
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ИЮЛЬ

№ 3

2022

СЕНТЯБРЬ

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. Чеверда*, д-р техн. наук *Г.А. Шехтман*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 3	Июль–Сентябрь 2022
----------------	-------------------------------	-----	-----------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Дергач П.А., Баранов Г.Н., Карюкина К.Ю., Дробчик А.Н. Экспериментальное изучение резонансных свойств гирдеров, входящих в состав бустерного синхотрона «СКИФ»	4
Стефанов Ю.П., Жарасбаева Д.К. Диаграммы нагружения и параметры модели упруго-псевдопластической деформации черносланцевых пород баженовской свиты	13
Нечаев О.В., Эпов М.И., Глинских В.Н. Единый подход к трехмерному моделированию процесса каротажа гальваническими и индукционными зондами в анизотропных средах.....	25
Тимофеев В.Ю., Тимофеев А.В., Семибаламут В.М. Измерение деформаций в Байкальском и Алтайском регионах.....	34
Заплавнова А.А., Оленченко В.В., Дергач П.А., Федин К.В., Осипова П.С., Шеин А.Н. Апробация комплекса сейсмических и электрических методов геофизики для решения задач мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания на свайном фундаменте	49
Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Щекаева Е.А. Трехмерная модель Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны.....	64
Сибиряков Е.Б. Коэффициентная обратная задача для уравнения Гельмгольца.....	77
Коваленко И.А., Кузнецова Ю.И., Калинин А.Ю., Дучков А.А. Сейсмогеологическая модель отложений терригенного венда на северо-восточном склоне Непско-Ботубинской антеклизы	85

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2022

ISSN 2619-1563 (Online)

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 3	July–September 2022
-----------------	-----------	------	------------------------

CONTENTS

Dergach P.A., Baranov G.N., Karyukina K.Yu., Drobchik A.N. Girder resonant properties analysis for the “SKIF” synchrotron	4
Stefanov Yu.P., Zharasbaeva D.K. Loading diagrams and parameters of the model of elastic-pseudoplastic deformation of black shale rocks of the Bazhenov Formation	13
Nechaev O.V., Epov M.I., Glinskikh V.N. A unified approach to three-dimensional modeling of the logging process by galvanic and induction probes in anisotropic media.....	25
Timofeev V.Yu., Timofeev A.V., Semibalamut V.M. Deformation measurement at Baikal and Altay regions	34
Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Dergach P.A., Fedin K.V., Osipova P.S., Shein A.N. Approbation of seismic and electrical geophysical techniques complex for solving the permafrost monitoring problems on the pile-foundation building.....	49
Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shchekaeva E.A. 3D model of the Selenga depression of the Baikal rift zone	64
Sibiriyakov E.B. Coefficient inverse problem for the Helmholtz equation	77
Kovalenko I.A., Kuznetsova Yu.I., Kalinin A.Yu., Duchkov A.A. Seismogeological model of the terrigenous Vendian deposits on the north–eastern slope of the Nepa-Botuoba anticline	85



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ГИРДЕРОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА “СКИФ”

П.А. Дергач^{1,2}, Г.Н. Баранов^{1,3,4}, К.Ю. Карюкина^{1,3,4}, А.Н. Дробчик¹

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

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

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Лаверентьева, 11, Россия,

⁴Источник синхротронного излучения «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
630559, Новосибирская область, Кольцово, Никольский проспект, 1, Россия,

e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Все магнитные элементы, которые формируют замкнутую орбиту и фокусируют пучок заряженных частиц в ускорителе, установлены на специальных точных и стабильных подставках – гирдерах. Как и любая механическая система, гирдер обладает резонансными частотами, на которых происходит усиление приходящих на него колебаний. Для обеспечения стабильности пучка заряженных частиц важно понимать как передаются механические колебания от пола к магнитному элементу, поскольку даже незначительные возмущения могут приводить к ухудшению параметров пучка заряженных частиц. В статье приведены результаты экспериментальных сейсмометрических измерений подставок под магнитные элементы бустерного синхротрона Центра коллективного пользования «СКИФ». Проведено определение их резонансных частот.

Сейсмометрия, синхротрон, резонансные колебания, гирдер, резонансная частота, геофон

GIRDER RESONANT PROPERTIES ANALYSIS FOR THE “SKIF” SYNCHROTRON

P.A. Dergach^{1,2}, G.N. Baranov^{1,3,4}, K.Yu. Karyukina^{1,3,4}, A.N. Drobchik¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Ave., 11, Novosibirsk, 630090, Russia,

⁴Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Nikol'skiy Ave., 1,
Kol'tsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia

e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

All magnetic elements that form a closed orbit and focus the beam of charged particles in the accelerator are installed on special precise and stable supports – girders. Like any mechanical system, the girder has its natural frequencies, at which the vibrations coming to it are amplified. To ensure the stability of the charged particle beam, it is important to understand how mechanical vibrations are transmitted from the floor to the magnetic element, since even small perturbations can lead to a worsening in the parameters of the charged particle beam. The article presents the results of experimental seismometric measurements of the girders for magnetic elements of the booster Siberian Circular Photon Source “SKIF”. Their natural frequencies are determined.

Engineering seismology, synchrotron, resonant frequencies, girder, natural frequency, geophone

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) – мощный инструмент исследований в различных областях науки: медицине, биологии, материаловедении, нанотехнологиях и т. д. Для генерации СИ используют специализированные источники синхротронного излучения, одним из которых и является строящийся Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») [Baranov et al., 2021], характеризующийся ультрамалым эмиттансом, высоким током электронного пучка, наличием специальных устройств генерации СИ и, соответственно, высокой яркостью СИ [Bilderback et al., 2005].

Магнитные элементы бустерного синхротрона (бустера) ЦКП «СКИФ», предназначенного для ускорения пучка электронов из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ [Andrianov et al., 2022] до проектной энергии основного кольца 3 ГэВ, будут установлены на специальные гирдеры, представляющие собой точные и стабильные конструкции для установки элементов ускорителя (рис. 1).

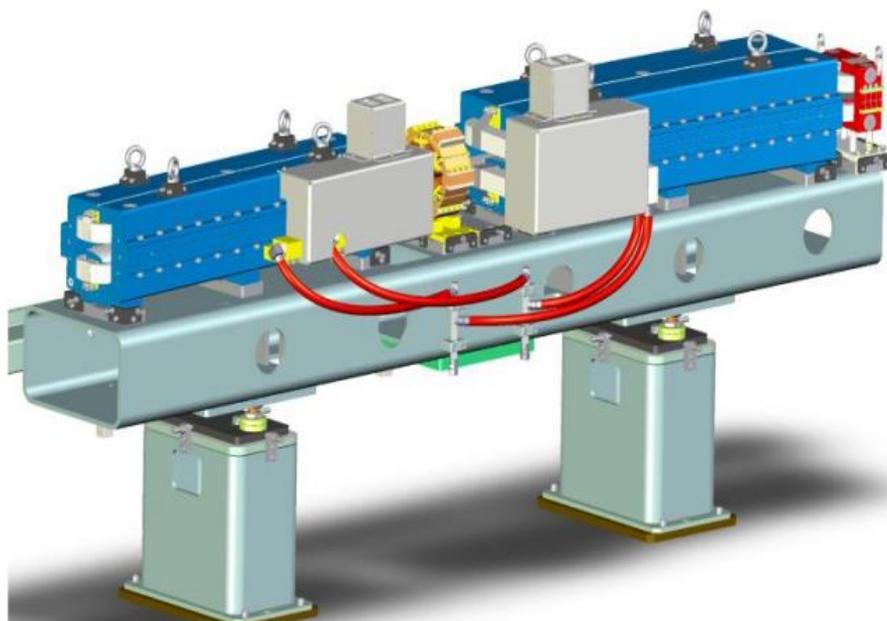


Рис. 1. Магниты бустерного синхротрона на общем гирдере

Гирдеры и их опоры изготавливаются из прямоугольной стальной трубы сечением 500 x 300 мм² с толщиной стенки 16 мм. На гирдере длиной около 3.5 м размещаются магниты и вакуумная камера с датчиками положения пучка. Точность выставки магнитов на гирдере лучше ± 150 мкм [Технологическая инфраструктура..., 2022].

Для определения того, как механические вибрации будут передаваться с пола на гирдер, а в дальнейшем и на магнитные элементы бустера, приводя к отклонению орбиты пучка электронов, были проведены экспериментальные сейсмометрические измерения. Цель – определение резонансных частот гирдера и оценка коэффициента передачи внешних вибраций на магниты синхротрона.

МЕТОДЫ

Экспериментальные сейсмометрические измерения производились с использованием бескабельной телеметрической сейсморегистрирующей системы SCOUT, состоящей из набора автономных цифровых сейсмических регистраторов, укомплектованных трехканальными геофонами

с повышенной чувствительностью GS-ONE LF (100.4 В/м/с), а также системы синхронизации отметки момента воздействия. Все записи производились с частотой дискретизации 1 кГц, что обеспечивает регистрацию сейсмических колебаний в частотном диапазоне от 5 до 500 Гц. При необходимости, частотный диапазон записей может быть расширен в область низких частот с использованием цифровой частотной коррекции [Дергач и др., 2018; Дергач, 2020].

Процесс обработки записей микросейсм включал в себя пересчет записей из целочисленного кода регистратора в единицы скорости (м/с), нарезку непрерывных записей на интервалы длительностью 10 с, а также последующий расчет и накопление амплитудных спектров. Далее полученные амплитудные спектры суммировались, что позволяло уверенно выделять регулярные пики, соответствующие резонансным частотам, аналогично методике, описанной в статьях [Колесников и др., 2019; Kolesnikov et al., 2019].

При записи колебаний от импульсного источника, воздействия производились в трех направлениях, совпадающих с ориентацией компонент геофона (горизонтальные X, Y и вертикальная Z). Для повышения соотношения сигнал/шум, производилось накопление одиночных воздействий.

Обработка записей импульсных воздействий также включала в себя пересчет записей из целочисленного кода регистратора в единицы скорости (м/с), однако, в отличие от обработки шумоподобных записей, спектры рассчитывались для единичных воздействий, либо их суммы, состоящей из единичных накоплений.

Для того чтобы оценить коэффициент усиления резонансных колебаний, геофоны устанавливались как непосредственно на сам гирдер, так и на пол под ним.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для изучения резонансных свойств гирдеров было проведено две серии экспериментов: длительная запись фона внешних сейсмических шумов и записи импульсных колебаний, возбуждаемых ударами резиновой киянкой по гирдеру. На рисунке 2 приведено фото расположения регистрирующей аппаратуры во время проведения эксперимента по непрерывной записи сейсмических шумов.



Рис. 2. Фото установки девяти комплектов регистрирующей аппаратуры во время проведения эксперимента по непрерывной записи сейсмических шумов

В эксперименте по записи фона сейсмических шумов использовалось 9 комплектов регистрирующей аппаратуры (сейсмический регистратор и трехкомпонентный геофон), а в случае записи импульсных воздействий – 15 комплектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 приведено сравнение накопленных амплитудных спектров, рассчитанных по записям сейсмических шумов длительностью 69 часов, для датчиков, установленных на гирдере (синяя линия) и на полу (красная линия).

Ориентация компонент записи: горизонтальная (X) – поперек оси гирдера, горизонтальная (Y) – вдоль оси гирдера, вертикальная (Z).

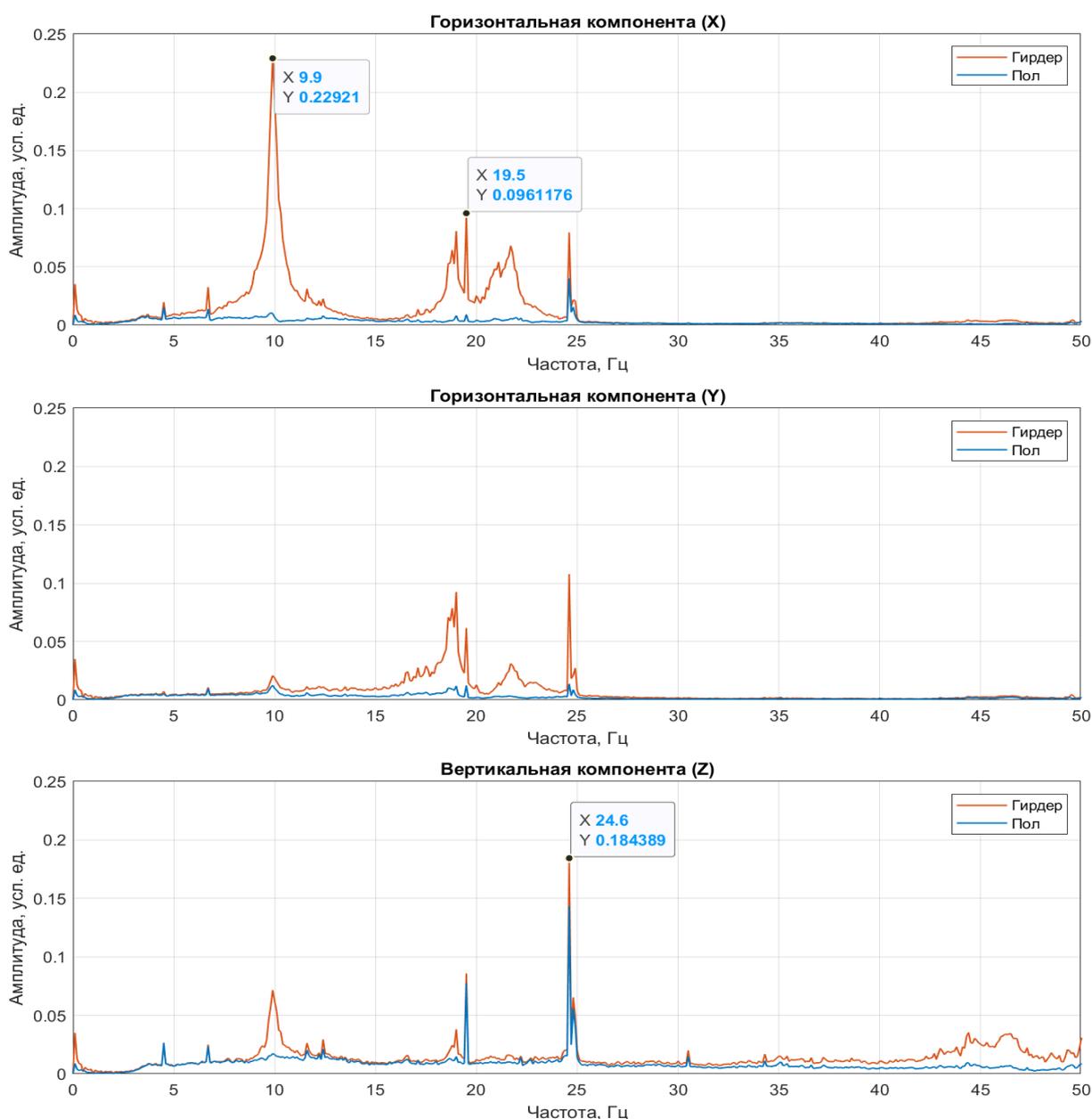


Рис. 3. Сравнение накопленных амплитудных спектров, рассчитанных по записям сейсмических шумов длительностью 69 часов, для трехкомпонентного датчика, установленного на гирдере

На всех компонентах четко прослеживается пик, имеющий частоту 24.6 Гц и максимальную амплитуду на спектре вертикальной Z-компоненты как на полу, так и на гирдере. Данная частота характерна для гармонических колебаний от внешнего промышленного источника (например, трансформатора источников питания) и не имеет отношения к резонансным частотам гирдера.

О природе происхождения пика на частоте 19.5 Гц однозначные выводы сделать проблематично, так как такое значение частоты достаточно сильно отличается от значений, характерных для промышленных источников гармонических шумов.

Наибольший интерес представляет пик, имеющий частоту 9.9 Гц, крайне слабо выраженный на спектрах датчика, установленного на полу непосредственно под опорой гирдера. Наибольшую амплитуду он имеет на горизонтальной компоненте (X), ориентированной поперек оси гирдера. Меньшую, но все же ярко выраженную амплитуду, – на спектре записи вертикальной компоненты. Необходимо отметить, что схожая ситуация наблюдается на остальных датчиках, установленных на гирдере. Такое распределение спектральных амплитуд характерно для резонансного характера рассматриваемых частотных пиков.

Чтобы подтвердить эти выводы, авторами были проанализированы спектры записей импульсных колебаний, возбуждаемых при помощи резиновой киянки. На рисунке 4 приведено сопоставление горизонтальной компоненты (X) исходных записей всех датчиков (сверху), а также их спектров (снизу). Горизонтальное воздействие (X).

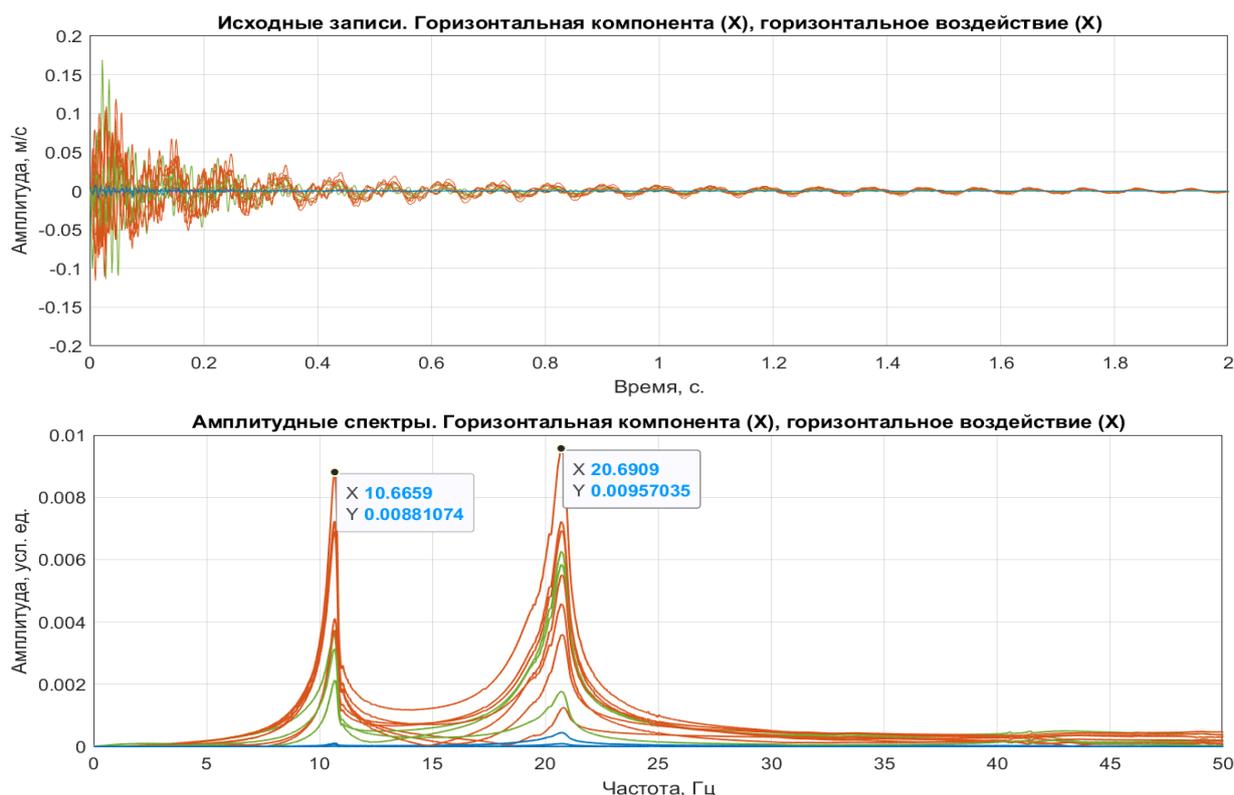


Рис. 4. Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Горизонтальная компонента (X), горизонтальное воздействие (X). Красные линии – датчики, установленные в верхней части гирдера, зеленые – в средней части, синие – на полу

На спектре явным образом можно выделить два пика с частотами 10.67 и 20.69 Гц. Значения частот предполагаемых резонансных колебаний отличаются от значений, выделенных по результатам

анализа накопленных спектров сейсмического шума. Это можно объяснить следующим образом: эксперименты с импульсным источником колебаний производились после монтажа дополнительных элементов (секступольная линза, элементы системы охлаждения, вакуумная камера), что увеличило массу всей конструкции и, соответственно, изменило ее резонансные свойства.

На рисунках 5 и 6 приведены исходные записи импульсных воздействий, ориентированных горизонтально (Y) и вертикально (Z), а также их амплитудные спектры. Ориентация компонент записей совпадает с направлениями воздействий.

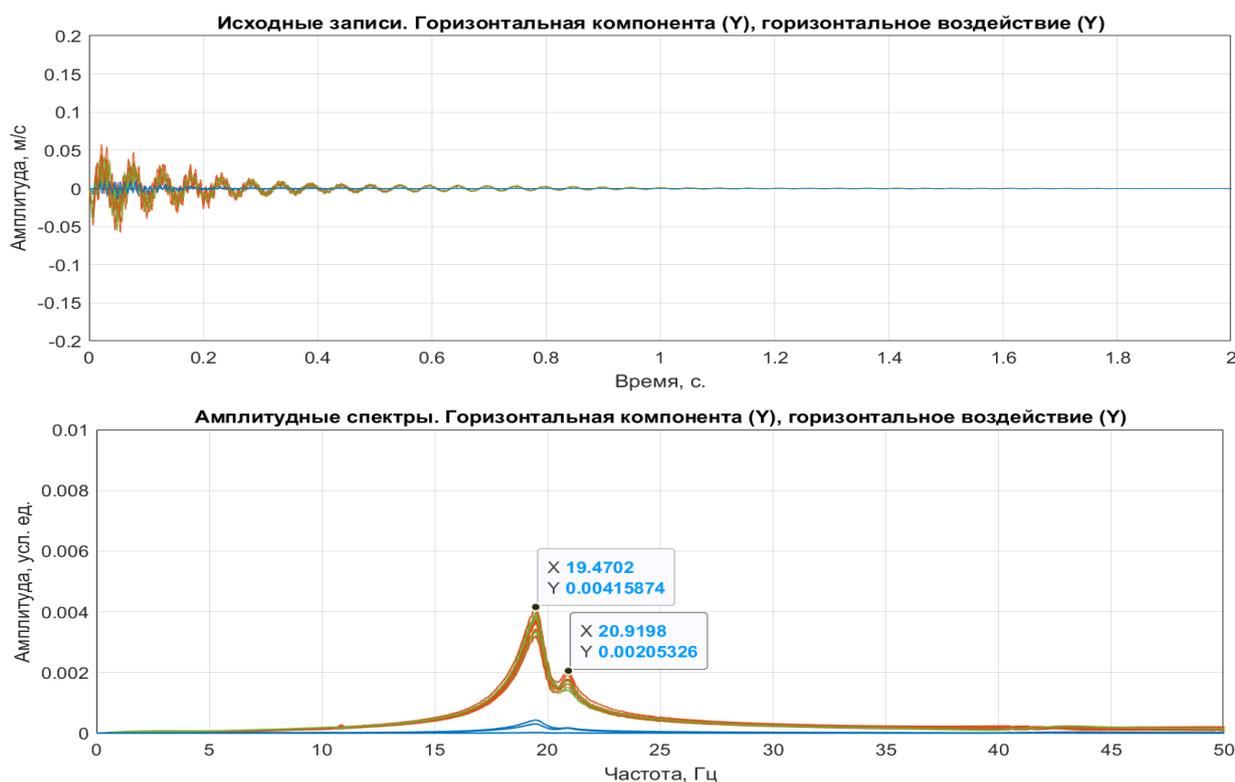


Рис. 5. Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Горизонтальная компонента (Y), горизонтальное воздействие (Y)

Как видно из спектра, при импульсном воздействии, направленном с торца гирдера, также, по-видимому, возникают резонансы, однако меньшей амплитуды, и на других частотах (19.47 и 20.91 Гц).

При вертикальном воздействии, в полосе частот ниже 50 Гц, сколько-либо значимых резонансов не возникает. Как, впрочем, и на более высоких частотах (вплоть до частоты Найквиста). В отличие от записей сейсмических шумов, при анализе спектров от импульсных воздействий не удалось выявить каких-либо резонансов на частотах, близких к значению 25 Гц.

В силу того, что импульсные воздействия производились непосредственно по гирдере, оценка коэффициента передачи вибрационных воздействий с пола на гирдер в этом случае не представляется возможной. В частности, амплитуда сигналов вблизи места удара будет выше, чем на удалении от него. В то же время, по записям фона внешних сейсмических шумов, оценить коэффициент передачи можно путем вычисления соотношения амплитуд пиков на накопленных спектрах записей, произведенных на гирдере и на полу возле его основания. Коэффициенты передачи для колебаний с частотами 9.9 и 19.5 Гц составили 20 и 10 раз соответственно.

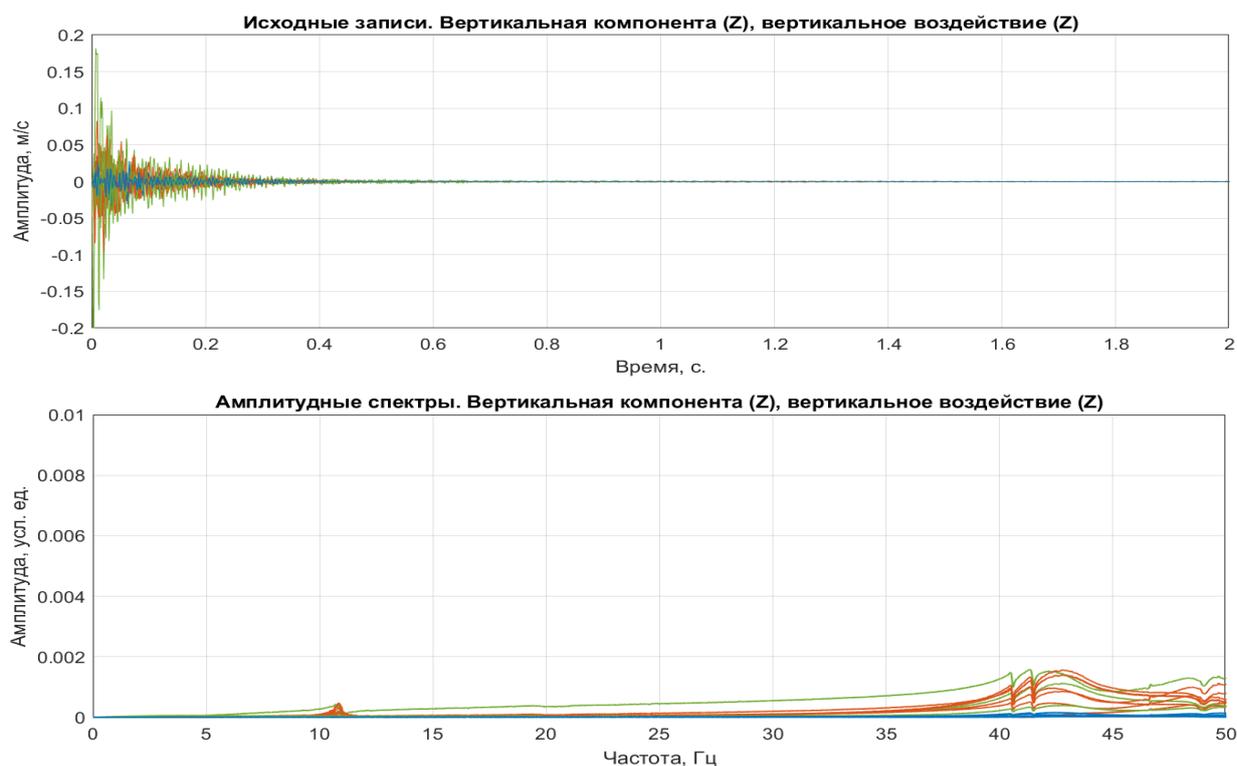


Рис. 6. Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Вертикальная компонента (Z), вертикальное воздействие (Z)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных работ была произведена оценка резонансных частот подставок под магнитные элементы (гирдеров) бустерного синхротрона ЦКП «СКИФ». Как в накопленных амплитудных спектрах непрерывных записей сейсмических шумов, так и в спектрах импульсных воздействий, на горизонтальной компоненте, ориентированной поперек оси гирдера, были выделены резонансы на частотах близких к значениям 10 и 20 Гц. Частоты пиков незначительно изменялись при монтаже дополнительных элементов, увеличивающих вес и резонансные свойства конструкции.

Авторы рекомендуют обратить внимание на данные резонансы и проследить, чтобы никакие промышленные установки в ближайшем окружении бустерного синхротрона не работали на этих частотах, так как амплитуда может повыситься до критических значений и негативно повлиять на орбиту пучка электронов бустера.

Более детально изучить резонансные свойства позволит установка большего количества датчиков вдоль линии и непрерывная запись фона сейсмического шума. Это позволит построить распределение амплитуд резонансных колебаний вдоль гирдера.

Дальнейшее направление исследований – проведение аналогичных измерений для гирдеров накопительного кольца ЦКП «СКИФ» и сравнение с результатами численного моделирования.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда и Новосибирской области, грант № 22-27-20146.

ЛИТЕРАТУРА

- Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А.** Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. – 2018. – № 54 (3). – С. 22–34, doi: 10.21455/si2018.3-2.
- Дергач П.А.** Модуль низкочастотной деконволюции записей геофонов. Свидетельство № 2020667269, заявка № 2020666036 от 09.12.2020, зарегистрировано 22.12.2020, RU.
- Колесников Ю.И., Федин К.В., Лакиморе Н.** Экспериментальное обоснование применения акустических шумов для диагностирования надземных трубопроводов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 49–58, doi: 10.15372/FTPRPI20190206.
- Технологическая** инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»: Сб. статей. В 3-х томах / Под общей редакцией К.И. Шефер, составитель Е.Б. Левичев. Том 2. – Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2022. – 51 с.
- Andrianov A., Arsenyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17 (2). – Article T02009, doi: 10.1088/1748-0221/17/02/T02009.
- Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E.** Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24 (12). – Article 120704, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.
- Bilderback D.H., Elleaume P., Weckert E.** Review of third and next generation synchrotron light sources // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – Vol. 38 (9). – P. S773–S797, doi: 10.1088/0953-4075/38/9/022.
- Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L.** Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 125. – Article 105739, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105739.

REFERENCES

- Andrianov A., Arsenyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17 (2). – Article T02009, doi: 10.1088/1748-0221/17/02/T02009.
- Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E.** Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24 (12). – Article 120704, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.
- Bilderback D.H., Elleaume P., Weckert E.** Review of third and next generation synchrotron light sources // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – Vol. 38 (9). – P. S773–S797, doi: 10.1088/0953-4075/38/9/022.
- Dergach P.A., Tubanov T.A., Yushin V.I., Duchkov A.A.** Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // Seismic Instruments. – 2019. – Vol. 55 (3). – P. 345–352, doi: 10.3103/S0747923919030046.
- Dergach P.A.** Low-frequency deconvolution software. Patent № 2020667269, registration form № 2020666036 09.12.2020, registered 22.12.2020, RU.

Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Article 105739, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105739.

Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomaizve L. Experimental Substantiation of Using Acoustic Noise in Above-Ground Pipeline Diagnostics // *Journal of Mining Science*. – 2019. – Vol. 55 (2). – P. 219–228.

Technological infrastructure of Siberian Circular Photon Source "SKIF": Collection of articles. In 3 volumes / Edited by K.I. Shefer, completed by E.B. Levichev. Vol 2. – Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, 2022. – 51 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка.

