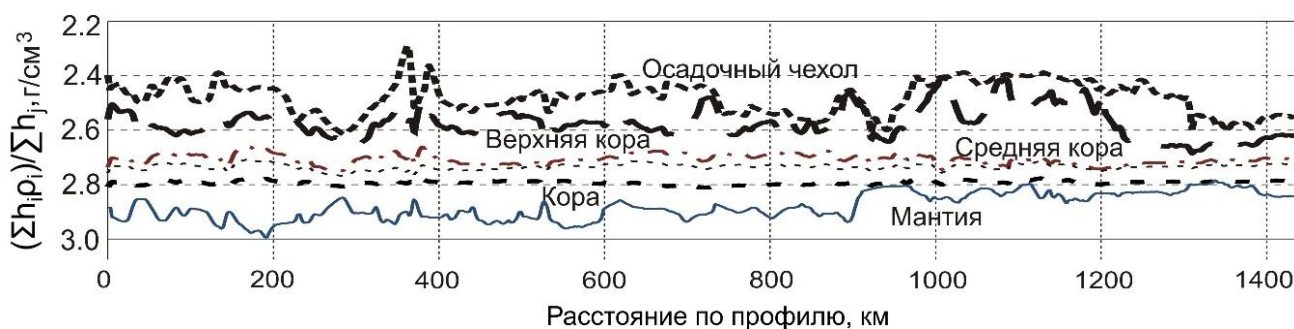


Рис. 5. Распределение взвешенной плотности в слоях земной коры и совместно со слоем в верхах мантии. Подписи на изолиниях соответствуют подошве слоев при значениях взвешенной плотности, относящиеся к покрывающей толще коры.

Это может быть геофизическим признаком того, что стадии тектонического развития и локализация деформаций в складчатых системах Центрально-Азиатского складчатого пояса концентрировалась в ослабленных зонах фундамента (швы, разломы, аккреционные клинья), а внутрикоровые массивы могли оставаться относительно неглубоко вовлеченными, особенно если движение пластов и надвигов происходит поверх фундамента. Таким образом, выделяются две границы, наиболее неоднородные по латеральным изменениям плотности и ее взвешенных значений, маркирующих кровлю коры и мантии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Земная кора Забайкалья и Прибайкалья отличается пониженными значениями средней скорости 6.2–6.4 км/с в сравнении с 6.4–6.5 км/с на Сибирской платформе при отсутствии слоя (характерен для Сибирского кратона) с повышенной до 6.7–6.9 км/с скоростью в ее нижней части [Суворов, Мельник, 2021].

Мощность коры изменяется в интервале 39–42 км при значительных вариациях скорости на Мохо от 7.9 до 8.3 км/с, где наименьшие значения характерны для Байкальской складчатой области. Природа других вариаций скорости пока не вполне понятна.

Характер распределения значений плотности в земной коре значительно дополняет возможность изучения природы глубинных сейсмических неоднородностей. Повышенная контрастность изменения взвешенной плотности наблюдается в верхнем слое консолидированной коры, который можно отнести к толще кристаллического фундамента и в слое верхней мантии, ограниченном границей Мохо и глубиной 60 км. Существуют две границы, наиболее неоднородные по латеральным изменениям плотности и ее взвешенным значениям, маркирующих кровлю коры и мантии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Кашубин С.Н., Мильштейн Е.Д., Винокуров И.Ю., Эринчек Ю.М., Сержантов Р.Б., Татарин В.Ю. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D-картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа // Региональная геология и металлогения. 2016. № 67. С. 43–48. EDN:YJYCYB.
- Кочнев В.А., Васильев Д.В., Сидоров В.Ю. Пакет для решения прямых и обратных трехмерных задач гравиметрии ADG-3D // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2011. № 2011611667.

Мельник Е.А., Суворов В.Д. Восстановление структуры земной коры Забайкалья по данным глубинных сейсмических исследований // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12, 2 (78). С. 92–97. doi:10.23670/IRJ.2018.78.12.054. EDN:YSUKKT.

Сержантов Р.Б., Кашубин С.Н., Эринчек Ю.М., Татаринов В.Ю., Мильштейн Е.Д. Глубинное геолого-геофизическое изучение недр России: Современное состояние и основные задачи // Региональная геология и металлогения. 2013. № 53. С. 26–31. EDN:RFSBJJ.

Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая модель зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (опорный профиль 3-ДВ) // Физика Земли. 2021. № 6. С. 52–67. doi:10.31857/S0002333721060107. EDN:XNOUZM.

Суворов В.Д., Павлов Е.В., Мельник Е.А. Сейсмоплотностные признаки мезозойской складчатости в земной коре восточной пассивной окраины Сибирского кратона (профиль 3ДВ) // Геофизические технологии. 2022. № 1. С. 110–117. doi:10.18303/2619-1563-2022-1-110. EDN:LUGPLD.

Brocher T.M. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (6). P. 2081–2092. doi:10.1785/0120050077.

Zelt C.A. Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic travelttime data // Geophysical Journal International. 1999. Vol. 139 (1). P. 183–204. doi:10.1046/j.1365-246X.1999.00934.x.

REFERENCES

Brocher T.M. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (6). P. 2081–2092. doi:10.1785/0120050077.

Kashubin S.N., Milshtein E.D., Vinokurov I.Yu., Erinchek Yu.V., Serzhantov R.B., Tatarinov V.Yu. State network of geotransects and superdeep wells – the basis for 3D deep mapping of the Russian Federation and its continental shelf // Regional Geology and Metallogeny. 2016. No. 67. P. 43–48. (In Russ.).

Kochnev V.A., Vasiliev D.V., Sidorov V.Yu. Package for solving direct and inverse three-dimensional gravimetry problems ADG-3D // Certificate of state registration of a computer program. 2011. No. 2011611667. (In Russ.).

Melnik E.A., Suvorov V.D. Restoration of structure of Earth crust of Transbaikal based on data of in-depth seismic researches // International Research Journal. 2018. № 12, 2 (78). P. 92–97. (In Russ.). doi:10.23670/IRJ.2018.78.12.054.

Serzhantov R.B., Kashubin S.N., Erinchek Yu.M., Tatarinov V.Yu., Milshtein E.D. Deep geological and geophysical study of the subsoil of Russia: Current state and main tasks // Regional Geology and Metallogeny. 2013. No. 53. P. 26–31. (In Russ.).

Suvorov V.D., Melnik E.A. Transition zone from the Siberian craton to the Verkhoyansk-Kolyma Folded System according to seismic data (reference 3-DV profile) // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2021. Vol. 57 (6). P. 864–877. doi:10.1134/S1069351321060100. EDN: GXLVYL.

Suvorov V.D., Pavlov E.V., Melnik E.A. Seismic and density signs of Mesozoic folding in the Earth's crust of the eastern passive margin of the Siberian craton (profile 3DV) // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2022. No. 1. P. 110–117. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2022-1-110.

Zelt C.A. Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic travelttime data // Geophysical Journal International. 1999. Vol. 139 (1). P. 183–204. doi:10.1046/j.1365-246X.1999.00934.x.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕЛЬНИК Елена Александровна – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: региональное изучение земной коры и верхней мантии платформенных и складчатых областей Сибири методами активной сейсмологии.

СУВОРОВ Владимир Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: развитие методики обнаружения и описания закономерностей распределения сейсмоплотностных и геомеханических параметров, определяющих структурообразование в земной коре.

ПАВЛОВ Евгений Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация гравитационных аномалий в приложении к задачам тектонического районирования и разведки полезных ископаемых.

*Статья поступила в редакцию 29 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 12 февраля 2026 г.,
принята к публикации 12 февраля 2026 г.*



О СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ

Даниил Иванович Костащук¹, Георгий Михайлович Митрофанов^{2,✉}

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

^{1,2}Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия,

¹d.kostashchuk@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0372-0476>

²MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Аннотация. Представлен обзор методов стохастической инверсии сейсмических данных с кратким освещением эволюции сейсмической инверсии в целом. Рассмотрены четыре ключевых метода стохастической инверсии с более детальным обзором одного из алгоритмов группы Монте-Карло – 1D stochastic inversion process. Подробно разбираются все этапы его практической реализации. Продемонстрировано применение алгоритма при решении задач прогноза коллекторских свойств целевых горизонтов. Работа может служить структурированным введением в область вероятностных алгоритмов сейсмической инверсии.

Ключевые слова: сейсморазведка, стохастическая инверсия, интерпретация сейсмических данных, прогноз характеристик горизонтов

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Для цитирования: Костащук Д.И., Митрофанов Г.М. О стохастической инверсии и ее использовании для прогноза характеристик среды // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 12–29. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-12.

ON STOCHASTIC INVERSION AND ITS USE FOR MEDIA CHARACTERISTICS PREDICTION

Daniil I. Kostashchuk¹, Georgy M. Mitrofanov^{2,✉}

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

^{1,2}Novosibirsk State University, Pirogov Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,

¹d.kostashchuk@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0372-0476>

²MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Abstract. This paper presents an overview of stochastic seismic data inversion methods, briefly discussing the evolution of seismic inversion in general. Four key stochastic inversion methods are discussed, with a more detailed examination of one of the Monte Carlo algorithms – the 1D stochastic inversion process. All stages of its practical implementation are discussed in detail. The application of the algorithm to predicting the reservoir properties of target horizons is demonstrated. This paper can serve as a structured introduction to the field of probabilistic seismic inversion algorithms.

Keywords: seismic exploration, stochastic inversion, seismic data interpretation, horizon characteristics prediction

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

For citation: Kostashchuk D.I., Mitrofanov G.M. On stochastic inversion and its use for media characteristics prediction // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 12–29. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-12.

ВВЕДЕНИЕ

Методы сейсмической инверсии развиваются уже длительное время [Кондратьев и др., 2011]. К настоящему моменту они стали стандартными процедурами в программных комплексах обработки сейсмических данных. Их результаты представляются в виде модели упругих параметров геологической среды, используемой в последующем при интерпретации для прогнозирования свойств среды и служащей основой при разведке и разработке месторождений углеводородов [Ампиров и др., 2009; Яковлев и др., 2011; Дмитрачков, Протасов, 2021]. Таким образом, сейсмическая инверсия является важным элементом количественной сейсмической интерпретации, определяющим характеристики коллектора через переход от амплитуды сейсмических колебаний к свойствам геологической среды [Latimer, 2011].

Развитие инверсных алгоритмов начиналось с разработки метода предсказывающей деконволюции [Wadsworth et al., 1953; Robinson, 1954], ориентированного на определение импульсной характеристики среды, с которой взаимодействовал сейсмический сигнал. Большую роль в восприятии сейсмической инверсии, как метода решения обратных динамических задач теории упругости, сыграла работа [Алексеев, 1967]. На ранних этапах формировались и развивались методы акустической инверсии, отвечающие нормальному падению фронта волны на целевые объекты. В результате получались акустические импедансы, пересчитываемые в коэффициенты отражения и характеризующие типы пород, что позволяло прогнозировать геологический разрез [Гогоненков, 1981]. Широкое распространение алгоритмов акустической инверсии в интерпретации сейсмических данных способствовало исследованиям по ее применению для определения параметров коллектора. В работе [Angeleri, Carpi, 1982] авторы оценивали пористость коллектора, анализируя время прохождения по данным псевдоскоростных каротажей.

Дальнейшее развитие методов и их использование при интерпретации данных, получаемых с применением систем многократных перекрытий, привело к упругим моделям среды. Так, [Connolly, 1999] описал обработку наборов трехмерных данных в виде объемов с частичными смещениями, чтобы использовать информацию из AVO (Amplitude Versus Offset) анализа. Затем [Krebs et al., 2009] описали метод полноволновой инверсии поля (full-wavefield inversion, FWI), который оценивает параметры упругой модели путем итеративной минимизации разницы между наблюдаемыми и моделируемыми данными, что делает его вычислительно трудоемким. К настоящему времени весь спектр указанных методов сформировали детерминистический подход к сейсмической инверсии. Его главная особенность – стремление получить наилучшую, в определенном смысле, модель среды, характеризуемую тремя упругими параметрами.

Несмотря на значительные успехи в области детерминистической инверсии, ее результаты были недостаточными для детального прогноза свойств среды, что требовалось при разработке сложных месторождений углеводородов. Поэтому [Bortoli et al., 1993; Haas, Dubrule, 1994] предложили использовать вероятностное моделирование для описания свойств среды, а выбор наилучшей модели осуществлять через сопоставления наблюдаемого и модельного волнового поля. Затем [Grana, Della

Rossa, 2010] предложили метод совместной оценки петрофизических свойств путем интеграции статистической физики горных пород с байесовской сейсмической инверсией. Авторы рассматривали оценку петрофизических свойств как байесовскую задачу инверсии. Алгоритм основан на уравнениях физики горных пород, которые связывают свойства коллектора со скоростями, и линеаризованном сейсмическом моделировании, которое связывает эти скорости и плотность с амплитудами сейсмических волн. Позже [Bosch et al., 2010] продемонстрировали успех упругой сейсмической инверсии в колумбийском бассейне Льянос (Colombia's Llanos Basin) для подробного описания литологии формации Карбонера (Carbonera), объединив литологию, полученную сейсморазведкой, с профилями каротажа скважин с использованием геостатистических методов. В более современных исследованиях [Das et al., 2019] рассмотрели проблему сейсмической инверсии, используя сверточную нейронную сеть (CNN) для получения упругих моделей подземных структур на основе сейсмических данных, [Johari, Emami Niri, 2021] провели исследование физики горных пород в гетерогенном коллекторе песчаника на юго-западе Ирана, чтобы связать геологические и коллекторские свойства с упругими и сейсмическими параметрами. Они выполнили диагностический анализ горных пород (rock physics diagnostic, RPD) с использованием данных скважин, применяя модели гранулированной среды и соотношения замещения флюидов Гассмана. На основе каротажных данных скважины ими был создан шаблон для анализа физических характеристик горных пород (rock physics template, RPT) для оценки изменений литологии и насыщенности флюидом. Объединив данные трехмерной сейсморазведки с помощью предварительной стохастической сейсмической инверсии, результаты инверсии были наложены на этот RPT для первоначальной идентификации содержания углеводородов в трехмерной структуре коллектора.

Следующим шагом [Miele et al., 2023] предложили инновационный подход, использующий итеративную геостатистическую сейсмическую инверсию для прогнозирования проницаемости по сейсмическим данным. Их подход заключается в моделировании фации с использованием 1D-моделирования вертикальных цепей Маркова. Затем они генерируют проницаемость, пористость и акустический импеданс, приводя их в соответствие с ранее смоделированной фациальной моделью. Результатом методологии является набор многочисленных геостатистических реализаций, охватывающих фации, проницаемость, пористость и акустический импеданс, которые основаны на сейсмических данных и ограничены оценками несоответствия, полученными на основе физических моделей горных пород. Авторы [Narayan et al., 2024] провели комплексное исследование, чтобы понять систему отложений позднего мела и распределение фаций коллектора, проанализировав мгновенную частоту, P -импеданс, объем глины, характеристики нейтронной пористости и структуру. Используя сейсмическую инверсию, основанную на модели, акустический импеданс и петрофизические свойства, такие как нейтронная пористость и объем глинистого материала, были точно спрогнозированы с применением многослойной нейронной сети.

К настоящему времени методы геостатистической и вероятностной инверсии получили широкое распространение, сформировав стохастический подход к сейсмической инверсии. В зарубежной литературе имеются сотни научных и прикладных работ, представляющие различные алгоритмы такой инверсии. К сожалению, отечественных публикаций существенно меньше, и они в основном направлены на сравнение результатов детерминистической и стохастической инверсии без анализа рассматриваемых алгоритмов [Хамитуллин и др., 2014; Кубышта и др., 2016; Шаповалов и др., 2023]. Осознавая важность таких исследований, отметим, что они не дают представления о широте выполняемых научных

исследований в этой области. В рамках статьи авторы постарались восполнить пробел, указав на имеющиеся ограничения стохастической инверсии.

МЕТОДЫ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ

Они описывают потенциальные вариации решения обратной задачи, используя наборы возможных решений, обладающих близостью аппроксимации наблюдаемых данных [Fernandes et al., 2024]. История итеративной геостатистической (стохастической) инверсии начинается с начала 90-х годов прошлого столетия и продолжается по настоящее время. В работе [Bortoli et al., 1993] был предложен метод, который использует последовательные алгоритмы стохастического моделирования для генерации случайных пространственно-коррелированных моделей акустического импеданса. В другой работе [Soares et al., 2007] авторы представили глобальную геостатистическую инверсию для преодоления ограничений, возникающих при использовании подходов «трасса за трассой», используя глобальный подход на этапе стохастического последовательного моделирования. Также были предложены альтернативные подходы стохастической инверсии, результатами которой являются фации, свойства горных пород и объемы упругих параметров [Grana et al., 2012; Lang, Grana, 2017]. В последнее время методы стохастической инверсии продолжают широко использоваться для прогнозирования свойств среды на основе данных сейсмического отражения и оценки неопределенностей [Grant et al., 2019; Ketteb et al., 2019; Cyz, Azevedo, 2020; Fernandes et al., 2024].

В свою очередь геостатистическая инверсия делится на следующие группы методов: алгоритмы стохастической оптимизации, байесовская аналитическая инверсия, вероятностное глубокое обучение и методы Монте-Карло [Fernandes et al., 2024].

Одним из алгоритмов стохастической оптимизации является Ensemble smoother with multiple data assimilation (ES-MDA). Данный метод заключается в сглаживании ансамбля с использованием множественной ассимиляции данных. Первым шагом задается низкочастотная модель акустического импеданса, после чего для каждой трассы создается ансамбль. Ансамбль создается случайным образом, отклоняя значения вдоль трассы акустического импеданса в пределах априорного распределения. Близкие значения вдоль трассы изменяются согласно вариограмме, чтобы трассы акустического импеданса не превратились в независимый случайный процесс. Следующим шагом выполняется прямое моделирование сейсмической трассы для каждой модели. Затем итерационно решается следующее уравнение [Fernandes et al., 2024]:

$$m_i^u = m_i^p + K(dobs_i - d_i^p) \text{ для } i = 1, \dots, N_e, \quad (1)$$

где N_e – номера ансамбля; u и p – апостериорное и априорное распределение модельной переменной m ; $dobs_i$ – вектор наблюдаемых данных; K – коэффициенты Калмана.

$$K = C_{md}^p (C_{dd}^p + \alpha_j C_d)^{-1}, \quad (2)$$

где C_{md}^p – матрица взаимной ковариации между априорным вектором параметров модели m^p и вектором модельных данных d^p ; C_{dd}^p – матрица автоковариации прогнозируемых данных; C_d – ковариационная матрица ошибок измерений наблюдаемых данных; α_j – коэффициент сопоставления $\alpha_j > 1$, причем

$$\sum_{j=1}^{N_a} \frac{1}{\alpha_j} = 1.$$

Вычисление корреляционных матриц выполняется следующим образом:

$$C_{md}^p = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} (m_i^p - \bar{m}^p)(d_i^p - \bar{d}^p)^T, \quad (3)$$

$$C_{dd}^p = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} (d_i^p - \bar{d}^p)(d_i^p - \bar{d}^p)^T, \quad (4)$$

где $\bar{m}^p = N_e^{-1} \sum_{i=1}^{N_e} m_i^p$, $\bar{d}^p = N_e^{-1} \sum_{i=1}^{N_e} d_i^p$.

ES-MDA опирается на несколько ключевых допущений, которые могут ограничить его эффективность в определенных ситуациях. Предполагается, что как ошибки модели, так и ошибки наблюдений соответствуют гауссовым распределениям, которые могут не соблюдаться в сильно негауссовых системах. Кроме того, этап обновления основан на линейной аппроксимации с использованием ковариаций, полученных на основе ансамбля. В сильно нелинейных системах это может привести к неоптимальным или смещенным обновлениям, особенно при небольших размерах ансамбля [Zhang, He, 2025].

Основной формулой, используемой в байесовских методах, является формула Байеса:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (5)$$

где $P(A)$ – априорная вероятность гипотезы A , $P(A|B)$ – вероятность гипотезы A при наступлении события B , $P(B|A)$ – вероятность наступления события B при истинности гипотезы A , $P(B)$ – полная вероятность наступления события B .

Байесовские методы используются для разделения плохо отсортированных литологий по сейсмическим данным [Avseth et al., 2001]. Данный подход является явно вероятностным, интегрируя петрофизические модели, эффекты насыщения флюидом в стиле Гассмана и методы AVO-анализа в байесовском формате. Однако одним из основных ограничений данного метода является то, что информативные сейсмические амплитуды в байесовской классификации берутся непосредственно из сейсмических объемов. Следовательно, результаты уязвимы к эффектам интерференции и неопределенности, тем самым не отражают возросшую неоднозначность, возникающую в этих случаях.

В более поздней работе [Dutta et al., 2006] авторы пытаются интегрировать последовательно-стратиграфические соображения в инверсию параметров качества пород по схожим принципам, но ограничение относительно амплитуд сохраняется. В процессе инверсии используется прямое сверточное моделирование, которое неявно устраняет эффекты интерференции, что является преимуществом [Abrahamsen et al., 1997]. В работа [Gunning, Glinsky, 2007] представлена первая попытка определить характеристики сортированности в байесовском формате, который моделирует эффекты интерференции, связанные с волновыми сигналами ограниченного разрешения.

Вероятностное глубокое обучение основано на использовании нейронной сети в алгоритме инверсии. Так, в работе [Liu, Grana, 2019] предлагается внедрение современной гетерогенной распределенной вычислительной архитектуры для ускорения сейсмической инверсии. В сейсмической инверсии интересующим модельным параметром является акустический импеданс, а прямым оператором, как правило, служит сверточная модель вида

$$d = w * r + e = w * g(I_p) + e, \quad (6)$$

где w – вейвлет, оцененный по данным каротажа и сейсмики, r – коэффициенты отражения, вычисленные из акустического импеданса I_p с помощью функции g , e – случайная ошибка.

В парадигме машинного обучения уравнение 6 можно представить как двухслойную нейронную сеть, включающую входной слой (модельная переменная, включающая I_p) и выходной слой (сейсмический отклик d) без скрытых слоев. В отличие от стандартных нейронных сетей, в данной модели входные переменные (I_p) являются неизвестными переменными, подлежащими оценке, а не весовые коэффициенты (вейвлет w).

Данный подход включает в себя три этапа: моделирование (симуляция), инверсия и оценка неопределенности. На этапе геостатистического моделирования строится ансамбль начальных моделей коллектора на основе априорных геологических знаний и параметров пространственной корреляции с помощью выбранного алгоритма геостатистического моделирования: быстрое преобразование Фурье со скользящим средним (Fast Fourier transform with moving average, FFT-MA) [Le Ravalec-Dupin, 2005], моделирование по полю вероятностей (probability field simulation, PFS) [Froidevaux, 1993; Srivastava, 1993], последовательное гауссовское моделирование (sequential Gaussian simulation, SGS) [Doyen, 2007] и многоточечная статистика (multiple-point statistics, MPS) [Mariethoz, Caers, 2014].

Следующим шагом полученные априорные модели коллектора обновляются для ассимиляции сейсмических данных и других геофизических измерений, чтобы обеспечить лучшее описание реального поведения коллектора. Заключительным шагом собираются все результаты инверсии и реализаций коллектора, чтобы оценить связанную с моделью неопределенность, что позволяет повысить надежность принятия решений в разведке и добыче.

Методы Монте-Карло (Markov chain Monte Carlo) основываются на двух ключевых понятиях:

– моделирование методом Монте-Карло – это метод, используемый для прогнозирования и понимания поведения систем, в которых присутствует неопределенность. С помощью многократного моделирования со случайными входными данными этот метод позволяет оценить возможные результаты и их вероятность;

– цепь Маркова – это способ описания системы, которая переходит из одной ситуации, называемой «состоянием», в другую. При этом предполагается, что вероятность нахождения в определенном состоянии на следующем шаге зависит исключительно от текущего состояния. Это ключевое свойство, позволяющее игнорировать предыдущие состояния, называется свойством Маркова или отсутствием памяти.

Одним из алгоритмов методов Монте-Карло является 1D stochastic inversion process (ODiSI), продемонстрированный в статье [Connolly, Hughes, 2016]. Данный метод основан на сопоставлении большого количества псевдоскважин с сейсмическими данными, позволяет получить хорошие оценки коллекторских свойств, фациальных вероятностей и связанных с ними неопределенностей. Исторически ODiSI применялся только к интервалам кремнекластических коллекторов, однако в статье [Grant et al., 2019] данный метод был применен для карбонатных коллекторов, где показал хорошие результаты для интервала коллектора Мишриф (Mishrif) на месторождении Румайла (Rumaila) в Ираке.

АЛГОРИТМ 1D STOCHASTIC INVERSION PROCESS

Данный алгоритм разделяется на несколько последовательных блоков:

- 1) создание псевдоскважин,
- 2) прямое моделирование трасс на основе псевдоскважин,
- 3) сравнение модельных сейсмических трасс с целевой трассой и отбор по лучшим сопоставлениям с целевой трассой,
- 4) усреднение отобранных псевдоскважин с наименьшей среднеквадратичной ошибкой по отношению к целевой трассе.

В качестве входных данных для рассматриваемого алгоритма используются суммарные сейсмические данные и данные ГИС (колонка фаций, значения скоростей продольных и поперечных волн, плотность, пористость и т. д.). Используя колонку фаций необходимо рассчитать матрицу переходов между фациями (рис. 1). Стоит отметить, что матрица перехода рассчитывается не вдоль всей колонки фаций, а для каждого отдельного стратиграфического комплекса, характеризующегося однородностью свойств. В данном примере фации были разделены по пористости (рис. 2): фация 0 соответствует пористости до 0.03, фация 1 – от 0.03 до 0.08, фация 2 – от 0.08 до 0.15, фация 3 – от 0.15 и выше.

	Фация 0	Фация 1	Фация 2	Фация 3
Фация 0	0.000	0.375	0.375	0.250
Фация 1	0.333	0.000	0.667	0.000
Фация 2	0.273	0.273	0.000	0.455
Фация 3	0.143	0.429	0.429	0.000

Рис. 1. Матрица вероятности перехода между фациями.

Используя колонку фаций, необходимо рассчитать функцию плотности вероятностей толщины каждой фации. Данная функция $f(x)$ вычисляется как произведение экспоненциальной $h(x)$ и гауссовой

функции $g(x)$ распределения, но также могут быть использованы и другие распределения, лучше отвечающие конкретному месторождению [Connolly, Hughes, 2016]:

$$h(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad (7)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

$$f(x) = h(x)g(x) = \frac{\lambda}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} - \lambda x}, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{1}{m}$, m – средняя мощность фации, σ – стандартное отклонение мощности фации, σ^2 – дисперсия мощности фации.

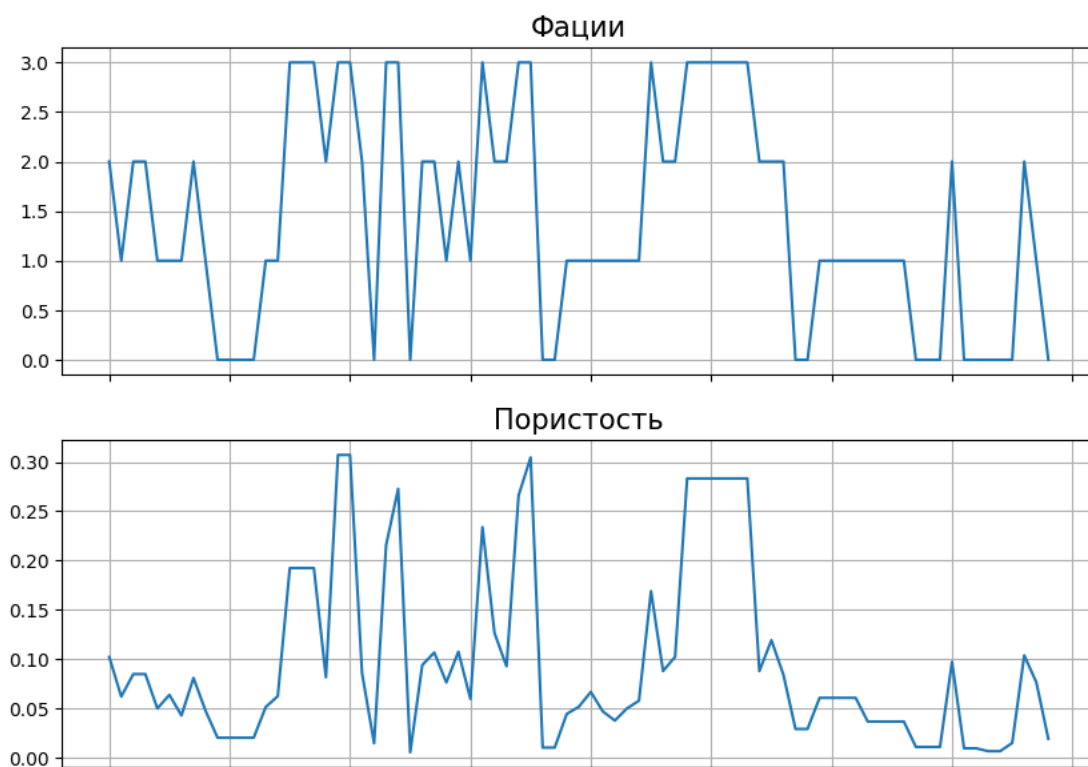


Рис. 2. Разделение фаций по пористости.

Используя матрицу перехода между фациями и распределение мощностей фаций, сгенерируем некоторое количество псевдоскважин. Количество псевдоскважин является гиперпараметром, так в работе [Connolly, Hughes, 2016] авторы генерируют 2000 псевдоскважин, а в работе [Grant et al., 2019] – 20 000, обычно достаточно от 10^3 – 10^4 псевдоскважин. На рисунке 3 приведены 10 случайных псевдоскважин из 1000 сгенерированных, используя матрицу перехода с рис. 1 и распределение для каждой фации, рассчитанное по формуле 9.

Отдельно хочется отметить, что главная ось матрицы перехода (рис. 1) заполнена 0. Это происходит вследствие того, что мощность каждой фации задается функцией плотности вероятности (9). Но существуют алгоритмы, в которых не используется функция плотности вероятности для прогнозирования мощности фации, в данном случае матрица перехода между фациями рассчитывается от дискрета к дискрету, и мощность фации определяется вероятностью перехода фации в саму себя, т. е. главной диагональю [Grana et al., 2012; de Figueiredo et al., 2019].

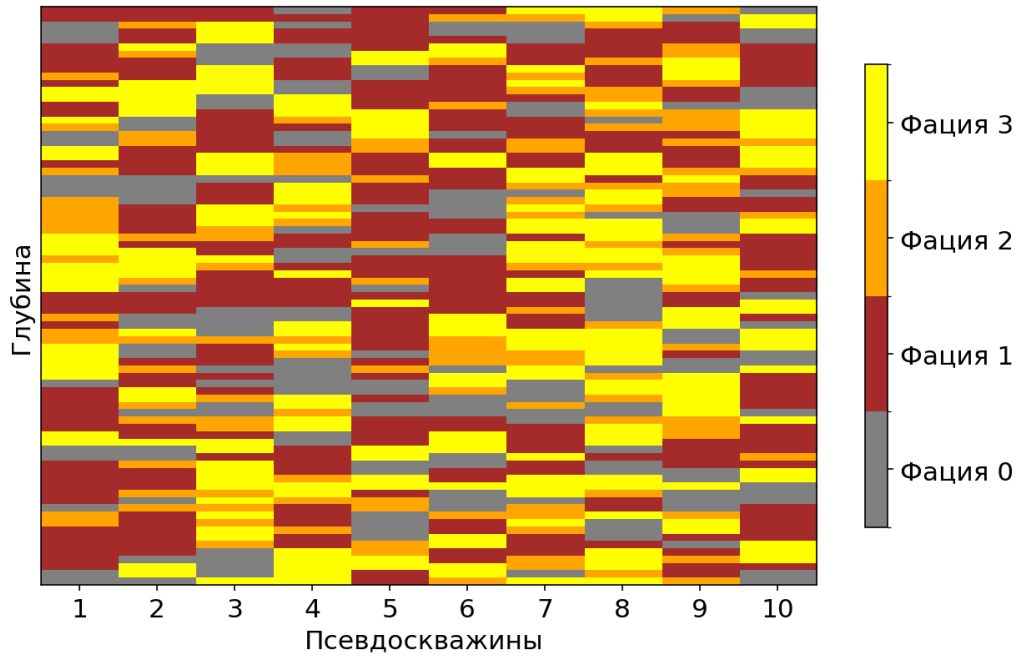


Рис. 3. Десять случайных псевдоскважин, полученных при помощи матрицы перехода с рис. 1 и формулы 9.

Следующим этапом выполняется прямое моделирование. В рамках данного этапа необходимо рассчитать акустическую жесткость (10) и коэффициенты отражения (11). Для расчета акустической жесткости [Connolly, Hughes, 2016] предлагают использовать extended elastic impedance (EEI), впервые предложенный в работе [Whitcombe et al., 2002], с целью повышения чувствительности рассматриваемого алгоритма к некоторым искомым параметрам:

$$EEI(\chi) = V_{p0}\rho_0 \left[\left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right)^p \times \left(\frac{V_s}{V_{s0}} \right)^q \times \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^r \right], \quad (10)$$

где $p = \cos(\chi) + \sin(\chi)$, $q = -8K \times \sin(\chi)$, $r = \cos(\chi) - 4K \times \sin(\chi)$, $K = \left(\frac{V_{s0}}{V_{p0}} \right)^2$, V_p – скорость продольной волны в слое, V_{p0} – средняя скорость продольной волны в рассматриваемом интервале, V_s – скорость поперечной волны в слое, V_{s0} – средняя скорость поперечной волны в рассматриваемом интервале, ρ – плотность в слое, ρ_0 – средняя плотность в рассматриваемом интервале.

$$A_k = \frac{EEI(\chi)_{k+1} - EEI(\chi)_k}{EEI(\chi)_{k+1} + EEI(\chi)_k}, \quad (11)$$

Для расчета EEI значения V_p , V_s и ρ берутся из зависимостей для каждой фации, полученных из колонок ГИС. Данные зависимости могут быть совершенно различными: линейные и нелинейные зависимости от глубины, зависимости между различными параметрами, формулы Гассмана [Gassmann, 1951] и т. д. Данный момент является плюсом ODiSI, т. к. позволяет более гибко настраивать рассматриваемый алгоритм под конкретные месторождения.

После расчета коэффициентов отражения рассчитываются модельные сейсмические трассы. Данная процедура выполняется при помощи операции свертки, которая определяется следующим уравнением:

$$q(t) = \int_0^t f(\tau)y(t - \tau)d\tau, \quad (12)$$

где $q(t)$ – модельная сейсмическая трасса, $f(t)$ – трасса коэффициентов отражения, $y(t)$ – сигнал, оцененный по данным каротажа и сейсмоки.

После расчета модельной сейсмической трассы для каждой псевдоскважины полученные сейсмические трассы сопоставляются с целевой сейсмической трассой. Для каждого сопоставления рассчитывается среднеквадратичная ошибка (13) и выбираются псевдоскважины с наименьшими ошибками. Количество выбранных псевдоскважин также является гиперпараметром, как и количество генерируемых псевдоскважин. В работе [Connolly, Hughes, 2016] авторы отбирают 30 лучших псевдоскважин, а в [Grant et al., 2019] – 100.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{N}}, \quad (13)$$

где P_i – значение i дискрета целевой сейсмической трассы, O_i – значение i дискрета сейсмической трассы, соответствующей псевдоскважине, N – общее количество наблюдений.

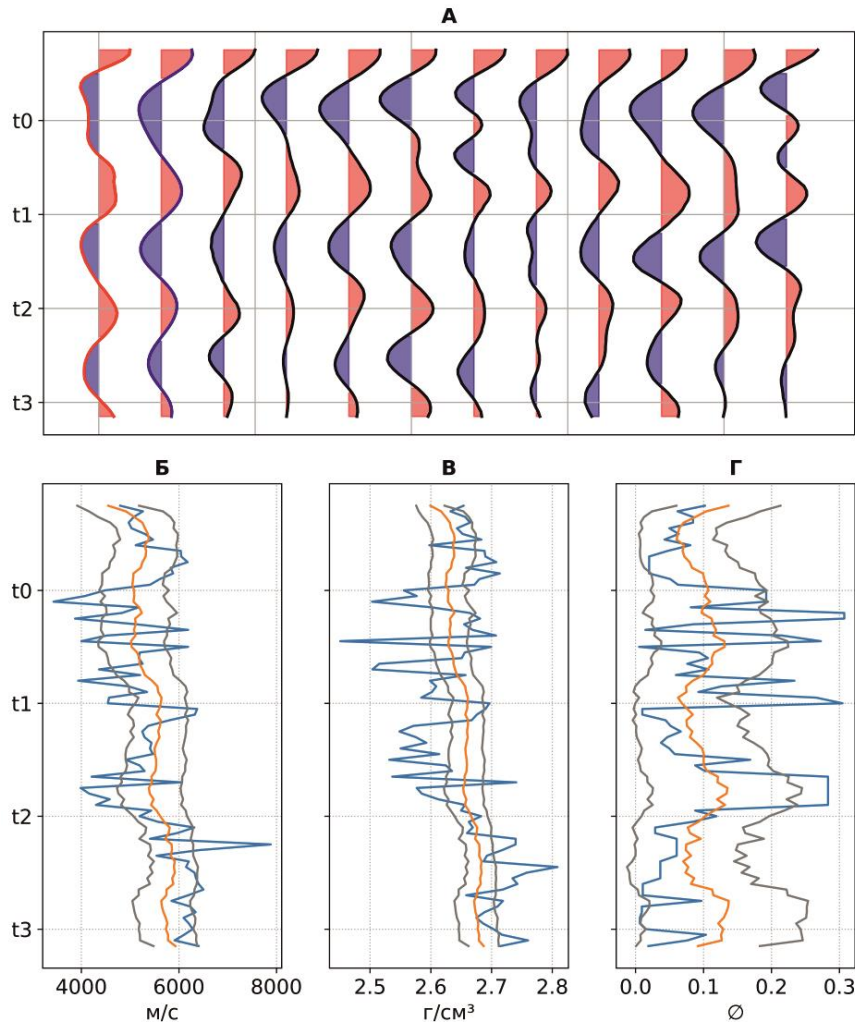


Рис. 4. Целевая сейсмическая трасса – красный цвет, модельная сейсмическая трасса, полученная усреднением – синий цвет, сейсмические трассы, которые усреднялись – черный цвет (А); скорости продольных волн: целевые значения – голубой цвет, модельные значения, полученные усреднением – оранжевый цвет, стандартное отклонение – серый цвет (Б); плотность: целевые значения – голубой цвет, модельные значения, полученные усреднением – оранжевый цвет, стандартное отклонение – серый цвет (В); пористость: целевые значения – голубой цвет, модельные значения, полученные усреднением – оранжевый цвет, стандартное отклонение – серый цвет (Г).

Последним шагом выполняется усреднение всех данных, соответствующих отобраным псевдоскважинам. Также рассчитывается стандартное отклонение (14) для каждого параметра (пористость, плотность, скорость продольной волны и т. д.) для оценки полученных результатов. На рисунке 4 приведен пример целевой сейсмической трассы, модельной сейсмической трассы, полученной усреднением 100 трасс, и 10 из 100 трасс, которые усреднялись. На этом же рисунке приведен пример данных ГИС, полученный при помощи рассматриваемого алгоритма. Разрезы сейсмических данных, разрезы пористости, стандартного отклонения пористости и разрез наиболее вероятных фаций показаны на рис. 5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (14)$$

где x_i – значение соответствующего параметра, \bar{x} – среднее арифметическое всех значений соответствующего параметра, N – общее количество наблюдений.

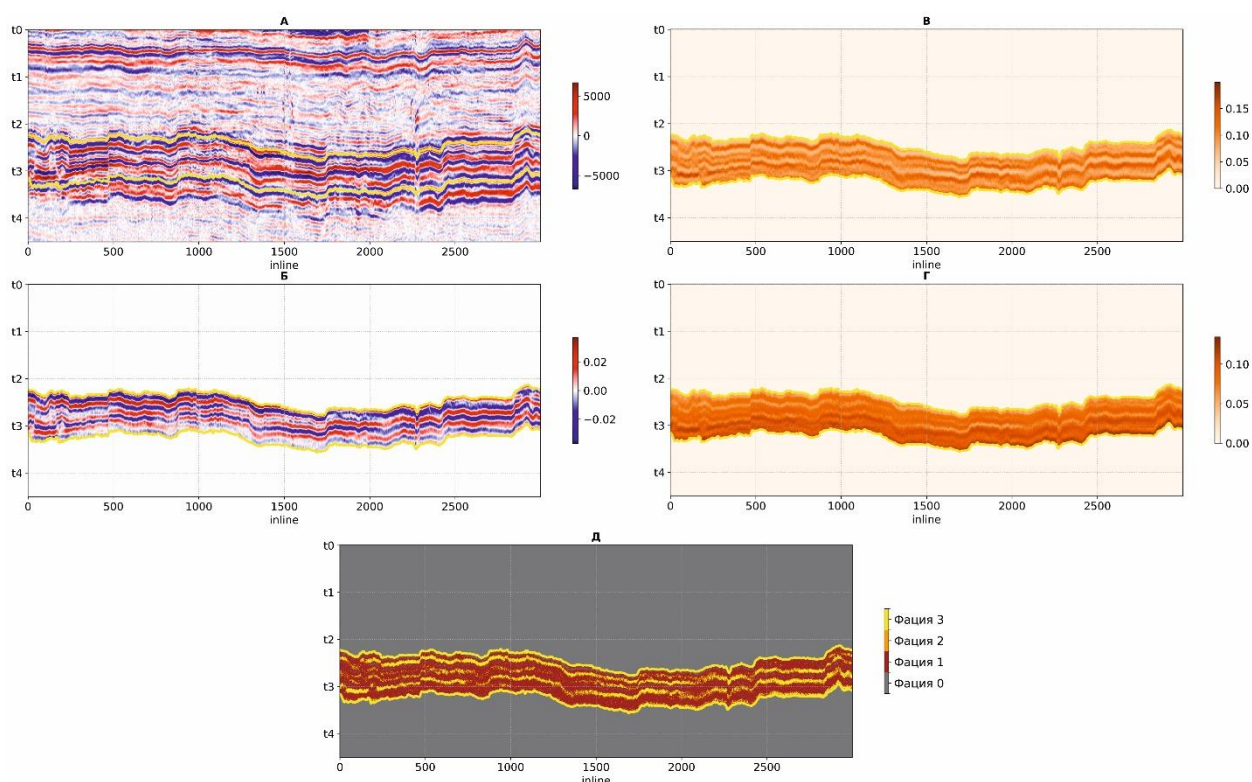


Рис. 5. Наблюдаемое волновое поле (А); подобранное волновое поле (Б); разрез пористости (В); стандартное отклонение пористости (Г); разрез фаций с наибольшей вероятностью (Д).

Рассматриваемый алгоритм является одномерным, не учитывающим латеральную корреляцию. Для решения данного вопроса авторы [Connolly, Hughes, 2016] предлагают определять наиболее вероятные литофации в каждой точке отбора на основе распределения литофаций для локального набора псевдоскважин с наименьшей среднеквадратичной ошибкой, а затем делать корректировку с учетом ближайших соседних трасс, учитывая локальное падение. Диапазон латерального поиска расширяется путем повторных итераций. На каждом шаге вероятности корректируются, чтобы вертикальная статистика оставалась согласованной с исходными параметрами и соблюдались вертикальные пропорции литологии. Но авторы отмечают, что, хотя пространственное моделирование важно и, по сути, необходимо для

построения моделей с разрешением выше сейсмического, учитывая ограничения геостатистических моделей и калибровочных данных, его не следует интегрировать в процесс сейсмической инверсии, а нужно оставить в качестве последующего шага, который может быть итеративно оптимизирован [Connolly, Hughes, 2014, 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен некоторый обзор современных методов стохастической сейсмической инверсии. Проследив ключевые этапы развития этого направления, авторы рассмотрели четыре метода, уделив особое внимание алгоритму ODiSI, как одному из перспективных и эффективных подходов. Мы хотели показать, что разнообразие алгоритмов стохастической инверсии является преимуществом, позволяя геофизикам выбирать инструмент, оптимально подходящий для конкретных геологических условий и решаемых задач – будь то оценка неопределенностей, воспроизведение свойств пород или построение высокоразрешенных моделей.

Алгоритм ODiSI был реализован в виде программного модуля. В ходе тестирования алгоритма возникли общие проблемы стохастической инверсии: большие временные затраты на расчеты и необходимость больших объемов памяти. Соответствующие сложности были преодолены путем распараллеливания и частичного сохранения результатов. Созданный алгоритм был протестирован на реальном геофизическом материале. В результате удалось построить набор согласованных реализаций, который включает разрезы литологических фаций и петрофизических свойств, согласующиеся со скважинной информацией. Эти результаты наглядно демонстрируют практическую применимость метода ODiSI для решения задач прогноза коллекторов и количественной характеристики геологической среды с учетом неопределенностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Алексеев А.С.** Обратные динамические задачи сеймики // Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1967. С. 9–84.
- Ампиров Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И.** Почти всё о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16. EDN:LUNKLO.
- Гогоненков Г.Н.** Прогнозирование геологического разреза по сейсмическим данным // Геология нефти и газа. 1981. № 1. С. 48–55.
- Дмитрачков Д.К., Протасов М.И.** Применимость сейсмической инверсии для латерально-неоднородных сред // Геофизика. 2021. № 6. С. 33–37. EDN:HHVGPZ.
- Кондратьев И.К., Рыжков В.И., Киссин Ю.М., Шубин А.В.** Способы реализации и оценка эффективности сейсмической инверсии: Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 62 с.
- Кубышта И.И., Павловский Ю.В., Емельянов П.П.** Эффективность технологий инверсии данных сейсморазведки 3D как основа построения и уточнения сейсмогеологической модели вендских отложений месторождения Восточной Сибири // ПроНефть. 2016. № 1. С. 27–37. EDN:XTVKIP.
- Хамитуллин И.М., Новокрецин А.В., Шилова Ю.В., Ключова Е.Ю.** Возможности применения результатов геостатистической инверсии для 3D геологического моделирования // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2014. № 4. С. 10–13. EDN:TGWSSL.

- Шаповалов М.Ю., Хамитуллин И.М., Шакиров Р.Р., Филиппова К.Е., Брегида А.А.** Использование сейсмической инверсии для прогноза коллектора в интервале прибрежно-континентальных отложений юрского комплекса // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 3. С. 49–56. doi:10.18599/grs.2023.3.7. EDN:YJQKGY.
- Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е.** Почти всё о сейсмической инверсии. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15. EDN:NRAZNB.
- Abrahamsen P., Hektoen A.L., Holden L., Munthe K.L.** Seismic impedance and porosity: support effects // E.Y. Baafi, N.A. Schofield (Eds.). Geostatistics Wollongong'96. Kluwer, Dordrecht, 1997. Vol. 1. P. 489–500.
- Angeleri G.P., Carpi R.** Porosity prediction from seismic data // Geophysical Prospecting. 1982. Vol. 30. P. 580–607. doi:10.1111/j.1365-2478.1982.tb01328.x.
- Avseth P., Mukerji T., Jørtad A., Mavko G., Veggeland T.** Seismic reservoir mapping from 3-D AVO in a North Sea turbidite system // Geophysics. 2001. Vol. 66 (4). P. 1157–1176. doi:10.1190/1.1487063.
- Bortoli L.J., Alabert F., Haas A., Journel A.** Constraining stochastic images to seismic data // A. Soares (Ed.). Geostatistics Tróia'92. Springer, Dordrecht, 1993. P. 325–337. doi:10.1007/978-94-011-1739-5_27.
- Bosch M., Mukerji T., Gonzalez E.F.** Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: a review // Geophysics. 2010. Vol. 75 (5), 75A165–75A176. doi:10.1190/1.3478209.
- Connolly P.** Elastic impedance // Leading Edge. 1999. Vol. 18 (4). P. 438–452. doi:10.1190/1.1438307.
- Connolly P., Hughes M.** The application of very large numbers of pseudo-wells for reservoir characterisation // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, Abu Dhabi, UAE, 2014. P. SPE-171879-MS. doi:10.2118/171879-MS.
- Connolly P.A., Hughes M.J.** Stochastic inversion by matching to large numbers of pseudo-wells // Geophysics. 2016. Vol. 81 (2). P. M7–M22. doi:10.1190/geo2015-0348.1.
- Cyz M., Azevedo L.** Direct geostatistical seismic amplitude versus angle inversion for shale rock properties // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. Vol. 59 (6). P. 5335–5344. doi:10.1109/TGRS.2020.3017091.
- Das V., Pollack A., Wollner U., Mukerji T.** Effect of rock physics modeling in impedance inversion from seismic data using convolutional neural network // Proceedings of the 13th SEGJ International Symposium (Tokyo, Japan, 12–14 November 2018). Society of Exploration Geophysicists, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2019. P. 522–525. doi:10.1190/SEGJ2018-135.1.
- de Figueiredo L.P., Grana D., Roisenberg M., Rodrigues B.B.** Multimodal Markov chain Monte Carlo method for nonlinear petrophysical seismic inversion // Geophysics. 2019. Vol. 84 (5). P. M1–M13. doi:10.1190/geo2018-0839.1.
- Doyen P.M.** Seismic reservoir characterization: an Earth modelling perspective. EAGE, 2007. doi:10.3997/9789462820234.
- Dutta T., Mukerji T., Mavko G., Avseth P.** Reservoir quality prediction by integrating sequence stratigraphy and rock physics // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2006. P. 1811–1815. doi:10.1190/1.2369876.
- Fernandes F.J.D., Teixeira L., Freire A.F.M., Lupinacci W.M.** Stochastic seismic inversion and Bayesian facies classification applied to porosity modeling and igneous rock identification // Petroleum Science. 2024. Vol. 21 (2). P. 918–935. doi:10.1016/j.petsci.2023.11.020.
- Froidevaux R.** Probability field simulation // A. Soares (Ed.). Geostatistics Tróia'92. Springer, Dordrecht, 1993. P. 73–83. doi:10.1007/978-94-011-1739-5_7.

- Gassmann F.** Über die elastizität poroser medien // Vierteljahrsschrift der naturforschenden gesellschaft in Zürich. 1951. Vol. 96. P. 1–23.
- Grana D., Della Rossa E.** Probabilistic petrophysical-properties estimation integrating statistical rock physics with seismic inversion // Geophysics. 2010. Vol. 75 (3). P. O21–O37. doi:10.1190/1.3386676.
- Grana D., Mukerji T., Dvorkin J., Mavko G.** Stochastic inversion of facies from seismic data based on sequential simulations and probability perturbation method // Geophysics. 2012. Vol. 77 (4). P. 53–72. doi:10.1190/geo2011-0417.1.
- Grant S.R., Hughes M.J., Olatoke O.J., Philip N.** Stochastic inversion by trace matching for carbonate reservoir property prediction: A Mishrif Reservoir case study // The Leading Edge. 2019. Vol. 38 (1). P. 27–34. doi:10.1190/tle38010027.1.
- Gunning J., Glinesky M.E.** Detection of reservoir quality using Bayesian seismic inversion // Geophysics. 2007. Vol. 72 (3). P. R37–R49. doi:10.1190/1.2713043.
- Haas A., Dubrule O.** Geostatistical inversion – a sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data // First Break. 1994. Vol. 12 (11). P. 561–569. doi:10.3997/1365-2397.1994034.
- Johari A., Emami Niri M.** Rock physics analysis and modelling using well logs and seismic data for characterising a heterogeneous sandstone reservoir in SW of Iran // Exploration Geophysics. 2021. Vol. 52 (4). P. 446–461. doi:10.1080/08123985.2020.1836956.
- Ketteb R., Djeddi M., Kiche Y.** Modeling of porosity by geostatistical methods // Arabian Journal of Geosciences. 2019. Vol. 12 (8). P. 268. doi:10.1007/s12517-019-4450-9.
- Krebs J.R., Anderson J.E., Hinkley D., Neelamani R., Lee S., Baumstein A., Lacasse M.-D.** Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources // Geophysics. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC177–WCC188. doi:10.1190/1.3230502.
- Lang X., Grana D.** Geostatistical inversion of prestack seismic data for the joint estimation of facies and impedances using stochastic sampling from Gaussian mixture posterior distributions // Geophysics. 2017. Vol. 82 (4). P. M55–M65. doi:10.1190/geo2016-0670.1.
- Latimer R.B.** Inversion and interpretation of impedance data // Interpretation of three-dimensional seismic data. AAPG, SEG, Tulsa, Oklahoma, 2011. P. 309–350.
- Le Ravalec-Dupin M.** Inverse stochastic modeling of flow in porous media. Applications to reservoir characterization. Paris, Editions Technip, 2005. 194 p.
- Liu M., Grana D.** Accelerating geostatistical seismic inversion using TensorFlow: A heterogeneous distributed deep learning framework // Computers & Geosciences. 2019. Vol. 124. P. 37–45. doi:10.1016/j.cageo.2018.12.007.
- Mariethoz G., Caers J.** Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images. John Wiley & Sons, 2014. doi:10.1002/9781118662953.
- Miele R., Grana D., Seabra Varella L.E., Viola Barreto B., Azevedo L.** Iterative geostatistical seismic inversion with rock-physics constraints for permeability prediction // Geophysics. 2023. Vol. 88 (2). P. M105–M117. doi:10.1190/geo2022-0352.1.
- Narayan S., Sahoo S.D., Kar S., Pal S.K., Kangsabanik S.** Improved reservoir characterization by means of supervised machine learning and model-based seismic impedance inversion in the Penobscot field, Scotian Basin // Energy Geosciences. 2024. Vol. 5 (2). P. 100180. doi:10.1016/j.engeos.2023.100180.

- Robinson E.A.** Predictive deconvolution of time series with applications to seismic exploration // MIT Geophysical Analysis Group Report No. 7. 1954. 281 p.
- Soares A., Diet J.D., Guerreiro L.** Stochastic inversion with a global perturbation method // EAGE Conference on Petroleum Geostatistics. EAGE, 2007. P. 32. doi:10.3997/2214-4609.201403048.
- Srivastava R.M.** Reservoir characterization with probability field simulation // Proceedings of the SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1993. P. 330. doi:10.1190/1.1822473.
- Wadsworth G.P., Robinson E.A., Bryan J.G., Hurley P.M.** Detection of reflections on seismic records by linear operators // Geophysics. 1953. Vol. 18 (3). P. 539–586. doi:10.1190/1.1437911.
- Whitcombe D.N., Connolly P.A., Reagan R.L., Redshow T.C.** Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction // Geophysics. 2002. Vol. 67 (1). P. 63–67. doi:10.1190/1.1451337.
- Zhang Z., He X.** A variational framework for inverse modeling: case study in CO₂ sequestration // Advances in Water Resources. 2025. Vol. 203. P. 105034. doi:10.1016/j.advwatres.2025.105034.

REFERENCES

- Abrahamsen P., Hektoen A.L., Holden L., Munthe K.L.** Seismic impedance and porosity: support effects // E.Y. Baafi, N.A. Schofield (Eds.). Geostatistics Wollongong'96. Kluwer, Dordrecht, 1997. Vol. 1. P. 489–500.
- Alekseev A.S.** Inverse dynamic problems of seismics // Some methods and algorithms for interpreting geophysical data (In Russ.). Nauka, Moscow, 1967. P. 9–84.
- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V., Filippova K.E., Priezzhev I.I.** Almost everything about seismic inversion. Part 1 // Seismic Technologies. 2009. No. 4. P. 3–16. (In Russ.).
- Angeleri G.P., Carpi R.** Porosity prediction from seismic data // Geophysical Prospecting. 1982. Vol. 30. P. 580–607. doi:10.1111/j.1365-2478.1982.tb01328.x.
- Avseth P., Mukerji T., Jørtad A., Mavko G., Veggeland T.** Seismic reservoir mapping from 3-D AVO in a North Sea turbidite system // Geophysics. 2001. Vol. 66 (4). P. 1157–1176. doi:10.1190/1.1487063.
- Bortoli L.J., Alabert F., Haas A., Journel A.** Constraining stochastic images to seismic data // A. Soares (Ed.). Geostatistics Tróia'92. Springer, Dordrecht, 1993. P. 325–337. doi:10.1007/978-94-011-1739-5_27.
- Bosch M., Mukerji T., Gonzalez E.F.** Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: a review // Geophysics. 2010. Vol. 75 (5), 75A165–75A176. doi:10.1190/1.3478209.
- Connolly P.** Elastic impedance // Leading Edge. 1999. Vol. 18 (4). P. 438–452. doi:10.1190/1.1438307.
- Connolly P., Hughes M.** The application of very large numbers of pseudo-wells for reservoir characterisation // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, Abu Dhabi, UAE, 2014. P. SPE-171879-MS. doi:10.2118/171879-MS.
- Connolly P.A., Hughes M.J.** Stochastic inversion by matching to large numbers of pseudo-wells // Geophysics. 2016. Vol. 81 (2). P. M7–M22. doi:10.1190/geo2015-0348.1.
- Cyz M., Azevedo L.** Direct geostatistical seismic amplitude versus angle inversion for shale rock properties // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. Vol. 59 (6). P. 5335–5344. doi:10.1109/TGRS.2020.3017091.
- Das V., Pollack A., Wollner U., Mukerji T.** Effect of rock physics modeling in impedance inversion from seismic data using convolutional neural network // Proceedings of the 13th SEGJ International Symposium (Tokyo, Japan, 12–14 November 2018). Society of Exploration Geophysicists, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2019. P. 522–525. doi:10.1190/SEGJ2018-135.1.

- de Figueiredo L.P., Grana D., Roisenberg M., Rodrigues B.B.** Multimodal Markov chain Monte Carlo method for nonlinear petrophysical seismic inversion // *Geophysics*. 2019. Vol. 84 (5). P. M1–M13. doi:10.1190/geo2018-0839.1.
- Dmitrakhov D.K., Protasov M.I.** Applicability of seismic inversion for laterally heterogeneous media // *Geophysics*. 2021. No. 6. P. 33–37. (In Russ.).
- Doyen P.M.** Seismic reservoir characterization: an Earth modelling perspective. EAGE, 2007. doi:10.3997/9789462820234.
- Dutta T., Mukerji T., Mavko G., Avseth P.** Reservoir quality prediction by integrating sequence stratigraphy and rock physics // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2006. P. 1811–1815. doi:10.1190/1.2369876.
- Fernandes F.J.D., Teixeira L., Freire A.F.M., Lupinacci W.M.** Stochastic seismic inversion and Bayesian facies classification applied to porosity modeling and igneous rock identification // *Petroleum Science*. 2024. Vol. 21 (2). P. 918–935. doi:10.1016/j.petsci.2023.11.020.
- Froidevaux R.** Probability field simulation // A. Soares (Ed.). *Geostatistics Tróia'92*. Springer, Dordrecht, 1993. P. 73–83. doi:10.1007/978-94-011-1739-5_7.
- Gassmann F.** Über die elastizität poroser medien // *Vierteljahrsschrift der naturforschenden gesellschaft in Zürich*. 1951. Vol. 96. P. 1–23.
- Gogonenkov G.N.** Prediction of geological section from seismic data // *Russian Oil and Gas Geology*. 1981. No. 1. P. 48–55.
- Grana D., Della Rossa E.** Probabilistic petrophysical-properties estimation integrating statistical rock physics with seismic inversion // *Geophysics*. 2010. Vol. 75 (3). P. O21–O37. doi:10.1190/1.3386676.
- Grana D., Mukerji T., Dvorkin J., Mavko G.** Stochastic inversion of facies from seismic data based on sequential simulations and probability perturbation method // *Geophysics*. 2012. Vol. 77 (4). P. 53–72. doi:10.1190/geo2011-0417.1.
- Grant S.R., Hughes M.J., Olatoke O.J., Philip N.** Stochastic inversion by trace matching for carbonate reservoir property prediction: A Mishrif Reservoir case study // *The Leading Edge*. 2019. Vol. 38 (1). P. 27–34. doi:10.1190/tle38010027.1.
- Gunning J., Glinsky M.E.** Detection of reservoir quality using Bayesian seismic inversion // *Geophysics*. 2007. Vol. 72 (3). P. R37–R49. doi:10.1190/1.2713043.
- Haas A., Dubrule O.** Geostatistical inversion – a sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data // *First Break*. 1994. Vol. 12 (11). P. 561–569. doi:10.3997/1365-2397.1994034.
- Johari A., Emami Niri M.** Rock physics analysis and modelling using well logs and seismic data for characterising a heterogeneous sandstone reservoir in SW of Iran // *Exploration Geophysics*. 2021. Vol. 52 (4). P. 446–461. doi:10.1080/08123985.2020.1836956.
- Ketteb R., Djeddi M., Kiche Y.** Modeling of porosity by geostatistical methods // *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. Vol. 12 (8). P. 268. doi:10.1007/s12517-019-4450-9.
- Khamitullin I.M., Novokreshchin A.V., Shilova Yu.V., Klyusova E.Yu.** Potential applications of geostatistical inversion results for 3D geological modeling // *Scientific and Technical Bulletin of Rosneft*. 2014. No. 4. P. 10–13. (In Russ.).
- Kondratiev I.K., Ryzhkov V.I., Kissin Y.M., Shubin A.V.** Methods of implementation and evaluation of the effectiveness of seismic Inversion: A Textbook (In Russ.). Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 2011. 62 p.