БАРАНОВ Григорий Николаевич – научный сотрудник ускорительных лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и старший научный сотрудник Источника синхротронного излучения «СКИФ». Основные научные интересы: ускорители заряженных частиц, источники синхротронного излучения, динамика пучков заряженных частиц.

КАРЮКИНА Ксения Юрьевна – научный сотрудник ускорительных лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Источника синхротронного излучения «СКИФ». Основные научные интересы: ускорители заряженных частиц, источники синхротронного излучения, динамика пучков заряженных частиц.

ДРОБЧИК Аркадий Николаевич – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка и создание геофизической аппаратуры.



ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ УПРУГО-ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Ю.П. Стефанов^{1,2}, Д.К. Жарасбаева^{1,3}

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

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск, просп. Академический, 2/4, Россия,

³Научно-лабораторный центр АО «Геология», 630055, Новосибирск, ул. Мусы-Джалиля, 23, Россия,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по псевдотрехосному нагружению полноразмерных образцов черносланцевых пород баженовской свиты. Эксперименты проводились в условиях одноосного нагружения и при давлениях бокового обжатия 20 и 40 МПа. Показано, что в рассмотренном диапазоне нагрузки деформация породы за пределом упругости протекает в разных режимах: дилатансии и компакци. Несмотря на низкую пористость породы, переход от дилатансии к уплотнению происходит при среднем давлении, не превышающем 34 МПа. На основе анализа полученных данных выделены этапы деформирования на диаграммах нагружения и определены параметры математической модели с комбинированной предельной поверхностью, описывающей процесс деформирования в режимах дилатансии и компакци.

Баженовская свита, геомеханические эксперименты, дилатансия, компакция, математическая модель, предельная поверхность

LOADING DIAGRAMS AND PARAMETERS OF THE MODEL OF ELASTIC-PSEUDOPLASTIC DEFORMATION OF BLACK SHALE ROCKS OF THE BAZHENOV FORMATION

Yu.P. Stefanov^{1,2}, D.K. Zharasbaeva^{1,3}

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

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Akademicheskyy Ave., 2/4, Tomsk, 634055, Russia,

³Scientific Laboratory Center of JSC "Geologika", Musy-Jalil Str., 23, Novosibirsk, 630055, Russia,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

The results of the analysis of experimental data on pseudotriaxial loading of full-size samples of black shale rocks of the Bazhenov Formation are presented. The experiments were carried out under conditions of uniaxial loading and at lateral compression pressures of 20 and 40 MPa. It is shown that in the considered load range, the deformation of the rock beyond the elastic limit proceeds in different modes: dilatancy and compaction. Despite the low porosity of the rock, the transition from dilatation to compaction occurs at a pressure not exceeding 34 MPa. Based on the analysis of the obtained data, the stages of deformation in the loading diagrams are distinguished and the parameters of the mathematical model with a combined limiting surface are determined, which describes the deformation process in dilatancy and compaction modes.

Bazhenov Formation, geomechanical experiments, dilatancy, compaction, mathematical model, yield surface

ВВЕДЕНИЕ

Черносланцевые отложения в качестве основных нефтематеринских объектов распространены во всем мире: в Западно-Сибирской, Волго-Уральской, Тимано-Печорской, Северо-Кавказской нефтегазоносных провинциях России, бассейнах Северной Америки (Уиллистон, Аппалачский), Ближневосточного и Карибского регионов и др. Уникальность роли таких отложений в нефтегазовых системах состоит в том, что они поочередно или одновременно могут являться нефтегазоматеринской горной породой, флюидоупором и коллектором. Ресурсы углеводородов в этих толщах относятся к трудноизвлекаемым, а сами коллектора к нетрадиционным. За последние годы появились новые, существенно более точные данные о геологическом строении, стратиграфии и палеонтологии, палеогеографии [Конторович и др., 2013, 2019; Стафеев и др., 2017] баженовской свиты и ее возрастных аналогов. Однако не смотря на практически полувековую историю изучения отложений баженовской свиты, остается большое количество нерешенных проблем, в том числе связанных с механическими характеристиками пород.

Основные публикации, посвященные механическим характеристикам, освещают в основном, такие темы как:

1) методика лабораторных исследований механических свойств пород – породы баженовской свиты обладают сложными текстурно-структурными свойствами (слоистость, хрупкость, битуминозность), поэтому геомеханические эксперименты требуют особой подготовки и методики проведения [Тихоцкий и др., 2017; Шустов, 2019; Шубин и др., 2020];

2) определение статических и динамических модулей упругости и их корреляций [Шубин и др., 2020];

3) изучение анизотропии упруго-прочностных параметров пород [Баяк и др., 2015; Тихоцкий и др., 2017].

4) использование традиционных моделей и критериев прочности для прогнозирования предела упругости и прочности и построения геомеханических моделей [Маркин и др., 2016].

Таким образом, основная масса работ посвящена методике лабораторных исследований, определению упругих модулей и их анизотропии, а прочностные свойства описывают в рамках традиционных моделей Кулона–Мора и Друккера–Прагера. Кроме указанных, существует множество вариантов моделей поведения материалов под нагрузкой и их различные обобщения [Colmenares, Zoback, 2002]. Основная проблема математического описания поведения горных пород состоит в том, что в процессе деформирования изменяются их свойства, соответственно, должны меняться и параметры модели. Поэтому без учета важнейших особенностей протекания деформации за пределом упругости общепринятые модели дают лишь оценку начала необратимой деформации и разрушения. В то время как необходимостью является именно описание процесса развития деформации, которая обычно протекает неоднородно, деформация часто имеет локализованный характер, а свойства среды постоянно меняются. Для черносланцевых пород баженовской свиты проблема стоит наиболее остро ввиду трудностей экспериментального изучения и недостатка данных. Для проведения численного моделирования и решения задач геомеханики необходимо иметь адекватную математическую модель, учитывающую важнейшие особенности поведения породы.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Геомеханические исследования проводились с помощью специального испытательного оборудования, предназначенного для исследования механических свойств образцов горных пород в атмосферных и пластовых условиях (оборудование производства АО «Геологика»). Оборудование оснащено камерой прочности, обеспечивающей моделирование пластовых условий, включая горное и поровое давление, а также поддержание пластовой температуры и блок измерения деформаций. Измерение упругих и прочностных свойств керна баженовской свиты заключалось в проведении экспериментов на одноосное и псевдотрехосное сжатие: UCS – одноосное сжатие, при котором образец деформируется в осевом направлении (без бокового обжима) до его разрушения; CCS – трехосный тест на сжатие, при котором образец деформируют в осевом направлении до разрушения в условиях постоянного давления обжима σ_c .

Все эксперименты проводились на полноразмерных образцах (8 × 16 см) керна баженовской свиты при пластовой температуре 105 °С. Полученные диаграммы нагружения – графики зависимости осевой ε_1 и радиальной деформации ε_2 образцов от приложенной нагрузки приведены на рис. 1. Объемная деформация определяется как сумма трех компонент деформации: $\varepsilon = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$. На представленных диаграммах можно выделить ряд стадий деформирования:

Стадия 0–1: начальный нелинейный участок. Данная нелинейность сильно проявляется в тестах на одноосное сжатие при отсутствии бокового обжатия (рис. 1, а). Она связана с закрытием микродефектов, которые имеются в образце при приложении нагрузки. При боковом обжатии 20 и 40 МПа закрытие большей части микротрещин происходит на этапе приложения всестороннего обжима.

Стадия 1–2: упругое сжатие образца, наиболее линейный участок на графике нагружения. На этом участке определяются упругие модули.

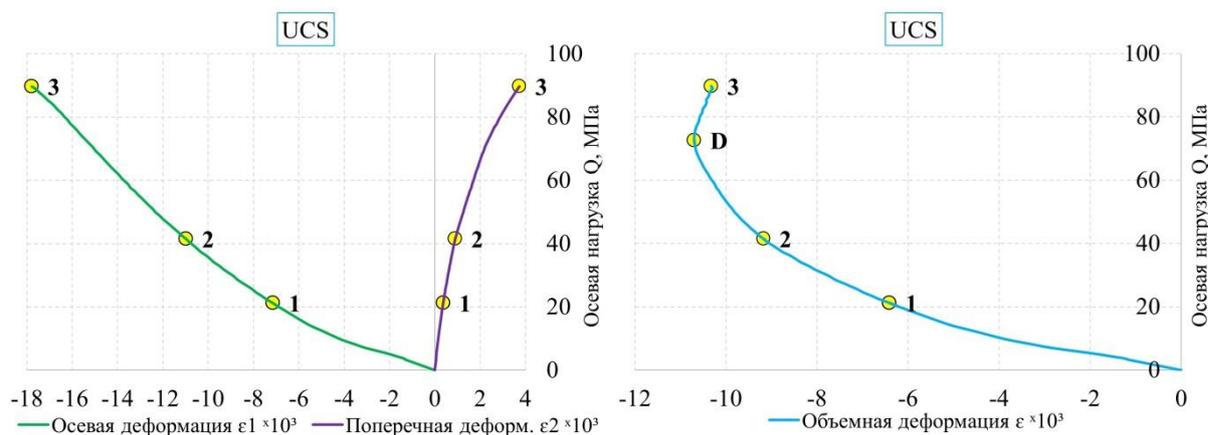
Стадия 2–3: упруго-псевдопластическое деформирование. Появление псевдопластической – необратимой деформации приводит к отклонению от линейности на графиках осевой, радиальной и объемной деформации. В образце развиваются сдвиговая и объемная необратимая деформация. В режиме дилатансии график для объемной деформации отклоняется вверх и вправо (см. рис. 1, а), в режиме компакссии – вниз и влево (рис. 1, б, в).

В режиме дилатансии на начальном этапе приращение упругой деформации больше, чем приращение псевдопластической. На следующем этапе после достижения точки D график нагружения для объемной деформации разворачивается в другую сторону (см. рис. 1, а). Данную точку нередко обозначают как D-point, а стадию интерпретируют как неустойчивое трещинообразование [Bieniawski, 1967], хотя неустойчивость возникает лишь с началом интенсивного разрушения образца после достижения предела прочности.

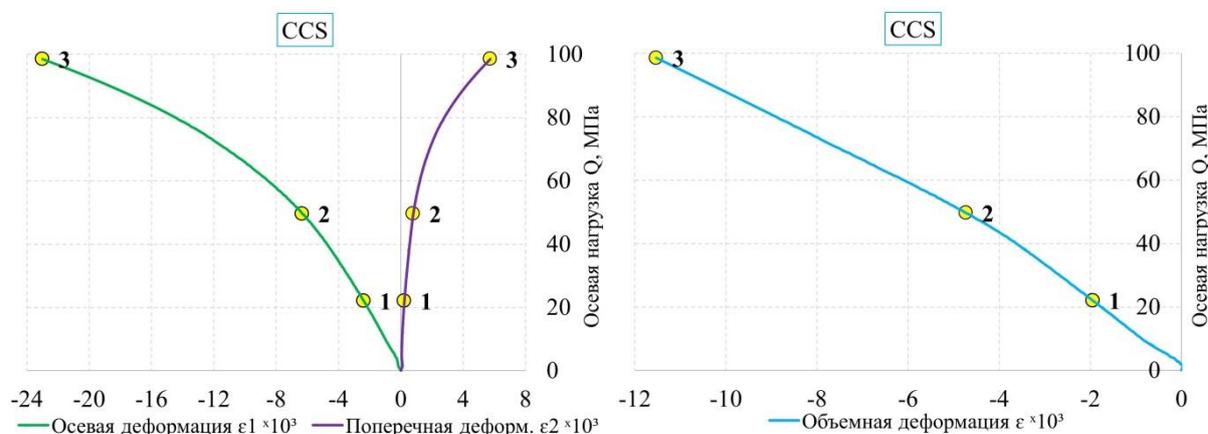
В режиме компакссии сокращение объема в данных экспериментах менее выражено, поскольку развивается при сильном упрочнении, что связано с низкой пористостью породы.

Следующая стадия неустойчивого деформирования, соответствующая формированию полос локализованной деформации и разрушению, в данных экспериментах не рассматривалась, т. к. имело место быстрое разрушение образцов и резкий сброс напряжений.

а



б



в

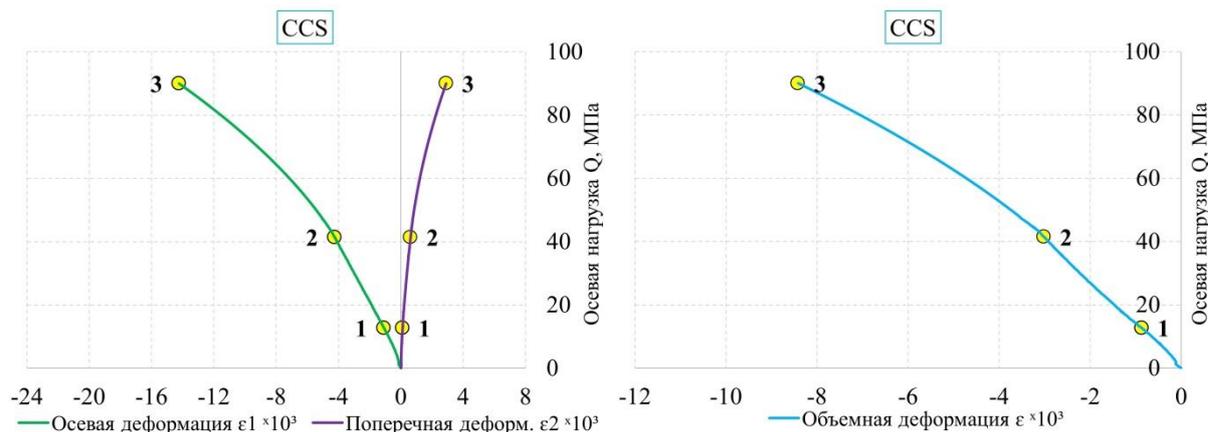


Рис. 1. Диаграммы нагружения для экспериментов: а – на одноосное сжатие (давление обжима 0 МПа); б – псевдотрехосное сжатие при давлении бокового обжатия $\sigma_c = 20$ МПа; в – $\sigma_c = 40$ МПа. 1 – начало линейно упругого деформирования; 2 – предел упругости; 3 – предел прочности (разрушение образца)

Несмотря на ряд особенностей поведения, которые зависят от давления бокового обжатия, перечисленные стадии наблюдаются на графиках для всех проведенных экспериментов. На этапе, когда развивается необратимая деформация – стадия (2–3) – характер изменения объема проявляется на

диаграммах поперечной и объемной деформации. На этих диаграммах имеет место отклонение от линейного участка в разные стороны в зависимости от бокового обжатия. В эксперименте на одноосное сжатие наблюдается увеличение объема образца, вызванное ростом и раскрытием микротрещин, деформация развивается в режиме дилатансии. В то же время, на графиках нагружения, в условиях трехосного сжатия (см. рис. 1, б, в), наблюдается обратный процесс, сокращение объема образца, его уплотнение. Таким образом, свойства среды претерпевают значительные изменения и находятся в большой зависимости от напряженно-деформированного состояния. Изменение механизма деформирования пород баженовской свиты происходит при увеличении всестороннего давления (давления обжима в геомеханических экспериментах). Переход из режима дилатации в режим компакциии происходит в ходе деформации при давлении бокового обжатия в диапазоне 15–20 МПа.

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СРЕДЫ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

По результатам проведенных экспериментов обнаружено, что деформация исследуемых пород в зависимости от давления развивается в режимах дилатансии и компакциии. Соответственно математическая модель и предельная поверхность, лежащая в ее основе должны отражать данное свойство. Кроме того, необходимо учесть существенную нелинейность на начальных этапах нагружения, которая приводит к зависимости упругих модулей от давления среды [Стефанов, 2016]. На рисунке 2 показаны аппроксимации значений модулей сдвига и сжатия в зависимости от давления. Данная зависимость достаточно хорошо описывается одним уравнением: $F = F_0 \cdot (b \left(\frac{P_{обж}}{P_0}\right)^a + c \frac{P_{обж}}{P_0} + 1)$, где F принимает значение модулей сжатия K или сдвига μ , $b=3 \cdot 10^2$, $c=7.96$, $P_0 = 1$ МПа.

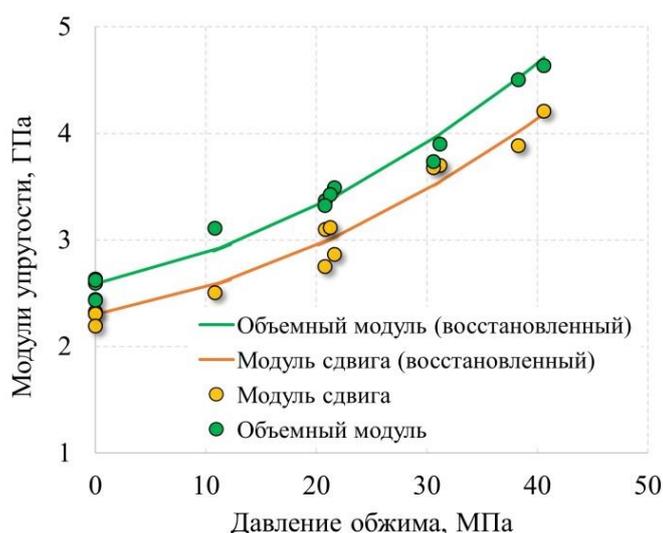


Рис. 2. Графики зависимости упругих модулей от давления обжима

Для описания деформации за пределом упругости примем за основу комбинированную предельную поверхность [Stefanov et al., 2011; Garavand et al., 2020], представленную на рис. 3. Для определения параметров приведем основные соотношения модели.

Примем гипотезу о разложении деформации и ее скорости на упругую и пластическую части: $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p$, где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компонента скорости деформации. Тогда закон упругости может быть записан в виде:

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

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, точка сверху означает производную по времени; λ , μ – параметры Ламе; I – первый инвариант девиатора тензора деформации, δ_{ij} – символ Кронекера. Заметим, что в приведенных соотношениях скорости изменения напряжений и деформаций могут быть заменены на их приращения.

Приращение неупругой или пластической части тензора деформации, которое рассчитывается при достижении напряжениями предельной поверхности $f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$, определяется уравнением:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\theta \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$

где $d\varepsilon_{ij}^p$ – приращение пластических деформаций; $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$ – пластический потенциал; $d\theta$ – множитель, определяемый в ходе процесса.

Необходимо отметить, что используется неассоциированный закон пластического течения, то есть функция пластического потенциала и функция текучести являются независимыми.

Предельная поверхность, показанная на рис. 3, состоит из двух частей, поверхности Друккера-Прагера [Николаевский, 1971; Друккер, Прагер, 1975]:

$$f_1 = \tau - \alpha\sigma - Y, \quad \text{при } \sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_0$$

и эллиптической поверхности [Grueschow, Rudnicki, 2005]:

$$f_2 = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0, \quad \text{при } \sigma > \sigma_0,$$

где $\sigma = -\sigma_{kk}/3$ – первый инвариант тензора напряжений; $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений, α и Y – параметры, $a = \sigma_1 - \sigma_0$, $b = c + \alpha\sigma_0$ – полуоси эллипса.

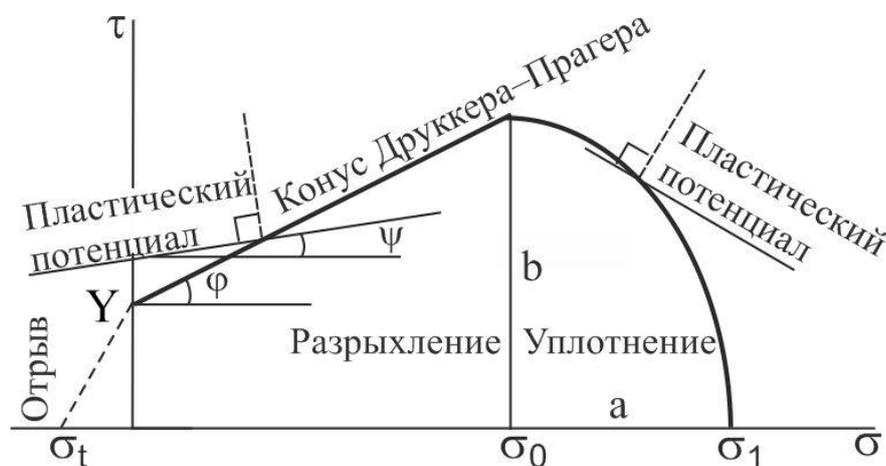


Рис. 3. Схема комбинированной предельной поверхности: τ – интенсивность сдвигового напряжения; σ – средние напряжения; φ – угол внутреннего трения Друккера–Прагера; Y_0 – когезия Друккера–Прагера; σ_0 – пороговое эффективное давление перехода от режима дилатансии к компакции

Начальная предельная поверхность соответствует пределу упругости и описывает лишь начало процесса, дает первые оценки зарождения пластической деформации. Изменения предельной поверхности в ходе развития необратимой деформации на стадиях упрочнения и разупрочнения задается с помощью уравнений [Стефанов, 2002]:

$$Y(\gamma^p) = Y_0[1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p))],$$

где h – коэффициент упрочнения, $d\gamma^p$ – приращение интенсивности сдвиговой пластической деформации, $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$, $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$, γ^* – критическая деформация, после которой преобладает деградация материала.

В процессе уплотнения происходят изменения эллиптической части предельной поверхности, она может смещаться вдоль оси давления и расширяться. Опишем это при помощи соотношения:

$$\sigma_0(\varepsilon^p) = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^* + \varepsilon^p} \right)^m, \text{ что эквивалентно } \sigma'_0(\varphi) = \sigma'_0(\varphi^*/\varphi)^m, \text{ где } \varepsilon^* = \varphi^* - \text{ начальная пористость, } \Delta\varphi = \varepsilon^p$$

– объемная деформация, $a = a_0 + r\Delta\sigma_0$, r и m – параметры.

Уравнения пластического потенциала примем в виде [Stefanov et al., 2011]: $g = \tau - \beta\sigma$, где $\beta = d\varepsilon^p/d\gamma^p$ – коэффициент дилатансии,

$$\beta(\sigma, \varepsilon^p) = \beta_0 \left(\frac{\sigma_0(\varepsilon^p) - \sigma}{\sigma_0(\varepsilon^p)} \right)^{n_1} \quad \text{при } \sigma < \sigma_0,$$

$$\beta(\sigma, \varepsilon^p) = - \left(\frac{\sigma - \sigma_0(\varepsilon^p)}{\sigma_1 - \sigma_0(\varepsilon^p)} \right)^{n_2} \quad \text{при } \sigma_0 < \sigma < \sigma_1.$$

Таким образом, приведенная модель поведения среды, помимо упругих модулей, содержит параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Перечень параметров модели с комбинированной предельной поверхностью

Участок предельной поверхности Друккера–Прагера, дилатансия						Эллиптический участок предельной поверхности, компакция					
Y_0	α	h	β	α	n_1	σ_0	σ_1	ε^*	m	r	n_2

Для определения параметров предельной поверхности необходимо пересчитать значения напряжений и деформаций для точек, отмеченных на диаграммах нагружения, которые соответствуют пределам упругости и прочности, либо перестроить графики в координаты первого инварианта напряжений и деформаций, а также второго инварианта девиатора напряжений и деформаций. Для условий, соответствующих рассмотренным экспериментам, выражения для пересчета оказываются предельно простыми:

$$\tau = Q/\sqrt{3} = |\sigma_1 - \sigma_c|/\sqrt{3}, \sigma = \frac{Q}{3} + \sigma_c = |\sigma_1 + 2\sigma_c|/3, ,$$

$$\gamma = 2|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|/\sqrt{3}, \varepsilon = -(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2).$$

Отметив значения пределов упругости и прочности на путях нагружения в пространстве напряжений для проведенных экспериментов, мы построим начальную и конечную предельные поверхности (рис. 4) и определим их параметры. По соответствующим данным необратимой деформации определяются остальные параметры, которые задают соотношения изменений предельной поверхности от начального состояния. Полученные параметры приведены в табл. 2.

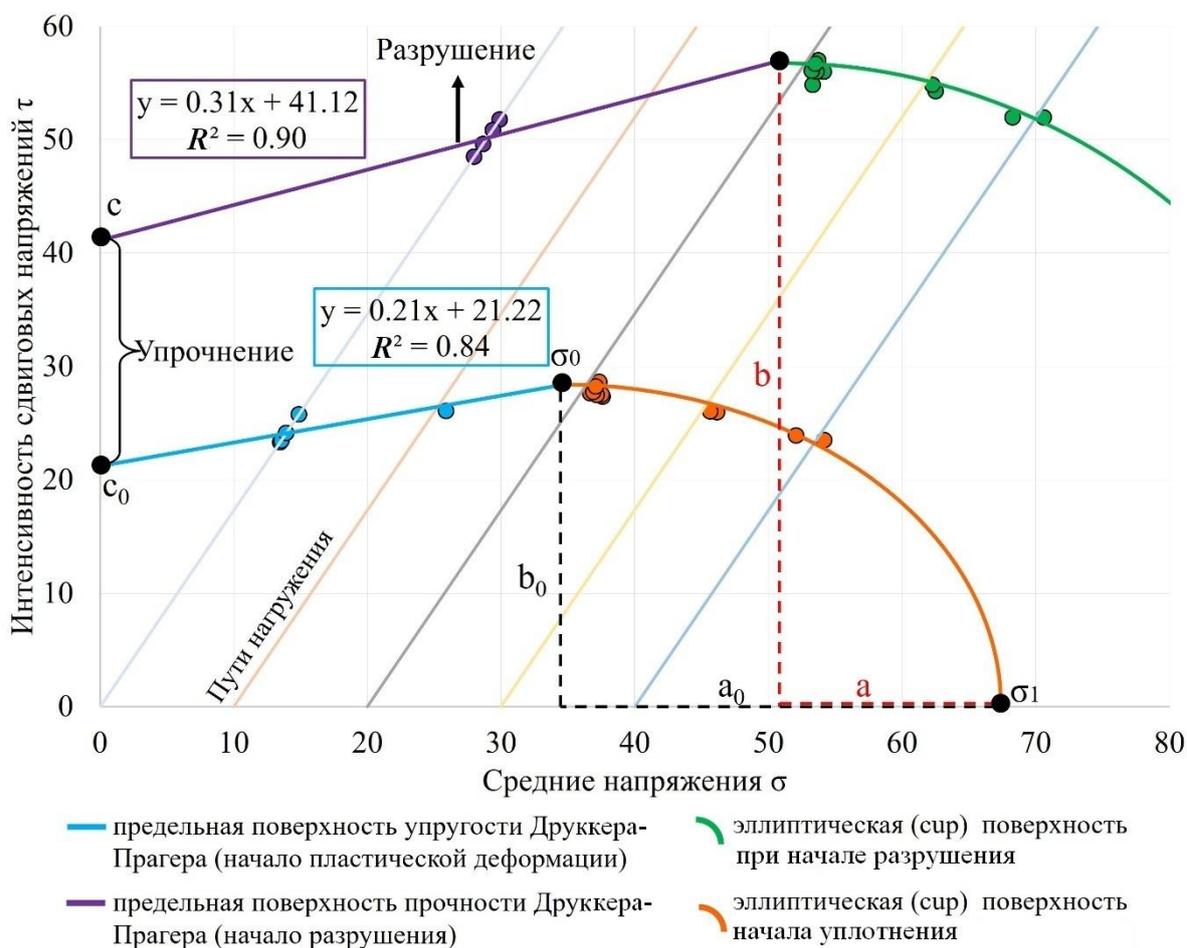


Рис. 4. Пути нагружения и предельная поверхность

Таблица 2

Параметры модели с комбинированной предельной поверхностью, полученные по экспериментальным данным

ρ_0	2.47 г/см ³	Плотность образца до проведения эксперимента
K_0	2.6 ГПа	Начальный объемный модуль (при обжиге 0)
G_0	2.3 ГПа	Начальный модуль сдвига (при обжиге 0)
Y_0	21.2 МПа	Когезия поверхности упругости Друккера–Прагера
α	0.32	Коэффициент внутреннего трения поверхности прочности Друккера–Прагера
β	0.3	Коэффициент дилатансии
h	1.0	Параметр упрочнения

γ^*	0.01	Интенсивность сдвиговой пластической деформации, соответствующая пиковым напряжениям (пределу прочности)
σ_0	34 МПа	Давление, при котором начинается уплотнение (переход к эллиптической предельной поверхности)
σ_1	68 МПа	Давление, при котором начинается уплотнение при всестороннем сжатии
ε^*	0.03	Начальная пористость
m	6	Показатель степени в уравнении, описывающем изменение σ_0 (смещение эллиптической поверхности)
n_1	0	Показатель степени в уравнении для изменения коэффициента дилатансии
n_2	1.6	Показатель степени в уравнении для изменения коэффициента дилатансии в области компакци
r	1.2	Коэффициент связи между σ_1 и σ_0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования образцов пород баженовской свиты показал ряд особенностей их поведения под нагрузкой. В первую очередь это развитие деформации в режимах дилатансии и компакци. Причем не смотря на низкую пористость, переход в режим уплотнения происходит при давлениях 34 МПа, что достигается при давлениях бокового обжатия порядка 15 МПа. Соответственно, при боковом обжатии 20 МПа деформация образца происходит с необратимым сокращением объема. Такие значения смены режима деформирования, например, для песчаника соответствуют пористости более 20 %. При этом процесс деформации в обоих режимах сопровождается значительным упрочнением, когезия возрастает в два раза.

Отмечена существенная нелинейность диаграмм нагружения на начальных участках нагружения. В зависимости от давления обжима (на интервале от 0 до 40 МПа) упругие модули возрастают приблизительно в 1.5 раза.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных в рамках стандартных испытаний при разных значениях бокового обжатия, определены параметры математической модели с комбинированной предельной поверхностью, которая позволяет описывать процесс деформации с учетом дилатансии и компакци.

Работа выполнена при поддержке проекта Программы Фонда научных исследований № 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».

ЛИТЕРАТУРА

Баяк И.О., Березина И.А., Краснова М.А., Патонин А.В., Пономарев А.В., Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Цельмович И.В., Калмыков Г.А. Экспериментально-теоретический подход для прогноза и анализа анизотропных упругих свойств углеводородосодержащего сланца Баженовской свиты при пластовых

условиях // Актуальные направления геологического изучения и освоения недр Западной Сибири. – Тюмень ФГУП «ЗапСибНИИГГ», 2015. – С. 47–59.

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.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. – 2013. – № 54 (8). – С. 972–1012.

Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Никитенко Б.Л., Рыжкова С.В., Борисов Е.В., Ершов С.В., Костырева Е.А., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Пономарева Е.В., Фомин М.А., Ян П.А. Маргинальный фильтр волжско-раннеберриасского морского бассейна и его влияние на распределение осадков // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 3. – С. 199–210, doi: 10.31857/S0024-497X20193199-210.

Маркин М.А., Гула А.К., Юсупов Я.И. Комплексный геомеханический подход для выбора интервалов проведения ГРП на примере баженовской свиты в пределах Красноленинского свода // Бурение и нефть. – 2016. – № 9. – С. 50–55.

Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // Прикладная математика и механика. – 1971. – № 35 (6). – С. 1017–1029.

Стафеев А.Н., Ступакова А.В., Сулова А.А., Гилаев Р.М. Обстановки осадконакопления и палеогеографическая зональность баженовского горизонта (титон-нижний берриас) Западной Сибири // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. Ч. 2. – С. 134–143, doi: 10.18599/grs.19.14.

Стефанов Ю.П. Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5 (5). – С. 107–118.

Стефанов Ю.П. Некоторые нелинейные эффекты поведения горных пород // Физическая мезомеханика. – 2016. – № 19 (6). – С. 54–61.

Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гафурова Д.Р., Дубиня Н.В., Краснова М.А., Корост Д.В., Макарова А.А., Патонин А.В., Пономарев А.В., Хамидуллин Р.А., Цельмович В.А. Комплексные лабораторные исследования керна в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. – 2017. – № 96 (2). – С. 17–32, doi: 10.21455/std2017.2-2.

Шубин А.А., Кудымов А.Ю., Яценко В.М. Методические аспекты изучения механических свойств пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 3. – С. 43–46, doi: 10.24887/0028-2448-2020-3-43-46.

Шустов Д.В. Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 55–60, doi: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60.

Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part II – experimental studies // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. – 1967. – Vol. 4. – P. 407–423, doi: 10.1016/0148-9062(67)90031-9.

Colmenares L.B., Zoback M.D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39. – P. 695–729, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00048-5.

Garavand A., Stefanov Yu.P., Rebetsky Y.L., Bakeev R.A., Myasnikov A.V. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2020. – Vol. 44. – P. 823–850, doi: 10.1002/nag.3041.

Grueschow E., Rudnicki J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – Vol. 42. – P. 4574–4587, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.02.001.

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. – P. 2323–2340, doi: 10.1016/j.jmps.2011.08.002.

REFERENCES

Bayuk I.O., Berezina I.A., Krasnova M.A., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Tselmovich V.A., Kalmykov G.A. Experimental and theoretical approach for the prediction and analysis of anisotropic elastic properties of hydrocarbon-containing shale of the Bazhenov formation under reservoir conditions // Actual directions of geological study and development of the subsoil of Western Siberia. – ZapSibNIIGG, Tyumen, 2015. – P. 47–59.

Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part II – experimental studies // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. – 1967. – Vol. 4. – P. 407–423, doi: 10.1016/0148-9062(67)90031-9.

Colmenares L.B., Zoback M.D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39. – P. 695–729, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00048-5.

Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics – 1952 – Vol. 10 (2) – P. 157–165, doi: 10.1090/qam/48291.

Garavand A., Stefanov Yu.P., Rebetsky Y.L., Bakeev R.A., Myasnikov A.V. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2020. – Vol. 44. – P. 823–850, doi: 10.1002/nag.3041.

Grueschow E., Rudnicki J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – Vol. 42. – P. 4574–4587, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.02.001.

Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – Vol. 54 (8). – P. 747–779, doi: 10.1016/j.rgg.2013.07.002.

Kontorovich A.E., Burstein L.M., Nikitenko B.L., Ryzhkova S.V., Borisov E.V., Ershov S.V., Kostyreva E.A., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Y., Ponomareva E.V., Fomin M.A., Yan P.A. Volgian–early Berriasian marginal filter in the West Siberian marine basin and its influence on sediment distribution // Lithology and Minerals. – 2019. – Vol. 3. – P. 199–210.

Markin M., Gula A., Yusupov J. Complex geomechanical approach to select intervals of fracturing on the example of the Bazhenov Formation within Krasnoleninsky arch // Burenie i Neft. – 2016. – No. 9. – P. 50–55.

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

Shubin A.A., Kudymov A.Yu., Yatsenko V.M. Methodological aspects of studying the mechanical properties of rocks of Bazhenov formation // Oil Industry. – 2020. – Vol. 3. – P. 43–46, doi: 10.24887/0028-2448-2020-3-43-46.

Shustov D.V. Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal. – 2019. – Vol. 4. – P. 55–60.

Stafeev A.N., Stoupakova A.V., Suslova A.A., Gilaev R.M. Conditions of sedimentation and paleogeographic zoning of the Bazhenov horizon (Tithon–Lower Berrias) in West Siberia // *Georesources*. – 2017. – Special Issue. Part 2. – P. 134–143.

Stefanov Yu.P. Deformation localization and fracture of geomaterials: numerical simulation // *Physical Mesomechanics*. – 2002. – Vol. 5. – P. 103–114.

Stefanov Yu.P. Some nonlinear rock behavior effects // *Physical Mesomechanics*. – 2018. – Vol. 21. – P. 234–241, doi: 10.1134/S1029959918030074.

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. – P. 2323–2340, doi: 10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gafurova D.R., Dubinya N.V., Krasnova M.A., Korost D.V., Makarova A.A., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Khamidullin R.A., Tselmovich V.A. Comprehensive laboratory core analysis at CPGR IPE RAS // *Seismic Instruments*. – 2018. – Vol. 54. – P. 586–597, doi: 10.3103/S0747923918050146.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: поведение горных пород за пределом упругости, локализация деформации и разрушения, численное моделирование.

ЖАРАСБАЕВА Дарья Константиновна – лаборант лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: строение и свойства горных пород, экспериментальные исследования, численное моделирование.



ЕДИНЫЙ ПОДХОД К ТРЕХМЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА КАРОТАЖА ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ И ИНДУКЦИОННЫМИ ЗОНДАМИ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

О.В. Нечаев, М.И. Эпов, В.Н. Глинских

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: NechayevOV@ipgg.sbras.ru*

В статье рассматривается единый подход к моделированию каротажных зондов, обладающих как гальваническими, так и индукционными источниками электрического поля. Данный подход основан на свойствах функциональных пространств, используемых в методе конечных элементов, и позволяет осуществлять единую программную реализацию для различных методов каротажа. В качестве примера использования предложенного подхода рассматривается процесс каротажа в анизотропной среде с наклоном главных осей анизотропии.

Каротаж, анизотропные среды, метод конечных элементов

A UNIFIED APPROACH TO THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE LOGGING PROCESS BY GALVANIC AND INDUCTION PROBES IN ANISOTROPIC MEDIA

O.V. Nechaev, M.I. Epov, V.N. Glinskikh

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: NechayevOV@ipgg.sbras.ru*

The article considers a unified approach to modeling logging probes with both galvanic and induction electric field sources. This approach is based on the properties of the functional spaces used in the finite element method and allows for a single software implementation for various logging methods. As an example of the use of the proposed approach, the logging process in an anisotropic medium with a slope of the main axes of anisotropy is considered.

Logging, anisotropic media, finite element method

ВВЕДЕНИЕ

Начиная от поиска перспективных объектов, определения их запасов и заканчивая контролем за разработкой месторождений, активно используются современные геофизические методы, позволяющие получить исчерпывающую информацию о нефтяных и газовых резервуарах. При изучении геологической среды большую роль играет реконструкция удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород по данным электрокаротажных зондирований. Оценка содержания углеводородов в резервуарах выполняется по значениям УЭС горных пород на основе измерений в скважине методами электрического каротажа. Данные каротажные зонды можно разделить на два типа: гальванические и индукционные. Первый тип зондов (например, БК и БКЗ) как правило в качестве источника использует стационарный ток или постоянную разность потенциалов, приложенных к электродам, имеющим контакт с внешней средой. Второй тип зондов (ИК, ВИКИЗ и др.) для возбуждения вторичного электромагнитного поля в

геологической среде использует нестационарный ток (чаще гармонический), протекающий в генераторной катушке.

Современной тенденцией к интерпретации каротажных диаграмм является совместное использование данных, полученных от различных зондов, что значительно повышает качество восстановления свойств околоскважинного пространства [Михайлов и др., 2017; Nechaev et al., 2021; Сухорукова и др., 2022]. В этой связи становится удобным иметь единый подход к моделированию каротажных зондов, обладающих различными типами источников электромагнитного поля. Благодаря этому становится возможным в рамках единой программной базы быстро реализовывать решение прямой задачи каротажного зондирования для различных типов зондов, что, в свою очередь, облегчает реализацию совместной инверсии каротажных данных.

В работе рассматривается единый подход к моделированию каротажных зондов, обладающих как стационарными–гальваническими, так и нестационарными–индукционными источниками электрического поля. Это становится возможным благодаря свойствам используемых для вариационной постановки функциональных пространств [Nédélec, 1986], а так же векторному методу конечных элементов [Hiptmair, 2002], обеспечивающему выполнение закона сохранения зарядов в сложных по своему физическому строению областях естественным образом.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования электрического поля, порождаемого стационарным источником тока, введем электрический потенциал φ такой, что $E = -\text{grad } \varphi$, распределение которого в области моделирования описывается следующей краевой задачей:

$$-\text{div } \sigma \text{ grad } \varphi = \text{div } J, \quad (1)$$

$$\varphi|_{\Gamma^0} = 0, \quad (2)$$

где σ – удельная электрическая проводимость $\sigma = \rho^{-1}$, Γ^0 – внешняя граница области моделирования, на которой электрический потенциал считается равным нулю (расстояние от токового электрода до внешней границы выбирается таким образом, чтобы оно существенно не влияло на значение электрического потенциала на измерительных электродах), J – плотность тока в источнике. Следует отметить, что в этом случае предполагается, что $\text{div } J \neq 0$, в противном случае задача будет сводиться к уравнению магнитостатики.

Если сторонний ток является нестационарным, то можно выделить два случая. Первый – ток является гармоническим, и второй – зависимость тока от времени описывается некоторой функцией. Второй случай можно свести к первому при помощи преобразования Фурье, поэтому далее будем рассматривать только гармоническую зависимость тока от времени при некоторой фиксированной циклической частоте.

Напряженность электрического поля, порождаемого гармоническим током, в области моделирования описывает следующая краевая задача:

$$\text{curl } \mu^{-1} \text{ curl } E + (i\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E = -i\omega J, \quad (3)$$

$$E \times \vec{n}|_{\Gamma_0} = 0, \quad (4)$$

где E – амплитуда напряженности электрического поля, ω – частота тока в источнике, μ – магнитная проницаемость, ε – диэлектрическая проницаемость, i – мнимая единица, \vec{n} – вектор нормали для границы Γ^0 . Каких-либо ограничений на $\operatorname{div} J$ не накладывается.

Оба уравнения (1) и (3) выводятся из системы уравнений Максвелла, исходя из предполагаемых свойств источника стороннего тока. Следствием этого является то, что уравнение (1) может быть так же получено из (3), путем взятия div от обеих частей (3), делением левой и правой части равенства на $i\omega$, устремлением частоты ω к нулю и вводом скалярного потенциала $E = -\operatorname{grad} \varphi$. При этом должно выполняться $\operatorname{div} J \neq 0$.

ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Для решения краевых задачи (1)–(2) и (3)–(4) будем использовать метод конечных элементов [Шайдуров, 1989; Niptmair, 2002]. Пусть Ω – трехмерная, возможно неоднородная по физическим свойствам, область моделирования с липшиц-непрерывной границей. Введем следующие функциональные пространства:

$$\begin{aligned} H^1(\Omega) &= \{\psi \in L^2(\Omega) : \operatorname{grad} \psi \in L^2(\Omega)\}, \\ H_0^1(\Omega) &= \{\psi \in H^1(\Omega) : \psi|_{\Gamma_0} = 0\}, \\ H(\operatorname{curl}; \Omega) &= \{v \in [L^2(\Omega)]^3 ; \operatorname{curl} v \in [L^2(\Omega)]^3\}, \\ H_0(\operatorname{curl}; \Omega) &= \{v \in H_0(\operatorname{curl}; \Omega) ; v \times \vec{n}|_{\Gamma_0} = 0\}, \end{aligned}$$

где $L^2(\Omega)$ – пространство Лебега. Для элементов введенных пространств определим следующее скалярное произведение:

$$(u, v) = \int_{\Omega} u \cdot v \, d\Omega.$$

Для краевой задачи (3)–(4) сформулируем вариационную постановку [Niptmair, 2002]: *найти $E \in H_0(\operatorname{curl}; \Omega)$ такое, что $\forall v \in H_0(\operatorname{curl}; \Omega)$ выполняется:*

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \operatorname{curl} E \cdot \operatorname{curl} v \, d\Omega + \int_{\Omega} (i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) E \cdot v \, d\Omega = - \int_{\Omega} i\omega J \cdot v \, d\Omega. \quad (5)$$

Для краевой задачи (1)–(2) сформулируем вариационную постановку [Шайдуров, 1989]: *найти $\varphi \in H_0^1(\Omega)$ такое, что $\forall \psi \in H_0^1(\Omega)$ выполняется:*

$$\int_{\Omega} \operatorname{grad} \varphi \cdot (\sigma \operatorname{grad} \psi) \, d\Omega = \int_{\Omega} \operatorname{div} J \cdot \psi \, d\Omega. \quad (6)$$

Для введенных пространств имеет место следующее свойство вложения:

$$\text{grad } \psi \in H(\text{curl}; \Omega), \forall \psi \in H_0^1(\Omega), \quad (7)$$

так как $\text{curl grad } \psi = 0$. Вариационная постановка (5) выполняется для всех $v \in H(\text{curl}; \Omega)$, согласно (7), возьмем $v = \text{grad } \psi$, $\psi \in H_0^1(\Omega)$, и тогда (5) примет вид:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \text{curl } E \cdot \text{curl grad } \psi (i\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega = \int_{\Omega} -i\omega J \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega.$$

Учитывая свойство $\text{curl grad } \psi = 0$, получим:

$$\int_{\Omega} (i\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega = \int_{\Omega} -i\omega J \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega.$$

Далее, деля левую и правую части равенства на $-i\omega$ и устремляя частоту ω к нулю, получаем:

$$\int_{\Omega} \sigma E \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega = \int_{\Omega} J \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega.$$

Поскольку теперь мы имеем дело со стационарным источником тока, в правой части равенства положим $E = -\text{grad } \varphi$, а в левой части воспользуемся формулой интегрирования по частям и тем фактом, что $\psi \in H_0^1(\Omega)$. В результате получаем:

$$\int_{\Omega} \sigma \text{grad } \varphi \cdot \text{grad } \psi \, d\Omega = \int_{\Omega} \text{div } J \psi \, d\Omega.$$

Таким образом, вводя дополнительные условия стационарности на сторонний ток и используя свойства введенных пространств, из вариационной постановки (5) можно естественным образом получить вариационную постановку (6).

Для построения дискретного аналога вариационной задачи (5) будем аппроксимировать элементы пространства $H(\text{curl}; \Omega)$ элементами дискретного подпространства $H^h(\text{curl}; \Omega)$, в качестве базисных функций которого возьмем векторные элементы p порядка на тетраэдральной сетке [Webb, 1999]. Данные базисные функции можно разделить на две группы. Первая группа – это базисные функции, являющиеся градиентами скалярных функций $p+1$ порядка, а вторая группа функций – это функции, дополняющие первую группу до полного базиса подпространства $H^h(\text{curl}; \Omega)$. Используя множество данных скалярных функций, можно определить базис дискретного подпространства пространства $H_0^1(\Omega)$. Исходя из данного способа построения дискретных подпространств, аналогичным образом можно показать, что и из дискретной вариационной постановки для задачи (3)–(4) можно получить дискретную вариационную постановку для задачи (1)–(2), путем ввода аналогичных условий на источник стороннего тока.

Матрица системы линейных алгебраических уравнений и ее правая часть, построенные для вариационной задачи (5) с использованием введенных ранее базисных функций, будут иметь блочную структуру. Один из блоков будет сгенерирован при помощи базисных функций, являющихся градиентами скалярных функций. Элементы этой подматрицы, с точностью до множителей (зависящих от физических параметров конкретной задачи), будут соответствовать элементам матрицы линейных алгебраических уравнений, полученной после дискретизации вариационной задачи (6).

Для улучшения спектральных свойств матриц, получаемых после дискретизации исходных задач, можно ортогонализировать базисные функции. Полная ортогонализация привела бы к резкому увеличению количества ненулевых элементов матрицы. В [Webb, 1999] предлагается проводить частичную ортогонализацию, т. е. разбить базисные функции на множество групп, а затем выполнить ортогонализацию внутри каждой группы. Векторные базисные функции высоких порядков могут быть ассоциированы с ребром, гранью или с самим тетраэдром. Это зависит от того, как определяется степень свободы конкретной базисной функции: интегралом вдоль ребра, интегралом по грани или интегралом по всему геометрическому элементу соответственно. Поскольку одно ребро, грань или элемент для базисов высоких порядков ассоциированы с несколькими функциями, будем использовать это свойство в качестве разделителя на группы. Так же при разделении на группы будем учитывать, является ли базисная функция градиентом скалярной функции или нет. Определение групп ортогонализации подобным образом не приводит к увеличению количества ненулевых элементов матрицы, к изменению ее портрета, а также к изменению, ранее введенной, блочной структуры матрицы. В [Webb, 1999] для ортогонализации используется стандартное скалярное произведение, в данной работе базисные функции внутри одной группы ортогонализуются относительно билинейной формы, которая используется для построения вариационной постановки. В качестве метода решения систем линейных алгебраических систем будем использовать *symmetric QMR* [Freund, Nachtigal, 1995], являющийся вариантом метода QMR, ориентированного на решение СЛАУ с симметричными матрицами. В данном случае мы не можем использовать метод сопряженных градиентов, так как матрица задачи (3)–(4) не является положительно определенной.

Таким образом, мы можем иметь унифицированные типы данных и вычислительные методы для задач типа (1)–(2) и (3)–(4) в рамках одного программного комплекса. Особенно это полезно, когда необходимо смоделировать исследование одного и того же участка скважины при помощи различных типов каротажных приборов.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрим моделирование процесса каротажного зондирования при помощи разработанного единого подхода. В качестве тестовой геоэлектрической модели выберем трещиноватый флюидонасыщенный карбонатный коллектор, окруженный плохо проводящим изотропным пластом с удельным сопротивлением 1000 Ом·м (рис. 1). Наличие микротрещин в коллекторе на макроуровне будет отображаться как наличие анизотропных свойств у соответствующего удельного сопротивления. Отклонение направления распространения трещин от горизонтальной плоскости будет приводит к повороту главных осей анизотропии вокруг оси ОУ. Горизонтальное удельное сопротивление коллектора во всех тестах равно 100 Ом·м, вертикальное удельное сопротивление будет принимать значения 200 или

400 Ом·м, углы поворота диагонального тензора анизотропии будут равны 0, 30, 60 и 90 градусам, мощность – 5 м. Необходимо отметить, что в силу симметричности рассматриваемых зондов относительно оси OZ, поворот осей анизотропии относительно оси OX или одновременный поворот относительно осей OX и OY всегда можно свести к эквивалентной модели с поворотом осей только относительно оси OY, путем поворота результирующего тензора анизотропии относительно оси OZ.

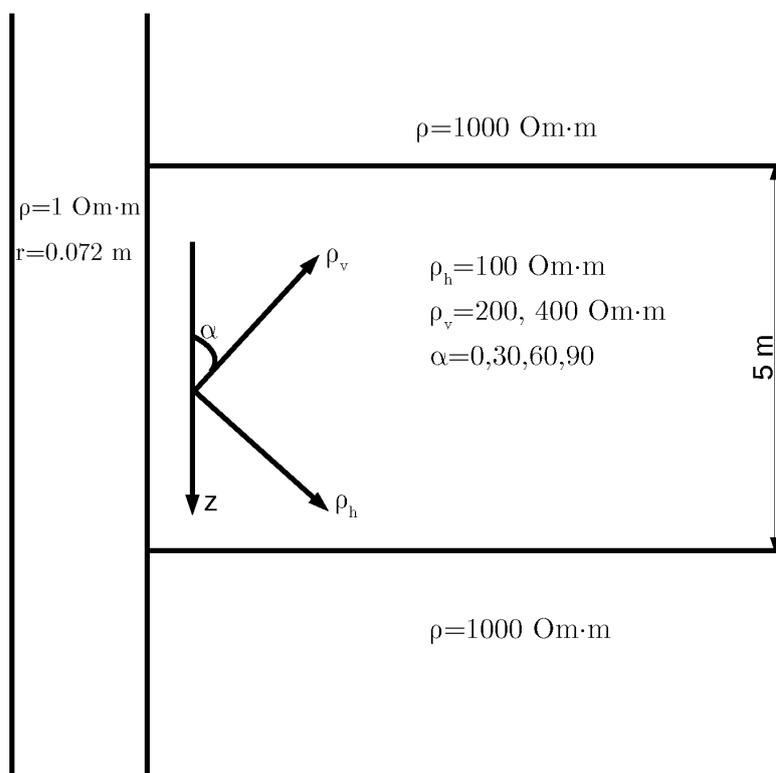


Рис.1. Тестовая геоэлектрическая модель

В качестве примера каротажного зонда с индукционным источником возбуждения электромагнитного поля возьмем зонд ВИКИЗ длиной 1.4 м с частотой тока в генераторной катушке 1.75 МГц. А в качестве примера зонда со стационарным гальваническим источником электромагнитного поля будем использовать зонд БКЗ А4.0М0.5N.

На рисунках 2 и 3 приведены каротажные диаграммы разностей фаз зонда ВИКИЗ 1.4 м в зависимости от значений вертикальной компоненты УЭС. Рисунки 4 и 5 содержат каротажные диаграммы кажущегося УЭС зонда БКЗ А4.0М0.5N в зависимости от значений вертикальной компоненты УЭС. Как следует из приведенных примеров моделирования каротажа трещиноватого коллектора, при интерпретации результатов измерений зондов также необходимо учитывать и угол наклона осей анизотропии – микротрещин пород, образующих коллектор. Особенно сильно влияние угла наклона будет сказываться на результатах, полученных при помощи зондов ВИКИЗ, так как в силу их конструктивных особенностей измерения этих зондов чувствительны только к эффективной горизонтальной составляющей тензора удельного сопротивления, которая, в свою очередь, при наличии угла наклона, зависит и от вертикальной составляющей диагонального (в системе координат относительно плоскости распространения трещин) тензора удельного сопротивления.

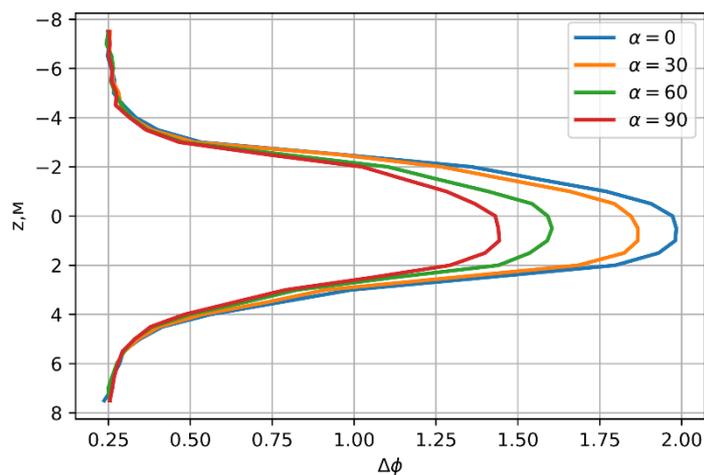


Рис. 2. Синтетические каротажные диаграммы разностей фаз зонда ВИКИЗ 1.4 м при вертикальной компоненте УЭС пласта 200 Ом·м и различных углах наклона главных осей анизотропии – α

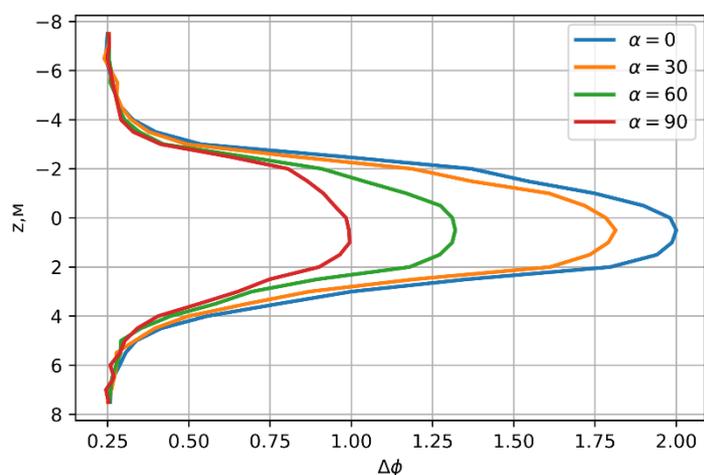


Рис. 3. Синтетические каротажные диаграммы разностей фаз зонда ВИКИЗ 1.4 м при вертикальной компоненте УЭС пласта 400 Ом·м и различных углах наклона главных осей анизотропии – α

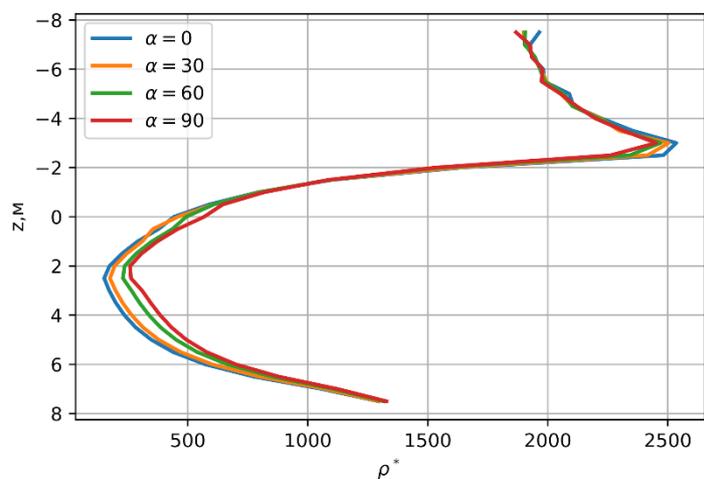


Рис. 4. Синтетические каротажные диаграммы кажущегося УЭС зонда БКЗ А4.0М0.5N при вертикальной компоненте УЭС пласта 200 Ом·м и различных углах наклона главных осей анизотропии – α

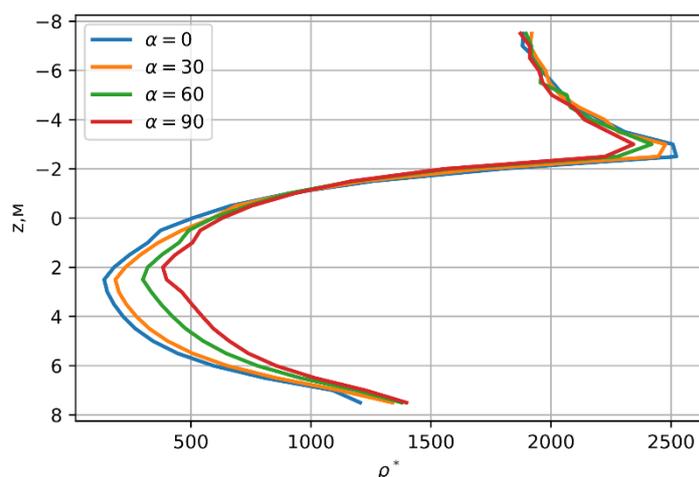


Рис.5. Синтетические каротажные диаграммы кажущегося УЭС зонда БКЗ А4.0М0.5N при вертикальной компоненте УЭС пласта 400 Ом·м и различных углах наклона главных осей анизотропии – α

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был рассмотрен единый подход к моделирования каротажных зондов, обладающих как стационарными, так и нестационарными источниками электрического поля. Данный подход позволяет осуществлять единую программную реализацию для различных методов электрокаротажа, что упрощает разработку методов и программ совместной инверсии каротажных данных, полученных при помощи зондов различного типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы Фонда научных исследований № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В.** Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и геофизика. – 2017. – № 58 (6). – С. 935–947, doi: 10.15372/GiG20170609.
- Сухорукова К.В., Нестерова Г.В., Примаков С.А.** Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 11с – С. 77–86, doi: 10.20403/2078-0575-2022-11с-77-86.
- Шайдуров В.В.** Многосеточные методы конечных элементов. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
- Freund R.W., Nachtigal N.M.** Software for simplified Lanczos and QMR algorithms // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – Vol. 19. – P. 319–341, doi: 10.1016/0168-9274(95)00089-5.
- Hiptmair R.** Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – P. 237–339, doi: 10.1017/S0962492902000041.
- Nédélec J.C.** A new family of mixed finite elements in \mathbb{R}^3 // Numerische Mathematik. – 1986. – Vol. 50. – P. 57–81, doi: 10.1007/BF01389668.
- Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I.** Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 2021. – Vol. 29 (2). – P. 295–304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.

Webb J.P. Hierarchal vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47 (8). – P. 1244–1253, doi: 10.1109/8.791939.

REFERENCES

Freund R.W., Nachtigal N.M. Software for simplified Lanczos and QMR algorithms // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – Vol. 19. – P. 319–341, doi: 10.1016/0168-9274(95)00089-5.

Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – P. 237–339, doi: 10.1017/S0962492902000041.

Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Joint inversion of induction and galvanic logging sounding data in axisymmetric geological models // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – Vol. 58 (6). – P. 752–762, doi: 10.1016/j.rgg.2016.09.032.

Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I. Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 2021. – Vol. 29 (2). – P. 295–304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.

Nédélec J.C. A new family of mixed finite elements in \mathbb{R}^3 // Numerische Mathematik. – 1986. – Vol. 50. – P. 57–81, doi: 10.1007/BF01389668.

Shaydurov V.V. Multigrid Finite Element Methods. – Nauka, Moscow, 1989. – 288 p.

Sukhorukova K.V., Nesterova G.V., Primakov S.A. Identification of the fringing zone during joint inversion of galvanic and electromagnetic logging probing signals measured simultaneously and at different times // Geology and Mineral Resources of Siberia. – 2022. – Vol. 11s. – P. 77–86.

Webb J.P. Hierarchal vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47 (8). – P. 1244–1253, doi: 10.1109/8.791939.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование электромагнитных полей в геофизических приложениях, метод конечных элементов, численные методы решения обратных задач электродинамики.

ЭПОВ Михаил Иванович – доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; управляющий директор СНИИГГиМС. Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; директор Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.



ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЙКАЛЬСКОМ И АЛТАЙСКОМ РЕГИОНАХ

В.Ю. Тимофеев¹, А.В. Тимофеев¹, В.М. Семибаламут²

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

²Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук” Сибирский филиал, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

e-mail: TimofeevVY@ipgg.sbras.ru

В работе рассматриваются результаты многолетних измерений скорости современной деформации в штольне, в скважине и на земной поверхности. Используются короткобазисные (кварцевые наклонометры и лазерные деформографы, датчики уровня воды, база от метров до десятков метров) и длиннобазисные (комплекты спутниковой навигации, база измерения деформаций от десятков до сотен километров) средства измерений. Выделены косейсмические скачки деформации (до 10^{-6}) в Байкальском и Алтайском регионах. Годовые межсейсмические скорости деформирования ($5 \cdot 10^{-8}$) в регионах оказались сходными.

Современные скорости деформации земной коры, лазерные деформографы, наклонометры, ультразвуковые датчики уровня воды, приемники космической геодезии, Байкальский и Алтайский сейсмоактивные регионы

DEFORMATION MEASUREMENT AT BAIKAL AND ALTAY REGIONS

V.Yu. Timofeev¹, A.V. Timofeev¹, V.M. Semibalamut²

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

*²Federal Research Center “United Geophysical Survey of the RAS”, Siberian Branch,
Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

e-mail: TimofeevVY @ipgg.sbras.ru

The paper presents the results of velocity observations for current deformation in underground gallery, In wells and on earth surface. Different instruments were used: short-base quartz tiltmeters and laser extensometers, sensors of water level with meters base, and long-base sensors (spacy geodynamic instruments with kilometers bases). Coseismic deformation jumps obtained (up to 10^{-6}) at Baikal and Altay regions. Annual velocities (at $5 \cdot 10^{-8}$ level) were registered at Baikal and Altay.