- Krebs J.R., Anderson J.E., Hinkley D., Neelamani R., Lee S., Baumstein A., Lacasse M.-D.** Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources // *Geophysics*. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC177–WCC188. doi: 10.1190/1.3230502.
- Kubyshta I.I., Pavlovskiy Yu.V., Emelyanov P.P.** Efficient 3D seismic inversion technologies as a basis for creating and updating geoseismic model of the Vendian deposits (in terms of Eastern Siberia oil-and-gas field) // *ProNefT*. 2016. No. 1. P. 27–37. (In Russ.).
- Lang X., Grana D.** Geostatistical inversion of prestack seismic data for the joint estimation of facies and impedances using stochastic sampling from Gaussian mixture posterior distributions // *Geophysics*. 2017. Vol. 82 (4). P. M55–M65. doi:10.1190/geo2016-0670.1.
- Latimer R.B.** Inversion and interpretation of impedance data // *Interpretation of three-dimensional seismic data*. AAPG, SEG, Tulsa, Oklahoma, 2011. P. 309–350.
- Le Ravalec-Dupin M.** Inverse stochastic modeling of flow in porous media. Applications to reservoir characterization. Paris, Editions Technip, 2005. 194 p.
- Liu M., Grana D.** Accelerating geostatistical seismic inversion using TensorFlow: A heterogeneous distributed deep learning framework // *Computers & Geosciences*. 2019. Vol. 124. P. 37–45. doi: 10.1016/j.cageo.2018.12.007.
- Mariethoz G., Caers J.** Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images. John Wiley & Sons, 2014. doi:10.1002/9781118662953.
- Miele R., Grana D., Seabra Varella L.E., Viola Barreto B., Azevedo L.** Iterative geostatistical seismic inversion with rock-physics constraints for permeability prediction // *Geophysics*. 2023. Vol. 88 (2). P. M105–M117. doi: 10.1190/geo2022-0352.1.
- Narayan S., Sahoo S.D., Kar S., Pal S.K., Kangsabanik S.** Improved reservoir characterization by means of supervised machine learning and model-based seismic impedance inversion in the Penobscot field, Scotian Basin // *Energy Geosciences*. 2024. Vol. 5 (2). P. 100180. doi:10.1016/j.engeos.2023.100180.
- Robinson E.A.** Predictive deconvolution of time series with applications to seismic exploration // MIT Geophysical Analysis Group Report No. 7. 1954. 281 p.
- Shapovalov M.Yu., Khamitullin I.M., Shakirov R.R., Filippova K.E., Bregid A.A.** Reservoir characterization in coastal-continental environment of the Jurassic complex based on seismic data inversion // *Georesources*. 2023. Vol. 25 (3). P. 49–56. (In Russ.). doi:10.18599/grs.2023.3.7.
- Soares A., Diet J.D., Guerreiro L.** Stochastic inversion with a global perturbation method // *EAGE Conference on Petroleum Geostatistics*. EAGE, 2007. P. 32. doi:10.3997/2214-4609.201403048.
- Srivastava R.M.** Reservoir characterization with probability field simulation // *Proceedings of the SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 1993. P. 330. doi:10.1190/1.1822473.
- Wadsworth G.P., Robinson E.A., Bryan J.G., Hurley P.M.** Detection of reflections on seismic records by linear operators // *Geophysics*. 1953. Vol. 18 (3). P. 539–586. doi:10.1190/1.1437911.
- Whitcombe D.N., Connolly P.A., Reagan R.L., Redshow T.C.** Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction // *Geophysics*. 2002. Vol. 67 (1). P. 63–67. doi:10.1190/1.1451337.
- Yakovlev I.V., Ampilov Y.P., Filippova K.E.** Almost everything about seismic inversion. Part 2 // *Seismic Technologies*. 2011. No. 1. P. 5–15. (In Russ.).
- Zhang Z., He X.** A variational framework for inverse modeling: case study in CO₂ sequestration // *Advances in Water Resources*. 2025. Vol. 203. P. 105034. doi:10.1016/j.advwatres.2025.105034.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСТАЩУК Даниил Иванович – аспирант НГУ, инженер лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: атрибутивный и сейсмофацциальный анализ, разработка алгоритмов определения характеристик целевых геологических объектов.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных, решение обратных задач геофизики.

*Статья поступила в редакцию 30 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 12 февраля 2026 г.,
принята к публикации 12 февраля 2026 г.*



ВЛИЯНИЕ СЕЙСМОПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХОВ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ 1-СБ

Р.А. Бакеев, Ю.П. Стефанов, Е.А. Мельник[✉], В.Д. Суворов, Е.В. Павлов, А.С. Сальников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

[✉]MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

Аннотация. С использованием результатов сейсмоденситостного моделирования по профилю 1-СБ численно исследовано напряженно-деформированное состояние, возникающее под действием сил гравитации в земной коре Байкальской складчатой области. Показано, что основную роль в формировании неоднородностей напряженного состояния и его аномалий играют вариации мощности и глубины залегания слоев пород с разными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, сейсмический профиль 1-СБ

Финансирование: работа была выполнена в рамках государственного задания 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».

Для цитирования: Бакеев Р.А., Стефанов Ю.П., Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В., Сальников А.С. Влияние сейсмоденситостных неоднородностей на напряженно-деформированное состояние земной коры и верхов мантии по профилю 1-СБ // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 30–41. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-30.

THE EFFECT OF SEISMIC DENSITY IRREGULARITIES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE EARTH'S CRUST AND MANTLE TOPS ALONG THE PROFILE 1-SB

R.A. Bakeev, Yu.P. Stefanov, E.A. Melnik[✉], V.D. Suvorov, E.V. Pavlov, A.S. Salnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

[✉]MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

Abstract. Using the results of seismic density modeling on the 1-SB profile, the stress-strain state arising under the influence of gravity forces in the Earth's crust of the Baikal folded region was numerically studied. It has been shown that the main role in the formation of inhomogeneities of the stressed state and its anomalies is played by variations in the thickness and depth of layers of rocks with different physical and mechanical properties.

Keywords: elastic-plastic deformation, numerical modeling, stress-strain state, 1-SB seismic profile

Funding: The study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2022-0021 "Regional structure features of the Earth's crust and upper mantle of platform and folded areas of Siberia, their stress-strain state according to seismological, gravimetric and geomechanical data".

For citation: Bakeev R.A., Stefanov Yu.P., Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V., Salnikov A.S. The effect of seismic density irregularities on the stress-strain state of the Earth's crust and mantle tops along the profile 1-SB // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 30–41. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-30.

ВВЕДЕНИЕ

В работе используются данные глубинных сейсмических зондирований вдоль профиля 1-СБ, длиной 1450 км, входящего в систему опорных региональных геофизических профилей Российской Федерации и протягивающегося в меридиональном направлении, пересекающего северную часть Центрально-Азиатского складчатого пояса с выходом на Сибирский кратон [Мельник, Суворов, 2018] (рис. 1). Расчет напряженного состояния осуществлялся в рамках упругопластической постановки.

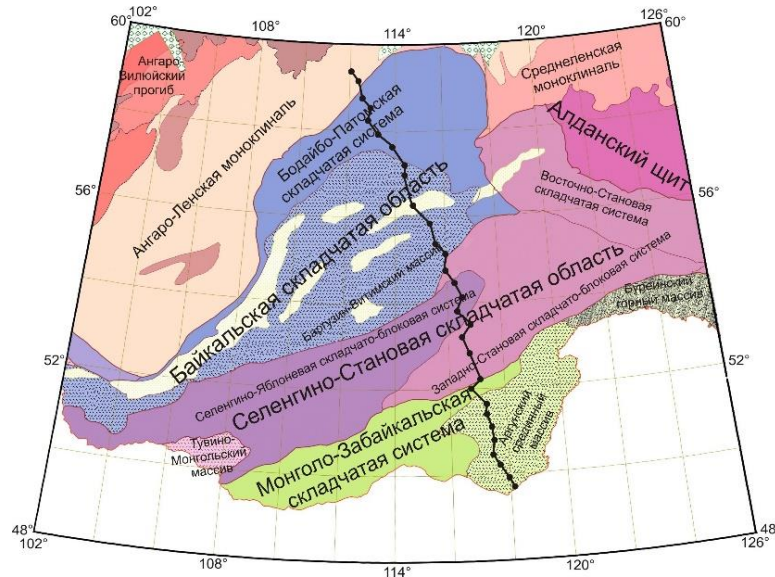


Рис. 1. Схема наблюдений ГСЗ (пункты взрыва – черные кружки) на фрагменте цифровой тектонической (геолого-структурной) карты России (2003 г.).

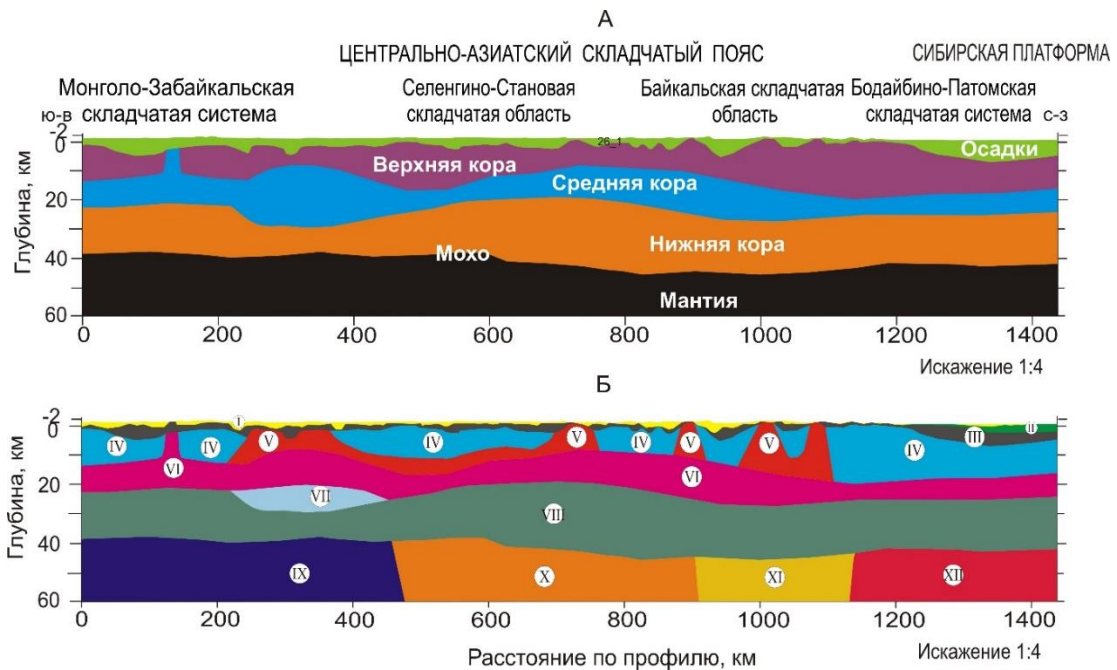


Рис. 2. Генерализованная сейсмоденситивная модель строения земной коры и верхов мантии по профилю 1-СБ (А) и геомеханическая модель с нумерованными блоками неоднородностей (Б), см. табл. 1.

На рисунке 2 показана генерализованная сейсмоплотностная модель строения земной коры и верхов мантии, где цветом выделены осадки, верхний, средний и нижний слой коры, а также верхняя часть мантии.

В соответствии с такой геометрией каждый блок имеет свои упругие и прочностные характеристики, представленные в табл. 1. Кроме того, согласно представлениям о распределении реологических свойств [Гольдин и др., 2006; Ребецкий, 2007; Вигон, 2011], были учтены изменения прочности с глубиной в выделенных интервалах ее роста и снижения. Заметим, что использование упругопластической модели означает мгновенное ограничение интенсивности касательных напряжений значением эффективной прочности τ^* (11), тогда как вязкой реологии соответствует время релаксации. Очевидно, что в случае квазистационарного процесса различия исчезают. Графики зависимости прочности с глубиной для трех вертикальных сечений представлены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры модели по блокам

Блоки		Плотность ρ , г/см ³	Модуль сжатия, K , ГПа	Модуль сдвига, ГПа	γ , МПа	α
I	Осадки	2.36	0.293	0.205	5	0.4
II		2.59	0.376	0.264	25	0.5
III		2.69	0.496	0.33	25	0.5
IV	Верхняя кора	2.75	0.528	0.346	30	0.35
V		2.76	0.573	0.366	40	0.4
VI	Средняя кора	2.78	0.6	0.377	50	0.4
VII		2.83	0.647	0.398	20	0.4
VIII	Нижняя кора	2.87	0.693	0.418	25	0.3
IX	Мантия	3.48	1.299	0.867	50	0.5
X		3.36	1.232	0.771	50	0.4
XI		3.21	1.124	0.66	50	0.4
XII		3.34	1.208	0.737	10	0.4

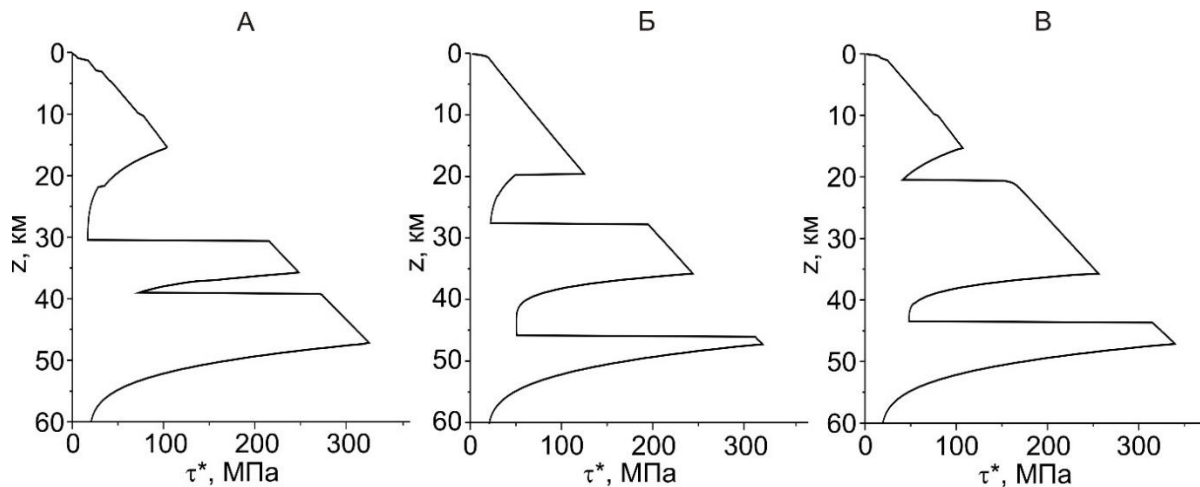


Рис. 3. Графики изменения прочности τ^* с глубиной вдоль профиля на отметках: 350 км (А), 725 км (Б), 1100 км (В).

Для получения наиболее полного представления о напряженном состоянии, возникающем в рассмотренной области земной коры под действием гравитации, были выполнены расчеты для упругой и упруго-псевдопластической моделей. В упругом случае параметры, характеризующие прочность среды, были приняты достаточно большими, чтобы предел прочности не достигался.

Неоднородное распределение напряжений является следствием неоднородности вещественного состава с различными механическими характеристиками. В упругом случае в значения вертикальной компоненты напряжений наибольший вклад вносят параметры плотности и криволинейность границ раздела. На горизонтальную компоненту дополнительное влияние оказывает коэффициент Пуассона. В упруго-псевдопластической модели значительное влияние оказывает необратимая деформация, изменение которой определяется прочностью. Построенные распределения таких параметров позволяют выявить области повышенных и пониженных напряжений, определяющих зоны возможного развития деформационных процессов в соответствии со структурой изучаемой области.

Неоднородность исследуемой области, наряду с ее геометрией и нагрузкой, определяет характер распределения напряжений. При огромной разнице напряжений вблизи поверхности и на глубине десятков километров такая неоднородность оказывается слишком малой для визуального восприятия. Поэтому аномалии напряженного состояния представляются в виде разности между их значениями в каждой расчетной точке области и реперной величине на правой границе профиля, относящейся к Сибирской платформе: $\bar{A}(i, j) = A(i, j) - A(n, j)$.

Для представления некоторых результатов рассчитывались послойные аномалии в виде отклонения значений параметров состояния в каждой расчетной ячейке от их средней величины на заданной глубине, т. е. $\bar{A}(i, j) = A(i, j) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A(i, j)$, $A(i, j)$ – значение параметра в ячейках (i, j) , n – количество расчетных ячеек вдоль профиля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет напряженно-деформированного состояния фрагмента земной коры и верхов мантии выполнен с помощью численного моделирования. Для этого решалась система уравнений механики для исследуемой области земной коры с учетом неоднородности ее строения. Система уравнений содержит уравнения движения и неразрывности, которая замыкается определяющими соотношениями упруго-псевдопластической среды:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,j} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, u_i – компоненты вектора скорости, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, F_i – массовые силы. Скорость деформации определяется соотношениями:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (3)$$

Предполагая, что скорости деформации состоят из суммы упругой и псевдопластической части, запишем:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (4)$$

Такое разложение в рамках механических аналогий означает последовательное соединение упругого и псевдопластического элементов. В этом случае уравнение упругости можно записать в форме

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}^p)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p), \quad (5)$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе, σ_{ij} и $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензора напряжений и тензора скорости деформаций, $\dot{\theta} = \dot{\varepsilon}_{kk}$ – скорость объемной деформации, δ_{ij} – символ Кронекера.

Для осуществления расчетов соотношения для давления (среднего напряжения) и девиатора напряжений записываются отдельными уравнениями, поэтому воспользуемся разложением тензоров напряжений и деформаций на шаровую и девиаторную части:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + s_{ij}, \quad (6)$$

где $P = -\sigma_{kk}/3$ – среднее давление; s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений.

Уравнения для расчета напряжений запишем в форме гипопругости:

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^e - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \right), \quad (7)$$

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik}\dot{\omega}_{jk} - s_{jk}\dot{\omega}_{ik},$$

$$\dot{P} = -K\frac{\dot{V}}{V}, \quad (8)$$

где K и μ – модули сжатия и сдвига. Уравнения гипопругости необходимы для учета деформации и поворота ячеек расчетной сетки при переходе от одного к другому шагу расчетов. Для этого будем использовать производную Яумана. Скорости поворота $\dot{\omega}_{ij}$ определяются при помощи уравнения

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}). \quad (9)$$

В качестве условия развития необратимой деформации будем использовать уравнение модели Друккера–Прагера [Николаевский, 1971; Друккер, Прагер, 1975; Стефанов, 2002]:

$$f = \tau - \alpha P - Y, \quad (10)$$

где Y и α – параметры модели, которые имеют смысл аналогичный когезии и внутреннего трения, $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений (второй инвариант девиатора напряжений). Соответственно, эффективная прочность среды определяется выражением:

$$\tau^* = \alpha P + Y. \quad (11)$$

Приращения компонент тензора псевдопластической деформации определялись с помощью соотношения теории пластического течения:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (12)$$

где $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$ – пластический потенциал, $d\lambda$ определяется в ходе деформирования из условия пластичности. Неассоциированный закон течения, который используется для расчета необратимой деформации горных пород, предполагает наличие независимого уравнения пластического потенциала и, соответственно, дополнительного параметра, описывающего дилатансию среды. Наиболее простой и удобной формой для пластического потенциала является уравнение

$$g = \tau - \beta p, \quad (13)$$

где β – коэффициент дилатансии. Выражение для расчета приращений необратимой деформации при использовании такого уравнения можно записать в виде:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \left(\beta \delta_{ij} + \frac{s_{ij}}{2\tau} \right). \quad (14)$$

Таким образом, для расчета напряженно-деформированного состояния за пределом упругости используется неассоциированный закон течения, как было предложено в работе [Николаевский, 1971]. Развитие и варианты применения данного закона были рассмотрены в статьях [Николаевский, 1971; Vermeer, de Borst, 1984; Гарагаш, Николаевский, 1989; Стефанов, 2002].

Система уравнений решается с помощью конечно-разностного метода второго порядка [Wilkins, 1999]. Некоторые особенности используемого подхода численного моделирования и алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния при развитии необратимой псевдопластической деформации изложены в работах [Стефанов, 2002; Stefanov et al., 2011; Стефанов, Бакеев, 2015]. Расчеты осуществлялись в 2D постановке плоской деформации. Граничными условиями являлись отсутствие вертикальных перемещений на нижней границе, горизонтальных перемещений на боковых границах и отсутствие напряжений на верхней свободной поверхности. На внутренних границах раздела сред использовались условия полного механического контакта, означающие непрерывность смещений и напряжений. Начальные условия соответствовали ненапряженному и недеформированному состоянию.

При моделировании использовано принятое в механике правило знаков, при котором отрицательные напряжения соответствуют сжатию, а положительные – растяжению. При расчете давления предполагается знак минус, следовательно, для давления положительные значения соответствуют сжатию, а отрицательные – растяжению.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХОВ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ 1-СБ

Рассмотрим напряженное состояние, возникающее под действием гравитации при упругом поведении слоисто-однородной модели среды, показанной на рис. 4 в виде послойных отклонений от средних значений.

В распределении остаточного давления наиболее низкий уровень его значений (около $-(10-15$ МПа) присутствует во всех слоях коры на участке Сибирской платформы, начиная с отметки примерно 1150 км, а наиболее повышенный до $+(5-10$ МПа) на участке Монголо-Забайкальской складчатой системы (0–200 км, рис. 2, А, 4, А). Такое распределение давления неизбежно найдет отражение в прочности пород, в соответствии с ее эффективными значениями. Наибольший интерес представляет горизонтальная компонента напряжений, т.к. ее пониженный уровень означает наименьшее горизонтальное сжатие (рис. 4, Б). Выделяются аномалии напряженного состояния вблизи послойных границ, в первую очередь в областях повышения и понижения глубины границ раздела, изменения

мощности слоев. Можно отметить, что наиболее обширные области во всех слоях коры с положительными значениями (красный цвет) возникают под Байкальской складчатой областью с отметки около 900 км на профиле. В этой зоне вертикальные напряжения также минимальны в мантии, как и на правом фланге с отметки 1200 км по всей глубине (рис. 4, В).

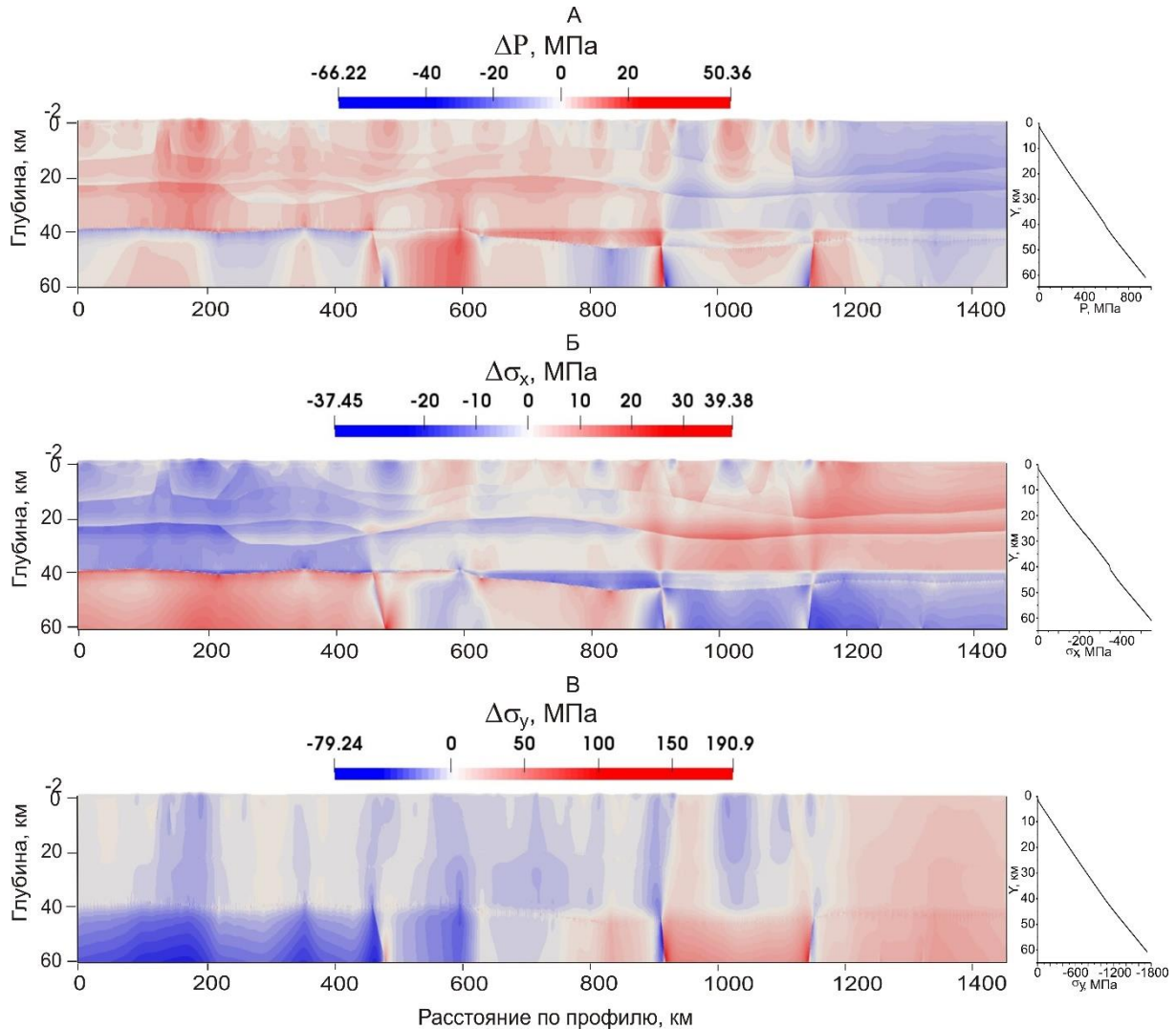


Рис. 4. Распределения послонных аномалий среднего давления (А), горизонтальной (Б) и вертикальной (В) компонент напряжений при упругой постановке. Справа показаны графики изменения средних напряжений с глубиной.

При учете возможности развития необратимой деформации конфигурация зон несколько изменилась (рис. 5). Данные распределения представлены в виде отклонений значений параметров относительно правой границы профиля, соответствующей Сибирской платформе.

Резко проявилось влияние рельефа межслойных границ. В зонах выпуклостей, с их минимальной глубиной, выделяется пониженный уровень давления и, соответственно, повышенный уровень горизонтальной компоненты сжимающих напряжений. В противоположность, в зонах вогнутостей межслойных границ с повышенной глубиной, наблюдается пониженное сжатие как по давлению, так и по горизонтальной компоненте напряжений. При этом область с минимальным сжатием, охватывающим все глубины, расположена в окрестности Муйской впадины на участке 900–1100 км, расширяясь с глубиной до отметок от 750 до 1100 км в мантии (см. рис. 5, Б). Таким образом, расположение наиболее

разреженной зоны близко к полученному в рамках упругой постановки задачи. Здесь же расположена область разрежения в мантии вертикальных напряжений. Пониженные вертикальные напряжения по всей глубине наблюдаются в области Бодайбино-Патомской складчатой системы (см. рис. 5, В). Необратимая деформация сосредоточена на участках пониженной прочности, соответствующих реологической расслоенности. Области с наибольшей необратимой деформацией расположены в первую очередь в межслоевых впадинах, областях с вогнутыми границами. Здесь можно выделить участок от 600 до 120 км, где имеется обширная область с необратимой деформацией в нижней коре (см. рис. 5, Г).

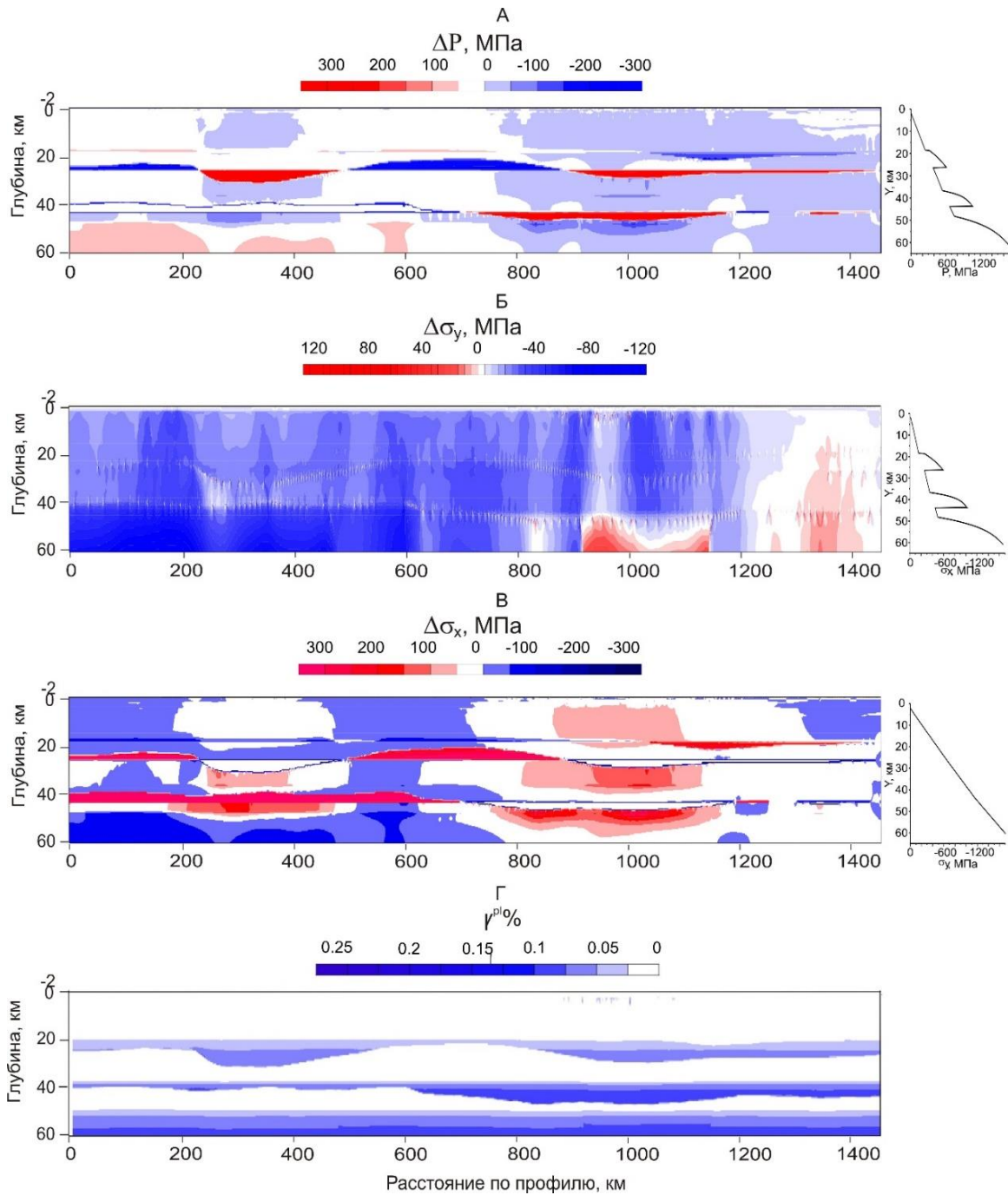


Рис. 5. Распределения аномалий относительно правой границы профиля среднего давления (А), горизонтальной (Б), вертикальной (В) компонент напряжений и необратимой деформации (Г) при гравитационной нагрузке. Справа показаны графики изменения напряжений с глубиной на реперной границе.

Таким образом, максимальные значения аномалий горизонтальной компоненты напряжений существенно превышают аномалии вертикальной компоненты. Зоны разрежения (красные) горизонтальных напряжений располагаются под Муйской впадиной Байкальской складчатой области во всех слоях наиболее прочных участков коры. Отличительной особенностью является наличие зоны разрежений, начиная с небольших глубин в верхней и средней коре. Положительные значения аномалий наблюдаются над нижней и верхней корой.

Наличие области пониженного уровня горизонтального сжатия соответствует сейсмичности региона. В этих зонах развиваются основные очаги необратимой деформации. Остальные зоны разрежения расположены на больших глубинах и сосредоточены на участках нижней коры и верхней части мантии. Выделяется участок на между 200 и 400 км профиля. Данные аномалии имеют большую величину и проявляются над границами Мохо и средней коры. Аномалии вертикальных напряжений расположены в мантии в области между Байкало-Муйской зоной и Бодайбо-Патомской системой, а также в области Сибирской платформы, начиная с глубины 15–20 км.

Таким образом, расчеты, проведенные как в упругой постановке, так и с учетом необратимой деформации, показывают, что наиболее критическим участком в плане развития необратимой деформации и разломообразования является область в районе Муйской впадины, которая имеет повышенную сейсмичность. Вариации аномалий вертикальных и горизонтальных напряжений над межслойными границами коры, рассчитанные относительно напряжений в конце профиля, показаны на рис. 6.