Modern deformation velocities for earth surface, laser extensometers, tiltmeters, ultrasound sensor of water level, spacy geodesy receivers, seismic-active Baikal and Altay regions

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что разрушение материалов происходит при достижении уровня критических деформаций в упругой среде. Факт образования протяженных разрывов, картируемых на земной поверхности при сильных землетрясениях, позволяет связывать подготовку землетрясений с процессами деформирования земной коры. В таком случае само сейсмическое событие есть результат быстрого

высвобождения упругой энергии, накопившейся в геологической среде. Измерения смещений и деформаций пунктов, расположенных на земной поверхности, различными методами проводятся многие десятилетия [Jahr et al., 2006; Takemoto et al., 2006; Чупин, 2019]. Множество известных результатов относится к измерениям в зонах сильных землетрясений и крупных промышленных объектов [Лухнев и др., 2021; Долгих, Долгих, 2022]. Такие исследования проводятся для поиска предвестников и уточнения параметров землетрясений, определения величины тектонических эффектов, определения критического уровня техногенных деформаций. Методы измерений изменения положений точек на поверхности относятся как к геодезии, так и к геофизике [Agnew, 1986]. Измерения деформаций проводятся на различных базах от долей метра до сотен километров. Существенные различия в методах и технологиях имеются при измерениях на земной поверхности и в глубине. Задача нашего исследования – проиллюстрировать возможности и результаты многолетних измерений разными системами: деформографами, наклономерами, датчиками уровня в скважинах, приемниками космической геодезии на примерах, полученных при многолетних наблюдениях в сейсмоактивных регионах Сибири (Байкальская рифтовая система и Горный Алтай).

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА

В нашей стране деформографические и наклономерные измерения широко использовались в сейсмоактивных регионах СССР и в зонах строительства крупных гидроэлектростанций [Островский, 1978; Гриднев и др., 1989]. При проведении измерений на земной поверхности и в подземных штольнях было отмечено существенное отличие в уровне регистрируемых квазисуточных вариаций. Известно, что температурные наклоны и деформации (неприливные периодические) в основном вызваны периодическим неравномерным нагревом поверхности при суточном вращении Земли [Попов, 1961]. Неоднородности в нагреве земной поверхности возникают из-за расчлененности рельефа, наличия зданий, различий в цвете пород поверхности и коэффициентах теплопроводности. Как следует из известных аналитических выражений [Попов, 1961], наклоны на поверхности при обычных параметрах рельефа (1–5 км) составляют от 0.1 до 1 с дуги (для деформаций до 10^{-6}). При заглаблении пункта измерений происходит экспоненциальное затухание величины эффекта, а уже с глубин 10 м и больше появляется возможность, помимо долговременных вариаций деформаций, связанных с тектоническими и сейсмическими эффектами, изучения эффектов земных приливов (50 мс дуги в наклонах и $3 \cdot 10^{-8}$ деформациях) и собственных колебаний Земли.

Кратко остановимся на конструкции приборов (наклономер, деформограф и система космической геодезии), которые использовались в наших экспериментах для изучения деформаций на уровне от 10^{-6} до 10^{-9} , что соответствует наклонам земной поверхности от секунд дуги до миллисекунд дуги. В наклономерах датчиком наклона является кварцевый или металлический маятник на цельнеровском подвесе. Известно, что при медленных движениях чувствительность такой системы пропорциональна квадрату периода. Для длиннопериодного горизонтального маятника – маятника Цельнера – компонента силы тяжести наклонной под углом Z к вертикальной плоскости равна $g \cdot \cos Z$. Следовательно, период маятника длиной L равен:

$$T = 2\pi[L/(g \cdot \cos Z)]^{1/2}. \quad (1)$$

По мере приближения маятника к горизонтальному положению ($Z \rightarrow \pi/2$) период колебаний приближается к бесконечности, возрастает чувствительность, но маятник теряет устойчивость для наклономеров $T_{\max} = 60$ с. При измерениях в штольнях с низким уровнем шумов нами достигался период в 15–20 с, что достаточно сложно и требует долгого времени установки. На поверхностных пунктах использовались периоды 2–4 с, что, естественно, резко увеличивало диапазон измерений.

Обычно при измерениях в штольнях используются как штанговые системы регистрации деформаций, так и лазерные. Кратко остановимся на описании используемого нами лазерного деформографа. Данный тип приборов относится к гетеродинным фазочувствительным лазерным измерителям малых перемещений на больших базах. В его основу положена двухчастотная интерферометрическая система с двумя синхронизированными по фазе лазерами [Багаев и др., 1992]. Принцип действия системы состоит в непрерывной регистрации изменения фазы волны во времени, обусловленной эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта, так что

$$\Delta l = (\Delta\varphi(t)/2\pi)\lambda/2 = (\lambda/4\pi) \int_0^T \Omega(t) dt, \quad (2)$$

где Δl – регистрируемое перемещение, $\Delta\varphi(t)$ – разность фаз, λ – длина волны и $\Omega(t)$ – частотный доплеровский сдвиг, зависящий от времени, а T – время измерения. Чувствительность системы в реальных условиях штольни при стабильных значениях температуры (суточные вариации 0.001 °C) ограничена воздействием вариаций атмосферного давления, поэтому была экспериментально реализована лазерная интерферометрическая система с опорным компенсационным плечом. Без специальной экранировки каждого из двух измерительных плеч в такой системе удалось исключить влияние медленных суточных вариаций метеопараметров на деформационный сигнал и поднять относительную чувствительность к перемещениям в приливном диапазоне частот более чем на два порядка, достигнув величины 10^{-9} – 10^{-11} . Конечно, даже при измерениях при стабильной температуре в регистрируемом сигнале остаются сезонные метеовлияния.

Периодические колебания уровня в глубоких скважинах известны давно. В таком случае ограниченная пластом жидкость действует как объемный деформограф. Малые объемные дилатации порядка 10^{-8} вызывают наблюдаемые приливные колебания водного уровня от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Такие флуктуации противоположны по фазе с приливным потенциалом: низкий прилив вызывает сжатие, которое повышает уровень жидкости. Наблюдения за долговременными изменениями уровня позволяет надеяться на определение параметров длиннопериодных эффектов. Регистрация измерений водного уровня проводилась с помощью установленного в скважине датчика давления, чувствительность системы составляла 0.1 мм. Известны трудности калибровки такого инструмента при измерениях объемной деформации пласта, но комплекс таких измерений с приливными деформографическими определениями позволяет определить упругий коэффициент для отдельной скважины, который можно использовать для изучения многолетних вариаций.

Рассматривая возможности метода космической геодезии, отметим, что основная проблема при вычислении расстояния до спутника системы спутниковой навигации связана с синхронизацией часов на спутнике и в приемнике. Даже мизерная погрешность может привести к огромной ошибке в определении расстояния. Каждый спутник несет на борту высокоточные атомные часы, которые встроить в обычный приемник невозможно. Чтобы скоррелировать временное рассогласование и избежать огромных ошибок в позиционировании, в систему спутниковой навигации введен принцип избыточности для определения

трехмерных координат на поверхности Земли. Обычно приемник использует сигналы не трех, а как минимум четырех спутников и на основании вспомогательных сигналов вносит все необходимые коррективы в работу своих часов. Кроме навигационных сигналов спутник непрерывно передает различную служебную информацию. Приемник получает, например, эфемериды (точные данные об орбите спутника), прогноз задержки распространения радиосигнала в ионосфере, а также сведения о работоспособности спутника. Элементы орбит известны с высокой точностью и корректируются 2–3 раза в день; также корректируются и высокоточные часы, точность которых сравнима с атомными часами – порядка 3 нс. Точность, достигаемая при таком использовании группового сигнала, в настоящее время составляет лишь несколько метров. Принципиально новые возможности системы были обнаружены в экспериментах по оценке фазовых задержек сигнала. Инструментальная точность приема фазовых сигналов составляет 0.2 мм в расчете расстояния до спутника, однако, сами отсчеты изначально содержат неоднозначность в виде неизвестного целого числа длин волн, а также подвержены искажающему влиянию ряда факторов, в первую очередь, задержек сигнала, связанных с прохождением через ионосферу и тропосферу. Разрешение указанных неоднозначностей и устранение искажений позволили достичь точности измерения взаимных расстояний 1–2 мм, что обусловило возможность применения системы для геодинимических исследований. Нами при геодинимических исследованиях используются двухчастотные приемники космической геодезии при накоплении сигнала в 36 и более часов. Постобработка данных проводится по специальным программам с использованием данных мировых постоянных станций и комплекса спутниковых поправок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ШТОЛЬНЕ, В СКВАЖИНЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ

Наиболее широкий спектр методов измерения деформаций представлен на сейсмостанции Талая (координаты 51.68°N, 103.64°E), расположенной на берегу озера Байкал (рис. 1).



Рис. 1. Положение станции Талая в 4 км к западу от берега озера Байкал, южнее Главного Саянского разлома

Байкальский регион известен своей высокой сейсмичностью. Станция Талая находится в нескольких километрах южнее Главного Саянского разлома – границы Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы. Здесь имеется горизонтальная 90-метровая штольня, пройденная в северном склоне горной гряды, что минимизирует температурные эффекты. Суточные вариации

температуры в 90 м от входа составляют 0.001 °С, годовые вариации от 1 °С зимой до 2 °С летом. В штольне и были установлены наклонометры и деформографы различных систем. В 100 м от штольни у южного склона долины ручья Талая расположена 120-ти метровая скважина, пройденная в архейских мраморах. В штольне отмечены гранито-гнейсовые интрузии с проявлениями слюды. Кондиционные данные по деформациям получены разными методами в период с 1985 по 2015 гг. Отдельные примеры записи зарегистрированных наклонов, деформаций и вариаций уровня воды в скважине приведены на рис. 2–5.

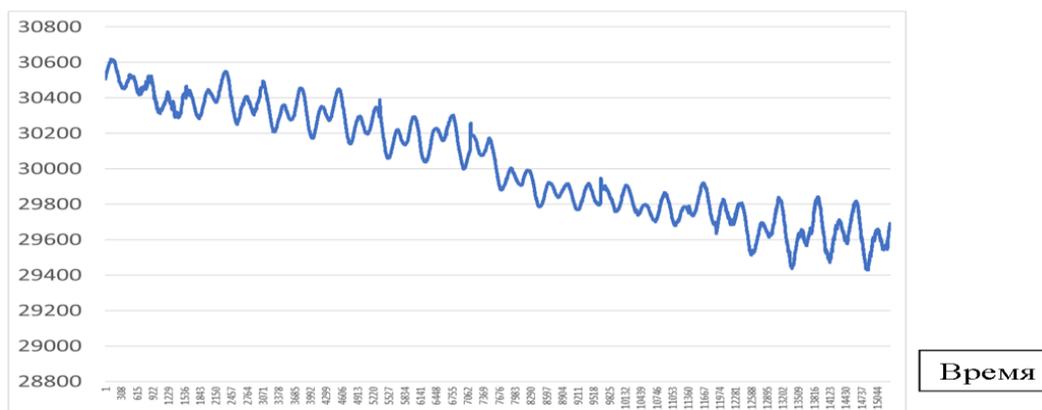


Рис. 2. Ход наклона (В–3) в период 23.06.1999, 03 часа 00 минут по 1999.07.14, 09 часов 00 минут, шаг 60 секунд. Горизонтальная шкала – время (минуты), вертикальная шкала – наклон (10^{-7} секунды дуги = 200 делений шкалы). Выделяются двухнедельные вариации амплитуды (низкий и высокий прилив), связанные с положением Луны (лунным месяцем)

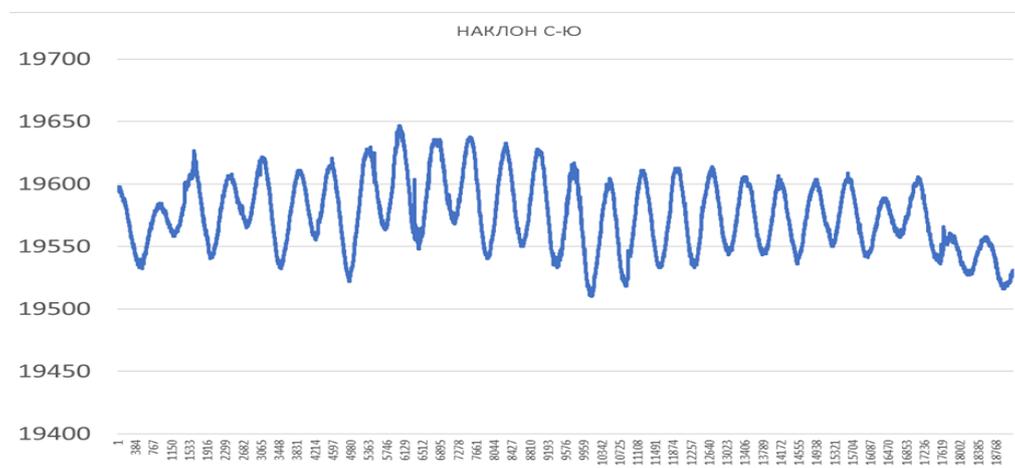


Рис. 3. Ход наклона (С–Ю) в период 03.09.1999, 17 часов 00 минут по 17.09.1999, 00 часов 00 минут, шаг 60 секунд. Горизонтальная шкала – время (минуты), вертикальная шкала – наклон (50 делений шкалы= 10^{-7} секунды дуги)

На основе данных многолетних измерений проведено изучение приливных вариаций наклонов и деформаций [Тимофеев и др., 2008; Ducarme et al., 2008]. Полученные результаты хорошо соответствуют статической (упругие деформации) и динамической (резонанс жидкого ядра Земли) теории приливных деформаций (модель приливной деформации Земли DDW99 и модели океана TPX06) [Dehant et al., 1999]. В результате имеется возможность точного расчета эффектов по разным компонентам прилива,

например, определить коэффициент связи объемной деформации и уровня воды в скважине, что позволяет проанализировать вариации уровня, как изменения объемной деформации (рис. 4 и 6).

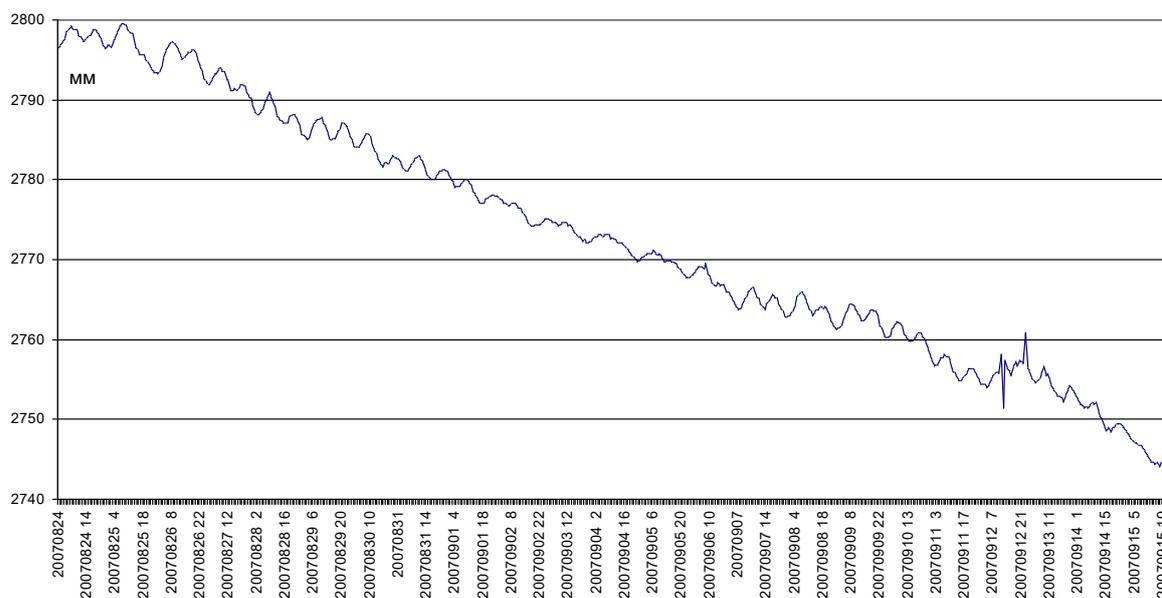


Рис. 4. Приливные вариации водного уровня в миллиметрах по данным наблюдений ультразвуковым датчиком. На графике показана почасовая серия наблюдений с 24.08.2007 по 16.09.2007 (приливная амплитуда до 0.2 см) [Тимофеев и др., 2012]

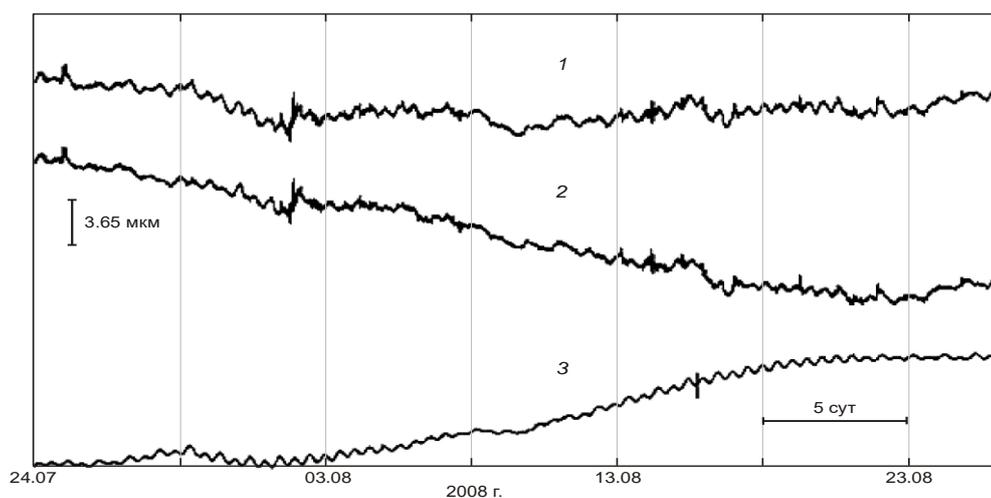


Рис. 5. Результаты наблюдений лазерным деформографом за месяц до Култукского землетрясения (27.08.2008 г., $M = 6.3$, $L = 25$ км). Ход деформации по двум направлениям $-24^\circ N$ (1) и 66° (2) и разностная деформация (3), база деформографов 25 м, штольня сейсмостанции Талая [Тимофеев и др., 2020]

Из короткопериодных вариаций хода деформации следует выделить косейсмический скачок деформаций в момент Култукского землетрясения (27.08.2008 г., $M = 6.3$), случившегося в 25 км от сейсмостанции. Отклик был получен на всех деформографических устройствах (кварцевые наклонометры, лазерные деформографы, уровнемеры). Скачок объемной деформации составил $\Delta = +1 \cdot 10^{-6}$ (см. рис. 6). Полученные результаты вместе с данными о косейсмических смещениях и использованием решения прямой задачи при дислокационной модели землетрясения [Toda et al., 2009], позволили уточнить

положение эпицентра Култукского землетрясения, случившегося в районе акватории озера Байкал (рис. 7).

Рассмотрим многолетние изменения скорости деформации, используя изменения за месяц и за год (рис. 8–10). Оценим вклад годовых вариаций уровня (1 м) озера Байкал, расположенного в 4 км к востоку от станции. В упругом решении для годового изменения деформаций получаем значение 10^{-8} , что и определяет нижний уровень представительности для многолетних наблюдений наклонов и деформаций.

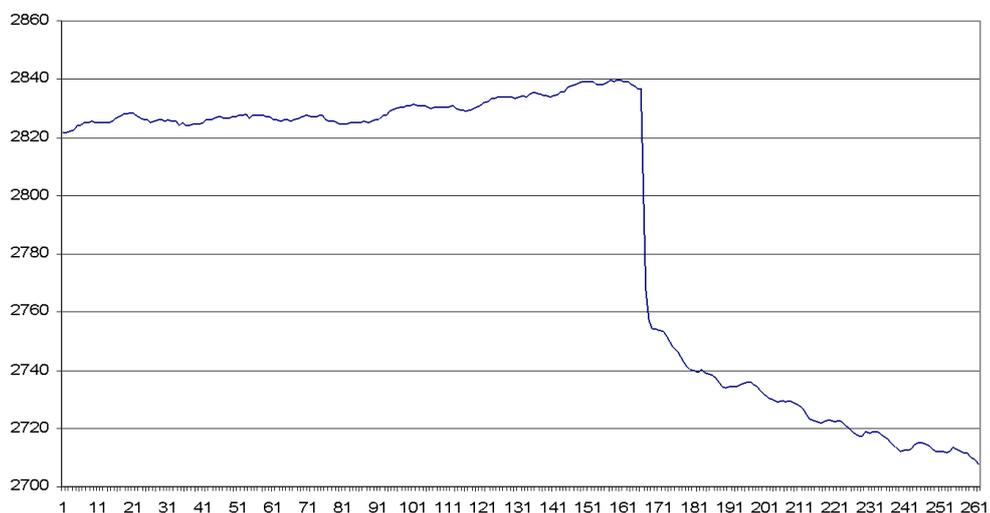


Рис. 6. Вариации уровня воды в скважине Талая (с 13 ч 20.08.2008 до 10 ч 31.08.2008 г.) скачок 10–11 ч 27.08.2008 – землетрясение, при часовой дискретизации записи. Время местное. По вертикальной оси – мм, по горизонтальной – часы. Упругий коэффициент получен из приливного анализа $dH/d\epsilon = 0.10$ мм/нстр. Нстр – нанострейн 10^{-9} [Тимофеев и др., 2012]. Косейсмический скачок объемной деформации составил: $\Delta = +1 \cdot 10^{-6}$

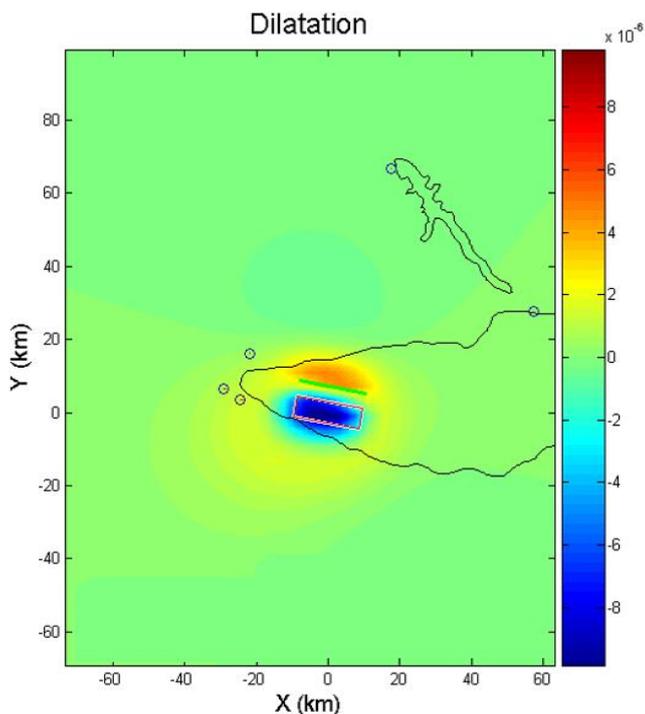


Рис. 7. Моделирование косейсмической объемной деформации (координаты Култукского землетрясения 27.08.2008: 51.62° N, 104.06° E, $M = 6.3$, параметры очага 101-61-55 – ориентация разрыва, угол падения разрыва, ориентация смещения по разрыву в градусах). Дислокационная модель землетрясения, сейсмическая подвижка в упругом полупространстве [Toda et al., 2009] по данным [<http://www.seismo.crust.irk.ru>]

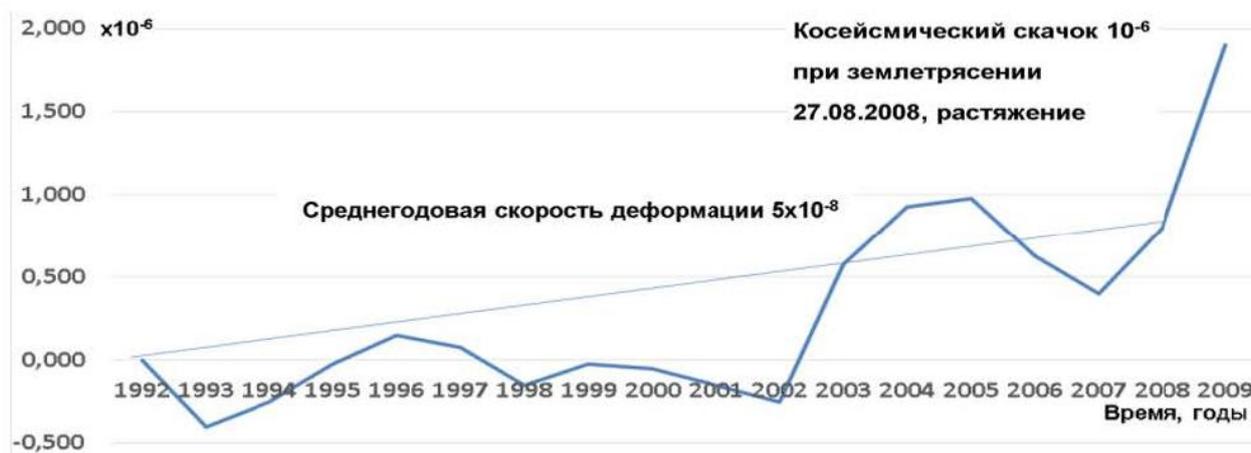


Рис. 10. Изменение объемной деформации по данным, полученным лазерными деформографами в штольне сейсмостанции Талая [Тимофеев и др., 2020]

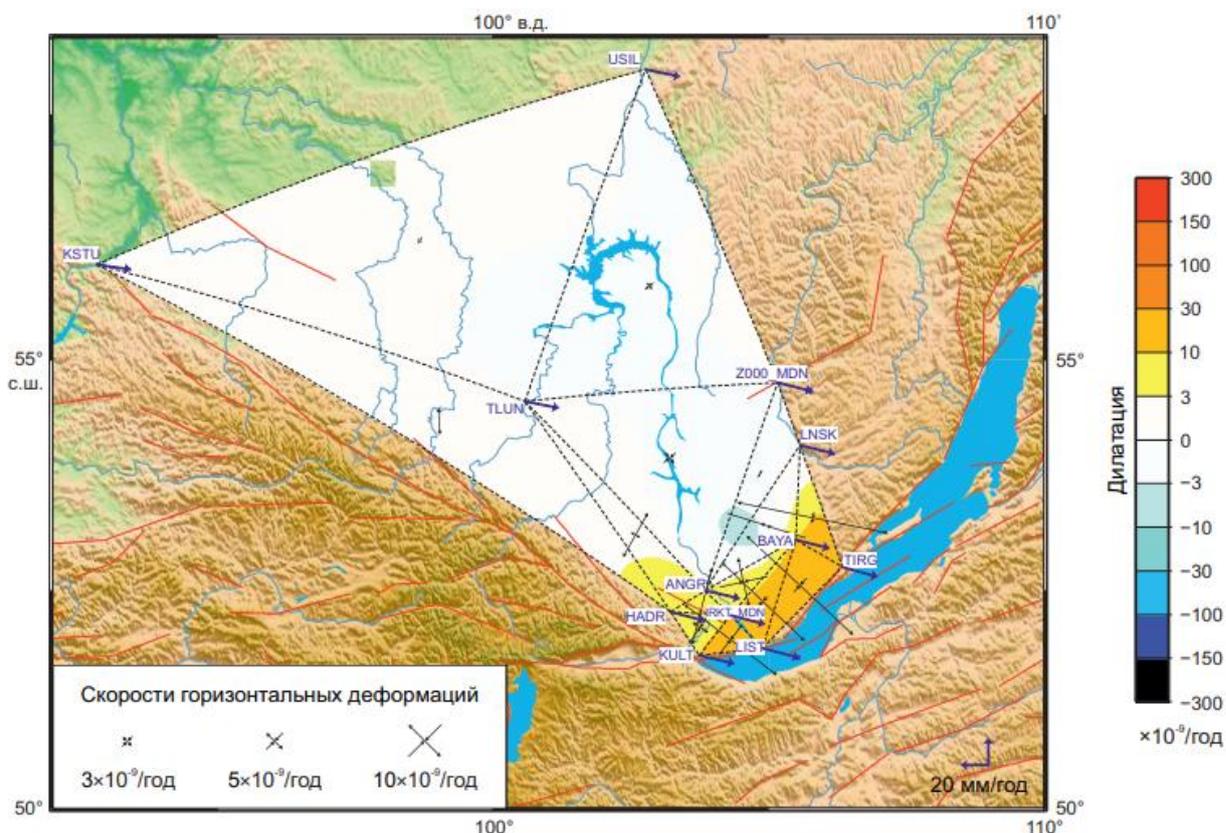


Рис. 11. Скорости дилатации и главных деформаций по определениям методом космической геодезии на Сибирской платформе и в юго-западной части Байкальской рифтовой системы [Ашурков, 2022]

Ход уровня воды в скважине за период 1993–2009 гг. показывает сильное влияния климатических сезонных вариаций, в основном связанных с проникновением осадков в скважину (рис. 9). Многолетние вариации уровня имеют период 11 лет [Тимофеев и др., 2012].

Изменения объемной деформации до данным измерений по двум осям в штольне за период 1992–2009 гг. приведены на рис. 10. При этом среднегодовая скорость деформации составила $5 \cdot 10^{-8}$. Появление методов космической геодезии позволяет сравнить данные, полученные на метровых базах, с данными определений на многокилометровых. Как следует из определений, представленных на рис. 11,

полученные на Талой данные в целом соответствуют GPS скоростям деформирования Байкальской рифтовой системы, а для Сибирской платформы скорости GPS деформирования минимум на порядок меньше и не превышают 10^{-9} .

Измерения смещений и деформаций в сейсмоактивном регионе – Горном Алтае – продолжаются ежегодно с лета 2000 г. Сеть измерений в южной части региона показана на рис. 12.