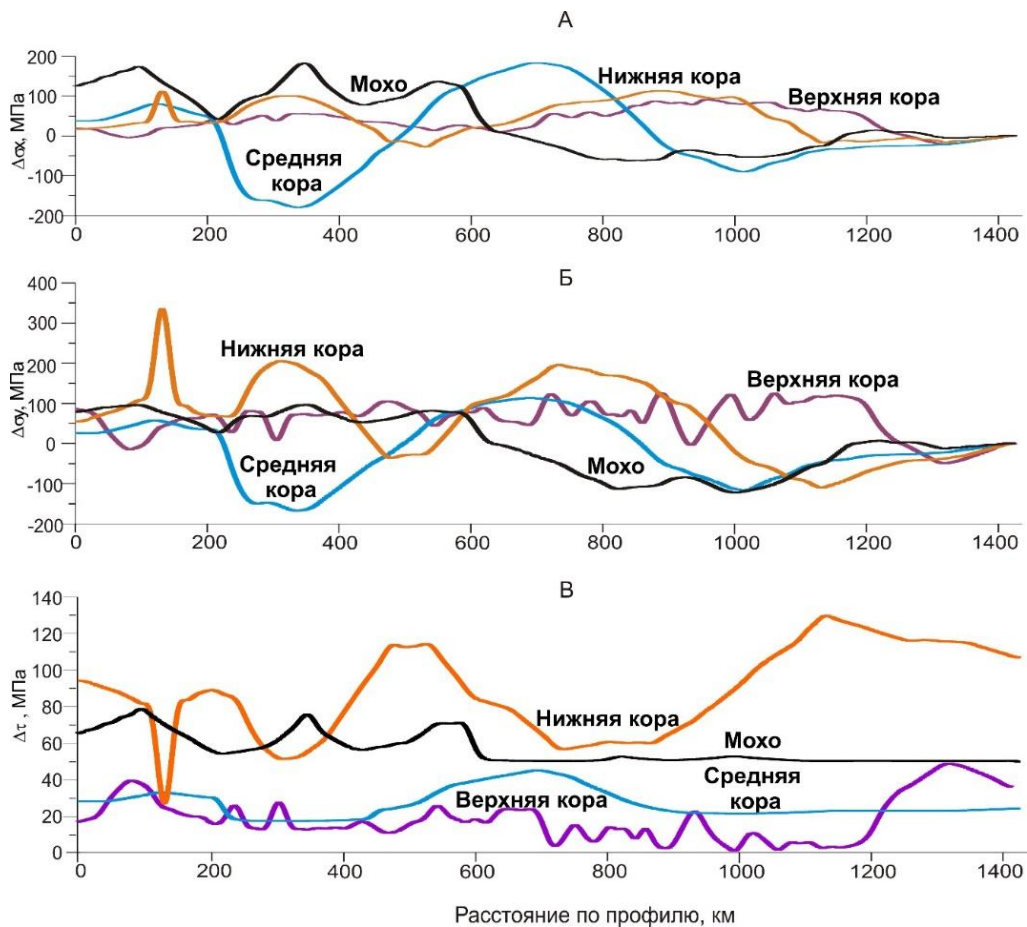


Рис. 6. Графики распределения аномалий горизонтальных (А), вертикальных (Б) напряжений над межслойными границами и интенсивности касательных напряжений (В).

Монголо-Забайкальская складчатая система и Селенгино-Становая складчатая область преимущественно находятся в статическом растягивающем напряженном состоянии, достигающим 200 МПа над средней корой и Мохо для горизонтальных и 340 МПа для вертикальных напряжений над нижней корой. В Байкальской складчатой области горизонтальные напряжения в средней коре и на Мохо уменьшаются в районе Муйской впадины от 0 до –100 МПа. Схожее уменьшение значений, только уже для всей коры, характерно и для вертикальных напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Силы гравитации играют ключевую роль в формировании напряженно-деформированного состояния. При недостатке данных о тектонических силах анализ напряжений, обусловленных гравитацией, становится первостепенным этапом исследования. Изучение того, как неоднородность строения и свойств среды влияет на распределение напряжений, дает возможность оценить области с повышенными и пониженными напряжениями. Эта информация крайне важна для выявления потенциальных зон активного деформирования или для объяснения их существования, включая сейсмически активные участки.

С помощью численного моделирования показано, что Монголо-Забайкальская складчатая система и Селенгино-Становая складчатая область преимущественно находятся в статическом растягивающем напряженном состоянии, достигающим 200 МПа для горизонтальных и 340 МПа для вертикальных напряжений. В Байкальской складчатой области горизонтальные напряжения в средней коре и на Мохо уменьшаются в районе Муйской впадины от 0 до –100 МПа. Схожее уменьшение значений, только уже для всей коры, характерно и для вертикальных напряжений. Растягивающие статические напряжения Центрально-Азиатского складчатого пояса в сравнении с контрастными изменениями сжимающих и растягивающих напряжений в Байкальской складчатой области могут соответствовать сейсмичности Муйской впадины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Гарагаш И.А., Николаевский В.Н.** Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12, № 1. С. 131–183.
- Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П.** Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 10. С. 1094–1105. EDN:KTWZCV.
- Друккер Д., Прагер В.** Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 166–177.
- Мельник Е.А., Суворов В.Д.** Восстановление структуры земной коры Забайкалья по данным глубинных сейсмических исследований // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12–2 (78). С. 92–97. doi:10.23670/IRJ.2018.78.12.054. EDN:YSUKKT.
- Николаевский В.Н.** Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучих сред // Прикладная математика и механика. 1971. Т. 35, № 6. С.1070–1082.
- Ребецкий Ю.Л.** Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.

Стефанов Ю.П. Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 5. С. 107–118. EDN:KWOSH.N.

Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. 2015. № 4. С. 81–93. doi: 10.7868/S0002333715040110. EDN:TXUETJ.

Цифровая тектоническая (геолого-структурная) карта России. Масштаб 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003.

Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28 (8). P. 1402–1443. doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.

Stefanov Yu P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59 (11). P. 2323–2340. doi:10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // Heron. 1984. Vol. 29 (3). P. 1–64.

Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1999. 260 p.

REFERENCES

Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28 (8). P. 1402–1443. doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.

Digital tectonic (geological and structural) map of Russian federation. Scale 1:250 000 000. VSEGEI, St. Petersburg, 2003.

Drukker D., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Mechanics. New in foreign science. No. 2. Defining laws of soil mechanics (In Russ.). Mir, Moscow, 1975. P. 166–177.

Garagash I.A., Nikolaevsky V.N. Non-associated flow laws and localization of plastic deformation // Advances in Mechanics. 1989. Vol. 12 (1). P. 131–183. (In Russ.).

Gol'din S.V., Suvorov V.D., Makarov P.V., Stefanov Yu.P. An instability gravity model for the structure and stress-strain of the lithosphere in the Baikal rift // Russian Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47 (10). P. 1090–1101.

Mel'nik E.A., Suvorov V.D. Restoration of structure of Earth crust of Transbaikal based on data of in-depth seismic researches // International Research Journal. 2018. No. 12–2 (78). P. 92–97. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2018.78.12.054.

Nikolaevskii V.N. Governing equations of plastic deformation of granular medium // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1971. Vol. 35 (6). P. 1017–1029. doi:10.1016/0021-8928(71)90106-7.

Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and strength of nature rock (In Russ.). Akademkniga, Moscow, 2007. 406 p.

Stefanov Yu.P. Deformation localization and fracture in geomaterials. Numerical simulation // Physical Mesomechanics. 2002. Vol. 5 (5). P. 107–118. (In Russ.).

Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Formation of flower structures in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2015. No. 4. P. 535–547. EDN:UFAAWR. doi:10.1134/S1069351315040114.

Stefanov Yu P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59 (11). P. 2323–2340. doi:10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // Heron. 1984. Vol. 29 (3). P. 1–64.

Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1999. 260 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БАКЕЕВ Рустам Альфредович – кандидат физико-математических наук, инженер лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование процессов деформации и разрушения твердых тел; BakeevRA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5367-9211>.

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: изучение процессов деформации горных пород, моделирование геомеханических процессов в земной коре, в том числе при разработке месторождений полезных ископаемых; StefanovYP@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2004-955X>.

МЕЛЬНИК Елена Александровна – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: региональное изучение земной коры и верхней мантии платформенных и складчатых областей Сибири методами активной сейсмологии.

СУВОРОВ Владимир Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: развитие методики обнаружения и описания закономерностей распределения сейсмоплотностных и геомеханических параметров, определяющих структурообразование в земной коре; SuvorovVD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1724-3095>.

ПАВЛОВ Евгений Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация гравитационных аномалий в приложении к задачам тектонического районирования и разведки полезных ископаемых; PavlovEV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3064-6879>.

САЛЬНИКОВ Александр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: изучение структурно-скоростного строения земной коры и верхней мантии на опорных геолого-геофизических профилях Сибири и Дальнего Востока; SalnikovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6938-9279>.

Статья поступила в редакцию 21 января 2026 г.,
одобрена после рецензирования 16 февраля 2026 г.,
принята к публикации 17 февраля 2026 г.



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРИРУЕМЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМИ ШУМАМИ СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМИКИ

Юрий Иванович Колесников^{1,✉}, Константин Владимирович Федин²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1435-434X>

²FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>

Аннотация. В статье приведены примеры применения для решения задач инженерной сейсмологии пассивного сейсмического метода, основанного на выделении из сейсмоакустического шумового поля стоячих волн, генерируемых такими шумами в ограниченных объектах. Исследования выполнялись как на природных, так и на техногенных объектах на разных масштабных уровнях – от первых сантиметров (например, при выявлении пустот под твердым дорожным покрытием) до десятков метров (в частности, для определения собственных частот и форм колебаний зданий и сооружений).

Ключевые слова: натурные эксперименты, сейсмоакустические шумы, пассивные сейсмические наблюдения, накопление амплитудных спектров, стоячие волны

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Благодарности: авторы выражают благодарность Л. Нгомайезве за активное участие в проведении натуральных экспериментов.

Для цитирования: Колесников Ю.И., Федин К.В. Опыт применения генерируемых сейсмоакустическими шумами стоячих волн для решения задач инженерной сейсмологии // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 42–67. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-42.

EXPERIENCE OF USING STANDING WAVES GENERATED BY SEISMOACOUSTIC NOISE TO SOLVE ENGINEERING SEISMIC PROBLEMS

Yury I. Kolesnikov^{1,✉}, Konstantin V. Fedin²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1435-434X>

²FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>

Abstract. This article presents examples of the application of a passive seismic method to solve engineering seismic problems. This method is based on the extraction from a seismoacoustic noise field of standing waves generated by such noise within confined objects. The studies were conducted on both natural and man-made objects at various scales – from a few centimeters (e.g., to assess the thickness of ice cover on water reservoirs) to tens of meters (specifically, to determine the natural frequencies and vibration modes of buildings and structures).

Keywords: *in-situ* experiments, seismoacoustic noise, passive seismic observations, amplitude spectral accumulation, standing waves

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

Acknowledgments: The authors would like to thank L. Ngomayezwe for his active participation in conducting the field experiments.

For citation: Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Experience of using standing waves generated by seismoacoustic noise to solve engineering seismic problems // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 42–67. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-42.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы пассивный сейсмический метод стоячих волн достаточно широко применяется в инженерной сейсмологии, в основном для обследования зданий и сооружений [Еманов, Красников, 2015; Еманов и др., 2018–2020; Бах и др., 2025а, б]. Первые такие работы были выполнены в Геофизической службе СО РАН, где была разработана методика выделения стоячих волн из записей микросейсм, зарегистрированных малокабельной аппаратурой на плотной сети наблюдений [Еманов и др., 2002, 2007]. Методика (названная авторами методом стоячих волн) основана на пересчете разновременных шумовых записей, полученных при синхронной регистрации стационарно установленным опорным и небольшой группой передвижных датчиков, к «единому» времени с помощью фильтров Винера. Это позволяет эффективно выделять из шума когерентные колебания, в частности, генерируемые шумом стоячие волны.

В дальнейшем на результатах физического моделирования в ИНГГ СО РАН было показано, что стоячие волны можно успешно выделять из сейсмоакустических шумовых полей и простым суммированием большого числа амплитудных спектров шумовых записей [Колесников, Федин, 2015, 2016]. В этом случае когерентность колебаний в разных точках наблюдений не является необходимым условием, что существенно расширяет круг задач, решаемых методом стоячих волн.

Критерием для идентификации стоячих волн является регулярность резонансных пиков, появляющихся в результате накопления амплитудных спектров шумовых записей (или квазирегулярность для волн с частотной дисперсией скорости, например, для изгибных волн). В настоящей статье приведены примеры применения пассивного метода стоячих волн при решении задач инженерной сейсмологии на разных масштабных уровнях.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Пассивный сейсмический метод стоячих волн основан на регистрации микросейсмических колебаний исследуемого объекта без воздействия искусственного источника упругих волн. В основе метода лежит предположение о том, что в исследуемом объекте в результате воздействия микросейсм (для простоты в дальнейшем будем применять этот термин и к более высокочастотным сейсмоакустическим шумам) могут формироваться стоячие волны. Частоты этих волн равны собственным частотам объекта исследования. Кроме того, предполагается, что спектр микросейсм содержит частотные составляющие, соответствующие этим собственным частотам.

Если это так, то, как показано на результатах физического моделирования [Колесников, Федин, 2015, 2016], накопление амплитудных спектров большого числа шумовых записей позволяет определять частоты (а во многих случаях и относительные амплитуды) стоячих волн, генерируемых микросейсмами в исследуемом объекте. Частотные и амплитудные особенности стоячих волн можно использовать для оценки состояния и мониторинга объектов исследования – об изменениях свойств объекта можно судить

как по изменениям частоты, так и по изменению формы различных мод собственных колебаний. Необходимо только отметить, что возможность анализировать формы мод имеется только в случае доступности наблюдений вдоль профиля стоячих волн (например, на образующей стержня или во внутренних точках объемного объекта). Если такие наблюдения невозможны (например, на дневной поверхности при колебаниях по вертикали приповерхностного слоя), то для идентификации стоячих волн можно использовать свойство регулярности их спектральных пиков на оси частот.

Регулярность частот спектральных пиков стоячих волн наглядно иллюстрируется стоячими волнами в тонких стержнях [Хайкин, 1971]. Так, частоты стоячих волн (собственные частоты) для стержня с двумя свободными или двумя фиксированными концами, на которых образуются, соответственно, пучности или узлы стоячих волн, определяются формулой:

$$f_n = \frac{nV}{2l}, \quad (1)$$

а для стержня с одним свободным и одним фиксированным концом – формулой:

$$f_n = \frac{(2n - 1)V}{4l}, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – номера мод стоячих волн, V – скорость волны в стержне, l – длина стержня. Скорость V , в зависимости от типа рассматриваемых колебаний в стержне, может быть равной скоростям, например, продольной стержневой, крутильной или изгибной волн.

В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами в отсутствие частотной дисперсии скорости (то есть зависимости скорости от частоты) равен

$$\Delta f = (f_{n+1} - f_n) = \frac{V}{2l}, \quad (3)$$

хотя согласно формуле (1) он равен частоте низшей моды f_1 , а по формуле (2) – удвоенной частоте низшей моды f_1 . Для продольных стержневых и крутильных колебаний это проявляется в появлении на амплитудных спектрах стоячих волн регулярной последовательности резонансных пиков на собственных частотах стержня. Но для волн с сильной частотной зависимостью, например, для изгибных волн, такая последовательность квазирегулярна (интервал между пиками меняется), что мы и увидим ниже на примере исследуемых протяженных объектов.

Подобный механизм образования стоячих волн наблюдается и в объемных ограниченных объектах. Только в этом случае стоячие волны образуются в результате интерференции объемных продольных или поперечных волн, отраженных от границ, разделяющих среды с различными акустическими жесткостями. Так, собственные частоты поверхностного низкоскоростного слоя на более жестком полупространстве определяются формулой (2) [Kramer, 1996]. Соответственно, частоты стоячих волн, образующихся между свободными границами (например, между подземной полостью и дневной поверхностью) должны соответствовать формуле (1). В приведенных ниже примерах свойство регулярности спектральных пиков стоячих волн использовалось для их идентификации в случаях проведения микросейсмических измерений на дневной поверхности.

Методика проведения измерений заключалась в регистрации микросейсм с помощью сейсмических датчиков, установленных непосредственно на поверхности исследуемого объекта. Для записи микросейсм в герцевом частотном диапазоне использовались цифровые одноканальные

регистраторы RefТек-125А и геофоны GS-20DX. Для измерений на относительно небольших объектах (например, твердом дорожном покрытии, бетонных блоках, ледяном покрове водоемов) применялись цифровой двухканальный осциллограф В-423 и широкополосные пьезокерамические датчики.

При измерениях один из датчиков (опорный датчик) устанавливался стационарно, как правило, в центральной части системы наблюдений. Один или несколько передвижных датчиков обеспечивали получение синхронных с опорным датчиком записей микросейсм во всех точках выбранной системы наблюдений. Записи, полученные от опорного датчика, использовались для нормирования уровня шума, записанного передвижными датчиками в разное время. Это позволило уменьшить влияние возможных резких изменений уровня микросейсм при «сканировании» одним или несколькими датчиками многоточечной системы наблюдений.

При нормировании сначала для каждой цифровой записи A_{ki} , полученной от опорного геофона в k -м сеансе, вычисляется сумма амплитуд $S_k = \sum_{i=1}^N |A_{ki}|$ (N – число отсчетов в записи). Далее вычисляются коэффициенты нормирования $K_k = S_1/S_k$, на которые затем умножаются записи, полученные передвижными приемниками во время k -х сеансов.

Полученные для каждой точки наблюдений нормированные записи микросейсм делятся на блоки равной длины (обычно от 1024 до 8192 отсчетов), для которых вычисляются амплитудные спектры, которые затем осредняются (накапливаются). С увеличением числа накоплений первоначально нерегулярных спектров отдельных блоков на осредненном спектре появляются и затем постепенно возрастают на фоне других частотных составляющих регулярные пики, соответствующие семейству стоячих волн в исследуемом объекте. Амплитуды и частоты (собственные частоты исследуемого объекта) этих пиков в дальнейшем используются для интерпретации результатов обработки микросейсмических данных.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Диагностика крепления трубы к опорам надземного трубопровода

Значительная часть трубопроводов сооружается в надземном исполнении – на опорах, обеспечивающих некоторый зазор между трубой и грунтом. В таких трубопроводах создаются благоприятные условия для формирования стоячих волн на собственных частотах пролетов трубы между соседними креплениями к опорам, что может при определенных условиях приводить к резонансным явлениям, повышающим вероятность повреждения участка трубопровода. Эти частоты зависят от многих факторов, в том числе в значительной степени от качества крепления трубы к опорам и устойчивости самих опор.

Теоретически показано, что собственные частоты изгибных колебаний трубопровода можно использовать для определения краевых условий (т. е. вида закрепления трубы на концах пролетов) [Ахтямов, Шагиев, 2016; Шагиев, Ахтямов, 2018]. Однако только по собственным частотам изгибных колебаний трубопровода невозможно однозначно диагностировать, на каком конце пролета трубы произошло снижение жесткости закрепления, т. к. одинаковое изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы должно приводить к одинаковым изменениям собственных частот участка. Мы провели натурные эксперименты, демонстрирующие эффективность применения метода стоячих волн для обнаружения проблемных мест крепления труб к опорам.

Исследования проводились на надземном трубопроводе (теплотрассе), состоящем из двух параллельных стальных труб диаметром 46 см. Через каждые 10 м трубы жестко приварены к массивным стальным опорам (рис. 1, а), за исключением мест пересечения резких локальных понижений рельефа. В этих местах трубы уложены без закрепления на более высокие стальные стойки (рис. 1, б), что можно рассматривать как некоторый аналог нарушения крепления трубы к опоре.



Рис. 1. Жесткое крепление труб к опоре (а); трубы на опоре без жесткого крепления (б); установленные на трубе регистратор 1 и геофон 2 (в).

В наших экспериментах исследовались два 10-метровых пролета одной из труб теплотрассы: один – жестко закрепленный с двух сторон, второй – закрепленный с одной стороны и лежащий на опоре без жесткого закрепления с другой. Измерения проводились с помощью двух регистраторов RefТек-125А и двух – одного опорного и одного передвижного – вертикальных геофонов GS-20DX (рис. 1, в) в точках, расположенных вдоль верхней образующей трубы с шагом 20 см по всей длине каждого пролета.

Специфика исследований протяженных объектов методом стоячих волн состоит в возможности регистрации шумовых записей непосредственно на профиле стоячих волн, что и реализовано в наших экспериментах. Совместная визуализация накопленных во всех точках профиля амплитудных спектров в плоскости расстояние–частота при отображении амплитуд в соответствии с выбранной цветовой шкалой позволяет оценивать формы стоячих волн, которые проявляются в виде чередования узлов и пучностей на собственных частотах исследуемых объектов.

На рисунке 2 показано распределение накопленных амплитудных спектров шумовых записей, полученных на этих участках трубопровода. Как видно из рисунка, в обоих случаях накопление приводит к выделению на развертках спектров нескольких мод изгибных стоячих волн (чередование в пролетах узлов и пучностей). Однако если в первом случае на обоих концах трубы наблюдаются узловые точки для всех выделенных мод (см. рис. 2, а), то во втором (см. рис. 2, б) у половины мод справа наблюдаются пучности и число выделенных мод стоячих волн в том же частотном диапазоне примерно в два раза больше, чем на рис. 2, а. Это означает, что рис. 2, б отражает колебания двойного пролета трубы.

Отметим, что в обоих случаях соответствующие стоячим волнам пики располагаются на оси частот квазирегулярно – интервал между соседними модами не постоянен. Это является следствием довольно сильной дисперсии (зависимости от частоты) скорости изгибных волн.

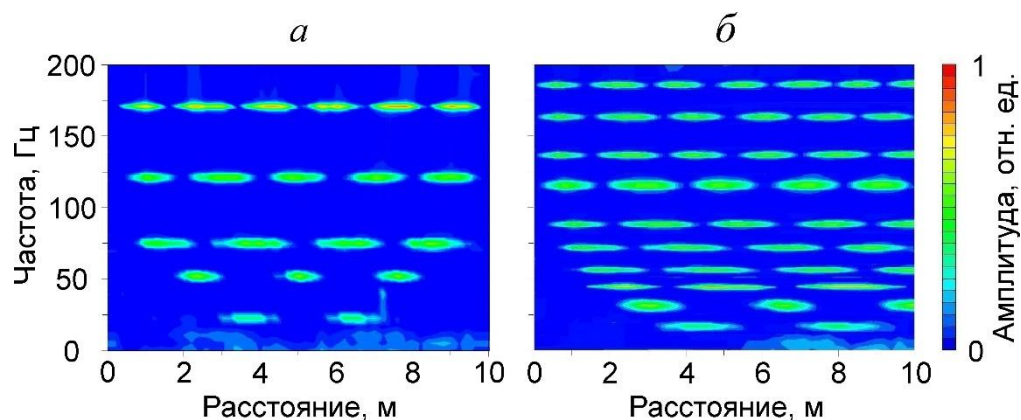


Рис. 2. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей в жестко прикрепленном к опорам с двух сторон участке трубы (а) и при отсутствии жесткого крепления правого конца пролета (б).

Таким образом, резкое увеличение числа мод стоячих волн в каком-либо пролете трубопровода и отсутствие узловых точек у части мод над его опорой свидетельствуют об отсутствии жесткого крепления трубы к этой опоре. Полученные результаты показывают эффективность применения пассивных шумовых измерений для оценки состояния крепления труб к опорам трубопроводов.

Оценка технического состояния мостов и их оснований

Мосты являются неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры и нуждаются в регулярном мониторинге технического состояния. Скорость износа и потери устойчивости мостов зависит от множества факторов, в том числе от непостоянства характеристик грунта в их основании. В северных регионах большое число мостов построены на многолетнемерзлых породах. Деградация мерзлоты приводит к образованию таликов и проседанию грунта, а вместе с ним – свай и опор мостов.



Рис. 3. Общий вид мостов на 31-м (а) и 244-м (б) километрах железной дороги «Обская–Бованенково».

Возможности применения пассивного сейсмического метода стоячих волн для обследования мостовых переходов оценивались по результатам микросейсмических наблюдений на двух железнодорожных мостах, расположенных на 31-м (рис. 3, а) и 244-м (рис. 3, б) километрах железной

дороги «Обская–Бованенково» в Ямало-Ненецком автономном округе. Регистрация микросейсмических колебаний проводилась на верхней поверхности мостовых пролетов двумя ориентированными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами GS-20DX с регистраторами RefTek-125A. Один геофон (опорный), был установлен в средней части моста, второй передвигался по профилю вдоль моста от начала первого до конца последнего пролета с шагом 3 м. В каждой точке профиля непрерывная запись микросейсм производилась в течение 5 мин с синхронной регистрацией колебаний в опорной точке.

На рисунке 4 изображена схема моста на 31-м км и развертка накопленных амплитудных спектров вдоль него, на которой можно выделить семь мод стоячих волн, начиная со второй. Это изгибные по горизонтали стоячие волны, т. к. регистрация микросейсм проводилась ориентированными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами. Для каждой моды между крайними из четырех опор можно видеть несколько пучностей, разделенных низкоамплитудными интервалами в окрестностях узловых точек. Число пучностей на каждой собственной частоте совпадает с номером моды.

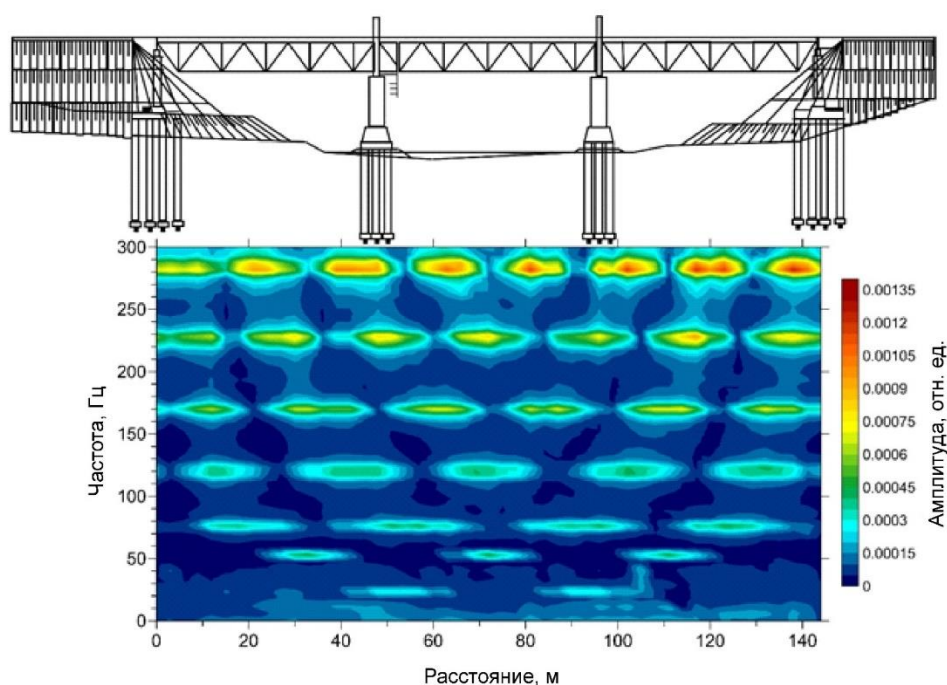


Рис. 4. Схема моста на 31-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково).

Обращает на себя внимание то, что средние опоры не приводят к образованию узлов в местах их контакта с пролетами моста. Это обусловлено шарнирным, а не жестким типом контактов опор с мостовыми пролетами. Подобный эффект наблюдался в экспериментах с трубопроводом (см. рис. 2), где узлы для всех мод находились только в местах жесткого крепления опор к трубе, но не там, где труба свободно лежала на опоре.

В целом же в поле стоячих волн каких-либо осложняющих его существенных аномалий не наблюдается, моды стоячих волн хорошо прослеживаются, распределение пучностей и узлов типично для закрепленного с двух сторон протяженного объекта, что говорит об отсутствии серьезных нарушений в конструкции моста или снижении его устойчивости.

Результаты обследования второго моста приведены на рис. 5. Как и в случае моста на 31-м км (см. рис. 4), этот мост колеблется как единое целое, узловые точки над средними опорами отсутствуют.

Более того, наблюдаются значительно повышенные амплитуды в местах контакта пролетов с двумя средними опорами. Предположительно это может быть связано с частичной потерей устойчивости этих опор из-за оттаивания грунтов под ними. Сложный характер поля стоячих волн в данной мостовой конструкции по сравнению с мостом на 31-м км свидетельствует о необходимости его более тщательного обследования и, возможно, проведения работ по восстановлению устойчивости двух центральных опор.

Проведенные исследования показали, что пассивный сейсмический метод стоячих волн позволяет оценивать техническое состояние мостовых конструкций на предмет их устойчивости и качества крепления пролетов к мостовым опорам. Анализ форм стоячих волн, выделенных из микросейсмических колебаний, показал, что появление искажающих эти формы аномалий (мост на 244-м км) свидетельствует об изменениях в конструкции моста и/или в его основании.

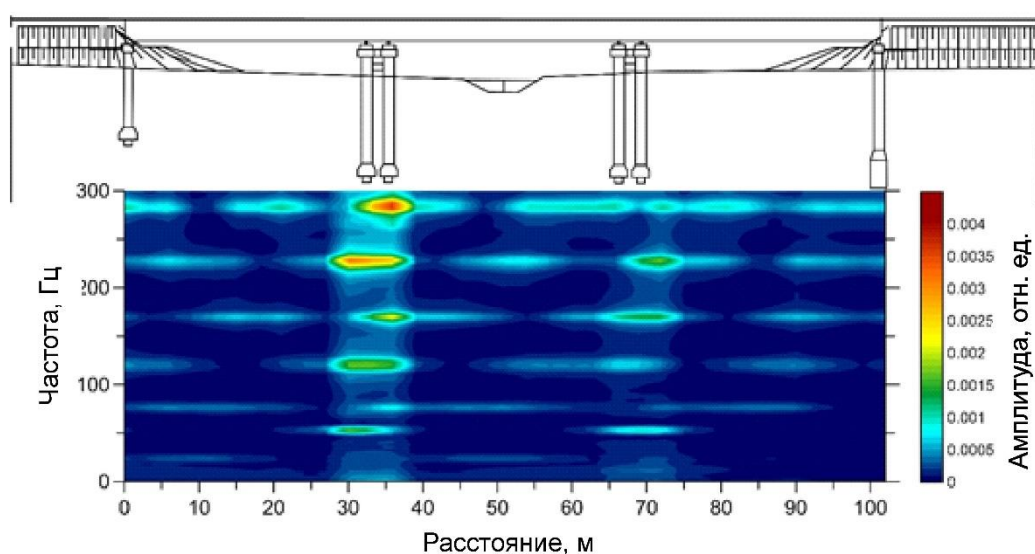


Рис. 5. Схема моста на 244-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково).

Оценка влияния сезонных изменений резонансных свойств верхней части разреза на сейсмобезопасность зданий

При строительстве зданий и инженерных сооружений, особенно в сейсмоактивных регионах, большое внимание уделяется их взаимодействию с основаниями – грунтами, на которых они возводятся. При проектировании таких объектов стараются следить за тем, чтобы их собственные частоты не совпадали с собственными частотами оснований, что позволяет в значительной мере нивелировать возможные резонансные явления при землетрясениях.

Известно, что сезонные промерзания и оттаивания могут влиять на динамические свойства как надземных сооружений, так и их оснований [Yuen, Kuok, 2010; Корепанов, Цветков, 2014]. Для того, чтобы оценить возможное влияние сезонных факторов на реакцию строительных конструкций на внешние вибрации, нами были проведены две серии экспериментов по регистрации сейсмоакустических шумов как внутри одного из жилых домов, так и вне его. Одна серия наблюдений проводилась в конце января, а вторая – в конце июня.

Десятиэтажный дом находится в непосредственной близости от железнодорожной станции «Сеятель» (рис. 6). Соседство с железной дорогой и проходящим вдоль нее междугородним шоссе

приводит к тому, что данное здание испытывает повышенные вибрационные нагрузки, иногда сопровождающиеся, по словам жителей верхних этажей, характерными «поскрипываниями» в строительных конструкциях. Причем эти явления носят сезонный характер, а именно: наблюдаются преимущественно в январе–феврале.



Рис. 6. Расположение жилого дома и гаража, в которых проводились наблюдения, по отношению к железнодорожным путям (а) и общий вид дома (б).

Для исследования собственных колебаний здания и приповерхностных грунтов в данной работе применялся пассивный сейсмический метод стоячих волн. Регистрация сейсмоакустических шумов проводилась зимой и летом в одних и тех же точках в одном из подъездов исследуемого здания, а также в подвале одного из находящихся поблизости неотапливаемых гаражей. Для регистрации использовались регистраторы RefТек-125А и горизонтальные геофоны GS20DX.

В здании регистрация шумов производилась на вертикальном профиле наблюдений на внутренней стене лестничной клетки второго подъезда, находящегося в двухсекционной части дома, ориентированной вдоль железной дороги. То есть регистрировались горизонтальные колебания двухсекционной части дома в направлении, перпендикулярном к железнодорожному полотну. Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений в здании составляла 30 мин.

На рисунке 7, а показано распределение по высоте дома амплитудных спектров, полученных по результатам зимних наблюдений (летние результаты отличаются лишь в деталях). Из рисунка видно, что амплитуды спектральных пиков меняются по высоте дома закономерно, образуя чередующиеся последовательности узлов и пучностей, причем с ростом частоты число узлов и пучностей возрастает. Такая картина (чередование узлов и пучностей) характерна для стоячих волн в протяженных объектах, поэтому частоты наблюдаемых на спектрах пиков идентифицированы как частоты мод поперечных собственных колебаний изучаемого здания.

На рисунке 7, б приведены обобщенные (осредненные как по времени, так и по всем точкам наблюдений) амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании в июне и январе. Как можно видеть, на обоих спектрах наблюдается ряд пиков (на рисунке они помечены номерами от 1 до 10), частоты которых не зависят от времени года, несколько отличаются лишь их амплитуды.

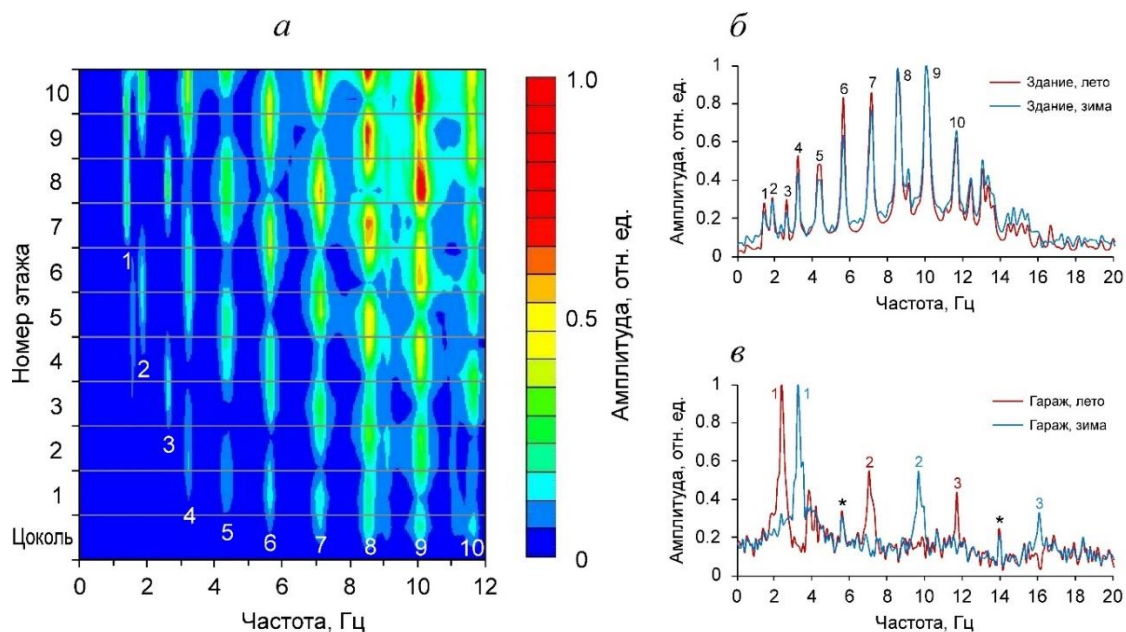


Рис. 7. Распределение осредненных по времени амплитудных спектров по высоте здания (а); сравнение осредненных спектров шумовых записей, полученных в здании (б) и в соседнем холодном гараже (в) в летний и зимний периоды.

Оценка собственных частот для сдвиговых горизонтальных колебаний слоя поверхностных грунтов производилась по амплитудным спектрам микросейсм, зарегистрированных в подвале гаража, расположенного примерно в 60 м от рассматриваемого здания (см. рис. 6, а). Для наблюдений использовался горизонтальный геофон, ориентированный примерно в перпендикулярном к железнодорожным путям направлении.

Продолжительность непрерывной записи микросейсм как в зимний, так и в летний периоды здесь была увеличена примерно до недели. В результате накопления амплитудных спектров фрагментов полученных шумовых записей на осредненных спектрах появились характерные для стоячих волн в приповерхностном грунтовом слое [Kramer, 1996] регулярные пики (рис. 7, в) на частотах, соответствующих формуле (2).

Для обоих спектров на рис. 7, в эта закономерность выполняется для трех отмеченных цифрами пиков (трех низших мод стоячих волн сдвига), погрешность находится на уровне спектральной разрешающей способности. Так частоты пиков, полученные по летним наблюдениям, равны 2.32, 7.08 и 11.72 Гц, а по зимним – 3.17, 9.64 и 16.1 Гц.

Таким образом, собственные частоты для сдвиговых колебаний поверхностного грунтового слоя, определенные по результатам измерений в подвале гаража в январе, превышают частоты, полученные по данным июньских наблюдений, примерно на 37 %. Из этого следует, что в определенные периоды времени частоты некоторых поперечных мод собственных колебаний здания и сдвиговых горизонтальных колебаний приповерхностного слоя могут совпадать, что может вести к снижению сейсмобезопасности данного сооружения.

В этом можно убедиться, если сравнить спектры записей, зарегистрированных в здании и в гараже летом и зимой (см. рис. 7, б, в). Так в июне частота наиболее интенсивной низшей моды собственных сдвиговых колебаний слоя (2.32 Гц) заметно отличается от наиболее близких к ней частот поперечных мод собственных колебаний здания (1.83 и 2.56 Гц). В то же время в январе частота низшей моды

собственных сдвиговых колебаний слоя (3.17 Гц) совпадает с точностью до спектральной разрешающей способности (в нашем случае это 0.12 Гц) с частотой одной из поперечных мод собственных колебаний здания, отмеченной на рис. 7, б цифрой 4, что может приводить к усилению возможных резонансных явлений в здании на этой частоте.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости учета сезонных вариаций резонансных свойств поверхностного грунтового слоя при проектировании различных сооружений, в особенности в районах с климатическими условиями, характеризующимися сменой длительных периодов положительных и отрицательных температур.

Обнаружение пустот под плитами, лежащими на акустически более жестком основании

Строительство гидроэлектростанций (ГЭС) во многих случаях сопровождается возведением грунтовых плотин и дамб, которые в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию различных факторов (давлению волн и льда, внутренней эрозии из-за фильтрационных процессов, сезонных промерзаний и оттаиваний и т. д.), приводящих к изменению их проектных характеристик. На долю грунтовых плотин приходится более половины всех аварий, происходящих на плотинах гидротехнических сооружений [Юзбеков, 2004].

Для защиты подвергающихся динамическому воздействию волн и льда верховых откосов грунтовых плотин и дамб применяются различные виды креплений, в частности, они могут быть укреплены бетонными плитами, как, например, на дамбе Новосибирской ГЭС. Со временем в верховых откосах могут появляться дефекты вследствие изменения состояния грунтов и потери прочности бетона железобетонных плит. Своевременное выявление этих дефектов позволяет вовремя принимать соответствующие меры по их устранению. Ниже представлены результаты применения высокочастотной модификации метода стоячих волн для обнаружения пустот под бетонными плитами, лежащими на более жестком основании, и контроля их толщины.

Объектом исследования в данном случае были верховые откосы дамбы Новосибирской ГЭС. Они, как отмечалось выше, укреплены бетонными плитами (рис. 8) с горизонтальными размерами 10×10 м², уложенными, как значится в проектной документации, на каменную наброску на песчано-глинистом грунте. На поверхности четырех предположительно «проблемных» (со слов сотрудников ГЭС) плит была проведена регистрация акустических шумовых сигналов. Регистрация проводилась на всей поверхности плит по квадратной сетке с шагом 1 м.



Рис. 8. Плиты крепления верхового откоса плотины Новосибирской ГЭС.

Для регистрации использовался двухканальный цифровой осциллограф В-423 и широкополосные пьезокерамические датчики поршневого типа с вертикально направленной осью максимальной чувствительности. Для ускорения измерений рядом с точками наблюдений на бетонные плиты производилось дополнительное шумовое воздействие с помощью щетки с жесткой щетиной. Это позволило сократить время регистрации в каждой точке с 5–10 мин, необходимых при работе с естественными акустическими шумами, до примерно 30 с.

При обработке записи разбивались на фрагменты длительностью примерно 82 мс, после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. На рисунке 9 приведены примеры осредненных спектров шумовых записей, зарегистрированных в двух точках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить как минимум два регулярных резонансных пика, согласующихся с формулами (1) для рис. 9, б или (2) для рис. 9, а.

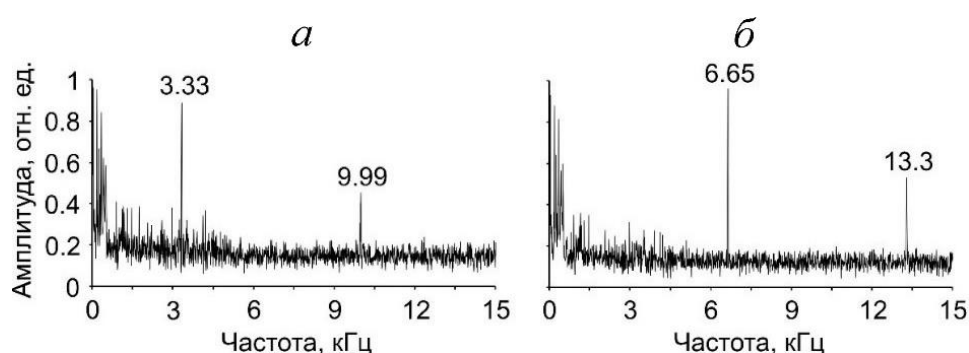


Рис. 9. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на плитах верхового откоса плотины над жестким основанием (а) и над полостью (б).

В частности, для бетонной плиты, лежащей на основании (каменной наброске на песчано-глинистом грунте), характеризующемся большей акустической жесткостью, что имело место в большинстве точек наблюдения, эти пики расположены на оси частот в соответствии с формулой (2). Это иллюстрирует спектр, приведенный на рис. 9, а, на котором частоты пиков, соответствующих первым двум модам стоячих волн сжатия–растяжения, равны 3.33 и 9.99 кГц. В то же время над образовавшейся под плитой полостью (рис. 9, б) распределение пиков согласуется с формулой (1) – их частоты равны 6.65 и 13.3 кГц.

Отмеченные спектральные пики соответствуют стоячим волнам вертикального сжатия–растяжения бетонного слоя, что подтверждает сопоставление результатов прямого измерения толщины бетонной плиты в контрольной точке и расчета толщины по формуле:

$$l = \frac{V_p}{2\Delta f}, \quad (4)$$

следующей из (3). В данном случае скорости V в формуле (3) для стоячих волн вертикального сжатия–растяжения соответствует скорость продольных волн V_p , а l – это толщина плиты.

Измеренная рулеткой по торцу незакрепленной снизу (без ее контакта с основанием) плиты толщина бетона составила примерно 30 см. Определенная по записанному рядом с торцом шуму частота низшей моды равна $f_1 = \Delta f = 6.94$ кГц, что при измеренной импульсным методом скорости в бетоне $V_p=4150$ м/с в соответствии с формулой (3) дает практически такую же толщину – 29.9 см.

На рисунке 10, а показано распределение частоты низшей моды f_1 , на поверхности исследуемых плит. Как видно из рисунка, на некоторых участках плит, примыкающих к их торцам, наблюдается примерно двукратное повышение частоты низшей моды. Это свидетельствует о том, что в этих местах нарушен контакт плит с основанием (образовались промоины) или произошло существенное снижение жесткости грунтов основания. В результате частоты стоячих волн в этих местах определяются формулой (1), в отличие от мест, где под плитами находится более жесткое основание – там эти частоты определяются формулой (2). Более слабые флуктуации частоты связаны, по-видимому, с неоднородностью плит по толщине или изменениями свойств бетона.

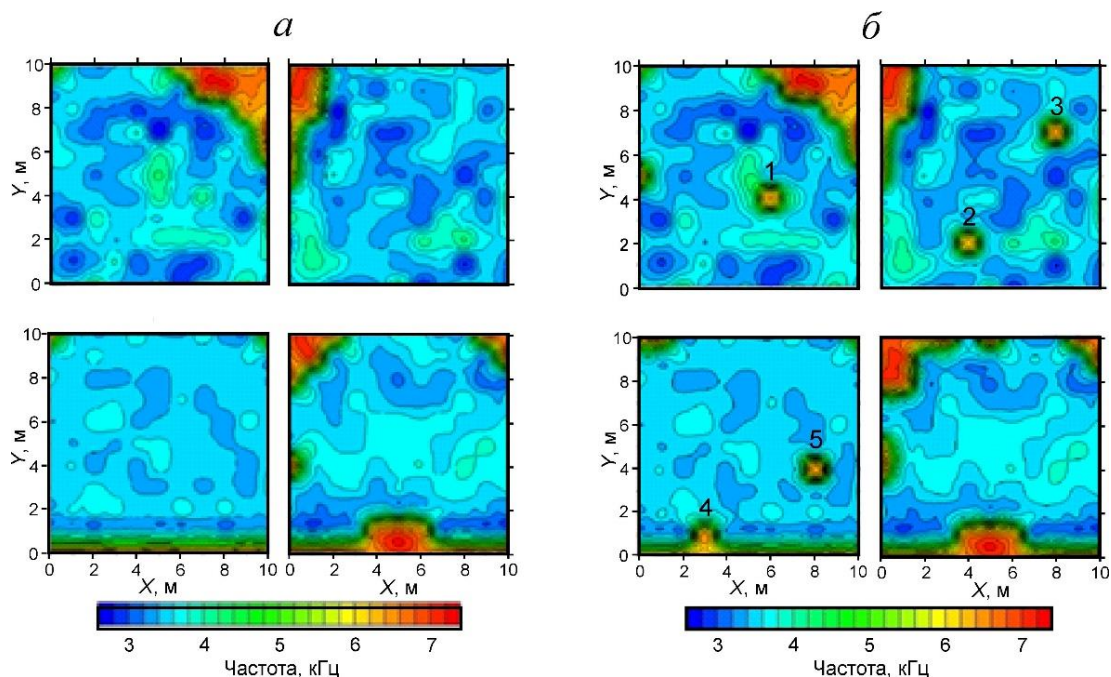


Рис. 10. Карты распределения частоты низшей моды стоячих волн вертикального сжатия–растяжения для предположительно «проблемных» бетонных плит верхнего и нижнего рядов крепления верхового откоса дамбы, полученные в 2019 (а) и 2020 (б) годах. Цифрами отмечены вновь появившиеся аномалии.

Нужно заметить, что на рис. 10, а две верхние карты получены для двух соседних плит из верхнего ряда крепления дамбы, к которым снизу также примыкают другие плиты. Две нижние карты отражают результаты для двух плит с разных участков нижнего ряда, под которыми других плит нет. Это различие проявляется в том, что во втором случае непосредственно возле нижней кромки плит также наблюдается двукратное повышение частоты низшей моды стоячих волн, связанное, по-видимому, с постепенным вымыванием части грунта основания в этих местах.

Повторные измерения на этих же плитах, проведенные через год, показали, что в целом распределение частоты низшей моды по поверхности плит сохранилось (рис. 10, б), но на трех плитах (верхние и левая нижняя карты) появились отмеченные цифрами небольшие аномалии с повышенной в два раза частотой, что свидетельствует о нарушении контакта плиты с ее основанием в этих местах.

Приведенные результаты показали, что метод стоячих волн позволяет надежно диагностировать появление пустот или участков ослабленных грунтов под бетонными плитами крепления откосов дамб, если первоначально лежащие в основании плит грунты имели более высокую в сравнении с бетоном акустическую жесткость.

Обнаружение пустот под твердым дорожным покрытием, лежащем на неконсолидированных грунтах

Одна из актуальных проблем диагностики автомобильных дорог связана с появлением пустот под их асфальтобетонным покрытием. Применение метода стоячих волн для обнаружения пустот под твердым дорожным покрытием, лежащем на неконсолидированных грунтах с меньшей акустической жесткостью, было протестировано на относительно небольшом объекте – промоине в подстилающем грунте, образовавшейся у края асфальтового покрытия тротуара (рис. 11). На поверхности асфальтового слоя над промоиной были проведены записи шумового поля на двух профилях, пересекающих промоину вдоль и поперек кромки тротуара (красные линии на рис. 11).

Из-за небольших размеров объекта исследований регистрация шумовых записей велась высокочастотной аппаратурой – цифровым осциллографом В-423 с вертикально направленным широкополосным пьезокерамическим датчиком. Для ускорения измерений производилось дополнительное шумовое воздействие на асфальтовое покрытие при помощи щетки с жесткой щетиной, что позволило сократить время непрерывной регистрации в каждой точке наблюдений до 6.5 с.

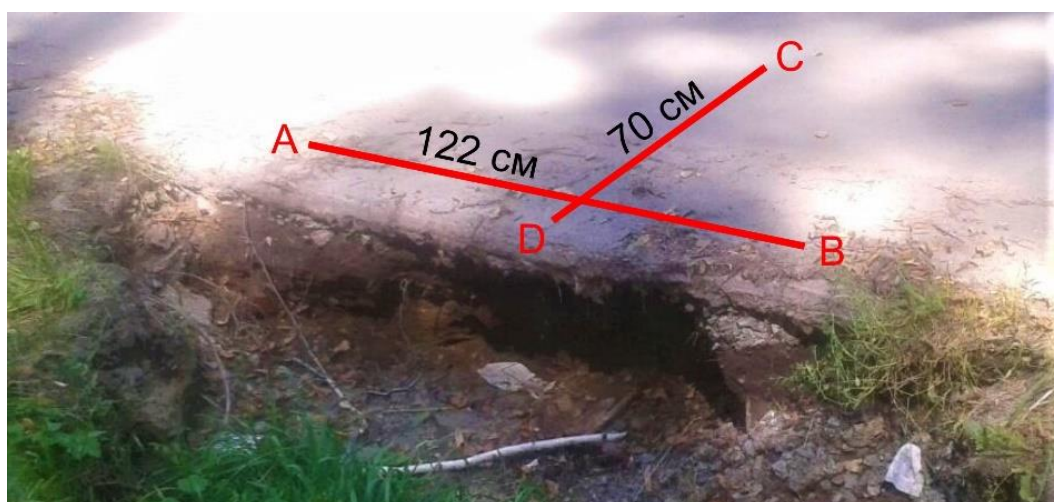


Рис. 11. Промоина под тротуарным асфальтовым покрытием. Красные линии – профили наблюдений.

Примеры осредненных (накопленных) амплитудных спектров для точек наблюдений в стороне от полости и над ней приведены на рис. 12. Как можно видеть, вне полости (см. рис. 12, а) на спектре наблюдаются два резких пика с частотами 37.4 и 74.8 кГц, что согласуется с формулой (1). Эти пики соответствуют двум низшим модам стоячих волн вертикального сжатия–растяжения в асфальтовом слое над грунтом, имеющим меньшую акустическую жесткость. Это подтверждается тем, что такие частоты при известной (измеренной) скорости продольных волн в асфальте ($V_p = 3260$ м/с), согласно формуле (1), соответствуют толщине асфальтового покрытия примерно 4.4 см, что хорошо согласуется с прямыми измерениями толщины слоя над промоиной (4.5 см).

Над полостью (рис. 12, б) осредненный спектр имеет существенные отличия от приведенного на рис. 12, а. Хотя на нем также наблюдаются регулярные пики, соответствующие стоячим волнам сжатия–растяжения практически с теми же, что на рис. 12, а амплитудами, но кроме них в низкочастотной части спектра появляются квазирегулярные пики, которые, как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам.

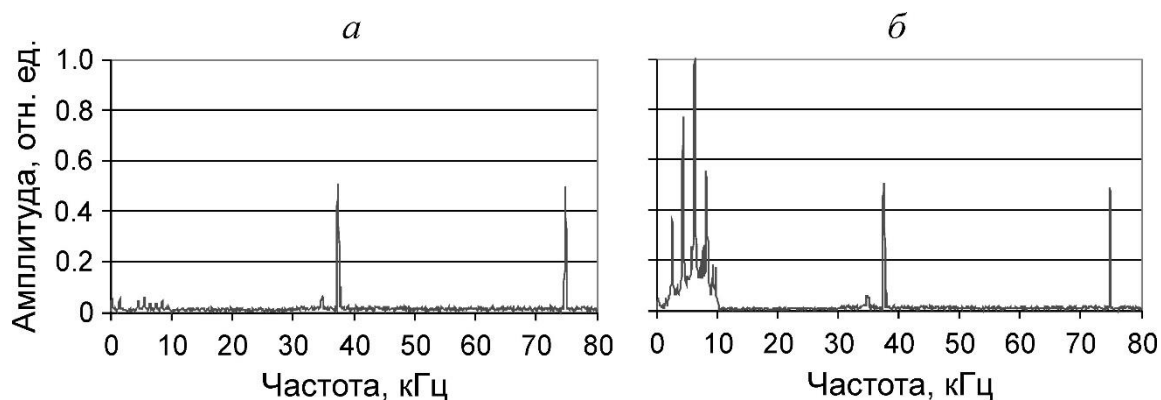


Рис. 12. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, полученных в стороне от промоины (а) и над ней (б).

На рисунке 13 показано распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей вдоль двух профилей, которые показаны на рис. 11 красными линиями. Как можно видеть, амплитуды первой и второй мод стоячих волн вертикального сжатия–растяжения на всей длине профилей не имеют узловых точек, т. к. измерения проводились на дневной поверхности, т. е. в пучностях всех мод этого типа стоячих волн. Во всех точках двух профилей, как и на рис. 12, частота второй моды равна удвоенной частоте первой моды, что согласуется с формулой (1).

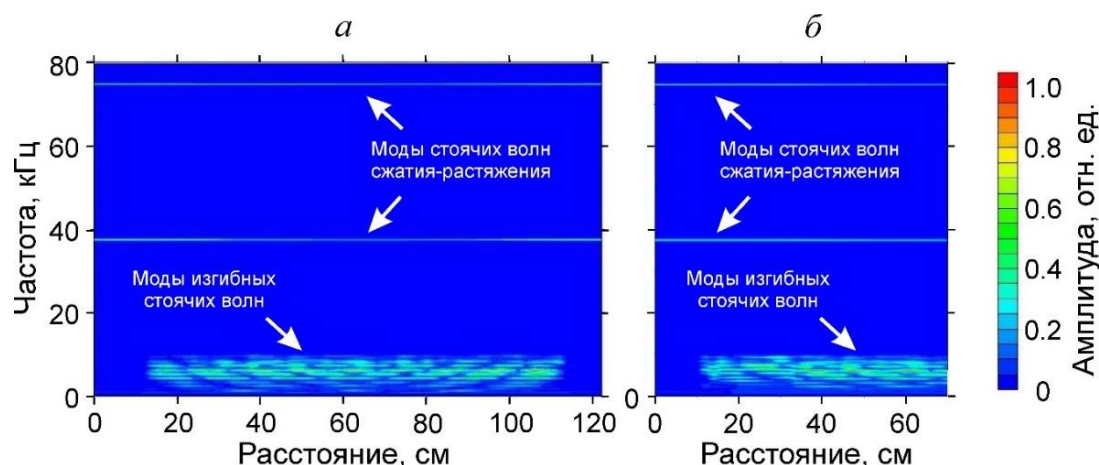


Рис. 13. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей вдоль профилей АВ (а) и CD (б).

В то же время в низкочастотной части спектров на участках профилей, находящихся над промоиной, для каждой моды наблюдается чередование узлов и пучностей, число которых увеличивается с ростом частоты, что характерно при наблюдениях вдоль профиля образующихся в ограниченном теле стоячих волн. В деталях это можно видеть на рис. 14, где в более крупном масштабе представлена низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров.

Наблюдаемые на рис. 14 чередования узлов и пучностей на квазирегулярных частотах отражают формы семейства изгибных стоячих волн, формирующихся под действием акустических шумов в незакрепленном участке асфальтового покрытия над промоиной. То, что это изгибные волны, подтверждается тем, что их частоты существенно ниже частот стоячих волн вертикального сжатия–растяжения и вне промоины колебания на этих частотах отсутствуют.

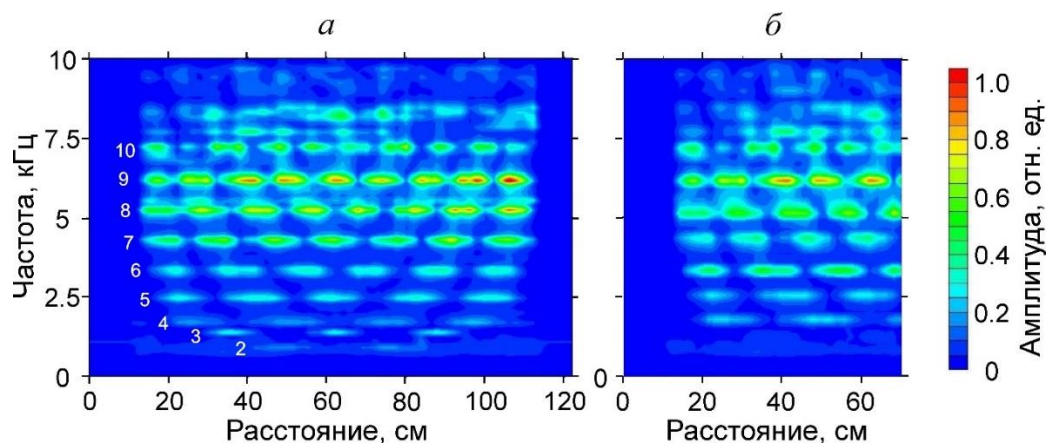


Рис. 14. Низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров, показанных на рис. 13. Цифрами указаны номера мод изгибных стоячих волн.

Проведенный эксперимент показал, что появление полостей под твердым дорожным покрытием приводит к формированию под воздействием акустических шумов на его незакрепленном участке изгибных стоячих волн, которые могут быть использованы для обнаружения таких пустот и оценки их размеров.

Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза

Одним из основных факторов, влияющих на сейсмическую опасность территорий, являются резонансные явления на собственных частотах приповерхностного слоя рыхлого грунта. Для проверки возможности прямого определения резонансных свойств приповерхностных отложений с использованием записей микросейсмических колебаний были проведены эксперименты на территории геофизической обсерватории «Ключи», расположенной примерно в 7 км к востоку от Новосибирского Академгородка (рис. 15, а). На рисунке 15, б показано положение на территории обсерватории 19 точек, в которых регистрировались микросейсм. Восемнадцать пронумерованных на рисунке точек были расположены на неконсолидированных грунтах и одна контрольная точка – на скальной породе в подземном бункере.

Записи микросейсм были получены с помощью регистраторов RefTek-125A и вертикальных и горизонтальных геофонов GS-20DX. Поскольку обсерватория расположена в районе с низким уровнем микросейсм, пассивные сейсмические измерения проводились непрерывно в течение примерно двух недель.

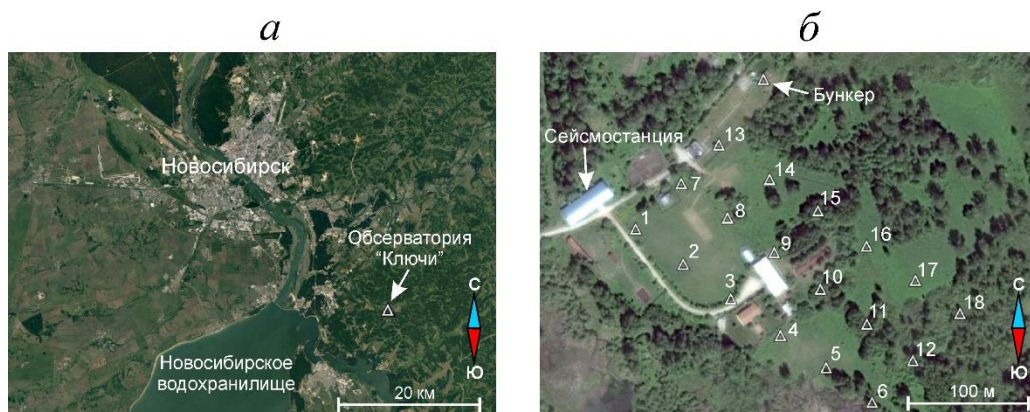


Рис. 15. Географическое положение геофизической обсерватории «Ключи» (а) и схема системы наблюдений на территории обсерватории (б). Треугольниками отмечены места установки сейсмоприемников.

На рисунке 16 показан пример осреднения амплитудных спектров блоков шумовых сигналов длительностью около 8.2 с, записанных вертикальным геофоном в точке номер 1. Как видно на рисунке, осреднение за один день не приводит к появлению резких регулярных пиков в осредненном спектре. Однако после обработки более длительных периодов такие пики появляются (на рис. 16 это пики на частотах 6.06, 18.2 и 30.3 Гц), и их амплитуды постепенно возрастают с увеличением числа осредняемых спектров. При дальнейшем увеличении длительности обрабатываемых записей (более 10 дней) увеличение амплитуд этих пиков резко замедляется.

Регулярность распределения пиков на частотной оси для всех точек наблюдения, расположенных на неконсолидированных грунтах, хорошо согласуется с формулой (2), что указывает на резонансный характер этих пиков. При этом осреднение амплитудных спектров данных микросейсмических колебаний, зарегистрированных на скальной породе в бункере, не приводит к появлению в осредненном спектре каких-либо регулярных пиков.