Таблица 1

Координаты пунктов Алтайской сети

Код станции	Широта φ, градусы	Долгота λ, градусы	Высота Н, м
SEMI	51.014	85.626	1483
USTK	50.939	84.769	1003
BALY	50.703	88.002	1259
CHIK	50.644	86.313	1710
YAZU	50.586	88.851	1544
ULAG	50.500	87.654	2039
KURA	50.245	87.890	1470
KAYT	50.146	85.439	1038
KAIT	50.145	85.464	983
CHAG	50.068	88.417	1710
UKOK	49.562	88.232	2323

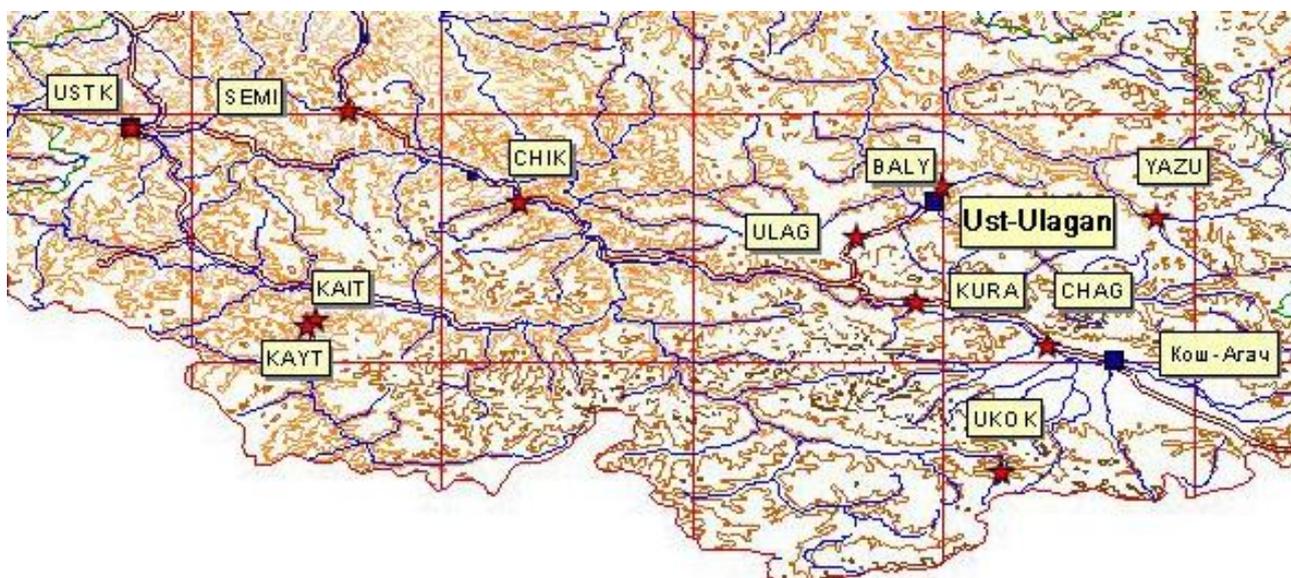


Рис. 12. Положение и коды GPS станций Алтайской геодинимической сети в южной части Горного Алтая (табл. 1). Приведены дорожная и гидросеть

По данным измерений методом космической геодезии в период 2003–2004 гг. зарегистрирован правосторонний скачок смещений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (координаты эпицентра 50.0° N, 88.1° E, $M = 7.3–7.5$) [Гольдин и др., 2005]. Относительное смещение на сейсмическом разрыве достигало 2 м. Ориентация смещений по определениям на пунктах KURA (155° N) и CHAG (125° N) в

среднем составила $140^\circ \text{ N} \pm 15^\circ$, что соответствует геологическим и сейсмологическим определениям ориентации сейсмического разрыва. Косейсмическое правостороннее смещение по нашим данным в зависимости от расстояния меняется от 0.40 м в 11 км от разрыва до 0.04 м в 90 км. Его можно описать в рамках упругой модели сдвига на вертикальном разломе. В целом для описания процесса землетрясения можно использовать модель упругой отдачи. По данным (2003–2004 гг.), полученным в эпицентральной части Чуйского землетрясения, определено положение главных деформаций по треугольникам: UKOK, KAIT, CHIK; KURA, ULAG, BALY; KURA, BALY, YAZU; CHAG, YAZU, KURA. Базы треугольников составляли от десятков до сотен километров. Косейсмический скачок даже на больших базах составил несколько единиц на 10^{-6} и соответствовал модельным расчетам по [Toda et al., 2009].

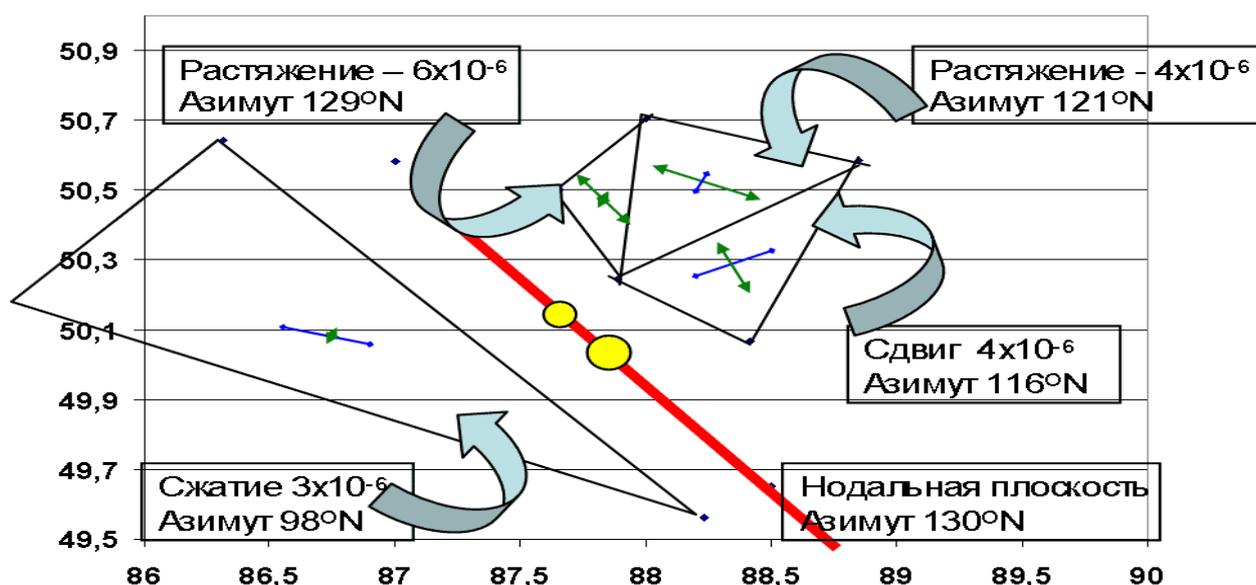


Рис. 13. Косейсмические деформации при Чуйском землетрясении 27.09.2003 по данным измерений методом космической геодезии (2003–2004 гг.). По данным пунктов UKOK, KAIT, CHIK; KURA, ULAG, BALY; KURA, BALY, YAZU; CHAG, YAZU, KURA. Красная линия – схематическое положение сейсмического разрыва (ориентация по сейсмическим данным 130° N , глубина по разным определениям от 10 до 26 км, разрыв субвертикален и выходит на поверхность). Желтыми кружками показано положение главного события 27.09.2003 и следующего сильного афтершока 01.10.2003

Оценка уровня межсейсмических деформаций проведена по данным измерений на пунктах KAIT, KAYT, USTK, расположенных 200–300 км от эпицентра Чуйского землетрясения. Пункт KAYT является измерительным полигоном Института лазерной физики СО РАН [Багаев и др., 1992], где проводятся регулярные измерения лазерными дальномерными системами, абсолютными лазерными баллистическими гравиметрами и системами космической геодезии. Измерения методом космической геодезии показали, что среднегодовая скорость деформации 2-х километровой линии KAIT–KAYT (рис. 12), простирающейся с запада на восток, за период 2001–2021 гг. составила $+2 \cdot 10^{-8}$ (растяжение). Линия расположена на резко пересеченном рельефе в межгорной долине у реки Катунь и ее притоков. Для линии KAIT–USTK (см. рис. 12), составляющей 100 км, изменение в период Чуйского землетрясения (2003–2004 гг.) составило $+3 \cdot 10^{-8}$ (растяжение). Среднегодовая скорость деформирования линии KAIT–USTK за период 2001–2021 гг. составила $-5 \cdot 10^{-8}$ (сжатие).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследование деформаций в регионе позволяет переходить к прогнозу и оценке сейсмической опасности, но оценка полной величины накопленных деформаций в среде возможна пока только качественными геологическими методами. Количественно же мы можем оценить скорость изменения деформаций и косейсмический скачок, что позволяет приблизительно определить время подготовки землетрясения. Изучение современных деформаций в отдельных регионах Земли в настоящее время отличается большим разнообразием методов. Появилась возможность рассматривать смещения и деформации для Азии на различных масштабных уровнях (тектоническая плита – сейсмоактивный регион – граница плиты и региона – глубинный разлом и отдельный измерительный пункт). Использование наклономеров и деформографов, установленных в штольне сейсмостанции Талая, а также регистрация уровня воды в скважине позволили оценить уровень приливных эффектов. Оказалось, что полученные результаты хорошо соответствуют статической (упругие деформации) и динамической (резонанс жидкого ядра Земли) теории приливных деформаций (модель приливной деформации Земли DDW99 и модели океана TRX06). Быстрые изменения деформаций в момент сильного регионального землетрясения были зарегистрированы всеми системами и позволили уточнить параметры Култукского землетрясения 27.08.2008 г., с использованием решения прямой задачи. Многолетние вариации наклонов, регистрируемых в штольне на базе в несколько метров, отражают периодическое деформирование края блока земной коры Байкальской рифтовой системы, а ход наклона коррелирует с сильными региональными землетрясениями ($M \geq 5$ на расстоянии до 200 км). Деформации на базе в 25 м за 17-ти летний период наблюдений показали среднегодовую скорость изменений $5 \cdot 10^{-8}$, что хорошо совпадает с результатами измерений методами космической геодезии в этом регионе. Использование метода спутниковой навигации в Горном Алтае показало его высокую эффективность при определении величины косейсмической деформации в эпицентре Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. При этом изменения деформации в эпицентральной зоне на базах от десятков до сотен километров оказалось на уровне 10^{-6} . Величина межсейсмических изменений оценивалась на расстоянии в 200–300 км от эпицентра. Годовая скорость деформации на базе в 100 км за 20-ти летний период наблюдений составила $5 \cdot 10^{-8}$. В целом межсейсмические скорости деформации Алтайского региона совпадают с величинами скоростей, зарегистрированных в Байкальской рифтовой зоне. Контроль за скоростью накопления деформаций в отдельных точках среды позволяет надеяться на выделение потенциально опасных областей будущих природных и техногенных катастроф.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН, номер FWZZ-2022-0019 «Механизмы воздействия природных и техногенных факторов на процессы в геосферах по результатам мониторинга естественных геофизических полей».

ЛИТЕРАТУРА

- Ашурков С.В.** Деформация южной части Сибирской платформы по данным GPS измерений // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – № 13 (1), 0628, doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0628.
- Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П.** Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли. – 1992. – № 1. – С. 85–91.
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г.** Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Доклады академии наук. – 2005. – № 405 (6). – С. 804–809.

- Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю.** Наклоны земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС // Геология и геофизика. – 1989. – № 30 (3). – С. 116–122.
- Долгих Г.И., Долгих С.Г.** Деформационные аномалии как индикатор генерации цунами // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – № 502 (2). – С. 77–82, doi: 10.31857/S2686739722020050.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Саньков А.В., Бызов Л.М.** Тектонические деформации и последующие сейсмические события юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – № 500 (1). – С. 58–63, doi: 10.31857/S2686739721090139.
- Островский А.Е.** Деформации земной поверхности по наблюдениям наклонов. – М.: Наука. – 1978. – 184 с.
- Попов В.В.** О температурных деформациях земной поверхности // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1961. – № 7. – С. 3–10.
- Тимофеев В.Ю., Дюкарм Б., Ван Раумбеке М., Горнов П.Ю., Эвераерт М., Грибанова Е.И., Паровышний В.А., Семибаламут В.М., Веспельман Г., Ардюков Д.Г.** Трансконтинентальный приливный профиль: Атлантическое побережье Европы – Юг Сибири – Тихоокеанское побережье России // Физика Земли. – 2008. – № 5. – С. 42–54.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Ярошевич А.В., Горнов П.Ю.** Об оценке косейсмической деформации, параметров пороупругости и трещиноватости среды по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. – 2012. – № 7–8. – С. 89–102.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Семибаламут В.М., Фомин Ю.Н., Панов С.В., Парушкин М.Д.** Применение деформографов в исследовании колебательных процессов в широком частотном диапазоне // Сейсмические приборы. – 2020. – Т. 56 (1). – С. 5–24, doi: 10.21455/si2020.1-1.
- Чупин В.А.** Томография морского дна береговыми лазерными деформографами // Физика геосфер. 11-й Всероссийский симпозиум: Материалы докладов, 9–14 сентября 2019 г. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. – С. 205–208.
- Agnew D.C.** Strainmeters and tiltmeters // Reviews of Geophysics. – 1986. – Vol. 24 (3). – P. 579–624, doi: 10.1029/RG024i003p00579.
- Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.** Tides for a convective Earth // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104 (B 1). – P. 1035–1058, doi: 10.1029/1998JB900051.
- Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M., Gornov P.Y., Parovishnii V.A., van Ruymbeke M.** A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections // Journal of Geodynamics. – 2008. – Vol. 45 (2–3). – P. 73–82, doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001.
- Jahr T., Kroner C., Lippmann A.** Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics. – 2006. – Vol. 41 (1–3). – P. 205–212, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.017.
- Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y.** A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // Journal of Geodynamics. – 2006. – Vol. 41. – P. 23–29, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.009.
- Toda S., Steina R., Lin J., Sevilgen V.** Coulomb 3. Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching / USGS Earthquake Hazards Program – Northern California, 2003–2009. – Режим доступа: <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling>.

REFERENCES

- Agnew D.C.** Strainmeters and tiltmeters // *Reviews of Geophysics*. – 1986. – Vol. 24 (3). – P. 579–624, doi: 10.1029/RG024i003p00579.
- Ashurkov S.V.** Deformation of southern part of Siberian platform by GPS data // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2022. – Vol. 13 (1), Article 0628, doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0628.
- Bagaev S.N., Orlov V.A., Fomin Yu.N., Chebotaev V.P.** Geterodin laser extensometers for precise geophysical observations // *Fizika Zemli*. – 1992. – Vol. 1. – P. 85–91.
- Chupin V.A.** Tomography of the marine bottom by cost laser extensometers // *Physics of Geospheres. Proceedings of 11th All-Russia Symposium, Vladivostok, 9–14 September 2019*. – TOI FEB RAS, Vladivostok, 2019. – P. 205–208.
- Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.** Tides for a convective Earth // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104 (B 1). – P. 1035–1058, doi: 10.1029/1998JB900051.
- Dolgikh G.I., Dolgikh S.G.** Deformation anomalies as an indicator of tsunami generation // *Doklady Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 502 (1–2). – P. 25–30, doi: 10.1134/S1028334X22020052.
- Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M., Gornov P.Y., Parovishnii V.A., van Ruymbeke M.** A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections // *Journal of Geodynamics*. – 2008. – Vol. 45 (2–3). – P. 73–82, doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001.
- Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardukov D.G.** Displacements surface fields at Chuiskoe earthquake zone, Gornii Altay // *Doklady Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 405 (6). – P. 804–809.
- Gridnev D.G., Sarycheva Yu.K., Timofeev V.Yu.** The slopes of the Earth's surface in the water reservoir zone of the Irkutsk Hydroelectric Power Station // *Geologiya i Geofizika*. – 1989. – Vol. 30 (3). – P. 116–122.
- Jahr T., Kroner C., Lippmann A.** Strainmeters at Moxa observatory, Germany // *Journal of Geodynamics*. – 2006. – Vol. 41 (1–3). – P. 205–212, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.017.
- Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Sankov A.V., Byzov L.M.** Tectonic deformations and subsequent seismic events in the southwestern flank of the Baikal Rift System based on GPS data // *Doklady Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 500 (1). – P. 756–760, doi: 10.1134/S1028334X21090130.
- Ostrovsky A.E.** Deformation of Earth surface by tilts observation. – Nauka, Moscow, 1978. – 184 p.
- Popov V.V.** About temperature deformation of Earth surface // *Fizika Zemli*. – 1961. – Vol. 7. – P. 3–10.
- Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y.** A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // *Journal of Geodynamics*. – 2006. – Vol. 41. – P. 23–29, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.009.
- Timofeev V.Yu., Ducarme B., van Ruymbeke M., Gornov P.Yu., Everaerts M., Gribanova E.I., Parovishnii V.A., Semibalamut V.M., Woppelmann G., Apdyukov D.G.** Transcontinental tidal profile: Atlantic coast of Europe – Southern Siberia – Russian Pacific coast // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2008. – Vol. 44. – P. 388–400, doi: 10.1134/S1069351308050042.
- Timofeev V.Yu., Ardukov D.G., Boiko E.V., Timofeev A.V., Yaroshevich A.V., Gornov P.Yu.** Estimation of co-seismic deformation, poroelasticity, and fracturing of rocks from the data on water level in a borehole // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2012. – Vol. 48. – P. 640–652, doi: 10.1134/S1069351312060067.
- Timofeev V.Yu., Ardukov D.G., Timofeev A.V., Boyko E.V., Semibalamut V.M., Fomin Y.N., Panov S.V., Parushkin M.D.** The use of strainmeters to study oscillation processes in a wide frequency range // *Seismic*

Instruments. – 2020. – Vol. 56 (4). – P. 380–393, doi: 10.3103/S0747923920040106.

Toda S., Steina R., Lin J., Sevilgen V. Coulomb 3. Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching / USGS Earthquake Hazards Program – Northern California. – 2003–2009, <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/>.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ТИМОФЕЕВ Владимир Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: космическая геодезия, современные движения и деформация земной коры, приливная и абсолютная гравиметрия, моделирование.

ТИМОФЕЕВ Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: космическая геодезия, современные движения и деформация земной коры, моделирование.

СЕМИБАЛАМУТ Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, директор филиала, Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. Основные научные интересы: современная деформация земной коры, лазерная деформография.



АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА СЕЙСМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕОФИЗИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

А.А. Заплавнова^{1,2,3}, В.В. Оленченко¹, П.А. Дергач^{1,2}, К.В. Федин¹, П.С. Осипова¹, А.Н. Шеин^{1,3}

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

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

³*ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, 629008, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ,
Салехард, ул. Республики, 20, офис 203
e-mail: ZaplavnovaAA@jppg.sbras.ru*

В условиях городской застройки г. Салехарда опробован комплекс методов, включающий электротомографию (ЭТ), георадиолокацию (ГРЛ), сейсморазведку на преломленных волнах (МПВ), на поверхностных волнах (MASW) и с выделением стоячих волн для решения геокриологических задач и мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания. В качестве эталонного объекта было выбрано жилое здание на свайном фундаменте, построенного по первому принципу строительства и оборудованного системой непрерывного геотермического мониторинга. Установлено, что методы ЭТ, МПВ и MASW неэффективны в условиях железобетонного свайного фундамента в ростверке и бетонной стяжки пола со слоем рыхлого насыпного грунта под ним. Лучший результат показали георадиолокация на частотах 150 и 400 МГц и сейсморазведка с выделением стоячих волн. Комплекс этих методов рекомендуется для определения положения кровли мерзлых пород под зданиями, определения фактической длины свай, качества их закрепления, оценки обводненности грунтов в околосвайном пространстве, оценке остаточного ресурса здания.

Многолетнемерзлые породы, геофизические методы, мониторинг, инженерная геофизика, свайный фундамент

APPROBATION OF SEISMIC AND ELECTRICAL GEOPHYSICAL TECHNIQUES COMPLEX FOR SOLVING THE PERMAFROST MONITORING PROBLEMS ON THE PILE-FOUNDATION BUILDING

A.A. Zaplavnova^{1,2,3}, V.V. Olenchenko¹, P.A. Dergach^{1,2}, K.V. Fedin¹, P.S. Osipova¹, A.N. Shein^{1,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Republic Str., 20, office 203,
Tyumen Region, Yamal-Nenets Autonomous District, 629008, Russia,
e-mail: ZaplavnovaAA@jppg.sbras.ru*

In the urban conditions in Salekhard city, a complex of methods, including electrical resistivity tomography (ERT), ground penetrating radar (GPR), a seismic survey on refracted waves (REF), on surface waves (MASW) and the standing waves selection, was tested on solving geocryological problems and monitor the permafrost at the building base. As a model object, a residential building on a pile foundation, built according to the principle I and equipped with a continuous geothermal

monitoring system, was chosen. It has been established that the ERT, REF, and MASW methods are ineffective in the conditions of a reinforced concrete pile foundation in a grillage and a concrete floor screed with a layer of loose bulk soil under it. The best result was shown by GPR at frequencies of 150 and 400 MHz and seismic exploration with the standing wave selection. A combination of these methods is recommended for determining the upper permafrost boundary under buildings, determining the actual piles-length, the quality of their fixing, assessing the water content of soils in the area around the piles, and establishing the residual building life.

Permafrost, geophysical techniques, monitoring, engineering geophysics, pile-foundation

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические методы широко используются для решения задач инженерной геокриологии [Старовойтов, 2008; Зыков и др., 2010; Мельников и др., 2010], в том числе и для мониторинга состояния грунтов в основаниях зданий и инженерных сооружений [Румянцев, Сергеевцев, 2012; Ефремов, Дроздов, 2016]. В мировой практике показана эффективность применения геофизических методов для решения инженерных задач [McDowell et al., 2002; Капустин, 2008; Аузин, Зацепин, 2016; Колесников, Федин, 2016; Аузин, 2020]. Однако большинство исследований наземными геофизическими методами проводится на этапе проектирования работ, тогда как мониторинг состояния мерзлых грунтов выполняется преимущественно скважинной термометрией. Обычно количество термометрических скважин в пределах сооружения ограничено, в то время как с помощью наземных методов можно обеспечить достаточно высокую плотность сети наблюдений. Возникает необходимость выбора оптимального комплекса геофизических методов для изучения разреза и мониторинга состояния мерзлых пород в основании зданий, построенных по первому принципу строительства – с сохранением мерзлоты в основании.

Условия городской застройки накладывают некоторые ограничения на возможность применения тех или иных методов. Эти ограничения возникают из-за проблем с устройством заземлений для гальванических методов электроразведки, ограниченной геометрии пространства для обеспечения нужного расстояния между электродами или сейсмическими датчиками при зондированиях, присутствия рыхлого слоя насыпных грунтов, бетонной стяжки или асфальта. Следовательно, не все методы геофизики будут эффективно решать поставленные задачи.

Целью данной работы являлся выбор оптимального комплекса наземных геофизических методов для определения геокриологического строения и мониторинга состояния мерзлых пород в основании зданий и сооружений в условиях города Салехард.

Основными задачами было оценить информативность и трудоемкость методов при определении положения кровли мерзлых пород, выявления таликов, оценить чувствительность методов при изменении температуры мерзлых грунтов. Кроме этого изучалась информативность сейсморазведки с выделением стоячих волн для определения длины свай, добротности свай, оценки напряженно-деформированного состояния фундамента, конструкции здания и его изменения при оттаивании деятельного слоя и изменении температуры мерзлых пород.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Девятиэтажное жилое здание было построено по I принципу строительства, т. е. с сохранением многолетнемерзлых грунтов в основании. Высота проветриваемого подполья 1.5 м. Фундамент столбчатый (под колонны) и ленточный (под диафрагмы), монолитный железобетонный по сборным

сваям. Подполье закрыто металлическими заслонками по периметру здания. Основание залито армированной бетонной стяжкой, мощностью до 0.12 м.

Для сохранения ММП в основании по контуру здания и каждого свайного куста установлены сезонные охлаждающие устройства (СОУ). В результате термостабилизации вокруг кустов свай до глубины 10 м была сформирована многолетнемерзлая толща с максимальными температурами осенью около минус 1 °С и минимальными температурами до минус 5.4 °С.

В пределах проветриваемого подполья расположена сеть термометрических скважин глубиной 10–12 м в количестве 24 шт., обеспечивающая непрерывный температурный мониторинг.

Согласно результатам бурения, в геологическом строении площадки участвуют насыпной грунт (песок с гравием до 2 %) мощностью 0.7 м и песок пылеватый, до глубины 6.7 м – водонасыщенный, ниже – твердомерзлый, массивной криотекстуры. В интервале глубин 10.5–14.3 м – песок мелкий с гравием до 4 %, твердомерзлый, массивной криотекстуры. В интервале 14.3–15 – песок пылеватый, с гравием 2 %, твердомерзлый, массивной криотекстуры. В юго-западном углу здания одной из скважин с глубины 11.5 м под мерзлой толщей вскрыты обводненные пески.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА

Для апробации были выбраны методы электротомографии, георадиолокации, многоканального анализа поверхностных волн (MASW), сейсмической томографии, сейсморазведки с выделением стоячих волн.

Исследования проводились в два этапа: в период максимального промерзания деятельного слоя (май) и период его максимального оттаивания (сентябрь).

Зондирования проводились по профилю, расположенному вдоль длинной оси здания (рис. 1). Дополнительные измерения методом георадиолокации были проведены в пределах термометрической аномалии, установленной по результатам скважинной термометрии.

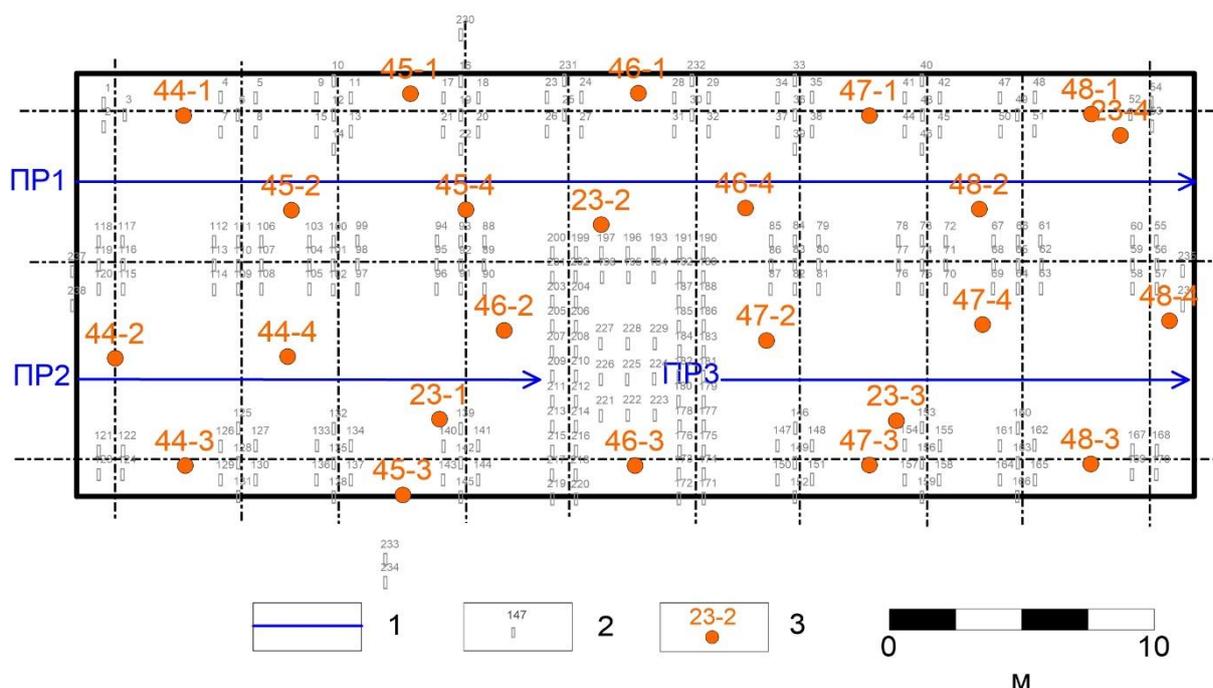


Рис. 1. Схема расположения профилей на плане здания, свайных кустов и термометрических скважин; 1 – измерительные профили, 2 – сваи фундамента, 3 – термометрические скважины

При измерениях методом георадиолокации применялся георадар ОКО-3 с антенными блоками центральной частоты 50, 150, 200 и 400 МГц. Для привязки измерений по расстоянию вдоль профиля использовался датчик перемещения. Контроль привязки производился по рулетке через каждые 5 м профиля. Обработка данных проводилась с помощью программы GeoScan32.

Электротомография выполнялась с помощью прибора «Скала 64-к15». Последовательность подключения электродов соответствовала установкам симметричной Веннера–Шлюмберже, дипольной и трехэлектродной прямой и встречной. Шаг между электродами составлял 2 м. Электроразведочный профиль выходил на придомовую территорию на 10 м с каждой стороны. Проблема заземления электродов на бетоне или асфальте была решена с помощью влажной ветоши, смоченной соленым раствором. Это позволило обеспечить пропускание тока через бетонную стяжку в подполье и железобетонные плиты дорожного покрытия, но на асфальтовом дорожном покрытии такая методика не сработала, т. к. асфальт – диэлектрик. Сопrotивление заземления через ветошь составляло 0.5–1.5 кОм, но при высыхании ветоши резко возрастало. Поэтому после устройства заземлений проводился постоянный контроль влажности ветоши.

Обработка данных электротомографии проводилась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv. По профилям строились геоэлектрические разрезы по результатам двумерной инверсии. Интерпретация данных проводилась с учетом результатов предшествующих инженерно-геологических изысканий и известных зависимостей УЭС от литологического состава пород, температуры и засоленности.

Сейсморазведочные исследования методами МПВ и MASW выполнялись бескабельной телеметрической сейсморегистрирующей системой «SCOUT», с регистрацией одной вертикальной (Z) компоненты смещения. Параметры записи: частота дискретизации – 1000 Гц; длительность – 500 мс; коэффициент усиления – 24 дБ.

Возбуждения волн производились посредством вертикальных ударов резиновой киянкой по бетонному основанию. Дополнительно использовался портативный вибрационный источник с частотным диапазоном излучаемого сигнала от 1 до 250 Гц. На каждом пункте возбуждения (ПВ) производилось от трех до пяти накоплений (в зависимости от взаимного расположения ПВ и ПП). Таким образом, одновременно регистрировались продольные и поверхностные волны. В качестве опорного сигнала использовался нелинейный СВИП с гиперболической разверткой по частоте от 1 до 100 Гц длительностью 60 с (low-dwell). Все сейсмические профили, за исключением двух, были расположены в пределах фундамента исследуемого здания. В отличие от работ, проводимых в июне, в сентябре два профиля выходили за пределы основания здания: один полностью и один частично.

Для исследования собственных колебаний свай зданий применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов. При этом для регистрации использовались горизонтальные и вертикальные геофоны GS20DX и трехканальные автономные цифровые регистраторы Байкал-АСН с частотой дискретизации 5 кГц. При анализе полученных экспериментальных данных сопоставлялись результаты математического моделирования методом конечных элементов [Рычков, 2004]. Регистрация шумов производилась на внешних стенах свай горизонтальными и вертикальными геофонами GS20DX и трехканальными автономными цифровыми регистраторами Байкал АСН, для наилучшего контакта в некоторых случаях датчик крепился жестким хомутом. Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений

составляла 15 минут. Для повышения точности измерения длины свай параллельно проводились измерения прибором для определения длины свай Спектр 4.3. Измерения проводились для каждого скважинного куста фундамента, а также на крыше сооружения. Изгибные колебания здания были определены путем установки датчиков и регистрации колебаний на лестничных пролетах каждого этажа здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Георадиолокация

Несмотря на то что антенные блоки георадара ОКО-3 являются экранированными, на радарограммах проявляются различные помехи – отражения, затрудняющие выделение полезного сигнала. Виды регистрируемых волн-помех показаны на примере радарограммы, полученной антенной с центральной частотой 150 МГц (рис. 2). Основные помехи, возникающие в условиях подполья, относятся к воздушным волнам-помехам. Оси синфазности, имеющие прямолинейную форму (5, рис. 2), присутствуют на всех радарограммах, полученных в подполье. Эти помехи были вызваны отражением сигнала от металлических ограждений подполья в начале и в конце профиля. Серии гипербол дифракции (6, рис. 2) образованы отражениями электромагнитной волны от свайных кустов. Помехи в виде многократных высокоамплитудных отражений в виде вертикальных полос («звона») наблюдаются от приповерхностных объектов (7, рис. 2), таких как фрагменты арматуры или кабелей, встречающихся в бетонной стяжке здания.

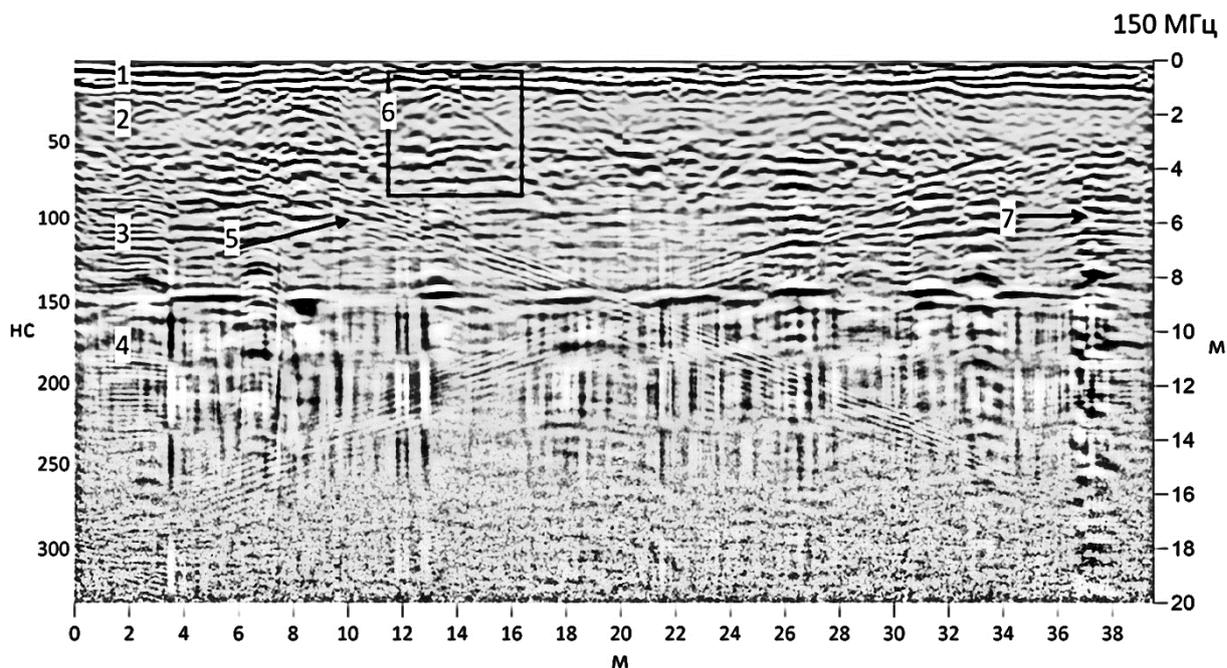


Рис. 2. Радарограмма по профилю № 1. Частота антенны 150 МГц: 1–4 – георадарные комплексы, 5 – воздушные отражения от щитов, закрывающих подполье, 6 – воздушные отражения от колонн, 7 – «звон» от приповерхностных объектов.

Оказалось, что при измерениях неэкранированной антенной частотой 50 МГц волны-помехи оказывают значительное влияние на волновую картину, что делает невозможной интерпретацию радарограмм. Впоследствии было принято решение отказаться от использования такой антенны из-за больших габаритов, зашумленных данных и низкой разрешающей способности.

При использовании для зондирования относительно высоких частот 250 и 400 МГц установлено, что сигналы затухают слишком быстро и не дают информацию о среде глубже 5 м. Однако эти антенны дают более детальные данные о строении верхней части разреза.

Сопоставление радарограмм 400 и 150 МГц с данными термометрии в июне и в сентябре 2022 г. показало, что кровля ММП может быть выделена по изменению характера георадиолокационного сигнала при переходе в мерзлые грунты. Результаты двух этапов работ показывают хорошую корреляцию температурных и радарных данных. Стоит отметить, что в юго-восточной части здания мощность сезонного слоя выше, чем в северо-западной (рис. 3, б). Данный факт дополнительно подтверждает возможности метода к выделению даже небольших изменений положения кровли ММП.

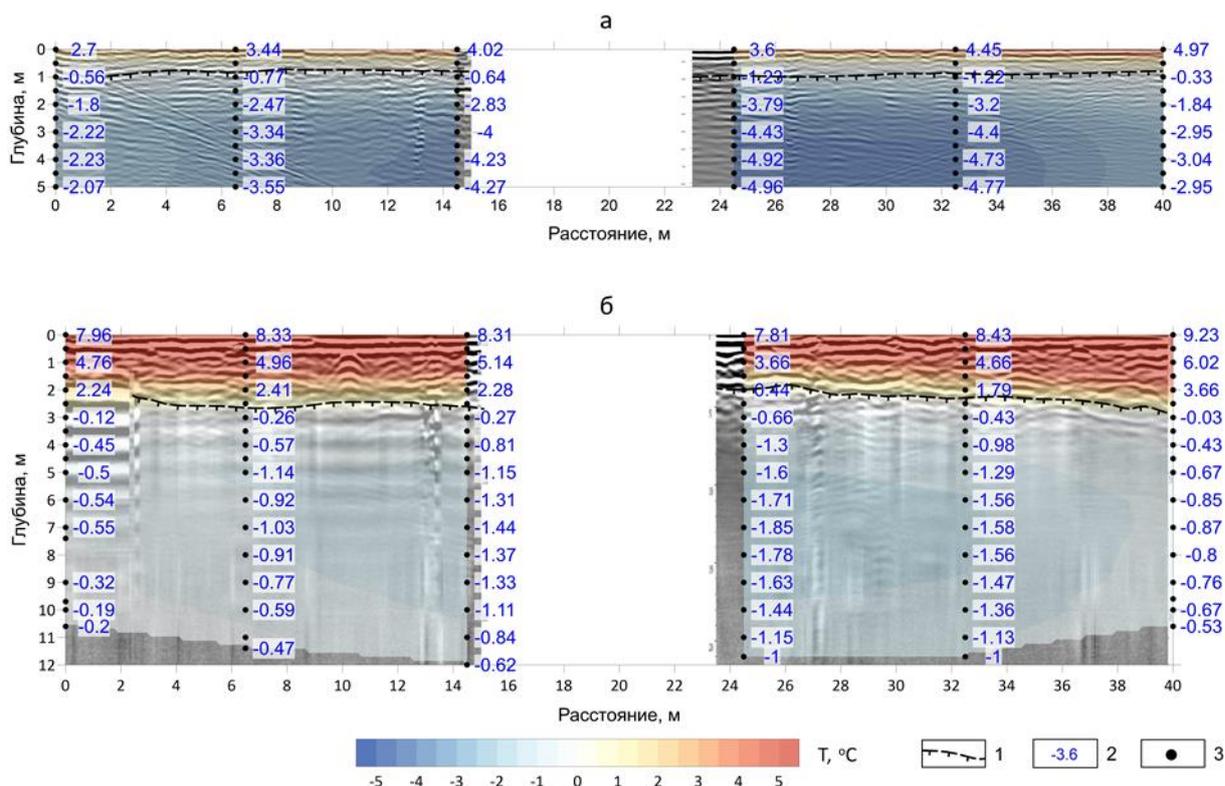


Рис. 3. Радарограммы по профилям 2 и 3 в июне на частоте 400 МГц (а) и в сентябре на частоте 150 МГц (б) совместно с температурным разрезом: 1 – кровля ММП, 2 – значения температуры, 3 – расположение термометрических датчиков

Для мониторинга положения кровли мерзлых пород рекомендуется использовать комплекс экранированных антенн 400 и 150 МГц. Применение комплекса этих антенн позволяет маркировать кровлю ММП как в период максимальной, так и минимальной мощности деятельного слоя. Измерения на частоте 150 МГц позволяют выделить литологические особенности под домом и на придомовой территории, на частоте 400 МГц обеспечивают детализацию верхней части разреза (до 5 м).

Электротомография

На разрезах удельного электрического сопротивления грунтов по данным 2D инверсии (рис. 4) с глубины около 4 м проявляется обширная аномалия очень низких значений (0.1–10 Ом·м). Эта аномалия не связана с геокриологическими и литологическими особенностями грунтов, а вызвана влиянием арматуры свай и железобетонного ростверка. Кроме этого, высокоомный слой в верхней части разреза

присутствует как в период максимального промерзания, так и в период максимального оттаивания деятельного слоя, что говорит о нечувствительности метода для оценки динамики сезонного промерзания грунтов под зданием. Вероятно, это связано с воздушно-сухим состоянием насыпного слоя, так как интенсивное проветривание подполья сквозняком, которое мы наблюдали в процессе работ, приводит к сильному иссушению верхней части разреза. Маловлажные грунты деятельного слоя имеют такое же высокое УЭС, как и в мерзлом состоянии, что не позволяет проследить границу оттаивания методом электротомографии.

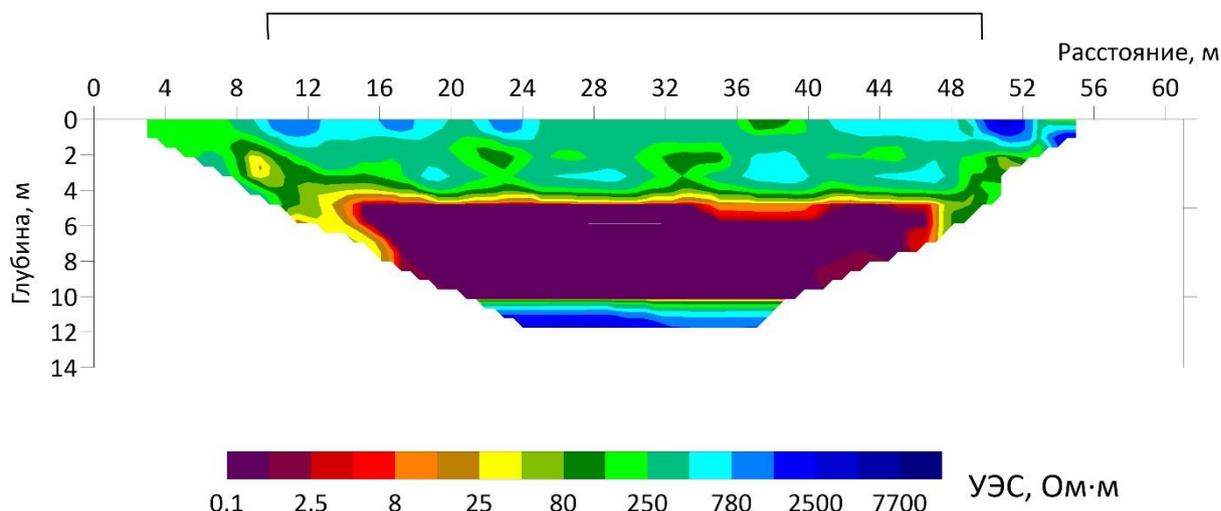


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю 1 дипольно-осевая установка; черной линией отмечены границы здания относительно профиля

Результаты трехмерной инверсии также не дали никакой геологической информации. В трехмерной модели распределения УЭС преобладала аномалия очень низкого электросопротивления, вызванная железобетонными сваями и ростверком. Сравнение моделей, полученных весной и осенью, показало несостоятельность метода ЭТ в трехмерной постановке обратной задачи для решения задач мониторинга.

Таким образом, из-за железобетонных конструкций и маловлажного грунта в верхней части разреза метод электротомографии оказался непригоден для оценки геокриологического строения разреза в основании здания и мониторинга состояния мерзлых пород.

Сейсморазведка методом преломленных волн

Полевые сейсмограммы анализировались на предмет возможности выделения времен прихода продольных (P) и поперечных (S) волн. На основе этого делалось заключение о наличии в разрезе инверсного слоя (с пониженной скоростью) и, соответственно, возможности обработки данных методом преломленных волн (в том числе сейсмической томографии).

Результаты анализа показали, что в разрезе присутствует инверсный слой. Наличие инверсионного слоя делает невозможным обработку построения скоростных разрезов методом преломленных волн (в том числе методом сейсмической томографии). Следовательно, метод МПВ непригоден для решения геокриологических задач и мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания в данных условиях.

Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW)

Метод многоканального анализа поверхностных волн Релея (MASW) применялся для обработки сейсмограмм со всех профилей. Использовалась программная реализация метода MASW, основанная на применении алгоритмов SFK-преобразования [Serdyukov et al., 2019], оптимизации выбора параметризации скоростной модели и метода Монте-Карло [Yablokov et al., 2021].

На всех разрезах выделяется приповерхностный слой, характеризующийся пониженным значением скорости V_s около 200–300 м/с (рис. 5). Ниже, предположительно, залегает толща мерзлых пород, характеризующаяся значением скорости V_s около 1200 м/с. Мощность верхнего слоя сильно варьируется (от 1 до 5 м) как для данных полученных в июне, так и в сентябре.

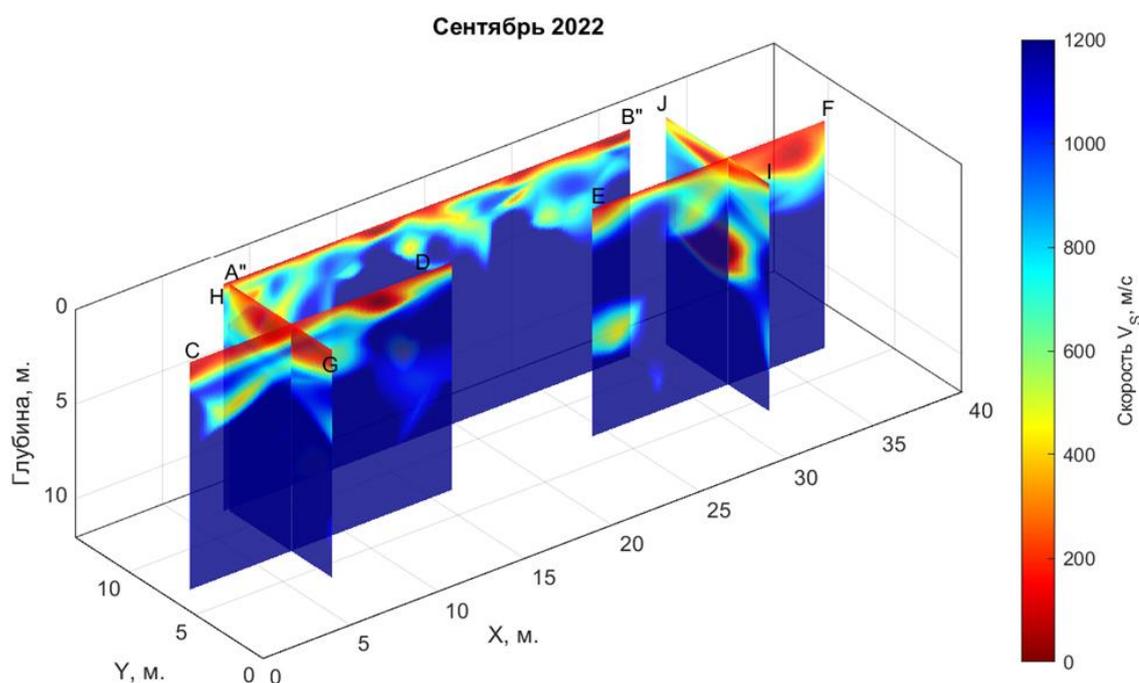


Рис. 5. Двумерные разрезы по MASW, полученные в результате интерполяции одномерных разрезов. Ограничение по глубине 12 м

Результаты, полученные в сентябре 2022 г., плохо согласуются с результатами предыдущих исследований методом MASW, проведенных в июне 2022 г. вдоль тех же профилей и с результатами других геофизических методов. Это, по всей видимости, связано с низким качеством данных, получаемых в пределах здания. Основная причина – наличие пустот между бетонной стяжкой пола подполья и насыпным грунтом. Опытные работы показали, что метод MASW также негоден для мониторинга мерзлого состояния пород в данных условиях.

Сейсморазведка методом стоячих волн

При обработке экспериментальных данных зарегистрированные в каждой свае шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8.2 секунд (8192 отсчета), вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов и проводилось их накопление. В результате на амплитудных спектрах появлялись резкие высокоамплитудные пики, которые в случае регистрации вертикальных компонент соответствовали модам типа сжатия–расширения.

Всего было обследовано 26 свай. На рисунке 6 числовыми значениями у свайных кустов показаны результаты определения длины свай по методике выделения стоячих волн прибором «Спектр 4.3», который применялся для верификации результатов. Расчеты длины свай по данным двух методов показали идентичные результаты.

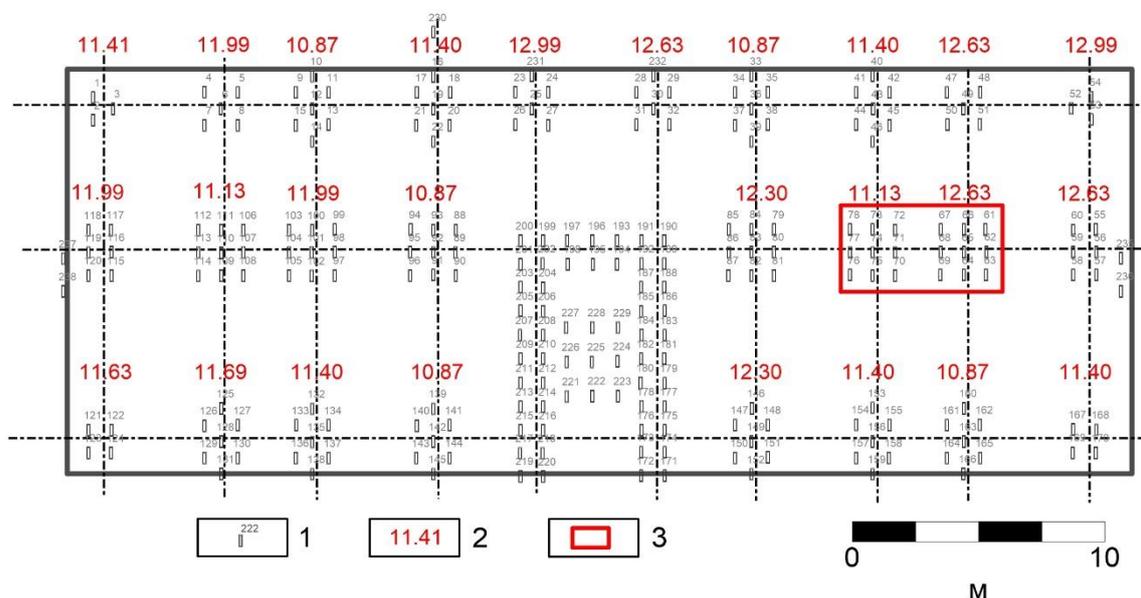


Рис. 6. Длины свай фундамента обследуемого жилого дома по данным метода сейсморазведки с выделением стоячих волн и измерителя длины свай аппаратурой «Спектр 4.3»: 1 – свая фундамента и ее номер, 2 – длина свай (в метрах) по данным сейсморазведки и акустических измерений, 3 – дефектные кусты свай по данным сейсморазведки с выделением стоячих волн

По результатам наблюдений в июне и сентябре 2022 г. были обнаружено две аномальные зоны амплитудного распределения колебаний первой моды (собственные частоты $X - 1.78$ Гц, $Y - 1.53$ Гц, $Z - 2.6$ Гц) в околосвайном пространстве, хорошо проявленные на всех трех компонентах и на картах распределения коэффициента Пуассона (отношение продольных колебаний к поперечным).

Первая аномальная зона располагается в правой части фундамента (рис. 7), проявляется повышением амплитуд колебаний. Детальный анализ измеренных сигналов показал, что на двух обвязках свай происходит отражение сигнала с глубины 8 м. Такой результат означает наличие дефекта на глубине отражения. Сопоставление измеренных данных с результатами математического моделирования подтвердили наличие и положение дефекта (предположительно, трещина или наклонное положение сваи).

Вторая аномальная зона совпадает с положительной температурной аномалией по данным скважинной термометрии. Повышение амплитуд на карте распределения коэффициента Пуассона свидетельствует об обводненности участка в околосвайном пространстве и о глубинном источнике аномалии. Как можно видеть на рис. 7, размер аномальной зоны увеличился в сентябре, что связано с увеличением размера обводненного участка песков вследствие повышения температуры грунтов за летний период.

На крыше здания исследования с выделением стоячих волн не выявили аномальных зон, превышающих нормальные собственные колебания конструкции. По изгибным модам колебаний был определен остаточный ресурс сооружения, согласно ГОСТ 34081-2017, который составил на момент исследований 100 %.

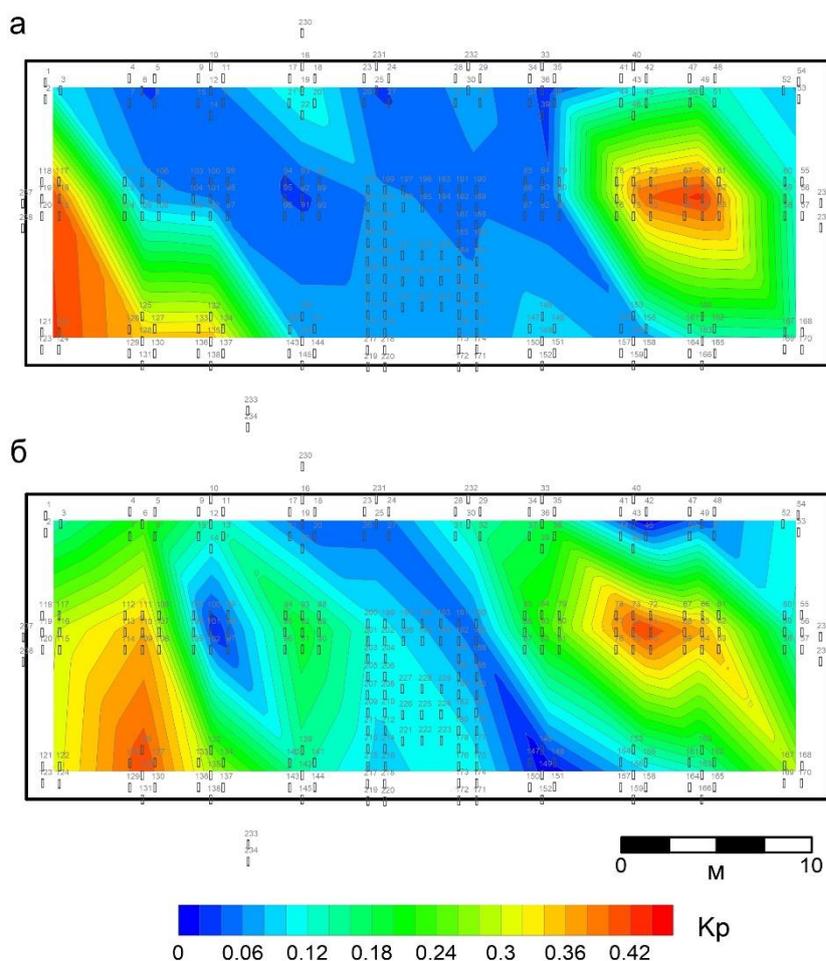


Рис. 7. Карта распределения коэффициента Пуассона в околосвайном пространстве в июне (а) и в сентябре (б)

Полученные экспериментальные результаты показали, что для обнаружения потери устойчивости свай нужно применять метод стоячих волн по спектрам шумовых сигналов. Из микросейсмических колебаний извлекаются сведения о распределении коэффициента Пуассона, которые необходимо использовать для выявления зон повышенной обводненности околосвайного пространства.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ

На данных георадиолокации хорошо выделяются литологические границы верхней части разреза и кровля сезонно- и многолетнемерзлых пород. Граница, проявляющаяся на глубине 2.5 м, по данным бурения является переходом от насыпных грунтов к суглинистым породам (рис. 8). По результатам метода MASW на глубине около 2.5 м происходит изменение характера волновой картины. Граница № 3 на глубине 8 м, связанная с изменением литологического состава пород (слой суглинков), была выделена только методом георадиолокации и MASW (при условии, что профиль выходит за пределы подполья).

На плане распределения коэффициента Пуассона (отношение продольных колебаний к поперечным) в области тепловой аномалии наблюдается интенсивная положительная аномалия (рис. 7). Такой результат свидетельствует о повышении обводненности грунтов в пределах аномальной зоны при нагревании грунтов в период максимального оттаивания и неработающих СОУ. Однако вариации температуры и влажности грунтов не проявляются на разрезах УЭС на фоне низкоомной аномалии, возникающей из-за влияния железобетонных свай и ростверка. Следовательно, для мониторинга

состояния мерзлых грунтов целесообразно использовать метод сейсморазведки с выделением стоячих волн и расчета коэффициента Пуассона (K_p). При повышении температуры мерзлых грунтов увеличивается количество незамерзшей воды в порах, особенно в тонкодисперсных и засоленных грунтах, что сказывается на величине K_p . В нашем случае преимущества этого метода перед методами МПВ и MASW заключаются в малых временных затратах и высокой информативности. Другие методы сейсморазведки не работают в случае присутствия бетонной стяжки пола и рыхлых насыпных грунтов под ней.

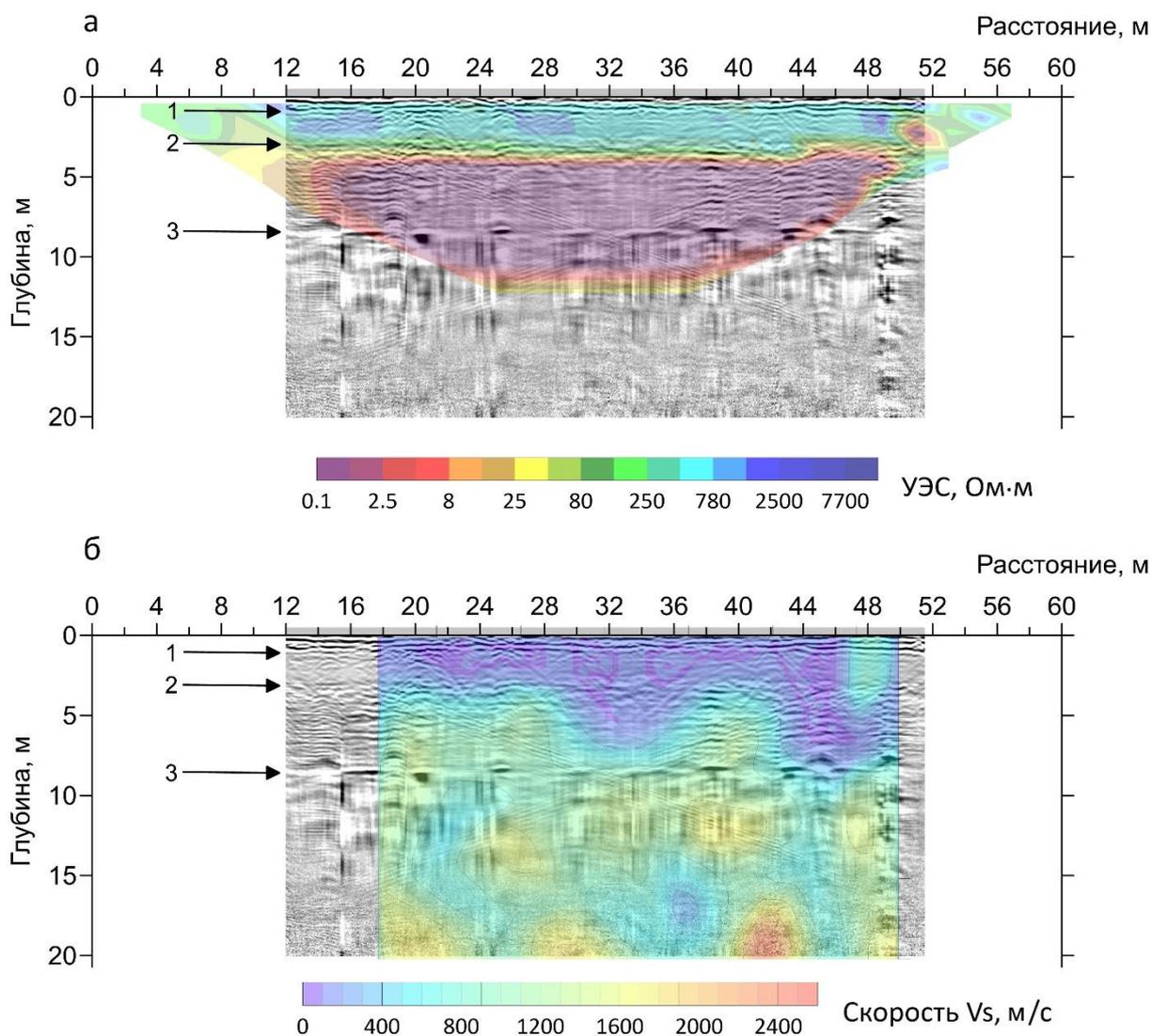


Рис. 8. Сопоставление георадарных данных на частоте 150 МГц с разрезом УЭС по данным ЭТ (а) и MASW (б). Цифрами показаны отражающие границы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния мерзлых пород в основании зданий и сооружений является важной задачей, которая в настоящее время решается преимущественно с помощью термометрии по редкой сети скважин. Казалось бы, наземные геофизические методы способны дополнить информацию о состоянии мерзлых

пород под зданиями, однако их применение в условиях городской застройки и железобетонной конструкции здания имеет ряд особенностей.

Как показали наши исследования, такими особенностями являются наличие бетонной стяжки пола в проветриваемом подполье, железобетонные кусты свай, объединенные в ростверк, ограниченное пространство. Все эти факторы осложняют применение электротомографии, сейсморазведки МПВ и MASW для решения таких задач как определение глубины залегания кровли мерзлых пород, выявление таликов, мониторинг состояния мерзлых грунтов.

Задача выделения кровли ММП была решена только методом георадиолокации. Измерения методом ГРЛ весьма эффективны и позволили выделить даже такие небольшие эффекты, как изменение глубины сезонного оттаивания в зависимости от экспозиции стороны здания. С юго-восточной стороны здания глубина сезонного оттаивания на 0.5 м больше, чем с северо-западной.

На основе опытных работ для проведения сезонного мониторинга положения кровли ММП предлагается оптимальный комплекс антенных блоков, включающий экранированные антенны центральной частоты 150 и 400 МГц. Эти антенны показали лучшую разрешающую способность и помехозащищенность. Однако глубинность метода ограничена несколькими метрами.

Особенностями использования для этой задачи методов сейсморазведки связано с поверхностными условиями в подполье – бетонная стяжка и слой рыхлых насыпных грунтов. Такие поверхностные условия исключают применение методов КМПВ или MASW для неразрушающего контроля сооружений. Метод электротомографии также показал низкую эффективность для решения задач выделения кровли ММП, оконтуривания таликов и мерзлых пород. Причиной этому – металлическая арматура железобетонных свай, замкнутая в ростверке, которая создает интенсивную аномалию низкого УЭС на разрезах. На фоне этой аномалии невозможно выделить изменения в разрезе, связанные с динамикой геокриологических условий.

Полученные экспериментальные результаты показали, что для обнаружения потери устойчивости свай может с успехом применяться метод стоячих волн, которые выделяются из большого числа амплитудных спектров шумовых сигналов.

Анализ распределения напряженно-деформированного состояния фундамента и коэффициента Пуассона грунтов околосвайного пространства показал, что существуют две аномальные зоны: предполагаемый талик в северо-западном углу задания и две, предположительно дефектные, группы свай. У этих свай было зарегистрировано отражение сигнала с глубины 8 м, что, вероятно, соответствует наличию дефекта на этой глубине. Предполагается, что указанные сваи имеют меньшую длину, чем остальные сваи фундамента. Анализ мод изгибных колебаний показал, что общее закрепление свайного фундамента в грунте оценивается как хорошее, остаточный ресурс здания 100 %.

По результатам проведенных исследований рекомендуется применение комплекса георадиолокации и сейсморазведки с выделением стоячих волн для мониторинга состояния ММП и устойчивости зданий, построенных по I принципу строительства.

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

ЛИТЕРАТУРА

Аузин А.А., Зацепин С.А. Определение геометрических характеристик свайных конструкций геофизическими методами // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических

полей: Материалы 43 сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. – Воронеж, ООО ИПЦ «Научная книга», 2016. – С. 24–27.

Аузин А.А. Обследование фундаментов инженерных сооружений геофизическими методами // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47 сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. – Воронеж, ООО ИПЦ «Научная книга», 2020. – С. 25–28.