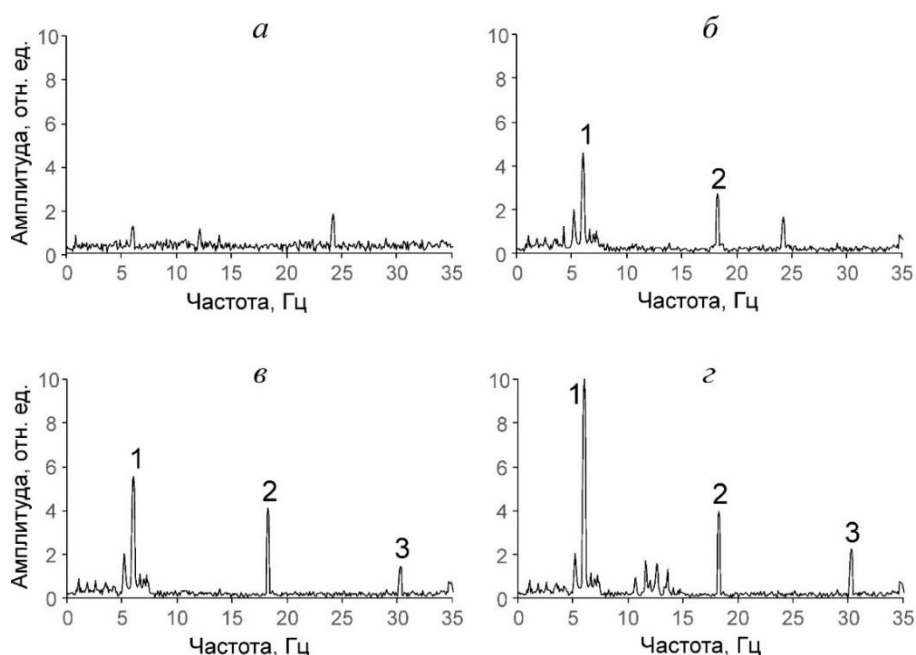


Рис. 16. Результаты накопления амплитудных спектров микросейсм, записанных вертикальным геофоном в точке номер 1 в течение одних (а), трех (б), пяти (в) и десяти (з) суток; цифрами отмечены номера мод стоячих волн.

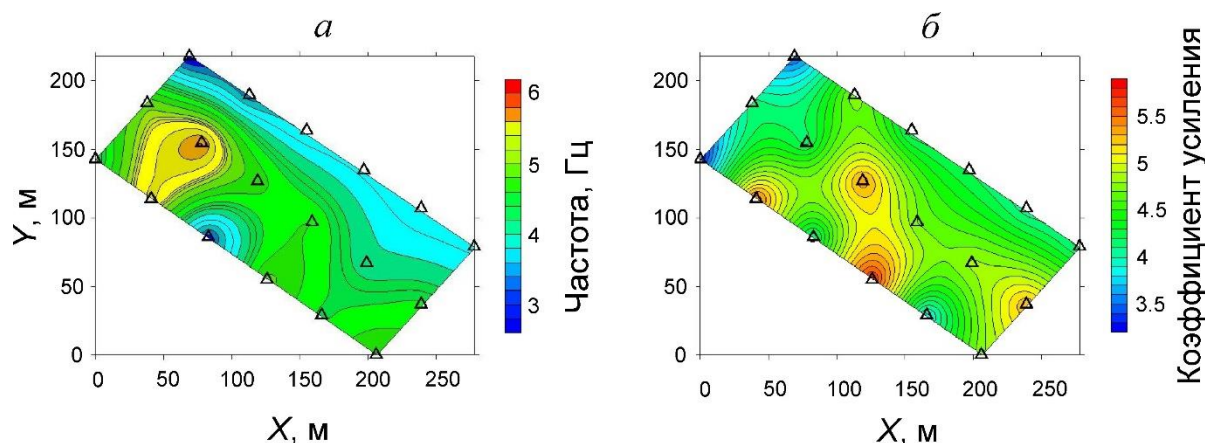


Рис. 17. Карты распределения на участке наблюдений частоты низшей (первой) моды сдвиговых стоячих волн (а) и коэффициента усиления колебаний на этой частоте (б). Треугольниками обозначены точки наблюдений.

После аналогичной обработки микросейсм, зарегистрированных во всех точках наблюдений вертикальными и горизонтальными геофонами, были построены карты частот трех низших мод стоячих волн сжатия–растяжения и сдвига, а также соответствующих коэффициентов усиления колебаний на этих частотах. Примеры таких карт для первой моды сдвиговых стоячих волн приведены на рис. 17. Коэффициенты усиления рассчитывались как отношения амплитуд резонансных пиков к амплитудам соответствующих частотных компонент, полученных для опорной точки на скальной породе в бункере. Карты основаны на данных, зарегистрированных в течение 14 дней.

По найденным частотам стоячих волн сжатия–растяжения и сдвига можно оценить эффективное (среднее по толщине неконсолидированного грунтового слоя) отношение $\gamma = V_s/V_p$, которое, согласно формуле (2), равно отношению частот сдвиговых и продольных стоячих волн одного порядка n . Это позволяет определить эффективный коэффициент Пуассона ν для поверхностных отложений по формуле [Krautkramer, Krautkramer, 1990]:

$$\nu = \frac{1 - 2\gamma^2}{2(1 - \gamma^2)}.$$

На рисунке 18 показано распределение параметров γ и ν на участке наблюдений. Как можно видеть, в пределах зоны наблюдений значения коэффициента Пуассона варьируются в основном в диапазоне 0.1–0.4, что типично для неконсолидированных отложений [Suwal, Kuwano, 2012].

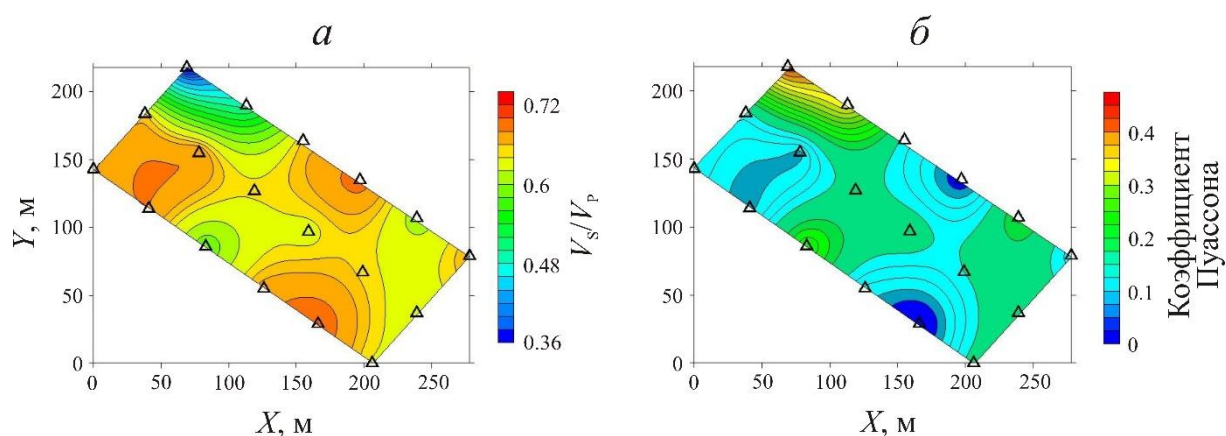


Рис. 18. Карты распределения на участке наблюдений эффективных значений отношения скоростей поперечных и продольных волн (а) и коэффициента Пуассона (б). Точки наблюдения отмечены треугольниками.

В целом, результаты проведенных на территории геофизической обсерватории «Ключи» экспериментов показали, что даже при относительно низком уровне микросейсмических колебаний осреднение амплитудных спектров большого количества шумовых записей позволяет выделить из шумового поля стоячие волны, генерируемые в приповерхностном слое неконсолидированных грунтов. Частоты стоячих волн (собственные частоты слоя) характеризуют приповерхностные резонансные свойства верхней части разреза, а их амплитуды могут быть использованы для расчета коэффициентов усиления относительно колебаний на поверхности скальной породы.

Картирование подземных полостей

Одно из направлений инженерной геофизики связано с поиском и изучением подземных пустот. Это могут быть объекты как естественного, так и искусственного происхождения. К первому типу относятся, в частности, пещеры карстового происхождения.

Для оценки возможностей картирования подземных пустот с использованием метода стоячих волн были проведены микросейсмические наблюдения на поверхности над карстовой пещерой, находящейся примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирска возле с. Барсуково. В настоящее время общая протяженность пещеры считается равной примерно 190–200 м, а доступной для человека части – по разным оценкам от 50 до 100 м. Глубина пещеры в самой глубокой ее части оценивается в 19 м. Вход в пещеру находится в средней части крутого (угол падения 50–70°) каменистого склона высотой несколько десятков метров (рис. 19). Непосредственно выше этого склона земная поверхность имеет более пологий, но местами довольно изрезанный рельеф. На этом участке и были проведены микросейсмические измерения с целью картирования Барсуковской пещеры.



Рис. 19. Склон на правом берегу р. Укроп (а), на котором находится вход в Барсуковскую пещеру (б).

Для записи микросейсм применялись регистраторы RefTek-125A и вертикальные геофоны GS-20DX. Регистрация микросейсм проводилась на площадной системе наблюдений в пределах участка размером примерно 24×34 м² в узлах квадратной сетки с шагом 0.5 м.

Записи от вертикальных геофонов использовались для определения частот стоячих волн сжатия–растяжения, генерируемых микросейсмами в породах над сводами пещеры. Для этого при обработке записи разбивались на фрагменты примерно по 8.2 с, вычислялись их амплитудные спектры и проводилось их осреднение.

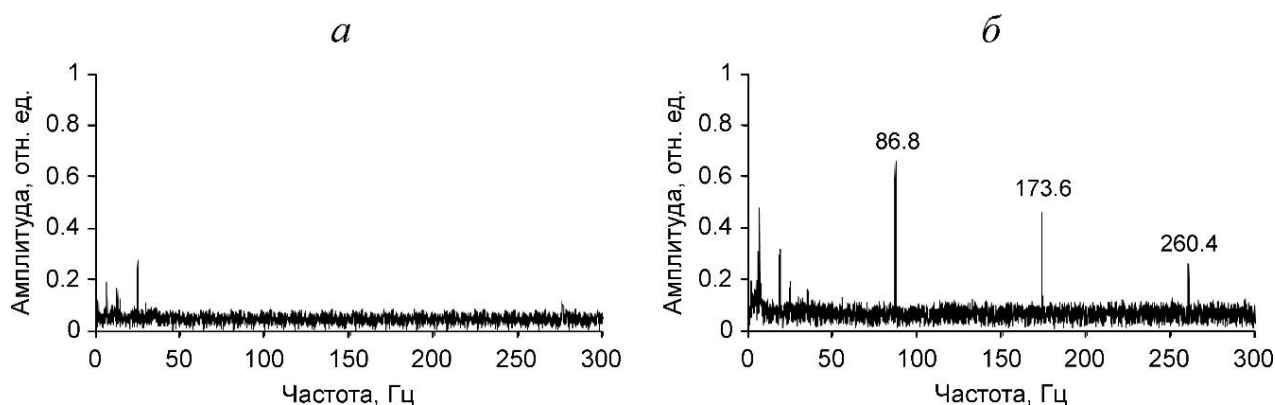


Рис. 20. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над ненарушенным породным массивом (а) и над пещерой (б).

Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над сплошным породным массивом и над одним из гротов пещеры в самой ее глубокой части, приведены на рис. 20. Как можно видеть, над ненарушенным массивом (см. рис. 20, а) на спектре не наблюдается каких-либо регулярных пиков. В то же время над кровлей грота пещеры (см. рис. 20, б) на спектре выделяются три резких пика, частоты которых кратны частоте низшей моды (86.8, 173.6 и 260.4 Гц), что согласуется с формулой (1). Это позволяет с высокой долей уверенности предположить, что это резонансные пики, соответствующие образующимся между земной поверхностью и кровлей пещеры первым трем модам стоячих волн.

Нужно заметить, что в точках наблюдений над ходами и гротами, расположенными на меньших глубинах, из-за ограниченного частотного диапазона геофонов и регистраторов удавалось выделить на спектрах только две, а при мелком залегании сводов пещеры лишь одну низшую моду стоячих волн. В последнем случае только густая сеть наблюдений позволяла уверенно идентифицировать низшую моду при последовательном переходе от точки к точке.

Поскольку только низшая мода стоячих волн вертикального сжатия–растяжения прослеживается над сводами пещеры на всей площади наблюдений, то для картирования использовалась именно эта мода. На рисунке 21 показана карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия–растяжения. Для точек, в которых резонансные пики не выделялись (например, как на рис. 20, а) или измерения не проводились, частота f_1 принималась равной нулю, что формально соответствует слоям бесконечной мощности.

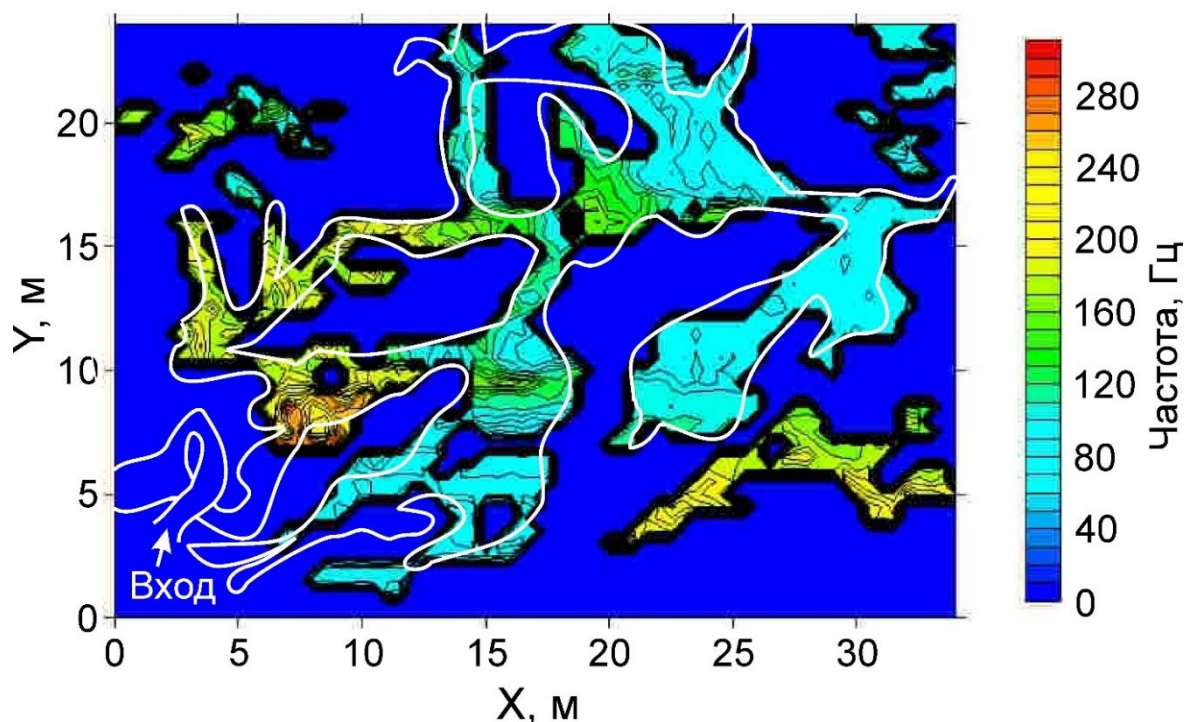


Рис. 21. Карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия–растяжения; белой линией показаны контуры пещеры со схемы, составленной спелеологом С. Пешковым.

Для сравнения на карте белой линией показаны контуры пещеры со схемы, составленной ориентировочно еще в семидесятых–восемидесятых годах прошлого века спелеологом С. Пешковым. Схема скопирована с сайта новосибирского туристского клуба «Экватор» (<http://tk-ekvator.ru>).

В окрестности входа в пещеру экспериментальные данные отсутствуют, т. к. наблюдения там не проводились из-за большой крутизны склона. В остальной же части участка при хорошем совпадении двух карт можно заметить и различия. Например, согласно карте, построенной методом стоячих волн, кроме самой пещеры в ее окрестности находится несколько обособленных пустот меньшего размера.

В целом, согласно полученным результатам, пассивный сейсмический метод стоячих волн показал себя эффективным инструментом для картирования подземных пустот.

Контроль толщины ледяного покрова на водоемах

Необходимость измерения толщины образующегося над водной поверхностью при отрицательных температурах ледяного покрова может возникать при решении множества практических задач: обеспечения безопасного передвижения людей по замерзшим водоемам и транспортных средств по ледовым переправам и автозимникам, прогнозирования паводков и т. д.

Для оценки возможностей применения пассивного метода стоячих волн по определению толщины ледяного покрова проведены натурные эксперименты на двух водоемах возле Новосибирского Академгородка – на небольшой реке Зырянка (приток Оби) и возле береговой линии пляжа «Звезда» на Новосибирском водохранилище. Регистрация шумовых записей проводилась в конце января–начале февраля на двух линейных профилях. На реке профиль длиной 20 м был ориентирован вдоль берегов и находился примерно в ее средней части, причем заведомо над водой. На пляже «Звезда» профиль наблюдений длиной 15 м был примерно перпендикулярен к береговой линии и располагался частично над водой, частично над мерзлым песком. Схематически положение профилей на льду и строение среды под ними показано на рис. 22.

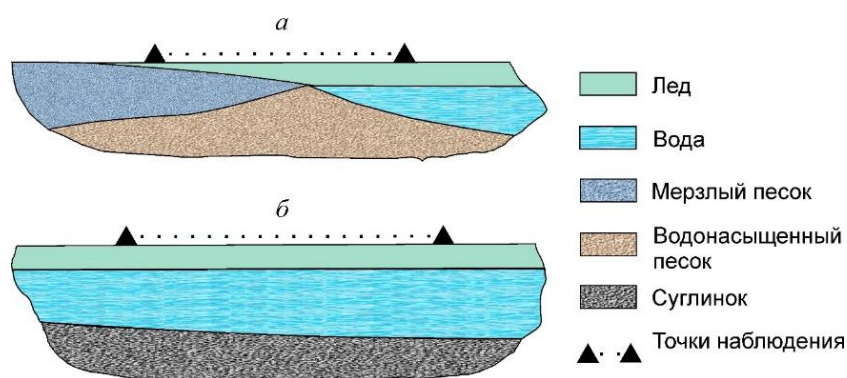


Рис. 22. Схема расположения профилей наблюдений на ледяном покрове на р. Зырянка (а) и в районе пляжа «Звезда» на Новосибирском водохранилище (б).

Регистрация шумовых сигналов производилась на поверхности ледяного покрова водоемов с помощью цифрового осциллографа В-423 и вертикального широкополосного пьезокерамического датчика. Шаг между точками наблюдений на профилях равнялся 1 м, длительность шумовых записей в каждой точке составляла 30 с при наблюдениях на р. Зырянка и 2 мин на пляже «Звезда».

При обработке шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно 8.2 мс, после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. Частоты выделяемых на осредненных амплитудных спектрах резонансных пиков использовались для определения по формуле (4) толщины ледяного покрова в точках наблюдений. При этом предполагалось, что скорость продольных волн V_p для льда известна и в разных точках наблюдений меняется незначительно.

На рисунке 23 приведены примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на двух участках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить несколько регулярных пиков, отмеченных на рисунке цифрами.

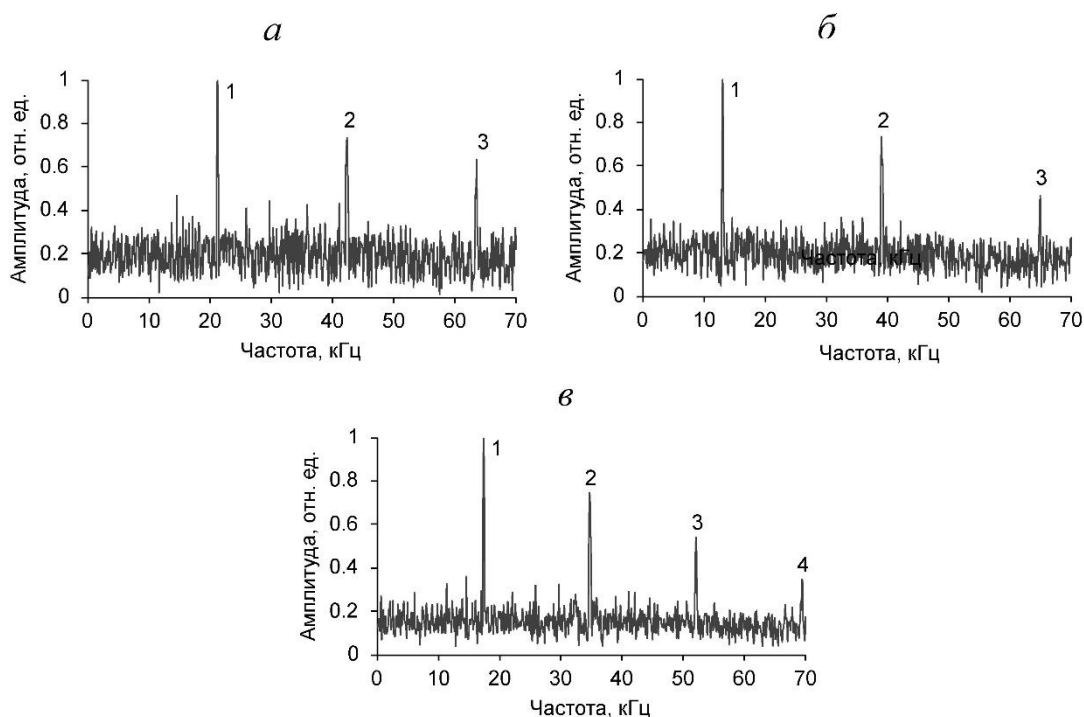


Рис. 23. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных возле береговой линии пляжа «Звезда» на льду, лежащем на воде (а) и над мерзлым песком (б); спектр шумовой записи на ледяном покрове р. Зырянка (в).

Там, где лед покрывает более низкоскоростную относительно него воду (рис. 23, а, в) с меньшей акустической жесткостью, эти пики расположены на оси частот с высокой точностью в соответствии с формулой (1). Например, на рис. 23, а частоты первых четырех мод стоячих волн имеют значения 17.4, 34.8, 52.1 и 69.5 кГц, а на рис. 23, в частоты первых трех мод стоячих волн равны 21.2, 42.4 и 63.6 кГц. В то же время над мерзлым песком (рис. 23, б) частоты пиков равны 13.0, 39.0 и 64.9 кГц, т. е. их распределение на оси частот согласуется с формулой (2). Это говорит о большей акустической жесткости подстилающей среды в сравнении со льдом (в основном, по-видимому, из-за более высокой плотности минеральных зерен песка).

Регулярность пиков на амплитудных спектрах и согласие их частот с формулами (1) для льда над менее акустически жесткой водой и (2) над более акустически жестким мерзлым песком позволяет считать эти пики соответствующими стоячим волнам сжатия–растяжения на собственных частотах ледового слоя. То, что это волны сжатия–растяжения, подтверждает сопоставление результатов прямого измерения толщины льда в контрольной лунке и расчет этой толщины по формуле (4).

Контрольная лунка была пробурена в районе пляжа «Звезда» в нескольких метрах от берега в месте, где подо льдом находилась вода, а не мерзлый грунт. Измеренная рулеткой толщина льда в контрольной лунке составила примерно 10.2 см. Полученный при бурении керн льда был использован для измерения импульсным методом скорости V_p продольных волн. По записанному рядом с лункой шуму

была определена частота низшей моды $f_1=19.9$ кГц, которая в случае льда, покрывающего воду, совпадает с интервалом Δf (как, например, на рис. 23, а, в). Для этой частоты и измеренной в керне льда скорости $V_p=4090$ м/с формула (4) дает значение $l=10.3$ см, близкое к толщине льда, измеренной прямым методом. Таким образом, эти измерения подтверждают корректность применения рассматриваемого метода для определения толщины ледяного покрова водоемов.

На рисунке 24 показано рассчитанное по формуле (4) распределение толщины льда вдоль профилей, на которых были выполнены шумовые измерения. При расчетах использовались определенные по осредненным спектрам интервалы Δf и измеренная скорость продольных волн $V_p=4090$ м/с. Как можно видеть, на р. Зырянка толщина льда составила в среднем примерно 11 см, ее изменения вдоль профиля в основном не превышали 3 см. На Новосибирском водохранилище (возле пляжа «Звезда») толщина льда над водой примерно такая же – порядка 10–11 см. Но на метровом интервале между точками 8 и 9, где в основании ледового слоя мерзлый грунт замещается водой, наблюдается более резкое изменение толщины льда, связанное, вероятно, с уменьшением глубины и наклона поверхности мерзлого грунта подо льдом.

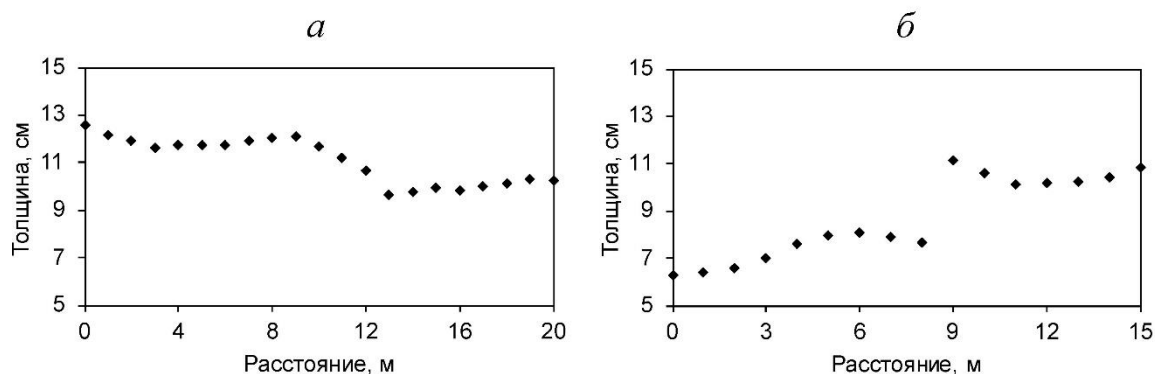


Рис. 24. Распределение толщины льда вдоль профилей наблюдений на р. Зырянка (а) и на пляже «Звезда» (б).

В целом, результаты натурных измерений подтвердили перспективность использования стоячих волн для определения толщины ледового покрова на водоемах, а также типа подстилающей его среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры использования пассивного сейсмического метода стоячих волн в предложенной авторами модификации показали его высокую эффективность при решении широкого класса задач инженерной сейсмологии, а также некоторых подобных задач в акустическом и ультразвуковом диапазонах частот. В данной модификации выделение стоячих волн из шумовых записей, полученных в разных точках системы наблюдений в разные временные периоды, происходит в результате накопления для каждой точки большого числа фрагментов амплитудных спектров микросейсмических (шумовых) записей.

Эксперименты проводились как на природных, так и на техногенных объектах на разных масштабных уровнях – от карстовой пещеры до ледяного покрова водоемов. Информативными параметрами в данном методе являются как частоты, так и амплитуды стоячих волн. На практике из этих двух параметров предпочтительнее использовать частоты, т. к. они менее зависимы от характеристик источника (в данном случае микросейсмического поля) и на точность их определения намного меньше

вливают параметры используемой аппаратуры, в частности ее амплитудно-частотные характеристики. С другой стороны, амплитуды позволяют визуализировать и анализировать формы стоячих волн, но это возможно только в случае регистрации микросейсмических данных вдоль профиля стоячей волны.

В целом эксперименты показали высокую эффективность модифицированного метода стоячих волн и его более широкие возможности в сравнении с первоначальным вариантом метода, который предполагает когерентность колебаний во всех точках наблюдений. А это требование не выполняется для многих объектов исследования, как, например, в некоторых описанных выше экспериментах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Ахтямов А.М., Шагиев В.Р. Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21, № 1. С. 21–26. EDN:XHOQXV.

Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г., Децик Д.В., Еманов А.А., Полянский П.О., Дураченко А.В., Рыбушкин А.Ю. Высокоточные определения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний плотин средненапорных ГЭС // Вопросы инженерной сейсмологии. 2025а. Т. 52, № 1. С. 120–131. doi:10.21455/VIS2025.1-6. EDN:UEYURX.

Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г., Еманов А.А., Полянский П.О. Высокоточные измерения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний здания Иркутской ГЭС // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2025б. № 5. С. 60–72. doi:10.37153/2618-9283-2025-5-60-72. EDN:ENBJUV.

Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 4. С. 37–64. EDN:VOXXGR.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 2. С. 192–207. EDN:AXGPLV.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–24. EDN:IAWNLF.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Клецин В.И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2018. № 4 (35). С. 28–33. EDN:YYWVZR.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов А.А. Инженерно-сейсмологический мониторинг зданий и сооружений: физико-математические основы метода, возможности, результаты // Научный вестник Арктики. 2019. № 7. С. 34–43. EDN:HESZPN.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов Ф.А. Изучение вертикальных собственных колебаний зданий методом стоячих волн // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47, № 4. С. 43–54. doi:10.21455/VIS2020.4-3. EDN:FLPPQP.

Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсмам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 89–96. doi:10.18303/1813-4254-2015-4-89-96. EDN:VLKGEN.

Колесников Ю.И., Федин К.В. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. 2016. № 2. С. 83–91. doi:10.18303/1813-4254-2016-2-83-91. EDN:WTHQBT.

Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 2. С. 153–167. doi:10.15593/perm.mech/2014.2.07. EDN:SHKEPZ.

Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.

Шагиев В.Р., Ахтямов А.М. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот // Математические структуры и моделирование. 2018. № 1 (45). С. 95–107. doi:10.24147/2222-8772.2018.1.95-107. EDN:YSIBSD.

Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (6). С. 62–65. EDN:KVUODV.

Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996. 653 p.

Krautkramer J., Krautkramer H. Ultrasonic testing of materials. 4th Edition. Springer-Verlag, Berlin, 1990. 677 p. doi:10.1007/978-3-662-10680-8.

Suwal L.P., Kuwano R. Poisson's ratio evaluation on silty and clayey sands on laboratory specimens by flat disk shaped piezo-ceramic transducer // Bulletin of ERS. 2012. Vol. 45. P. 141–158.

Yuen K.-V., Kuok S.-C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. 2010. Vol. 32 (8). P. 2379–2386. doi:10.1016/j.engstruct.2010.04.012.

REFERENCES

Akhtyamov A.M., Shagiev V.R. Identification of nonelastic fastenings types of pipeline // Bulletin of the Bashkir University. 2016. Vol. 21 (1). P. 21–26 (In Russ.).

Bach A.A., Emanov A.F., Sheboltsov A.G., Decik D.V., Emanov A.A., Polyansky P.O., Durachenko A.V., Rybushkin A.Yu. High-precision determinations of the characteristics of natural oscillations of medium-pressure hydroelectric power station dams by the standing wave method // Seismic Instruments. 2025. Vol. 61 (1). P. 48–57. doi:10.3103/S074792392570029X. EDN:ODOAKL.

Bach A.A., Emanov A.F., Sheboltsov A.G., Emanov A.A., Polyansky P.O. High-precision standing waves measurements of the natural oscillation characteristics of the Irkutsk HPP building // Earthquake Engineering. Constructions Safety. 2025. No. 5. P. 60–72 (In Russ.). doi:10.37153/2618-9283-2025-5-60-72.

Emanov A., Krasnikov A. The use of standing waves method in study of seismically isolated buildings // Problems of Engineering Seismology. 2015. Vol. 42 (4). P. 37–64 (In Russ.).

Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Gritsenko S.A., Danilov I.A., Kuz'menko A.P., Saburov V.S., Tat'kov G.I. Standing waves in engineering seismology // Russian Geology and Geophysics. 2002. Vol. 43 (2). P. 181–196. EDN:TNSYOL.

Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A. Coherent reconstruction of standing-wave fields as a basis for detailed seismological study of engineering structures // Earthquake Engineering. Constructions Safety. 2007. No. 3. P. 20–24 (In Russ.).

Emanov A.F., Bach A.A., Kletsin V.I. Standing waves in the dams of the Boguchan and Chirkean hydroelectric power stations // Natural and Technological Risks. Building Safety. 2018. Vol. 4 (35). P. 28–33. (In Russ.).

Emanov A.F., Bakh A.A., Emanov A.A. Engineering and seismological monitoring of buildings and structures: physical and mathematical foundations of the method, possibilities, results // Scientific Bulletin of the Arctic. 2019. No. 7. P. 34–43 (In Russ.).

- Emanov A.F., Bakh A.A., Emanov F.A.** Studying vertical natural vibrations of buildings by the standing wave method // *Seismic Instruments*. 2021. Vol. 57 (2). P. 163–172. doi:10.3103/s0747923921020225. EDN:TWJAVC.
- Khaykin S.E.** Physical foundations of mechanics (In Russ.). 2nd Ed. Nauka, Moscow, 1971. 752 p.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Detection of underground cavities using microtremor: physical modelling // *Seismic Technologies*. 2015. No. 4. P. 89–96 (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2015-4-89-96.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Application of passive standing wave method in engineering seismics: physical modelling and field experiment // *Seismic Technologies*. 2016. No. 2. P. 83–91 (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2016-2-83-91.
- Korepanov V.V., Tsvetkov R.V.** Seasonal changes in eigenfrequencies of structures supported on pile foundation // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 2. P. 153–167 (In Russ.). doi:10.15593/perm.mech/2014.2.07.
- Kramer S.L.** Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996. 653 p.
- Krautkramer J., Krautkramer H.** Ultrasonic testing of materials. 4th Edition. Springer-Verlag, Berlin, 1990. 677 p. doi:10.1007/978-3-662-10680-8.
- Shagiev V.R., Akhtyamov A.M.** Identification of pipe fastening using the minimum number of natural frequencies // *Mathematical Structures and Modeling*. 2018. No. 1 (45). P. 95–107 (In Russ.).
- Suwal L.P., Kuwano R.** Poisson's ratio evaluation on silty and clayey sands on laboratory specimens by flat disk shaped piezo-ceramic transducer // *Bulletin of ERS*. 2012. Vol. 45. P. 141–158.
- Yuen K.-V., Kuok S.-C.** Ambient interference in long-term monitoring of buildings // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32 (8). P. 2379–2386. doi:10.1016/j.engstruct.2010.04.012.
- Yuzbekov N.S.** Problems of assessing the condition of earth dams // *Civil Security Technology*. 2004. No. 2 (6). P. 62–65 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛЕСНИКОВ Юрий Иванович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: физическое моделирование сейсмических волновых полей, пассивный метод стоячих волн, инженерная сейсмология, натурные сейсмические эксперименты.

ФЕДИН Константин Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: экспериментальная сейсмология, инженерная сейсмология, физическое и компьютерное моделирование стоячих волн.

*Статья поступила в редакцию 30 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 12 февраля 2026 г.,
принята к публикации 12 февраля 2026 г.*



ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ СЕВЕРНЫХ ФЛАНГОВ ОНОНСКОЙ ВПАДИНЫ (ЗАБАЙКАЛЬЕ) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

В.В. Оленченко^{1,✉}, М.И. Эпов², Д.В. Напreeв³, В.С. Салихов⁴, Е.Ю. Антонов⁵

^{1,2,5}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

³ООО НППГА «Луч», 630010, Новосибирск, ул. Геологическая, 49, Россия,

⁴Забайкальский государственный университет, 672039, Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, Россия,

✉ OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

Аннотация. На территории одной из межгорных впадин Забайкалья проведена электроразведка и геохимические исследования для оценки перспектив ее нефтегазоносности. На протяжении многих лет эта территория считалась малоперспективной на углеводороды. В результате новейших полевых исследований выявлены интенсивные аномалии концентрации бутана в породах верхней части разреза. По данным электромагнитных зондирований выделены пласты с улучшенными коллекторскими свойствами. Оценка прогнозных ресурсов и извлекаемых запасов показала возможное присутствие на изученной территории среднего по масштабам месторождения природного газа и крупного месторождения нефти.

Ключевые слова: месторождение газа, электромагнитное зондирование, газовая хроматография, Ононская межгорная впадина

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0024).

Благодарности: полевые работы выполнены при поддержке Правительства Забайкальского края и ООО НППГА «Луч».

Для цитирования: Оленченко В.В., Эпов М.И., Напreeв Д.В., Салихов В.С., Антонов Е.Ю. Перспективы нефтегазоносности северных флангов Ононской впадины (Забайкалье) по данным электромагнитных зондирований и газовой хроматографии // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 68–85. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-68.

PROSPECTS OF OIL AND GAS POTENTIAL IN THE NORTHERN FLANKS OF THE ONON DEPRESSION (TRANSBAIKALIA) ACCORDING TO ELECTROMAGNETIC SOUNDING AND GAS CHROMATOGRAPHY DATA

V.V. Olenchenko^{1,✉}, M.I. Eпов², D.V. Napreev³, V.S. Salikhov⁴, E.Yu. Antonov⁵

^{1,2,5}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Scientific-Production Enterprise of Geophysical Equipment "Looch", Geologicheskaya Str., 49, Novosibirsk, 630010, Russia,

⁴Transbaikal State University, Aleksandro-Zavodskaya Str., 30, Chita, 672039, Russia,

✉ OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

Abstract. Electrical prospecting and geochemical studies were conducted in one of the intermontane depressions of Transbaikalia to assess its oil and gas potential. For many years, this area has been considered to have low hydrocarbon prospects. Recent field studies have revealed intensive butane concentration anomalies in rocks of the upper section. Layers with improved reservoir properties were identified based on electromagnetic sounding data. The assessment of forecast resources and recoverable natural gas reserves indicated the possible presence of a medium-scale gas field and a large-scale oil field, in terms of recoverable reserves, in the studied area.

Keywords: gas deposit, transient electromagnetic sounding, gas chromatography, Onon intermontane basin

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0024.

Acknowledgments: the authors would like to thank the Government of Transbaikalia and the Scientific-Production Enterprise of Geophysical Equipment “Looch”.

For citation: Olenchenko V.V., Epov M.I., Napreev D.V., Salikhov V.S., Antonov E.Yu. Prospects of oil and gas potential in the northern flanks of the Onon depression (Transbaikalia) according to electromagnetic sounding and gas chromatography data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 68–85. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-68.

ВВЕДЕНИЕ

Забайкалье – старейший горнорудный регион России. По разнообразию и величине запасов некоторых видов минерального сырья оно не уступает самым известным рудоносным регионам. Но обилие минерального сырья не дополняется топливно-энергетическими ресурсами. Так, на долю угля в Забайкалье приходится около 1.6 % общероссийских запасов, а углеводородное сырье в жидкой и газообразной форме (нефть, газ) в настоящее время пока отсутствует. Открытие в Забайкалье нефтегазового месторождения – принципиально важный шаг для дальнейшего развития края. Разведка, добыча и переработка углеводородов (УВ) на месте позволит создать новые рабочие места и обеспечить внутренние энергетические потребности региона.

Нефтегазоносность Забайкальских впадин изучается с 30-х годов прошедшего столетия, однако промышленные скопления УВ до сих пор не обнаружены. И несмотря на то, что бесспорные признаки нефтегазоносности в виде битумов, капельножидкой нефти и выходов газа были найдены в Ононской впадине в 1960-х годах^{1,2}, в течение последних 40 лет считалось, что межгорные впадины Забайкальского типа малоперспективны в плане нефтегазоносности. В последние годы интерес к Забайкальскому газу снова возрос в связи с разработкой программы газификации края. Поэтому современные поиски забайкальской нефти и газа целесообразно было сосредоточить в пределах ранее выявленных территорий с признаками нефтегазоносности.

Среди современных геофизических методов поисков УВ основной объем занимает сейсморазведка, а из несейсмических методов – электроразведка [Ингеров, 2005; Буддо, Поспеев, 2019] и газовая хроматография [Исаев, 2022]. В совокупности с газовой хроматографией вероятность выделения залежей УВ по данным электроразведки увеличивается. При этом электрические

¹ Пономарёва Г.П., Павлова Е.В., Косов В.А., Лысова Л.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Ононской, Аргунской, Тургино-Харанорской впадин Забайкалья. Окончательный отчет Забайкальской тематической партии. Том 1. Иркутск, 1965. ТГФ по Забайкальскому краю. Инв. №11124.

² Пономарёва Г.П., Хромовских Ю.П. Отчет по теме 17 «Сравнительная оценка перспектив нефтегазоносности межгорных впадин Бурятии и Читинской области». Том 1. ВСГУ по поискам и разведке нефти и газа. Иркутск, 1967. 290 с.

зондирования позволяют решать структурно-картировочные задачи, а по данным геохимии оцениваются перспективы выделенных структур на углеводородное сырье [Напреев, Оленченко, 2010; Эпов и др., 2014]. Подобный подход к поисковым работам был опробован и в Ононской впадине Забайкалья.

Главной целью проведенных исследований являлась оценка перспективности северных флангов Ононской впадины на УВ на основе анализа данных электроразведки и геохимии.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Ононская впадина расположена на юге Забайкалья, в среднем течении р. Онон. С востока ее ограничивает хребет Эрмана, а с запада – Онон-Бальджинский, Становик и Могойтуйский хребты (рис. 1). Общая протяженность впадины достигает 110 км при ширине от 2 до 20 км.

Ононская впадина представляет собой типичную межгорную рифтогенную впадину Забайкальского типа, расположенную на стыке Даурской и Агинской структурно-формационных зон, контактирующих по глубинному Онон-Туринскому разлому, глубина заложения которого оценивается в 100–200 км. Она имеет асимметричное строение: правый борт крутой, левый более пологий. Впадина заполнена эффузивно-осадочными отложениями мела и юры. Правый борт впадины сложен гранитоидами юрского возраста², левый – метаморфизованными породами пермо-триаса и девона.

Отложения девона представлены филлитизированными сланцами, песчаниками, в том числе углисто-глинистыми. Пермо-триасовая толща состоит из песчаников, алевролитов и сланцев. Песчаники массивные, плотные, алевролитовые сланцы с хорошо выраженной сланцеватостью. На размытой поверхности пермо-триаса в виде покровов залегают юрские и раннемеловые эффузивно-осадочные образования бырцинской и джергалантуйской свит.

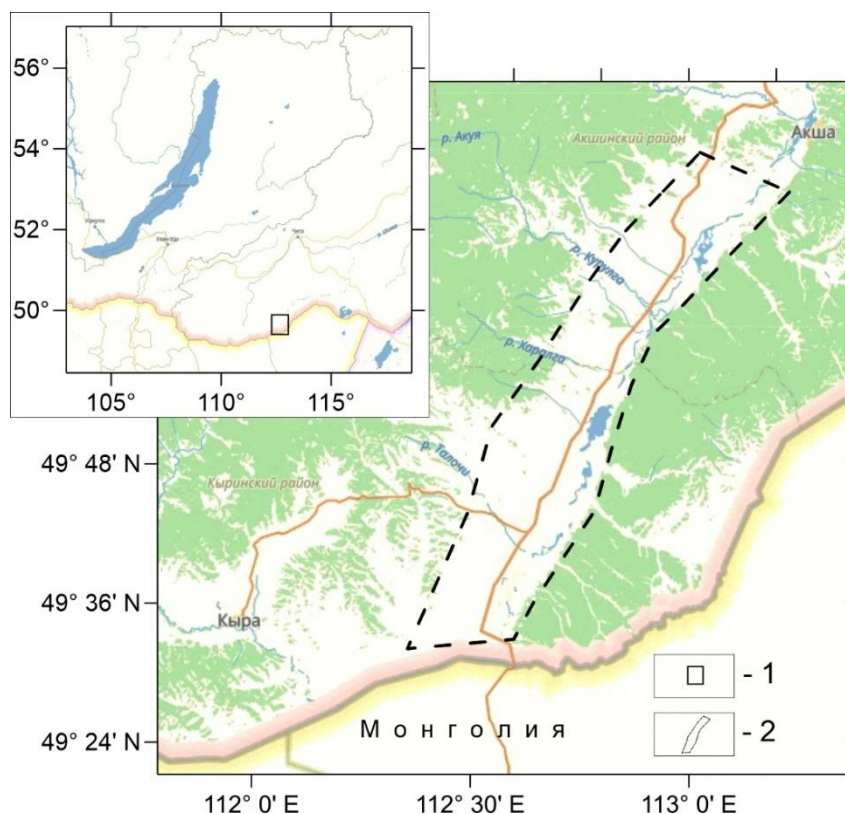


Рис. 1. Схема расположения Ононской впадины: 1 – положение района работ; 2 – границы российской части Ононской впадины.

Они прослеживаются узкой полосой вдоль левого (северо-западного) борта впадины. Бырцинская свита делится на две подсвиты: нижнюю, представленную средними и основными эффузивами, и верхнюю, сложенную кислыми эффузивами. Средние и основные эффузивы – это плотные массивные породы темно-серого, серого, зеленовато-серого, грязно-фиолетового и сиреневого цвета, часто с миндалекаменной или пористой текстурой. Вероятно, они могут выполнять роль вторичных коллекторов. Кислые эффузивы залегают в виде покровов и представлены афанитовыми и массивными породами лейкократового облика. Такие покровы могут выполнять роль покрывал.

Нижнемеловые отложения, представленные Мангутской свитой, залегают с небольшим угловым несогласием и размывом на юрско-меловых эффузивах верхней части бырцинской свиты, а иногда, в отдельных участках, и на более древних породах палеозоя². Породы нижнего мела (конгломератово-песчаниковая и песчано-аргиллитовая толща, с прослоями мергелей, битуминозных пород и редких пластов базальта) имеют горизонтальное и пологое залегание. В прибортовых частях впадины породы наклонены в сторону депрессии под углом 15–25°, в центральной же части углы не превышают 5°. Скважинами колонкового бурения нижнемеловые отложения вскрыты на глубину от 60 до 753 м. Самая глубокая скважина № 21, пробуренная в центре впадины, в районе предполагаемого поднятия фундамента, вскрыла только верхнюю часть разреза. Полный разрез меловых отложений нигде в пределах впадины не вскрыт.

Ранее проведенными геофизическими исследованиями было установлено, что Ононская впадина состоит из нескольких мульд, образование которых связано с нарушениями северо-западного простирания^{1,3}. По геофизическим данным выделены и подтверждены: Мангутский прогиб с мощностью мезозойских отложений до 1750 м, Нарасунский прогиб с мощностью до 2000 м, Нижне-Ульхунское поднятие (горст) с амплитудой 800 м и Курулгинское поднятие с амплитудой 800 м. Основные элементы Ононской впадины – Мангутский и Нарасунский прогибы – качественно выделяются как в поле силы тяжести, так и по электроразведке методом ВЭЗ. Сейсморазведкой был установлен унаследованный характер структур в нижнемеловых и палеозойских отложениях.

Проведенные в 1960-х годах исследования перспектив нефтегазоносности Ононской впадины были сосредоточены в ее юго-западной части, в районе сел Верхний Ульхун и Мангут. По данным бурения здесь с глубины 40 м отмечается битуминозность песчаников, а в одной из скважин с глубины 200 м до забоя на глубине 281 м вскрыто нефтенасыщение пористых пород жидкой маслянистой буровато-черной нефтью. В районе с. Верхний Ульхун скважина № 40 дала приток газа с дебетом 172.8 м³/сут.^{1,2}

Малоизученным оставался выделенный по геофизическим данным Нарасунский прогиб, расположенный в северо-восточной части впадины, мощность осадочного чехла в котором прогнозировалась до 2000 м. Г.П. Пономарёва не исключала, что северо-восточная часть Ононской впадины лишь кажется более простой, т. к. фактических наблюдений по ней значительно меньше, чем по юго-западной.

В районе Нарасунской котловины было пробурено 7 картировочных скважин глубиной от 92 до 300 м. Профили скважин располагались вдоль рек Джергалантуй и Талача. В поднятом керне установлено

³ Берштейн Г.Л. Отчет о результатах работ сейсмическими методами КМПВ и МРНП Читинской сейсморазведочной партии № 9/66 за 1966 год, полученных в Ононской впадине Читинской области. Том 1 / Берштейн Г.Л., Ревкова И.Г., Комаров М.Н. Восточный геофизический трест. Иркутск, 1967. ТГФ по Забайкальскому краю. Инв. № 11825.

повышенное содержание органического вещества (2 %), однако данных о битуминозности и нефтепроявлениях нет. Неглубокие скважины вскрыли только самую верхнюю часть нижнемеловых отложений. Большая толщина мезозойских отложений, установленная по данным сейсморазведки, дает основание считать Нарасунский участок весьма перспективным на УВ. Слабая изученность северо-восточных флангов Ононской впадины и геолого-геофизические признаки перспективности Нарасунской котловины стали причиной выбора этого участка для постановки поисковых работ современной электроразведкой и геохимическими методами.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплекс методов включал электромагнитные зондирования становлением поля и газовую хроматографию.

Зондирование становлением поля (ЗС) основано на изучении нестационарных электромагнитных полей, которые возбуждаются в среде при быстром выключении тока в замкнутом контуре (петле). Метод ЗС является основным методом электроразведки при поисках УВ, особенно в геологических условиях Восточной Сибири [Шарлов и др., 2010; Компаниец и др., 2013; Неведрова, Санчаа, 2013; Ефимов и др., 2016]. При работе методом ЗС в качестве источника используется незаземленная петля с током. В качестве приемников также применяются незаземленные петли.

На участке работ были проведены площадные электромагнитные зондирования по сети профилей. Их длина составляла 5.5–10 км. Расстояние между профилями – 2 км. Расстояние между центрами генераторных петель – 1.5 км. Профили располагались параллельно, вкрест простирания впадины.

При зондированиях применялась соосно-разнесенная схема измерений, которая позволяет при одном положении генераторной петли получить информацию о геоэлектрическом строении среды с некоторой площади и оценить влияние трехмерных неоднородностей вблизи пункта зондирования. Размер квадратной генераторной петли составлял 500×500 м, при токе в генераторном контуре 170 А. Для регистрации электромагнитного отклика применялись пять приемных датчиков, один из которых располагался соосно генераторной петле, а четыре других выносились ортогонально и по направлению профиля на расстояние 500 м. Схема установки и пример измеренных переходных процессов в соосном и разнесенных датчиках приведены на рис. 2. ЭДС в приемниках регистрировалась многоканальной телеметрической станцией SGS-TEM при временном шаге дискретизации 31 мкс.

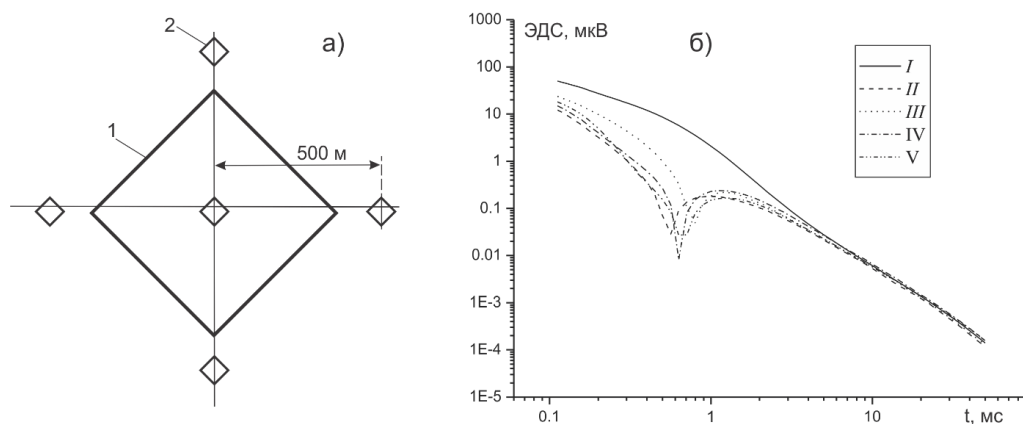


Рис. 2. Схема измерительной установки при электромагнитных зондированиях (а): 1 – генераторная петля 500×500м; 2 – приемный датчик ПДИ-500. Приведенные к единичному току ЭДС (б), измеренные в соосной (I) и разнесенных (II-V) петлях.

Количественная интерпретация данных ЗС выполнялась в программе TEM-IP, разработанной в ИНГГ СО РАН [Антонов и др., 2014]. Интерпретация заключалась в определении толщины и удельного электрического сопротивления (УЭС) слоев, слагающих разрез. В рамках горизонтально-слоистой модели среды находились теоретические переходные характеристики с наименьшим среднеквадратическим отклонением от зарегистрированной кривой спада ЭДС. По результатам исследований были построены геоэлектрические разрезы, пространственная модель распределения УЭС, карты распределения УЭС на разных глубинах, проводилась их геологическая интерпретация.

Основой метода газовой хроматографии является принцип разделения веществ при их продувке через капиллярную или поликапиллярную колонку [Яшин, 1976]. В итоге вещества, содержащиеся в пробе воздуха, при продувке через хроматограф дифференцируются и проявляются на детекторе в разное время. Результатом анализа является хроматограмма, на которой показываются времена выхода органических соединений и их относительная интенсивность, напрямую связанная с их объемным содержанием.

Для геохимического анализа на площади исследований были отобраны шпуровые пробы с глубин 1.0–1.5 м. Основным объектом отбора служили супеси и суглинки, играющие роль сорбентов. Пробы отбирались по сети профилей, шаг опробования по профилю составлял 200–500 м. В качестве анализатора использовался хроматограф ФГХ-1 с петлевым вводом пробы, термостатированной капиллярной колонкой и фотоионизационным детектором. Основным объектом детектирования являлись предельные УВ ряда «бутан-декан», а также УВ ароматического ряда: бензол, толуол, орто-, метаксилолы. Наличие последних является прямым признаком нефтеносности [Яшин, 1986]. Они отчетливо выделяются и однозначно определяются на хроматограммах. Кроме этого, ароматические УВ слабо подвержены деградации и биодеградации в процессе в отличие от их аналогов из предельного ряда [Гончаров, 1987]. Это делает их наиболее информативными при площадных подповерхностных съемках.

Кроме хроматографического анализа проводились потенциометрические измерения в водных вытяжках проб с определением окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и водородного показателя pH.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе хроматограмм среди всех детектированных веществ для дальнейшей интерпретации были выделены тринадцать: бензол, толуол, орто-, метаксилол, бутан, пентан, гексан, гептан, октан, нонан, декан, а также циклогексан и ацетон. Большая их часть встречается практически во всех пробах хотя бы в незначительных количествах. Анализ потенциометрических данных показал, что на площади исследований выделяются участки с низкими отрицательными значениями Eh (–550...–660 мВ) и повышенными значениям (6.96–8.04) показателя pH. Такие аномалии, как правило, отмечаются в контурах залежей и являются косвенным признаком нефтегазосности территории [Яшин, 1986].

По данным газовой хроматографии аномальные концентрации ароматических УВ превышают фоновые значения в 3–10 и более раз. Среди УВ предельного ряда следует отметить аномально высокие концентрации бутана, которые в отдельных пробах достигают 120 мг/м³. Учитывая предыдущий опыт геохимических исследований на нефтегазоконденсатных и нефтяных месторождениях Западной Сибири [Оленченко, Напеев, 2010; Напеев, Оленченко, 2011; Оленченко и др., 2015], отметим, что концентрации

по бутану в 1–2 мг/м³ уже являются аномалией типа «залежь», обнаруженные концентрации свидетельствуют об интенсивном источнике углеводородных газов, которым является газовая залежь.

На рисунке 3, а показана круговая диаграмма общего углеводородного состава в пробах грунта из забоя шпуров. Содержание ароматических УВ составляет всего 2 % от суммарной концентрации УВ. Соотношение концентраций ароматических и предельных УВ ($C_{аром.}/C_{пред.}$) в пробах грунта на месторождениях нефти Западной Сибири (Рогожниковское, Чкаловское) составляет 0.23–0.59, в то время как на участке исследований в Ононской впадине это отношение равно 0.02. Основной вклад в состав предельных УВ дает бутан (93 %) и пентан (5 %). Однако без бутана соотношение ароматических и предельных УВ равно 0.24, а доля ароматических УВ возрастает до 19 % (рис. 3, б). Это близко к показателям с месторождений нефти Западной Сибири. Таким образом, на площади исследований наблюдаются аномально высокие концентрации бутана, что является прямым поисковым признаком на газовую залежь.

Известно [Бакиров и др., 1982], что по направлению миграции УВ происходит уменьшение содержания ароматических УВ, поскольку они имеют наименьшую миграционную способность по сравнению с метановыми и нафтеновыми УВ. Закономерное обеднение нефтей и конденсатов ароматическими УВ по направлению региональной миграции из очагов генерации к зонам нефтегазонакопления наблюдается в Предкавказье, Средней Азии и других регионах [Старобинец, 1966; Чахмахчев, 1983].

Таким образом, соотношение ароматических и предельных УВ в пробах пород верхней части разреза (ВЧР) показывает, что газ на северных флангах Ононской впадины может являться результатом региональной миграции УВ от юго-западного замыкания впадины к северо-восточному выклиниванию.

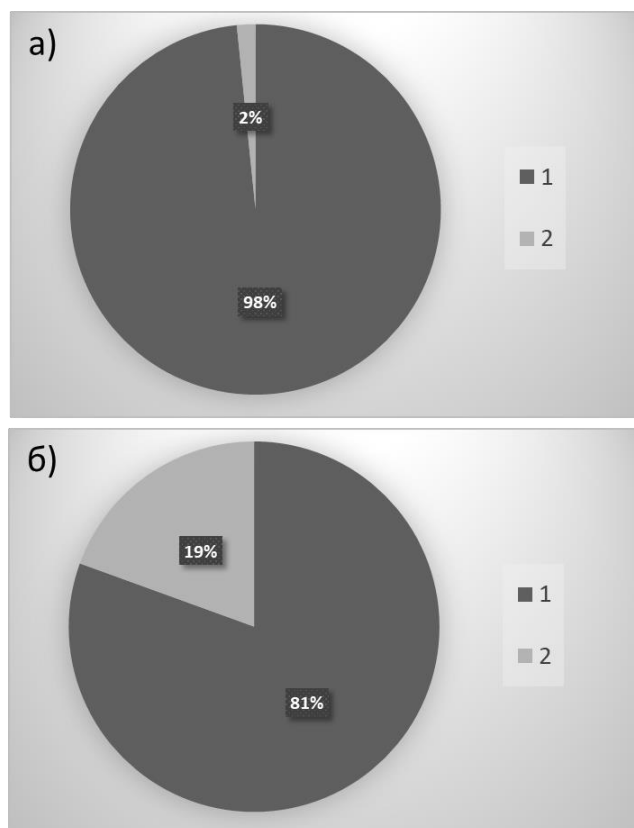


Рис. 3. Суммарный углеводородный состав проб грунта с забоя шпуров: 1 – предельные УВ; 2 – ароматические УВ.

Для определения подходов к геологическому истолкованию геоэлектрических разрезов был проведен статистический анализ распределения УЭС на площади исследований. На этой основе было выделено пять групп пород, характеризующихся разными значениями УЭС (табл. 1). Согласно известным зависимостям УЭС от состава пород [Петрофизика, 1992], каждой из групп поставлена в соответствие литологическая характеристика.

Таблица 1

Петрофизические группы, выделенные на основе статистического анализа УЭС по результатам 1D-инверсии данных ЗС

УЭС, Ом·м			Литология
Минимальное	Максимальное	Модальное	
12	30	20	Аргиллиты
30	80	50	Алевролиты
80	200	120	Песчаники, конгломераты
200	500	300	Конгломераты, эффузивы
500	1500	800	Граниты

На рисунке 4 показан геоэлектрический разрез по одному из профилей вкрест простирания впадины. Он характеризует строение впадины в самой неглубокой северо-восточной части. Здесь впадина асимметрична относительно осевой линии. В ее юго-восточной части высокоомное основание залегает на глубинах 740–1250 м, а в северо-западной – на глубинах 1650–1950 м. Максимальная глубина кровли высокоомного основания (2330 м), выявлена ближе к северо-западному борту (пункт ЗС 7).

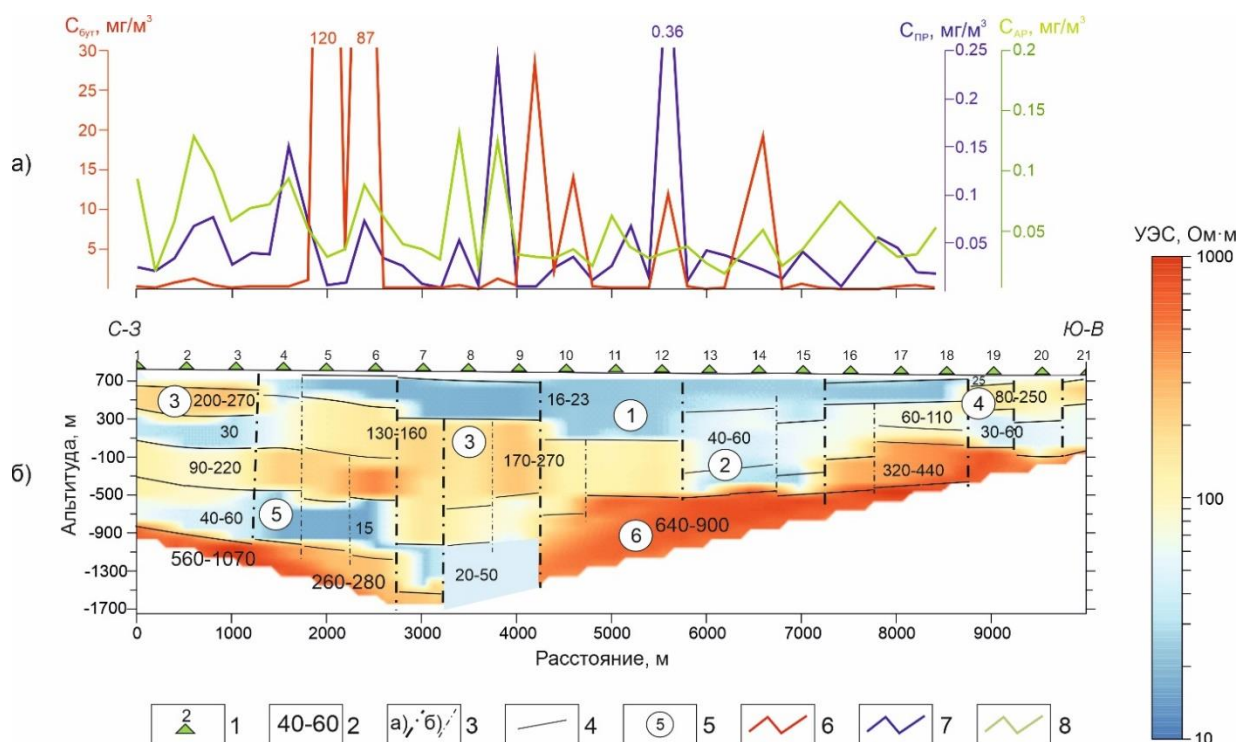


Рис. 4. Распределение бутана и предельных и ароматических УВ вдоль профиля (а) и геоэлектрический разрез Ононской впадины по данным ЗС (б): 1 – пункты ЗС; 2 – значения УЭС пород; 3 – разломы первого (а) и второго (б) порядков; 4 – геоэлектрические границы; 5 – номера геоэлектрических комплексов. Графики концентрации: 6 – бутана; 7 – предельных УВ; 8 – ароматических УВ.

В самой глубокой части впадины по пониженным УЭС в фундаменте (ЗС 8, 9) выделяется широкая (около 1000 м) зона осевого разлома.