Ефремов В.Н., Дроздов А.В. Изменения геокриологического состояния насыпных ГТС в Западной Якутии и оптимизация их мониторинга комплексом электроразведочных методов геофизики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2016. – № 3 (83). – С. 36–42.

Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Погорелов А.А., Сизых Е.М., Бек Д.Д., Усов А.М., Лучко М.В., Просунцов К.С., Скобелев А.Д., Смагин М.К. Роль и место электромагнитных зондирований при решении геокриологических задач // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным исследованиям «Геобайкал–2010». – Иркутск, 2010. – 2 с.

Капустин В.В. Разработка способов комплексных геофизических исследований грунтов, геотехнических и строительных конструкций: автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 2008. – 25 с.

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.

Мельников В.П., Скворцова А.Г., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Дубровин В.А. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов // Геология и геофизика. – 2010. – № 51 (1). – С. 171–180.

Румянцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Вибрационные испытания 16-этажного жилого дома объемно-блочной конструкции // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 98–102.

Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 12. – С. 46–48.

McDowell P.W., Barker R., Butcher A.P., Culshaw M.G., Jackson P.D., McCann D.M., Skip B.P., Matthews S.L., Arthur J.C.R. Geophysics in engineering investigations. – Ciria, London, 2002. – 266 p.

Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84 (1) – P. 19–24, doi: 10.1190/geo2018-0430.1.

Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting. – 2021. – Vol. 69 (7). – P.1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.

REFERENCES

Auzin A.A., Zatzepin S.A. Determination of the geometric characteristics of pile structures by geophysical methods // Proceedings of the 43th session “Problems of Theory and Practice in Geological Interpretation of Geophysical Fields” [in Russian]. – Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2016. – P. 24–27.

Auzin A.A. Survey of the foundations of engineering structures by geophysical methods // Proceedings of the 47th session “Problems of Theory and Practice in Geological Interpretation of Geophysical Fields” [in Russian]. – Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2020. – P. 25–28.

- Efremov V.N., Drozdov A.V.** Changes in the geocryological state of bulk hydraulic structures in Western Yakutia and optimization of their monitoring by a complex of electrical exploration methods of geophysics // Natural Resources of the Arctic and Subarctic. – 2016. – Vol. 3 (83). – P. 36–42.
- Kapustin V.V.** Development of methods for complex geophysical studies of soils, geotechnical and building structures. PhD Thesis [in Russian]. – MGU, Moscow, 2008. – 26 p.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Application of passive standing wave method in engineering seismics: physical modelling and field experiment // Seismic Technologies. – 2016. – Vol. 2. – P. 83–91.
- Melnikov V.P., Skvortsov A.G., Malkova G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., Dubrovin V.A.** Results of studying the geocryological conditions of the Arctic territories using seismic methods // Russian Geology and Geophysics. – 2010. – Vol. 51 (1). – P. 136–142, doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.011.
- Rumyantsev A.A., Sergeevtsev E.Yu.** Vibration tests of a 16-storey residential building of a volume-block design // Vestnik MGSU. – 2012. – Vol. 5. – P. 98–102.
- Rychkov S.P.** MSC.visual NASTRAN for Windows [in Russian]. – NT Press, Moscow, 2004. – 552 p.
- Starovoitov A.V.** Interpretation of georadar data // Exploration and protection of mineral resources. – 2008. – Vol. 12. – P. 46–48.
- McDowell P.W., Barker R., Butcher A.P., Culshaw M.G., Jackson P.D., McCann D.M., Skip B.P., Matthews S.L., Arthur J.C.R.** Geophysics in engineering investigations. – Ciria, London, 2002. – 266 p.
- Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D.** Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84 (1) – P. 19–24, doi: 10.1190/geo2018-0430.1.
- Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D.** An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting. – 2021. – Vol. 69 (7). – P.1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.
- Zykov Yu.D., Koshurnikov A.V., Pogorelov A.A., Sizykh E.M., Bek D.D., Usov A.M., Luchko M.V., Prosuntsov K.S., Skobelev A.D., Smagin M.K.** Role and place of electromagnetic sounding in solving geocryological problems // Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference “GeoBaikal 2010” [in Russian]. – Irkutsk, 2010. – 2 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗАПЛАВНОВА Анна Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: инженерная и рудная геофизика, криолитозона, комплексирование геоэлектрических методов, электротомография, магнитотеллурическое зондирование.

ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение электроразведочных методов геофизики при решении инженерно-геологических, рудопоисковых, геокриологических, геотехнических задач, поисках месторождений углеводородов и интерпретация электроразведочных данных.

ФЕДИН Константин Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение пассивной и активной сейсмологии для

решения инженерных задач, комплексирование с другими геофизическими методами для получения более точного результата.

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморастворка.

ОСИПОВА Полина Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: удельное электрическое сопротивление, электротомография, россыпное золото, георадиолокация, вызванная поляризация, криолитозона, инженерная и рудная геофизика.

ШЕИН Александр Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электрорастворка, электротомография, георадиолокация.



ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СЕЛЕНГИНСКОЙ ДЕПРЕССИИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Н.Н. Неведрова¹, А.М. Санчаа¹, Е.А. Щекаева²

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

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты интерпретации уникальных архивных данных вертикальных электрических зондирований, полученных в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны в 50-х гг. прошлого века партией Байкальской геофизической экспедиции ПГО «Иркутскгеофизика», с использованием современных компьютерных технологий. Целью этой работы является уточнение геоэлектрических характеристик разрезов по профилям измерений, а также строения таких сейсмоактивных структур как Дельтовый и Фофановский разломы, залив Провал, Творогово-Истокское поднятие с использованием программ 2–3D инверсии с наглядной визуализацией данных.

Байкальская рифтовая зона, Селенгинская депрессия, вертикальные электрические зондирования, Дельтовый и Фофановский разломы, 2D, 3D инверсия

3D MODEL OF THE SELENGA DEPRESSION OF THE BAIKAL RIFT ZONE

N.N. Nevedrova¹, A.M. Sanchaa¹, E.A. Shchekaeva²

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

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of the interpretation of unique archival data of vertical electrical soundings obtained in the Selenga basin of the Baikal rift zone in the 50s of the last century by the detachment of the Baikal geophysical expedition of the PGO "Irkutskgeofizika", using modern computer technologies. The purpose of this work is to refine the geoelectric characteristics of the sections according to the measurement profiles, as well as the structure of such seismically active structures as the Delta and Fofanovsky faults, the Proval Bay, the Tvorogovo-Istok uplift using a 2–3D inversion program with visual data visualization.

Baikal rift zone, Selenga depression, vertical electrical soundings, Delta and Fofanov faults, 2D, 3D inversion

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) в целом состоит из системы впадин и сопряженных с ними горных поднятий. Именно знания о строении впадин – о характеристиках разломных нарушений, мощности накопившихся в них осадков, рельефе поверхности фундамента – позволяют получить представление о геологических этапах развития всей рифтовой области. Одна из самых крупных впадин, Селенгинская депрессия, длиной в 100–120 км и шириной в 40–45 км расположена на юго-восточном берегу озера

Байкал. В нее входит дельта р. Селенга и прилегающие к ней заселенные районы с промышленной инфраструктурой. Депрессия относится к кайнозойским впадинам байкальского типа и является наиболее сейсмоактивной в БРЗ. Следует отметить, что до сих пор Селенгинская депрессия считается недостаточно изученной структурой побережья озера Байкал, что связано в основном с труднодоступностью отдельных участков дельты, существованием сильно заболоченных территорий.

В настоящее время продолжают глубинные процессы, вследствие которых образовалась впадина и окаймляющие ее хребты, вызывая многочисленные землетрясения. В связи с возможностью на территории Селенгинской депрессии катастрофических разрушительных землетрясений уточнение ее строения и выделение активных разломов является актуальной задачей.

В статье представлены результаты повторной интерпретации уникальных архивных данных вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), полученных в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны в 50-х гг. прошлого века партией Байкальской геофизической экспедиции ПГО «Иркутскгеофизика» (Н.Ф. Пятчин, А.П. Булмасов, В.И. Косов, В.Т. Вебер). Исследования с использованием этих данных проводились в ИНГГ СО РАН в 90-х гг. прошлого столетия и были связаны с образованием Байкальского прогностического полигона в районе поселков Энхалук–Стволовая.

Для изучения строения полигона, включающего восточную часть Селенгинской депрессии и залив Провал, помимо ВЭЗ привлекались другие геоэлектрические методы: глубинные зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСБ), магнитотеллурические зондирования (МТЗ), верхняя часть разреза изучалась с помощью детальных ЗСБ с передвижным источником. Интерпретация данных ВЭЗ в те годы была выполнена с применением программы СОНЕТ (НГУ) в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Результаты были представлены в ряде статей [Дашевский и др., 1999; Морозова и др., 1999; Неведрова, 2013].

Большой вклад в исследования депрессии в разные годы внесли специалисты Института земной коры СО РАН, представившие в своих работах геологические, геодинамические особенности строения, а также анализ сейсмической активности территории [Солоненко, 1981; Лунина, 2015; Мац, Ефимова, 2017; Лунина и др., 2021].

В настоящее время с появлением современных компьютерных технологий – программных средств двух- и трехмерной интерпретации – появилась возможность заново проинтерпретировать архивный материал ВЭЗ, полученный в Селенгинской депрессии. Целью этой статьи является уточнение геоэлектрических характеристик разрезов по профилям измерений, а также строения таких сейсмоактивных структур как Дельтовый и Фофановский разломы, залив Провал, Творогово-Истокское поднятие с использованием программ 2–3D инверсии с наглядной визуализацией данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фундамент Селенгинской депрессии и горное обрамление представлены древними кристаллическими образованиями архейского, протерозойского и нижнепалеозойского возрастов. Осадочные отложения, заполняющие впадину, имеют неогеновый и четвертичный возраст [Саркисян, 1958]. Судя по геофизическим данным, максимальная мощность кайнозойских отложений отмечается в сторону оз. Байкал [Солоненко, 1981]. По оценкам В.В. Федынского мощность кайнозойских осадков в депрессии составляет 5 км [Ушаков и др., 1972]. Последующие сейсмологические исследования, а также интерпретация результатов более детальных гравиметрических съемок позволяют полагать, что

мощность осадков на северо-западном краю дельты может достигать 7 км [Зорин, 1971] (рис. 1, а). Таким образом, оценки, полученные разными методами, сильно отличаются и нуждаются в верификации.

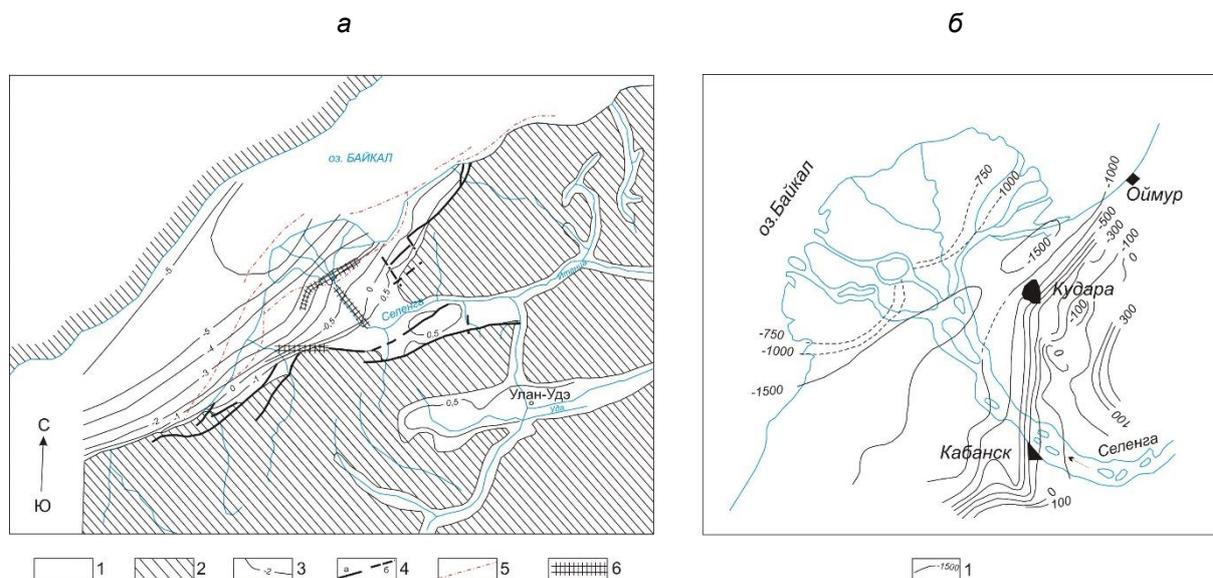


Рис. 1. а – карта глубинного строения дельты р. Селенги (составлена Ю.А. Зориным): 1 – Кайнозойские отложения, 2 – породы фундамента, 3 – изогипсы кристаллического фундамента (по гравиметрическим данным и результатам наблюдений со станции “Земля”; разломы, обновленные в кайнозое: 4 – выраженные в наземном рельефе (а – установленные, б – предполагаемые), 5 – скрытые под рыхлыми отложениями и водами оз. Байкал; 6 – зоны высоких горизонтальных градиентов силы тяжести, соответствующие разломам: I – Дельтовому, II – Хамар-Дабанскому, III – Фофановскому; б – схематическая карта рельефа поверхности фундамента Селенгинской депрессии по результатам интерпретации данных ВЭЗ (составлена А.П. Булмасовым): 1 – изолинии глубин до фундамента

Дельтовый разлом относится к главным сейсмоактивным элементам депрессии. Он прослеживается по гравиметрическим данным в северо-восточном направлении по линии пос. Творогово – пос. Кудара – мыс. Облом залива Провал. Ему соответствует зона больших горизонтальных градиентов силы тяжести, которая отражает резкое изменение мощности рыхлых отложений по простиранию разлома. По данным магниторазведки, Дельтовый разлом выделяется цепочкой линейно-вытянутых магнитных аномалий, которые могут быть связаны с докайнозойскими интрузиями [Булмасов, 1968; Зорин, 1971].

Фофановский разлом протягивается в северо-западном направлении ортогонально Дельтовому вдоль русла р. Селенга, вблизи поселков Берегово, Кабанск, Творогово. По данным гравиразведки, он выделяется слабо, что связано с небольшой вертикальной амплитудой разлома. Магниторазведкой выявлена узкая магнитная аномалия, секущая структуры фундамента вкрест простирания. В районе поселка Красный Яр аномалия меняет свое направление на северо-восточное, что, по всей видимости, происходит в результате появления древних интрузивных тел [Зорин, 1971; Солоненко, 1981].

На площади Селенгинской депрессии в 50-х гг. прошлого столетия было выполнено около 170 ВЭЗ с установкой Шлюмберже. Минимальный разнос генераторной линии составлял 6 м, а ее максимальные размеры достигали 10–16 км. Палеточная интерпретация данных ВЭЗ проведена в те годы А.П. Булмасовым, точность которой он оценил в 15–20 %. Одним из результатов является схематичная карта рельефа поверхности фундамента (рис.1, б).

Современные исследования депрессии проводятся в Институте земной коры СО РАН. Ведущим специалистом в области структурной геологии д.г.-м.н. О.В. Луниной составлена более детальная карта

разломно-блокового строения Селенгинской впадины. Она выделяет еще один разлом, параллельный Дельтовому, а Фофановский разлом продляет после пересечения с Дельтовым в сторону оз. Байкал, с направлением, немного смещенным на северо-восток [Мац, Ефимова, 2017; Лунина и др., 2021].

Очень высокая сейсмическая активность территории Селенгинской депрессии в пределах Байкальского рифта подтверждается сведениями об исторических землетрясениях. Самое сильное за последние 150 лет Цаганское землетрясение, значительно изменившее структуру дельты с образованием залива Провал, произошло 12 января 1862 г. ($M \sim 7.5$). Эпицентр события предполагается в районе этого залива. Основные макросейсмические последствия землетрясения, хорошо описанные и проанализированные, наблюдались в зоне Дельтового разлома. В его зоне произошли и другие сильные землетрясения прошлого столетия, в ходе которых образовались заливы Посольский и Истокский сор, аналогичные заливу Провал [Сейсмотектоника..., 1968; Голенецкий и др., 1995].

На рисунке 2 представлена карта эпицентров землетрясений за текущий 2022 г., на которой видно, что и в этом году на территории Селенгинской депрессии уже произошло большое число землетрясений достаточно высокого энергетического класса (<http://seis-bykl.ru>).

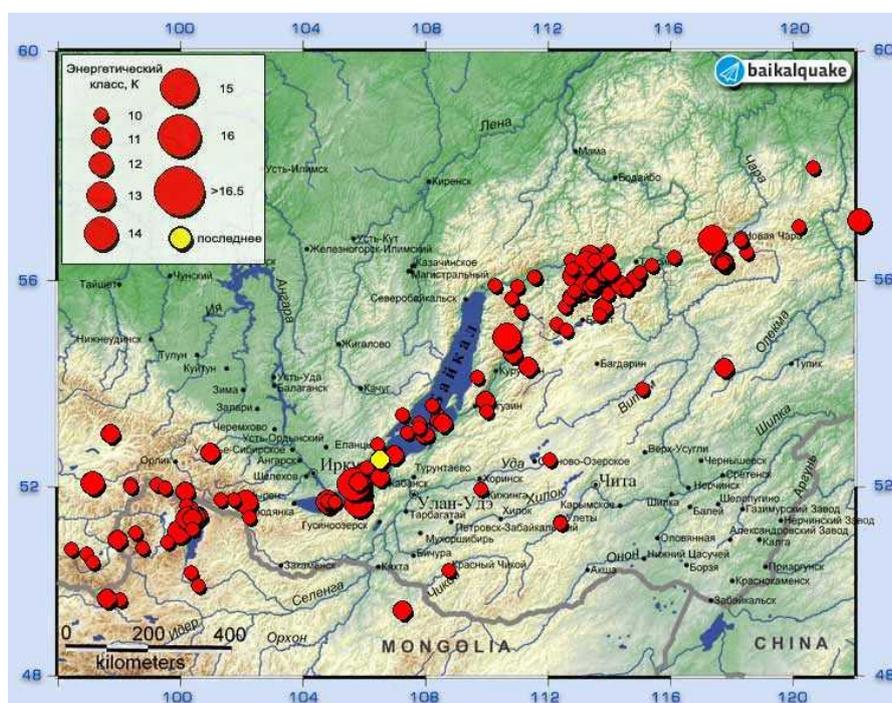
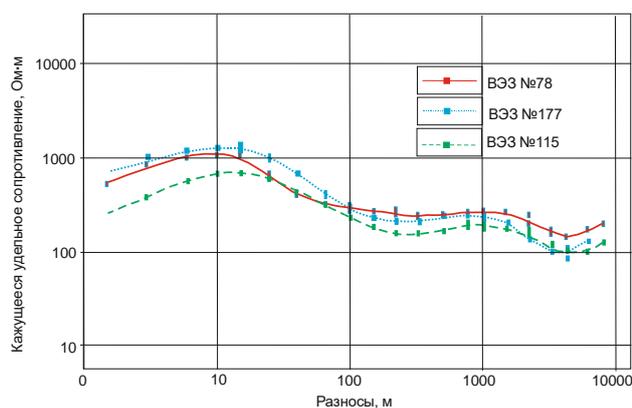
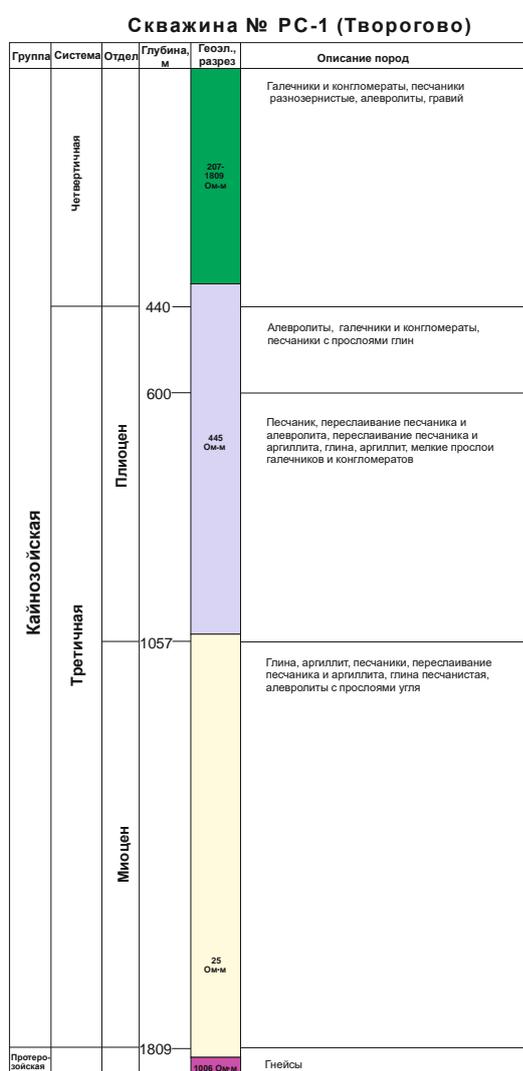


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений за 2022 год

В результате исследований 50-х гг. прошлого века на территории Селенгинской депрессии получены полевые данные ВЭЗ хорошего качества с погрешностями в пределах 5–6 %. В результате анализа этих данных, выполненного в 90-х гг., было установлено, что более 70 % кривых ВЭЗ позволяют провести интерпретацию с использованием горизонтально-слоистой модели. Остальной объем полевого материала составляли зондирования с видимыми искажениями полевых кривых на больших разносах ($AB/2 > 5000$ м). Было выяснено, что искажения обусловлены, в основном, сложным рельефом фундамента. Искажения были классифицированы и оценены. Также наблюдается небольшое число кривых с различным характером искажения по отношению к графикам зондирования над горизонтально-слоистой моделью [Мандельбаум и др., 1996а, б; Дашевский и др., 1999].

Все пункты ВЭЗ были размещены по профилям. Расстояние между пунктами ВЭЗ составляло в среднем 2.5 км (в отдельных местах до 7 км), между профилями – от 3 до 5 км. Всего в ходе работы над этой статьей для интерпретации было привлечено 150 кривых ВЭЗ.

Для обоснования интерпретационной модели Селенгинской депрессии были использованы различные априорные данные, из которых наиболее важными являются данные глубоких скважин, достигших докайнозойского фундамента. В первую очередь рассмотрены скважины в пос. Творогово (РС-1) и Колесово (РС-2). Скважины РС-1 и РС-2 пробурены на участках депрессии с существенно разной мощностью осадочного заполнения. В частности, скважина РС-1 находится в зоне Дельтового прогиба, а скважина РС-2 вскрыла фундамент в южной, менее глубокой части дельты [Солоненко, 1981]. Геоэлектрические модели по данным пунктов ВЭЗ, расположенных в районе этих скважин, были подобраны с учетом литологических характеристик и известных мощностей стратиграфических подразделений.



Модель среды для ВЭЗ №78			Модель среды для ВЭЗ №177			Модель среды для ВЭЗ №15		
Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м		Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м		Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м	
1	456	1.28	1	594	1.06	1	200	1.17
2	1890	5.5	2	1500	13	2	1033	8.5
3	303	71	3	335	43	3	300	41
4	207	317	4	170	177	4	129	240
5	445	651	5	372	591	5	286	753
6	25	780	6	21	881	6	23	1008
7	1006		7	1402		7	347	

Средняя погрешность: 5.51 % Средняя погрешность: 3.97 % Средняя погрешность: 3.74 %

Рис. 3. Согласование геоэлектрических моделей ВЭЗ с данными скважины РС-1 (Творогово)

В качестве примера на рис. 3 представлена скважинная колонка для скважины РС-1 и подобранные геоэлектрические модели. Скважина вскрыла кристаллический фундамент, представленный гнейсами на глубине 1809 м. На фундаменте залегают отложения миоцена мощностью в 712 м, характеризующиеся переслаиванием тонкослоистых глин, аргиллитов, песчаников, относящихся к

низкоомным породам. Вверх по разрезу в отложениях плиоцена общей мощностью в 618 м наряду с глинами и песчаниками присутствуют слои галечников и конгломератов, которые повышают значения УЭС. Наиболее неоднородные по литологическому составу четвертичные отложения составляют 440 м разреза и представлены конгломератами, галечниками, гравием, слоями песка с УЭС в широком диапазоне значений. Мощности и удельные электрические сопротивления горизонтов геоэлектрической модели неплохо соответствуют скважинным данным. Все кривые ВЭЗ, полученные в окрестности скважины, одного типа, погрешности подбора при инверсии данных составляют 4–5 % [Неведрова, 2013].

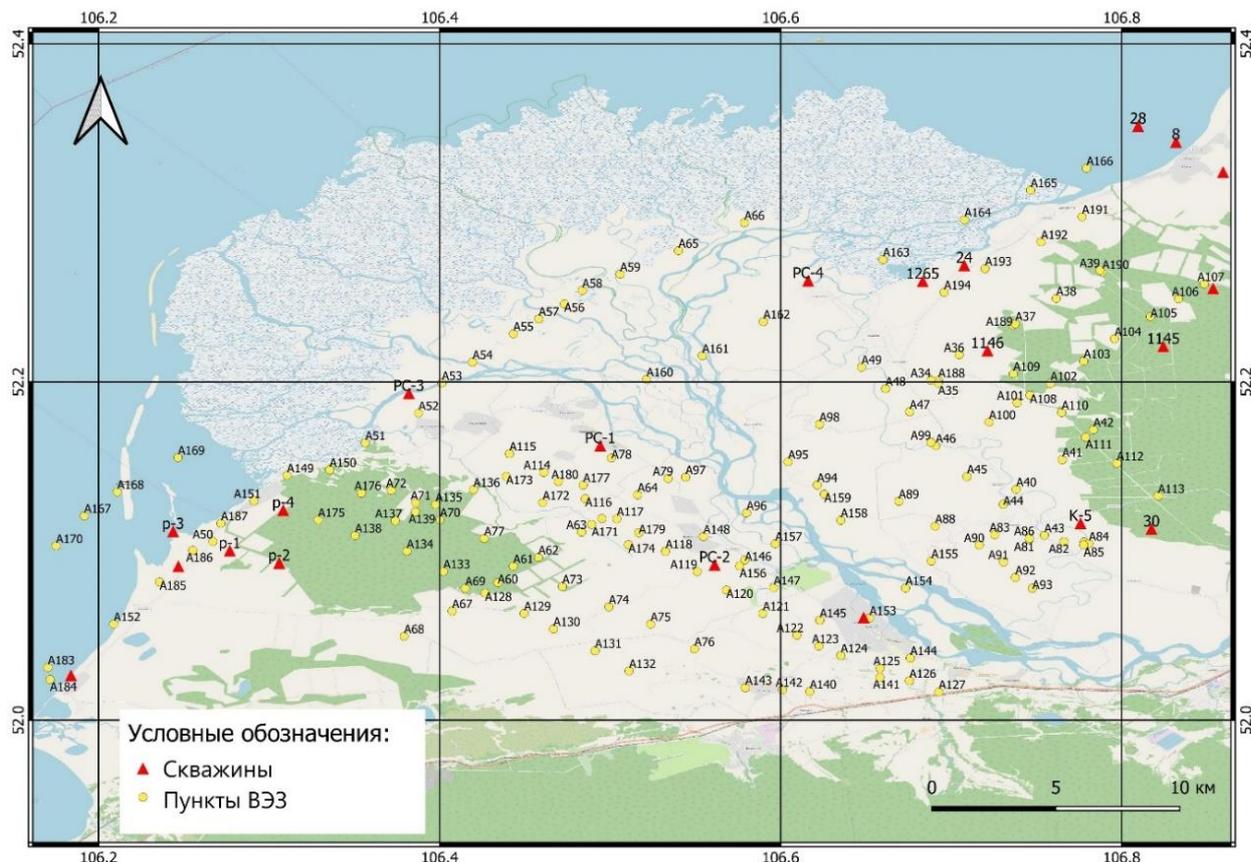


Рис. 4. Схема расположения пунктов ВЭЗ и скважин в Селенгинской депрессии

На рисунке 4 представлена схема расположения пунктов ВЭЗ и скважин на территории Селенгинской депрессии.

Для интерпретации данных ВЭЗ использован программный комплекс Zond Software (<http://zond-geo.ru>). На первом этапе интерпретация была выполнена в рамках горизонтально-слоистой модели среды. На втором этапе привлечены программы двух- и трехмерной инверсии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По результатам интерпретации данных ВЭЗ в рамках горизонтально-слоистой среды были получены геоэлектрические модели в каждом пункте зондирования. На рисунке 5 представлена трехмерная модель рельефа опорного горизонта (фундамента) Селенгинской депрессии по результатам одномерной интерпретации. Выделяется зона Дельтового разлома, Фофановский разлом, трассирующийся в северо-западном направлении в сторону озера Байкал, Твороговское поднятие.

По данным геоэлектрики Дельтовый разлом выделяется широкой полосой, которая в структурной геологии называется зоной или областью динамического влияния разлома [Шерман и др., 1983], включающей значительное количество блоков и разломов различных рангов. В целом, это протяженная область, где поднятия чередуются с зонами наибольшего прогиба опорного горизонта (фундаamenta) депрессии. Мощность осадочного чехла на отдельных участках прогибания превышает 4500 м. Ширина разломной зоны достигает 10 км.

Пунктирной линией на рис. 5 показан Фофановский разлом, который выделяется вдоль линии, разделяющей блоки с разной глубиной залегания опорного горизонта.

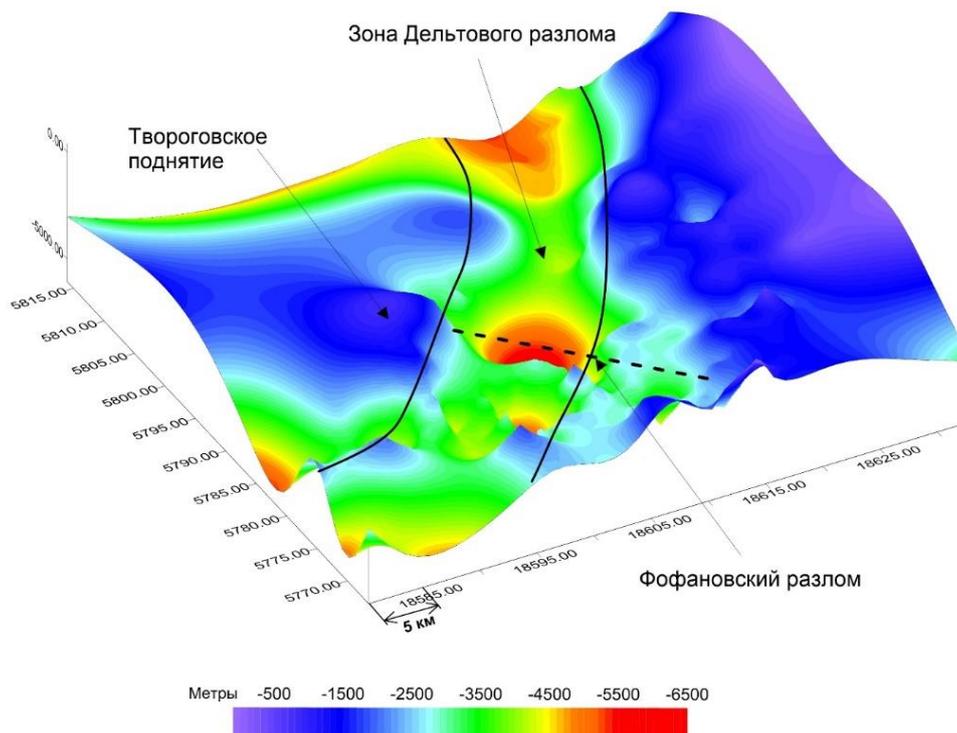


Рис. 5. Трехмерная модель рельефа опорного горизонта (фундаamenta) Селенгинской депрессии по данным ВЭЗ

На северо-западном участке дельты наблюдается приподнятый блок фундаamenta – Твороговское поднятие, ограниченное с юго-востока тектоническими структурами, субпараллельными Дельтовому разлому. Мощность осадочной толщи в пределах Твороговского поднятия не превышает двух километров. По данным геоэлектрики выяснено, что оно отделено от Истокского выступа прогибом. В этом случае по данным ВЭЗ удалось значительно уточнить строение северо-западной области дельты. Ранее эта область называлась Творогово-Истокским поднятием [Солоненко, 1968].