Характерной особенностью северо-западной части разреза является слоистое строение с чередованием мощных (300–500 м) пластов высокого и низкого УЭС. В разрезе выделяются пять пластов и основание. Такой тип строения впадины во многом оказался неожиданным. В пунктах ЗС 1, 2, 3 ниже глубины 150 м выявлена толща отложений мощностью около 300 м со значениями УЭС 230–310 Ом·м (3 на рис. 4). Скважина 1-Н в северо-западном борту впадины вскрывает неглубокозалегающий (25 м) контакт осадочных пород нижнего мела с эффузивами бырцинской свиты¹. Скважина располагается на борту впадины, приблизительно в 1000 м северо-западнее от пункта ЗС 1, где мощность нижнемеловых осадочных отложений резко уменьшается. Таким образом, данные бурения дают возможность связать выявленный в пунктах ЗС 1, 2, 3 с глубины 150 м слой пород повышенного сопротивления с эффузивами бырцинской свиты.

Под эффузивной толщей выделяется чередование слоев низкого (30 Ом·м), высокого (90–220 Ом·м) и пониженного (40–60 Ом·м) УЭС. Скорее всего, эти выделенные геоэлектрические комплексы мощностью 1200 м связаны с пермо-триасовой толщей хапчерангинской серии, состоящей из песчаников, алевролитов и углисто-глинистых сланцев. Комплекс пород с низким УЭС (15 Ом·м) на глубине 1300–1400 м (номер 5 на рис. 4) интерпретируется как зона рассланцевания с улучшенными коллекторскими свойствами. В ее основании залегают породы высокого УЭС (400–1000 Ом·м), предположительно граниты.

Центральная часть впадины выполнена породами с УЭС от 16 до 30 Ом·м, которые представляют нижнемеловой осадочный комплекс (номер 1 на рис. 4). Его максимальная мощность оценивается в 1250 м. При этом пониженные значения УЭС свойственны породам, состоящим преимущественно из аргиллитов, а увеличение УЭС с глубиной до 40–60 Ом·м вызвано опесчаниванием разреза – появлением прослоев алевролитов, песчаников (номер 2 на рис. 4). Фундамент представлен высокоомными (640–900 Ом·м) породами палеозоя или докембрия (номер 6 на рис. 4).

В пунктах ЗС 16, 17, 18 на глубине 670–860 м выделяется высокоомное поднятие. Оно, вероятно, представляет интрузивный комплекс, связанный с палеовулканом Ульхунчик, расположенным в 100–150 м к юго-западу от профиля. Геоэлектрический разрез юго-восточного борта долины (до р. Онон) в пунктах ЗС 19, 20, 21 является четырехслойным ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$). В нем второй слой повышенного УЭС (номер 4 на рис. 4) представлен, вероятно, конгломератами или хлидолитами, а высокоомное основание с глубины 800 м – гранитами.

По геохимическим данным вдоль профиля 1 отмечается серия интенсивных (до 120 мг/м³) аномалий бутана с повышенным фоном по предельным и ароматическим УВ. При этом явно заметен рост концентраций предельных и ароматических УВ с юго-восточного к северо-западному борту впадины. Максимальные концентрации бутана установлены в северо-западном борту впадины над выходом разлома под четвертичные отложения вблизи ЗС 5, 6. Интенсивные аномалии (14–28 мг/м³) бутана отмечаются также в окрестностях ЗС 9, 10, где выделен глубинный осевой разлом. Менее интенсивные аномалии бутана (11–19 мг/м³) отмечены между ЗС 12, 13 и 15. Здесь на разрезе происходит смена типов геоэлектрических моделей, связанных либо с фациальным замещением, либо с тектоническими контактами.

Многослойное строение северо-западного борта впадины по профилю 1 дает основание предполагать существование ловушек УВ структурного (тектонический экран) и неструктурного

(выклинивание) типов. Породами-коллекторами в этом случае могут быть нижнемеловые песчаники, конгломераты, юрские эффузивы (пузыристые лавы и лавобрекчи), а также рассланцованная по тектоническим нарушениям пермо-триасовая толща (номер 5 на рис. 4). Покрышкой же могут выступать нижнемеловые аргиллиты, выделяющиеся на геоэлектрических разрезах слоем с УЭС 16–18 Ом·м, а также юрско-меловые кислые афанитовые эффузивы с высоким УЭС.

На рисунке 5 приведены карты распределения УЭС по площади на глубинах 500, 1000, 2000 м. Они представляют собой погоризонтные срезы значений УЭС, интерполированных в трехмерном массиве.

Карта УЭС на глубине 500 м (см. рис. 5, а) отражает распределение аргиллит-алевролитовых отложений мангутской свиты во впадине, которые выделяются пониженными значениями УЭС. Вытянутая в северо-восточном направлении вдоль правого борта низкоомная (10–25 Ом·м) область (1) связана со скоплением тонкозернистого (пелиты, алевриты) материала в Нарасунской палеомульде. Эта пологая овальная котловина была выделена ранее по гравиметрическим данным В.Д. Любалиным¹. В направлении к северо-востоку УЭС отложений возрастает, что объясняется выклиниванием бассейна палеоморя и скоплением песков в области сноса.

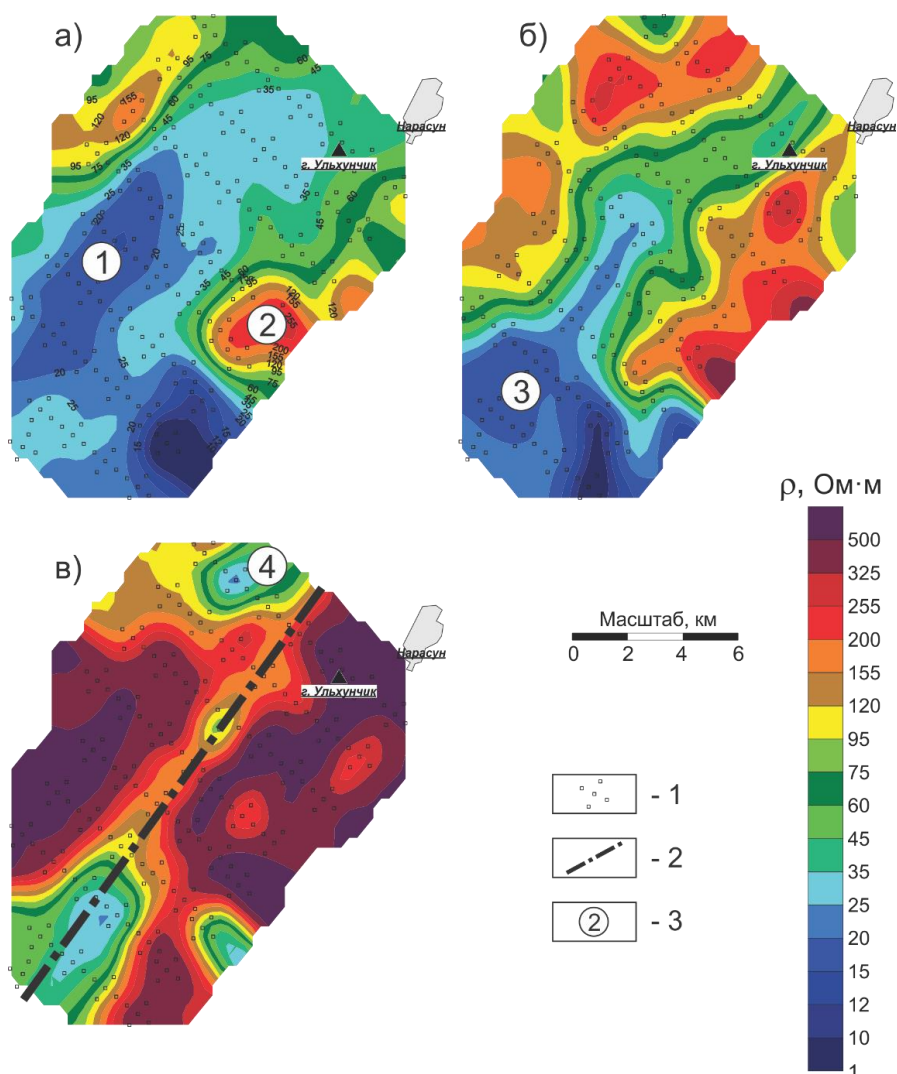


Рис. 5. Карты распределения УЭС на глубинах 500 (а), 1000 (б) и 2000 (в) метров по данным ЗС: 1 – пункты ЗС; 2 – региональный Онон-Туринский разлом; 3 – геоэлектрические комплексы: 1 – Нарасунская мульда; 2 – Курулгинский выступ (граниты); 3 – Улетуй-Харалгинская котловина; 4 – зона рассланцевания в фундаменте (коллектор).

По бортам впадины отложения более высокоомны, т. к. на глубине около 500 м они выполнены с северо-западной стороны эффузивами, а с юго-восточной – гранитоидами.

Аномалия низкого УЭС (1–10 Ом·м) в южной части участка приурочена к разломной структуре (сбросо-сдвиг), секущей Ононскую впадину с юго-востока на северо-запад. Вероятно, она связана с графитизацией пород в зоне динамометаморфизма либо с сульфидизацией в экзоконтакте интрузии.

Область высокого УЭС в северо-западном борту обусловлена выступом магматических пород, выделенной ранее по данным сейсморазведки как поднятие, ограничивающее Нарасунский прогиб и названное Курулгинским поднятием³. По данным геоэлектрики получается, что поднятие представляет собой ограниченный по размерам выступ, а в районе п. Нарасун котловина отсутствует.

На глубине 1000 м (см. рис. 5, б) в центральной части впадины выделяется щелеобразная зона низкого УЭС, приуроченная к региональному Онон-Туринскому разлому. К юго-востоку территория, занятая осадками низкого УЭС, резко расширяется (номер 3 на рис. 5, б). Здесь, между реками Улетуй и Нижняя Харалга, намечается глубокая котловина, выполненная отложениями мангутской свиты большой мощности. Этот участок следует считать перспективным на УВ. Поэтому здесь необходимо провести дополнительные исследования по изучению строения Улетуй-Харалгинской котловины и оценке перспектив ее нефтегазоносности.

На карте распределения УЭС на глубине 2000 м (см. рис. 5, в) видно, что борта впадины сложены высокоомными (300–800 Ом·м и более) образованиями (возможно, гранитоидами), однако к северо-западу от п. Нарасун породы обладают пониженным УЭС (50–100 Ом·м). Этот комплекс пород интерпретируется как пермо-триасовая толща с зонами трещиноватости и расщепления, возможно, являющаяся вторичным коллектором. Над этой зоной отмечаются интенсивные аномалии УВ в пробах пород ВЧР (см. рис. 4). В осевой части впадины отчетливо проявляется линейная зона низких УЭС, связанная с Онон-Туринским разломом, который может выступать в роли канала миграции углеводородов.

Общее представление о строении впадины в пределах участка исследований дает трехмерная модель, показанная на рис. 6. На объемной модели выделена изоповерхность УЭС 50 Ом·м. Породы с УЭС, превышающим это значение, залиты цветом. Фактически изоповерхность показывает подошву проводящих аргиллит-алевролитовых отложений мангутской свиты. Так как ранее по результатам сейсморазведки был установлен унаследованный характер структур в нижнемеловых и палеозойских отложениях³, то можно считать, что положение подошвы мангутской свиты отражает поведение поверхности фундамента впадины. Однако нужно помнить, что по результатам зондирований под меловыми отложениями установлено слоистое строение фундамента (см. рис. 4).

В процессе геологической интерпретации полученных геоэлектрических моделей в проводящей аргиллит-алевролитовой толще были выделены слои повышенного УЭС, интерпретируемые как породы с улучшенными коллекторскими свойствами (прослой песчаников). В результате анализа границ их распространения установлено, что вдоль юго-восточного борта развита квазилинейная зона таких пород.

Нами сделано предположение, что эти вторичные коллекторы могли образоваться за счет разрушения гранитоидов и сноса крупнообломочной фракции. Этот же вывод был сделан ранее по анализу керн¹. Было отмечено, что состав осадков по мере приближения к юго-восточному борту изменяется. В этом направлении резко увеличивается доля песчанистого материала. Петрографический анализ пород, слагающих толщу, свидетельствует о том, что источником сноса при их формировании явились породы обрамления. Обломки грубозернистых пород и песчаников представлены минералами и

породами, развитыми в бортах впадины, акцессорные минералы указывают на разрушение гранитных массивов, т. е. источником сноса были гранитоиды Халзанского массива, слагающие юго-восточный борт.

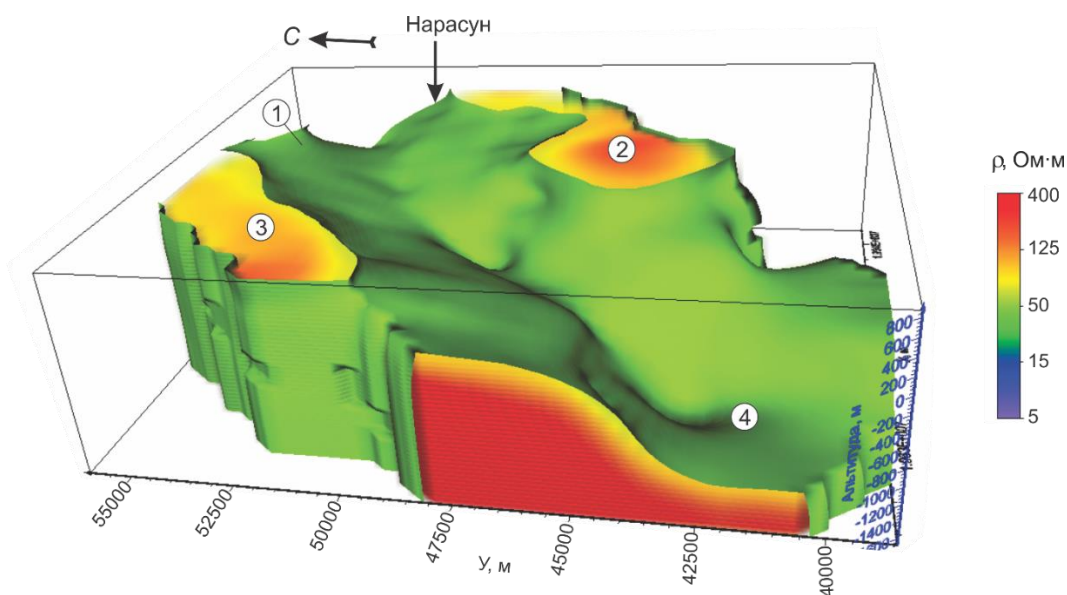


Рис. 6. Объемная геоэлектрическая модель северных флангов Ононской впадины по данным ЗС. Породы с УЭС менее 20 Ом·м – прозрачные: 1 – изоповерхность УЭС=50 Ом·м; 2 – Курулгинский выступ (граниты); 3 – левый борт (эффузивы); 4 – Улетуй-Харалгинская котловина.

В северо-западном борту аналогичные по генезису (коллювий, делювий) вторичные коллекторы прогнозируются на юго-западном замыкании участка. На основании анализа геоэлектрических моделей были предложены места заложения поисковых скважин. Критерием их выбора являлось наличие поднятия или выклинивания, пласта-коллектора, покрывки и геохимической аномалии над структурой или ее границах. Перспективные участки заложения скважин сведены в табл. 2.

Таблица 2

Перспективные участки заложения скважин

№ п.п.	Глубина до кровли коллектора, м	Мощность коллекторов, м	Характеристика структуры
1	205	360	Наклонно залегающий тектонически изолированный коллектор, перекрытый глинистой покрывкой
2	233	208	Слой-коллектор над интрузивным поднятием
3	440	375	Наклонно залегающий тектонически изолированный коллектор, перекрытый глинистой покрывкой
4	480	280	Проницаемые по трещиноватости породы, перекрытые эффузивами в юго-восточном борту
5	520	450	Моноклиальная структура. Угловое несогласие в северо-западном борту
6	1175	375	Трещиноватые породы пермо-триаса, перекрытые юрско-меловыми эффузивами в северо-западном борту
7	1390	600	Трещиноватые породы пермо-триаса, перекрытые юрско-меловыми эффузивами в центральной части северо-восточного замыкания впадины

Как следует из анализа табл. 2, глубина залегания коллекторов меняется в пределах от 200 до ~1400 м. К неглубоко залегающим коллекторам относятся слои песчаников в толще аргиллитов мелового возраста. Подобные породы, содержащие нефть и газ, были вскрыты в 50 км к юго-западу от участка на глубине около 200 м в Мангутской котловине.

На глубинах 1000–1500 м ожидаются отложения с улучшенными коллекторскими свойствами в виде трещиноватых пород пермо-триаса, перекрытых слабопроницаемыми юрско-меловыми эффузивами.

Площадные зондирования позволили установить границы распространения и мощность потенциальных коллекторов, что дало возможность выполнить оценку прогнозных геологических ресурсов. Для этого применялся объемный метод [Кузнецов и др., 2013]. Геологические ресурсы газа составляют около 9.9 млрд м³. Для расчета принято, что коэффициент открытой пористости – 0.2, коэффициент газонасыщения – 0.2, пластовое давление – 5 МПа, коэффициент сжимаемости – 0.85, поправка за температуру 1.01. При коэффициенте извлечения газа, равным 0.8, извлекаемые запасы газа могут достигать 7.9 млрд м³.

Оценка геологических ресурсов нефти составила 261 млн т. При расчетах применялись следующие параметры: коэффициент открытой пористости – 0.2, коэффициент нефтенасыщения – 0.2, плотность нефти – 0.92 кг/м³, объемный коэффициент – 0.85. При коэффициенте извлечения нефти, равным 0.3, извлекаемые запасы нефти составят около 78 млн т.

Согласно нормативным документам [Приказ..., 2013], месторождение, содержащее по величине начальных извлекаемых запасов нефти от 30 до 300 млн т, считается крупным, а содержащее от 5 до 30 млрд м³ газа – средним по запасам.

Таким образом, результаты электроразведки и геохимических исследований показывают, что на северных флангах Ононской впадины ожидается средняя по масштабам газовая залежь, а по извлекаемым запасам нефти – крупное месторождение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокий углеводородный потенциал Ононской впадины по данным электромагнитных зондирований и газовой хроматографии подтверждается геолого-структурными и геодинамическими данными. Последние сводятся к следующему.

1. Ононская впадина находится в зоне влияния глубинного (мантийного) Онон-Туринского разлома, являющимся пограничной областью между двумя структурно-формационными зонами – Агинской и Даурской. Этот разлом является восточной границей активной геодинамической структуры «ВЕБИРС», протягивающейся на север-северо-восток вплоть до Арктического побережья.

Различие этих зон подтверждается и региональными геофизическими полями: магнитным и гравитационным. Причем Агинская зона (правобережье р. Онон) существенно гранитоидная. Тектоническая активность среды подчеркивается и отмечаемыми шарьяжно-надвиговыми структурами фундамента.

2. Нелинейность распределения физических свойств горных пород Ононской впадины по вертикали, что подчеркивается результатами геофизических работ и материалами по литологии, т. е. чередование зон уплотнения и разуплотнения, имеющих волновой характер – как проявление нелинейной геодинамики, что значительно расширяет глубины возможного образования углеводородов. Перспективны зоны разуплотнения в кристаллическом фундаменте.

3. Кристаллический фундамент (в нашем случае – слоисто-блоковый) и осадочный чехол рассматриваются как согласованная флюидодинамическая углеводородная система, которая развивается в синергетическом режиме. В вулканитах, подстилающих осадочный чехол впадины, также фиксируются битумы. Уместно напомнить слова Д.И. Менделеева: «Если нефть есть в глубине, надо признать, что она будет находиться и наверху, так или иначе проникает выше».

4. В Ононской впадине, в центральной части, обращает на себя внимание весьма интересная секущая разломная структура (сбросо-сдвиг) северо-западного простирания. Это геоблоковая зона повышенной магмофлюидопроницаемости кристаллического фундамента, находящей отражение в чехле впадины.

Известно, что промышленные скопления углеводородного сырья находятся на пересечении разломных зон. К этой зоне тяготеют концентрации углеводородов и по данным геохимического опробования, т. е. здесь возможны «трубы дегазации» по П.Н. Кропоткину [Кропоткин, 1986].

Активная зона северо-западного простирания разделяет Ононскую впадину на две части: северную и южную, которые отличаются, прежде всего, в структурно-тектоническом отношении: фундамент южной части более древний (с блоками докембрийских пород), в отличие от более молодого (позднепалеозойского) северной части.

В северной части отчетливо выделяется ровоподобная структура (расщелина) северо-восточного простирания шириной 2–4 км. Наиболее погруженные центральные части (при конседиментационном развитии), видимо, более перспективные на УВ на глубинах 2–2.2 км и связаны, возможно, с тектоническим меланжем. В результате электроразведки и геохимических исследований в пределах северных флангов Ононской впадины выявлены перспективные геологические структуры и выделены интенсивные углеводородные аномалии.

Установлено уменьшенное УЭС пород мангутской свиты нижнего мела, что является признаком плохо проницаемых глинистых пород, которые могут исполнять роль покрышки. Кроме этих пород в качестве покрышки могут также выступать и юрско-меловые плотные эффузивы. В толще мангутской свиты выделены пласты пород с улучшенными коллекторскими свойствами мощностью 150–300 м. Перспективными с точки зрения нефтегазоносности являются также перекрытые меловыми аргиллитами и юрско-меловыми эффузивами расланцованные пермо-триасовые отложения, выполняющие роль вторичных коллекторов, над которыми отмечаются интенсивные аномалии бутана, предельных и ароматических УВ. В юго-западной части участка выявлена Улетуй-Харалгинская котловина, заполненная аргиллит-алевролитовыми отложениями большой (2300 м) мощности. Северо-восточная резко погружающаяся часть котловины может быть также перспективной на скопления УВ. На площади указаны участки, перспективные для заложения поисковых скважин.

По оценке извлекаемых запасов газа, в пределах площади исследований, ожидается среднее по масштабам месторождение газа, а по оценке извлекаемых запасов нефти – крупное месторождение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 8. С. 1282–1293. doi:10.15372/GiG20140809. EDN:SKHNZV.

- Бакиров А.А., Бордовская М.В., Мальцева А.К., Табасаранский З.А.** Геология и геохимия нефти и газа. М.: Недра, 1982. 288 с.
- Буддо И.В., Поспеев А.В.** Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 149 с. EDN: MYYKUC.
- Гончаров И.В.** Геохимия нефтей Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 181 с.
- Ефимов А.С., Смирнов М.Ю., Тригубович Г.М., Махнач Е.Н.** Комплексование сейсморазведки и адаптивной 3D-электроразведки М-ЗСБ и МТЗ при прогнозировании нефтегазовых коллекторов в Восточной Сибири // Нефть. Газ. Новации. 2016. № 1. С. 35–41. EDN:VPGAVB.
- Ингеров О.** Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов // Записки горного института. 2005. Т. 162. С. 15–25.
- Исаев В.П.** Геохимические методы прогноза и поисков месторождений нефти и газа: учебное пособие. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 196 с.
- Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. № 1. С. 35–40. EDN:RXGOQN.
- Кропоткин П.Н.** Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1986. Т. 31, № 5. С. 540–547.
- Кузнецов Д.В., Кулешов В.Е., Могутов А.С.** Подсчёт запасов нефти и растворённого газа: учебное пособие. Ухта: УГТУ, 2013. 112 с.
- Напreeв Д.В., Оленченко В.В.** Комплексование геофизических и геохимических методов при поиске залежей углеводородов в Усть-Тымском нефтегазоносном районе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 1. EDN:OYYSNV. https://ngtp.ru/rub/2010/6_2010.html.
- Напreeв Д.В., Оленченко В.В.** Выявление нефтегазоносных структур и оценка их перспективности по данным геофизических и геохимических методов // Геофизические методы при разведке недр / Под ред. Л.Я. Ерофеева, В.И. Исаева. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 181–183.
- Неведрова Н.Н., Санчаа А.М.** Применение электромагнитных зондирований становлением поля для нефтегазопоисковых исследований в Западной Сибири // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 71–75. EDN:QLIKHN.
- Оленченко В.В., Напreeв Д.В.** Поляризуемость четвертичных глин и ее взаимосвязь с нефтегазоносностью мезозойских отложений (на примере Западной Сибири) // 4-ая Международная конференция и выставка «Новые идеи через интеграцию геонаук». Санкт-Петербург, 2010. CD-ROM.
- Оленченко В.В., Поспеева Е.В., Антонов Е.Ю., Напreeв Д.В.** Геологическая информативность комплекса электроразведочных и геохимических методов при поисках нефти в условиях Западной Сибири // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: Сборник тезисов XII международного геофизического научно-практического семинара (г. Санкт-Петербург, 18–19 марта 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 189–191. CD-ROM.
- Петрофизика:** Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391 с.
- Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 1 ноября 2013 г. N 477 г. Москва "Об утверждении Классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов". Зарегистрирован в Минюсте РФ 31 декабря 2013 г. Регистрационный N 30943. Опубликован 3 февраля 2014 г. Вступил в силу

1 января 2016 г. // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. № 5. 03.02.2014.

Старобинец И.С. Геохимия нефтей и газов Средней Азии. М.: Недра, 1966. 292 с.

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.20–24. EDN:THSPGJ.

Чихмахчев В.А. Геохимия процесса миграции углеводородных систем. М.: Недра, 1983. 231 с.

Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Неvedрова Н.Н., Оленченко В.В., Поспеева Е.В., Напреев Д.В., Санчаа А.М., Потапов В.В., Плотников А.Е. Комплекс электромагнитных и геохимических методов для нефтепоисковых исследований в Западной Сибири // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 962–977. doi:10.15372/GiG20140518. EDN:SMXAYH.

Яшин Я.И. Физико-химические основы хроматографического разделения. М.: Химия, 1976. 216 с.

REFERENCES

Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O., Korsakov M.A. Software for inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55 (8). P. 1019–1027. doi: 10.1016/j.rgg.2014.07.009. EDN:UENCAF.

Bakirov A.A., Bordovskaya M.V., Maltseva A.K., Tabasaransky Z.A. Petroleum geology and geochemistry (In Russ.). Nedra, Moscow, 1982. 288 p.

Buddo I.V., Pospeev A.V. Precise inversion of Transient Electromagnetic Method data for oil and gas exploration in the south of the Siberian Craton (In Russ.). Irkutsk State University Publishing House, Irkutsk, 2019. 149 p.

Chakhmakhchev V.A. Geochemistry of the hydrocarbon systems migration (In Russ.). Nedra, Moscow, 1983. 231 p.

Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Неvedрова Н.Н., Оленченко В.В., Поспеева Е.В., Напреев Д.В., Санчаа А.М., Потапов В.В., Плотников А.Е. Complex of electromagnetic and geochemical methods for oil exploration studies in Western Siberia // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55 (5–6). P. 763–774. doi: 10.1016/j.rgg.2014.05.019. EDN:UGGSHR.

Efimov A.S., Smirnov M.Yu., Trigubovich G.M., Makhnach E.N. Integration of seismic exploration and adaptive 3D electrical prospecting using TEM and MT methods for predicting oil and gas reservoirs in Eastern Siberia // Neft. Gas. Novacii. 2016. No. 1. P. 35–41. (In Russ.).

Goncharov I.V. Geochemistry of West Siberian oils (In Russ.). Nedra, Moscow, 1987. 181 p.

Ingerov O. Application of electrical prospecting methods in hydrocarbon deposit exploration // Journal of Mining Institute. 2005. Vol. 162. P. 15–25. (In Russ.).

Isaev V.P. Geochemical methods for forecasting and prospecting oil and gas fields: Textbook (In Russ.). Infra-Engineering, Moscow, Vologda, 2022. 196 p.

Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Manifestation and accounting of induction-induced polarization in the study of sedimentary cover in the south of the Siberian Platform using TEM method // Geofizika. 2013. No. 1. P. 35–40. (In Russ.).

Kropotkin P.N. Earth degassing and hydrocarbon genesis // Journal of the All-Union Chemical Society named after D.I. Mendeleev. 1986. Vol. 31 (5). P. 540–547. (In Russ.).

Kuznetsov D.V., Kuleshov V.E., Mogutov A.S. Calculation of oil and dissolved gas reserves: Textbook (In Russ.). Ukhta State Technical University, Ukhta, 2013. 112 p.

Napreev D.V., Olenchenko V.V. Complex application of geophysical and geochemical methods in searching hydrocarbon pools in the Ust-Tym petroleum district // Petroleum Geology. Theory and Practice. 2010. Vol. 5 (1). (In Russ.). https://ngtp.ru/rub/2010/6_2010.html.

Napreev D.V., Olenchenko V.V. Identification of oil and gas bearing structures and assessment of their prospects based on geophysical and geochemical data // Geophysical methods in subsurface exploration / L.Ya. Erofeev, V.I. Isaev (Eds.). Tomsk Polytechnic University Publishing House, Tomsk, 2011. P. 181–183. (In Russ.).

Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Application of transient electromagnetic soundings for oil and gas exploration studies in Western Siberia // Journal of Mining Institute. 2013. Vol. 200. P. 71–75. (In Russ.).

Olenchenko V.V., Napreev D.V. Polarizability of Quaternary clays and its relationship with oil and gas potential of Mesozoic deposits (on the example of Western Siberia) // 4th International Conference and Exhibition «New Ideas through Integration of Geosciences». St. Petersburg, 2010. CD-ROM. (In Russ.).

Olenchenko V.V., Pospieva E.V., Antonov E.Yu., Napreev D.V. Geological informativeness of the complex of electrical prospecting and geochemical methods in oil exploration under Western Siberian conditions // Application of modern electrical prospecting technologies in mineral exploration: Proceedings of the XII International Geophysical Scientific and Practical Seminar (Saint Petersburg, March 18–19, 2015). St. Petersburg, 2015. P. 189–191. CD-ROM. (In Russ.).

Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated November 1, 2013 No. 477, Moscow «On Approval of the Classification of Oil and Combustible Gas Reserves and Resources». Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on December 31, 2013. Registration No. 30943. Published on February 3, 2014. Comes into force on January 1, 2016 // Bulletin of Normative Acts of Federal Executive Authorities. No. 5. Publ. 03.02.2014. (In Russ.).

Petrophysics. Reference book in 3 volumes. Vol. 1. Rocks and minerals / N.B. Dortman (Ed.) (In Russ.). Nedra, Moscow, 1992. 391 p.

Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanko S.M. Modern telemetric electrical prospecting stations SGS-TEM and FastSnap. Efficiency and experience of use // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2010. Vol. 31 (1). P. 20–24. (In Russ.).

Starobinets I.S. Geochemistry of petroleum in Central Asia (In Russ.). Nedra, Moscow, 1966. 292 p.

Yashin Ya.I. Physical and chemical fundamentals of chromatographic separation (In Russ.). Chemistry, Moscow, 1976. 216 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: электроразведка применительно к решению задач поисков углеводородов, твердых полезных ископаемых и геокриологических исследований.

ЭПОВ Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: теория и практика электромагнитных методов; EpovMI@ipgg.sbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5934-7063>.

НАПРЕЕВ Денис Викторович – главный геолог ООО НППГА «Луч». Основные научные интересы: геохимические методы при поисках углеводородов; *ndv@looch.ru*.

САЛИХОВ Владимир Салихович – доктор геолого-минералогических наук, профессор. Основные научные интересы: геология Восточной Сибири и Забайкалья; *salihovvs41@inbox.ru*.

АНТОНОВ Евгений Юрьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, разработки алгоритмов и программного обеспечения для электроразведки; *AntonovEY@jogg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-8269-2834>.

*Статья поступила в редакцию 30 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 2 марта 2026 г.,
принята к публикации 2 марта 2026 г.*