Далее была выполнена 2D инверсия данных с помощью программы Zondres2D. На рисунке 6 представлена 3D визуализация полученных двумерных разрезов, по которой можно оценить изменения УЭС по простиранию разрезов, мощности осадочных пород и интервал значений УЭС для основных структурных единиц депрессии. Трехмерная визуализация дает возможность проследить области поднятия фундаamenta в сторону Фофановской кристаллической перемычки – это разрезы в юго-восточной части депрессии по профилям северо-восточного (пр. 12, 13, 14, 15) и юго-восточного (пр. 7, 8, 9) простирания.

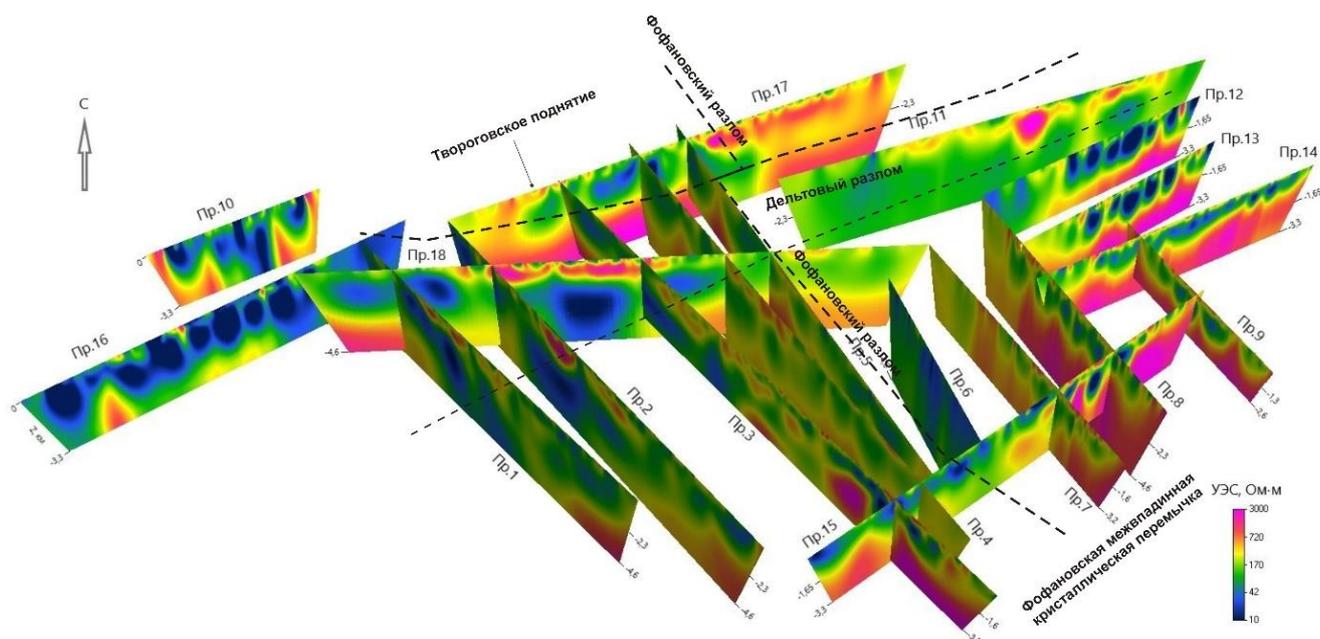


Рис. 6. 3D визуализация результатов 2D инверсии по профилям Селенгинской депрессии

Твороговское поднятие хорошо выделяется на разрезе по профилю 17 в его юго-западной части. Зоны максимального погружения фундамента наблюдаются в области Дельтового разлома (пр. 18), а также на разрезах по профилям 10 и 16 юго-западного простирания в сторону Усть-Селенгинской мезозойской впадины.

УЭС осадочных отложений существенно различно по площади депрессии, что связано, по всей видимости, с изменением литологического состава пород как миоценового, так и плиоценового возраста и согласуется с данными скважин. Наиболее низкоомные зоны проявляются на юго-западе и северо-востоке депрессии. Например, по данным скважины в районе п. Творогово миоценовые отложения представлены в большей степени алевролитами, глинистыми и песчаными породами с низким УЭС, в то время как по данным скважины в районе п. Колесово эти породы представлены песками, песчаниками, гравелитами с более высокими значениями УЭС. Аналогичные закономерности наблюдаются и для пород плиоценового возраста.

Далее по данным ВЭЗ профилей 1–5 выполнена трехмерная инверсия. Результаты представлены на рис. 7 в виде срезов трехмерной модели по трем направлениям. Северо-западная часть модели отражает распределение УЭС в зоне Дельтового активного разлома, где наблюдаются области пониженных значений УЭС (10–100 Ом·м) и большие глубины до фундамента (> 4.5 км). В юго-восточной части модели в сторону Фофановской кристаллической перемычки видны приподнятые блоки фундамента, кровля которого залегает неглубоко (2000–2500 м), что согласуется с результатами 1D и 2D инверсий. В верхней части модели практически везде выделяются протяженные интервалы повышенных значений сопротивлений. Скорее всего, это обусловлено наличием конгломератов четвертичного или плиоценового возраста на глубинах до 500 м, а также присутствием многолетнемерзлых пород. Области низких сопротивлений (10–100 Ом·м), судя по глубинам, соответствуют миоценовым отложениям, а интервалы пониженных значений УЭС в породах фундамента относятся к разломным зонам.

На основе 1D интерпретации, 2D, 3D инверсий всего объема архивных данных ВЭЗ построен рельеф кровли фундамента, разрезы по всем профилям измерений с трехмерной визуализацией и трехмерная геоэлектрическая модель участка Селенгинской депрессии. 3D модель включает юго-западную часть Дельтового разлома.

По всем полученным результатам можно сделать следующие выводы. Опорный горизонт выделяется по значениям УЭС в интервале от 700 до 3500 Ом·м (оттенки красного цвета). Зоны с более низкими значениями УЭС в опорном горизонте соответствуют разломным структурам. По геологическим данным опорный горизонт представлен породами фундамента протерозойского и архейского возраста. Залегающая выше низкоомная толща миоценовых отложений соответствует значениям УЭС в интервале от 20 до 70 Ом·м. В верхней литологически очень неоднородной части разреза присутствуют горизонты со значениями УЭС в широком диапазоне значений.

В структурном плане хорошо выделяется Твороговское поднятие, зоны как крупных (Дельтовый, Фофановский), так и более мелких разломов. Выделенные разломы хорошо согласуются с геологическими данными, полученные в том числе специалистами ИЗК СО РАН [Lunina, Denisenko, 2020], результатами прошлых исследований другими геофизическими и геологическими методами. К главным особенностям строения депрессии можно отнести мощный осадочный чехол (от 2 и > 4.5 км), а также существенно блоковое строение осадочного заполнения и фундамента, обусловленное многочисленными разнонаправленными разломными нарушениями. Таким образом, не стоит говорить о какой-то конкретной мощности осадков в Селенгинской депрессии, настолько дробно они дислоцированы.

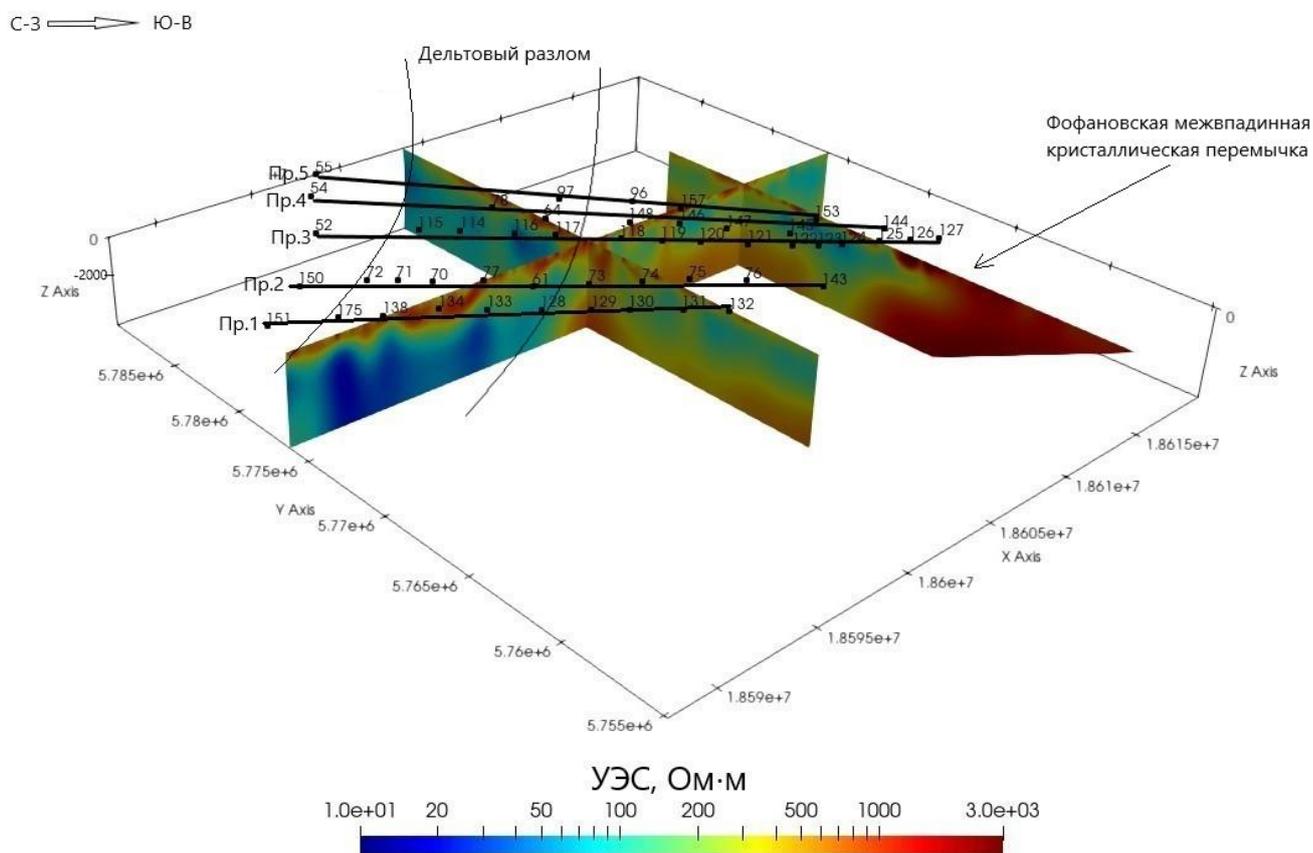


Рис. 7. Результат 3D инверсии. Трехмерная геоэлектрическая модель юго-западного участка Селенгинской депрессии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Байкальскую рифтовую зону входит значительное число разновеликих впадин. Несмотря на различные размеры и состав отложений, впадины имеют много общих черт геологического строения. Общим для всех рифтовых бассейнов является их четкая морфологическая выраженность, стратиграфическая характеристика осадочного чехла, характерные геофизические аномалии. К общим чертам относится также влияние мезозойских и кайнозойских тектонических движений на формирование впадин, которые резко отличались по своему характеру и привели к сложному сочетанию разнородных дислокаций, во многом зависящих от свойств древнего фундамента и мезо-кайнозойского осадочного покрова [Флоренсов, 1960]. Вместе с тем, у каждой впадины есть особенности строения, характерные только для нее. Например, большинство кайнозойских депрессий существенно различаются размерами, максимальной мощностью осадочного заполнения.

Селенгинская депрессия относится к наиболее ранним по заложению структурам БРЗ, она начала формироваться в начале рифтогенеза, так как именно в дельте в процессе бурения вскрыты наиболее древние в БРЗ осадки [Парфеевец, Саньков, 2006]. Параллельно с геологическими исследованиями впадины на ее территории применялись различные геофизические методы. Именно они позволяют изучить глубинную внутреннюю структуру этих сложнопостроенных объектов. По результатам электроразведочных работ 1951–1955 гг. методом ВЭЗ с разносами до 16 км, выполненных в нескольких впадинах, включая Селенгинскую, наряду с сейсморазведкой гравитационной, магнитной съемкой, были получены первые представления о глубинном строении впадин. Но палеточная интерпретация, единственно возможная в те годы, не позволила полноценно использовать уникальные данные ВЭЗ с такими большими разносами. Применение современных двумерных и трехмерных программ для интерпретации электромагнитных данных особенно актуально для сложнопостроенных неоднородных по литологическому составу объектов, какими являются все тектонические впадины.

В статье наглядное представление о глубинном строении Селенгинской депрессии получено с применением новых подходов к интерпретации данных ВЭЗ с использованием 2–3D программных средств инверсии. Уточнены геоэлектрические характеристики отдельных тектонических элементов: внутривпадинных перемычек и прогибов, разломных структур, что поможет продвинуться в понимании этапов формирования депрессии и роли геодинамических процессов, влияющих на внутреннее строение впадины в мезозойско-кайнозойское время.

Работы выполнены при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0025.

ЛИТЕРАТУРА

- Булмасов А.П.** Некоторые особенности геофизических полей и структуры земной коры Прибайкалья // Байкальский рифт: Сб. статей. – М.: Наука, 1968. – С.113–123.
- Голенецкий С.И., Ружич В.В., Дреннова Г.Ф., Емельянова И.А.** Ощутимые и сильные землетрясения района дельты Селенги и толчок 13 июля 1993 г. // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 4–5. – С. 215–223.
- Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Морозова Г.М., Грехов И.О., Поторочина Н.Г.** Тензочувствительные объекты в геоэлектрическом разрезе Байкальского прогностического полигона как индикатор подготовки сейсмических событий // Геология и геофизика. – 1999. – № 40 (3). – С. 409–421.

- Зорин Ю.А.** Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории. – М.: Наука, 1971. – 168 с.
- Лунина О.В.** Разломы плиоцен-четвертичной активизации юга восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов. Дис. ... докт. геол.-мин. наук: 25.00.03. – Иркутск, 2015. – 359 с.
- Лунина О.В., Денисенко И.А., Гладков А.А.** Особенности вертикальных смещений вдоль Дельтового разлома при Цаганском землетрясении 1862 г. на Байкале // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». – 2021. – № 37. – С. 70–86, doi: 10.26516/2073-3402.2021.37.70.
- Мандельбаум М.М., Эпов М.И., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Ельцов И.Н.** Сейсмическая активность и динамика электропроводности земной коры на Байкальском прогностическом полигоне // Геология и геофизика. – 1996а. – № 37 (6). – С. 88–94.
- Мандельбаум М.М., Дашевский Ю.А., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Грехов И.О., Мартынов А.А.** Технология геоинформационных систем при решении обратной задачи глубинных электрических зондирований // Геофизика. – 1996б. – № 1. – С. 29–37.
- Мац В.Д., Ефимова И.М.** Геологическая история Байкала // Природа. – 2017. – № 3. – С. 13–27.
- Морозова Г.М., Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Грехов И.О.** Глубинное распределение электропроводности и поле напряжений в земной коре Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. – 1999. – № 40 (3). – С. 332–345.
- Неведрова Н.Н.** Геоэлектрическое строение и вариации электропроводности по данным электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками: на примере регионов Сибири. Дис. ... докт. геол.-мин. наук: 25.00.10. – Новосибирск, 2013. – 360 с.
- Пакет программ ZOND**, <http://zond-geo.ru>.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А.** Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго–западной части Байкальской рифтовой системы. – Новосибирск: Академическое изд–во "Гео", 2006. – 149 с.
- Саркисян С.Г.** Мезозойские и третичные отложения Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 337 с.
- Сейсмотектоника** и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. – М.: Наука, 1968. – 217 с.
- Солоненко В.П.** Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт: Сб. статей. – М.: Наука, 1968. – С. 57–71.
- Солоненко В.П.** Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1981. – 169 с.
- Ушаков С.А., Федынский В.В., Шабалин Н.А.** Геофизические данные о природе рифтовых зон // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. – 1972. – № 3. – С. 3–19.
- Флоренсов Н.А.** Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. – Л.: Изд. АН СССР. Ленинградское отделение, 1960. – 258 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.** Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). – Новосибирск: Наука, 1983. – 112 с.
- Lunina O.V., Denisenko I.F.** Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. – 2020. – Vol. 141. – Article 104209, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104209.

REFERENCES

- Bulmasov A.P.** Some features of geophysical fields and crustal structures in the Baikal region // Baikal Rift [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1960. – P. 113–123.
- Dashevskij Yu.A., Nevedrova N.N., Morozova G.M., Grekhov I.O., Potorochina N.G.** Strain sensitive objects in the geoelectric section of the Baikal prognostic range as an indicator of the preparation of seismic events // Geology and Geophysics. – 1999. – Vol.40 (3). – P. 409–421.
- Florensov N.A.** Mesozoic and Cenozoic Basins in the Baikal Region [in Russian]. – Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moscow–Leningrad, 1960. – 258 p.
- Golenetskiy S.I., Ruzhich V.V., Drennova G.F., Emel'yanova I.A.** Large earthquakes in the area of the Selenga River delta and a shock of July 13, 1993 // Volcanology and Seismology. – 1996. – Vol. 17 (4–5). – P. 611–620.
- Lunina O.V.** Faults of the Pliocene–Quaternary activation in the south of Eastern Siberia and their role in the development of seismically induced geological processes. DSci. Thesis [in Russian]. – Irkutsk, 2015.
- Lunina O.V., Denisenko I.F.** Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. – 2020. – Vol. 141. – Article 104209, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104209.
- Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A.** Particularities of vertical displacements along the Delta fault during the 1862 Tsagan earthquake on Lake Baikal // Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Nauki o Zemle. – 2021. – Vol. 37. – P. 70–86 doi: 10.26516/2073-3402.2021.37.70.
- Mats V.D., Yefimova I.M.** Geological history of Lake Baikal // Priroda. – 2017. – Vol. 3. – P. 13–27.
- Mandel'baum M.M., Epov M.I., Morozova G.I., Nevedrova N.N., Yeltsov I.N.** Seismic activity and dynamics of electrical conductivity of the earth's crust at the Baikal polygon // Geology and Geophysics. – 1996a. – Vol. 37 (6). – P. 88–94.
- Mandelbaum M.M., Dashevsky Yu.A., Morozova G.M., Nevedrova N.N., Grekhov I.O., Martynov A.A.** GIS technology in inversion of electrical soundings // Geofizika. – 1996b. – Vol. 1. – P. 29–37.
- Morozova G.M., Dashevskij Yu.A., Nevedrova N.N., Grekhov I.O.** Deep accumulation of electrical conductivity and displacement fields in the Earth's crust of the Baikal prognostic polygon // Geology and Geophysics. – 1999. – Vol. 40 (3). – P. 332–345.
- Nevedrova N.N.** Geoelectric structure and variations in electrical conductivity according to electromagnetic sounding data with controlled sources: on the example of Siberian regions. DSci. Thesis [in Russian]. – Novosibirsk, 2013.
- Parfeev A.V., San'kov V.A.** Stress State of the Earth's Crust and Geodynamics of the Southwestern Part of the Baikal Rift System [in Russian]. – Geo, Novosibirsk, 2006. – 149 p.
- Sarkisyan S.G.** Mesozoic and Tertiary Sediments of the Baikal and Trans-Baikal Regions and the Russian Far East [in Russian]. – Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moscow, 1958. – 337 p.
- Solonenko V.P.** Seismogeology and Detailed Seismic Zoning of the Baikal Region [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1981. – 169 p.
- Seismotectonics and Seismicity of the Rift System of the Baikal Region** [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1968. – 217 p.
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu.** Areas of Dynamic Influence of Faults (Simulation Results) [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1983. – 112 p.

Solonenko V.P. Seismotectonics and modern structural development of the Baikal Rift Zone // Bajkal Rift [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1968. – P. 57–71.

Ushakov S.A., Fedynskij V.V., Shabalin N.A. Geophysical data on the nature of rift zones // Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. 4. Geology. – 1972. – Vol. 3. – P. 3–19.

Zond Geophysical Software, <http://zond-geo.com/english/>.

Zorin Yu.A. Recent Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Adjacent Territory [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1971. – 168 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕВЕДРОВА Нина Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация данных наземной геоэлектрики, электромагнитный мониторинг.

САНЧАА Айдиса Михайловна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация данных наземной геоэлектрики, трехмерное математическое моделирование.

ЩЕКАЕВА Елизавета Андреевна – студентка Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: интерпретация данных ВЭЗ.



КОЭФФИЦИЕНТНАЯ ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Е.Б. Сибиряков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики,
630009, Новосибирск, ул. Гурьевская, 51, Россия,
e-mail: SibiryakovEB@ipgg.sbras.ru*

В работе предложен алгоритм решения коэффициентной обратной задачи для уравнения Гельмгольца, использующий минимизацию функционала в спектральной области. В качестве примера рассмотрено нахождение параметров слоя на полупространстве по заданной функции и ее производной на плоской верхней границе в двумерном случае.

Коэффициентная обратная задача, уравнение Гельмгольца, спектральный метод

COEFFICIENT INVERSE PROBLEM FOR THE HELMHOLTZ EQUATION

E.B. Sibiryakov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
Siberian State University of Telecommunications and Information Science
Gurievskaya Str., 51, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: SibiryakovEB@ipgg.sbras.ru*

The paper proposed an algorithm for solving the coefficient inverse problem for the Helmholtz equation, which uses the minimization of the functional in the spectral domain. As an example, the parameters of layer on a half-space was found by using of a given function and its derivative on a plain upper boundary in 2D case.

Coefficient inverse problem, Helmholtz equation, spectral method

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициентная обратная задача заключается в нахождении коэффициентов дифференциального уравнения, как правило, с использованием какой-либо дополнительной информации о решении. Поскольку эти коэффициенты зависят от свойств среды, то коэффициентная обратная задача может быть как задачей нахождения свойств среды в зависимости от координат, так и задачей нахождения внутренних границ.

В работе [Аникиев и др., 2012] с помощью преобразования Радона обратная задача для волнового уравнения была сведена к уравнениям типа Гельфанда-Левитана. Однако там же отмечается, что метод плохо применим для низких частот. В работе [Карчевский, 2008] обсуждались разные алгоритмы

численного решения коэффициентных обратных задач для волнового уравнения с использованием разностных схем. Там же был сделан вывод, что обратные задачи для конечно-разностных уравнений являются самостоятельным объектом математического исследования. В статье [Сабитов, Мартемьянова, 2018] показано, что коэффициентная обратная задача для уравнения Гельмгольца является некорректной. Как отмечено в [Кабанихин, 2009] задача Коши для уравнения Лапласа стала первой задачей, на некорректность которой обратили внимание математики.

Обычно для нахождения неизвестных коэффициентов дифференциального уравнения используют решение сопряженной задачи и минимизацию функционалов невязок. Способ избежать минимизации функционалов был предложен в статье [Ватульян, Плотников, 2019]. На основе обобщенного принципа взаимности задача была сведена к некоторым интегральным уравнениям типа Фредгольма первого рода. По-видимому, этот подход оказался приемлемым лишь для градиентных сред. Важным является то, что для решения обратной задачи необходима дополнительная информация о решении. То есть нужна информация не только об отклике среды на нагрузку (обычно этим откликом являются перемещения), но и о самой нагрузке, создаваемой источником. Проблемой здесь является то, что процесс возбуждения, как правило, не является во всей области ни линейным, ни упругим. По этой причине нагрузка, используемая при решении задачи, вычисляется на некоторой эффективной поверхности, как если бы весь процесс был бы линейным и упругим. То есть сам вопрос получения дополнительных данных является нетривиальной, хотя и решаемой проблемой. Но без решения этого вопроса обратную задачу невозможно не только решить, но даже и поставить. Обычно, если волна является достаточно короткой, то нагрузку (источник поля) полагают импульсной и точечной. Это допустимо в случае достаточно коротких волн. Например, в работе [Karchevsky, 2002] в качестве источника использовалась объемная дельта-функция, а в статье [Карчевский, Фатьянов, 2001] – источник, близкий по характеристикам к малозаглубленному взрывному.

Таким образом, для того чтобы поставить обратную задачу для уравнения Гельмгольца, необходимо задать функцию на границе и нормальную производную от нее (как и для решения задачи Коши для уравнения Лапласа). Решение обратной задачи представляет из себя восстановление параметров среды (в том числе конфигурации границ).

Цель данной работы в том, чтобы определить возможность восстановления характеристик среды в случае колебаний, соответствующих достаточно длинной волне, при которой геометрия и функция источника имеют значение. При этом предполагается, используя отклик среды на монохромное колебание (всего на одной временной частоте), восстановить ее свойства (в том числе размеры слоев, заметно меньшие, чем пространственные длины волн, либо конфигурацию границ раздела акустических свойств). Без использования лучей, годографов и суммирования источников, излучающих из разных точек.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае двумерная обратная задача формулируется следующим образом. На плоской внешней поверхности (линии) находится система слоев, при этом нижний слой является полупространством (полуплоскостью). Известны функция на поверхности и ее нормальная производная. Верхняя граница – прямая линия $(0, x)$. Ось z направлена вниз. Интервал наблюдения верхней границы $[-\pi, \pi]$. За пределами этого интервала функция равна нулю. По аналогии с задачами линейной упругости обозначим нормальную производную от функции на поверхности символом $P(x) = \frac{\partial U}{\partial z}(0, x)$. Требуется

найти свойства слоев и границы, если таковые имеются. При этом функция удовлетворяет уравнению Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + k_i^2 U = 0. \quad (1)$$

Кроме того, на границе слоев выполняются условия непрерывности функции и нормальной производной. Если границы не являются плоскими, то они представляются в виде разложения по какой-либо системе функций с коэффициентами c_k . Задача состоит в том, чтобы найти коэффициенты k_i, c_k . При этом разумные диапазоны изменения этих параметров являются известными.

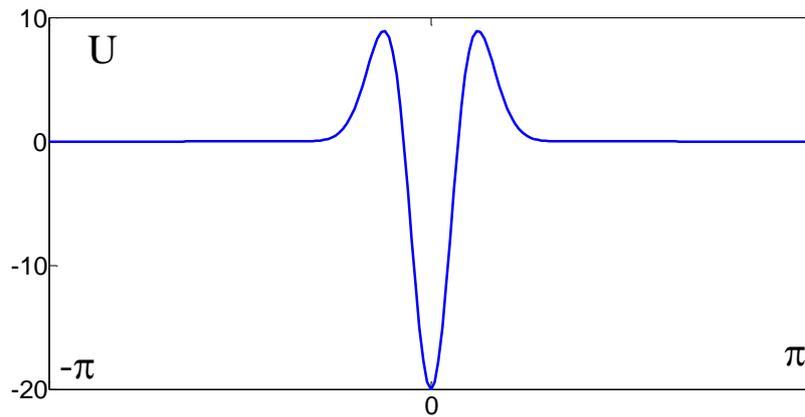


Рис. 1. Функция $U(x)$, заданная на поверхности

Одним из распространенных методов решения обратной задачи, то есть нахождения этих коэффициентов, является их перебор в диапазоне разумно допустимых для исследуемой среды. Если этих параметров много (перебрать все значения невозможно), то для их нахождения требуется упорядоченный перебор. Для этого используется функционал невязки. Этот функционал становится функцией многих переменных (параметров среды). Нужно найти минимум этой функции многих переменных, например, градиентным методом. Проблема заключается в том, что у этой функции может быть несколько локальных минимумов. Тогда использование градиентного метода будет проблематичным.

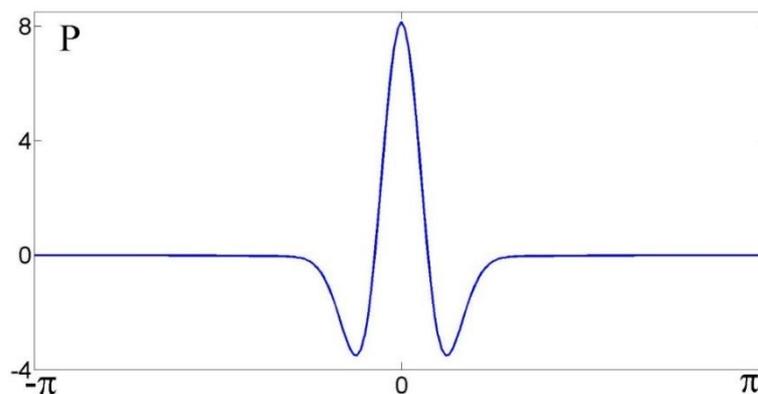


Рис. 2. $P(x)$ – нормальная производная от функции $U(0, x)$

В данной работе в расчетах нужно было восстановить три параметра среды: акустическое свойство слоя (он всего один) – k_1 , полупространства – k_2 и толщину плоского слоя – H . Несмотря на то что параметров всего три, это позволяет сделать некоторые качественные выводы о том, для чего, когда и как нужно использовать решения обратных задач на практике. Итак, на верхней поверхности задана функция (рис. 1), ее нормальная производная (рис. 2). Нужно восстановить толщину слоя, а также акустические свойства слоя и полупространства.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Необходимо по заданной на поверхности функции найти ее решение в объеме и после этого вычислить нормальную производную на поверхности. Для нахождения решения в объеме разложим функцию $U(0, x)$ на интервале в ряд Фурье по переменной x , полагая, что на интервале эта функция представлена рядом, а за его пределами есть ноль.

$$U(0, x) = \hat{U}_0 + \sum_{k_x=1}^{40} \hat{U}_{1k_x} \cos(k_x \omega_{0x} x) + \sum_{k_x=1}^{40} \hat{U}_{2k_x} \sin(k_x \omega_{0x} x) = \sum_{k=1}^{81} S_k U_k. \quad (2)$$

При этом $\omega_{0x} = 1$; $k_x = k - 1$, если $k < 42$ и $k_x = k - 41$, если $k \geq 42$.

$$S_k = \begin{cases} 1, (k = 1) \\ \cos(k_x x) (k < 42) \\ \sin(k_x x) (k \geq 42) \end{cases}; U_k = \begin{cases} \hat{U}_0 (k = 1) \\ \hat{U}_{1k_x} (k < 42) \\ \hat{U}_{2k_x} (k \geq 42) \end{cases}. \quad (3)$$

Если использовать данное разложение, то переменные разделяются, и задача сводится к краевой задаче для обыкновенного дифференциального уравнения, то есть для каждой компоненты S_k существует точное решение, которое и было использовано для вычисления функции $P(x)$. Истинные значения параметров среды (которые нужно найти), соответствующие функции, представленной на рис. 2, следующие: $k_1 = 0.4$; $k_2 = 0.8$; $H = 0.4$. В ходе решения осуществлялся перебор значений акустических параметров слоев и глубины слоя в интервале $[0.01, 1]$ с шагом 0.01. Таким образом, вычислялась функция четырех переменных $P_1(x, k_{1i}, k_{2j}, H_k)$.

Разложение решения на интервале наводит на мысль, что если параметров задачи много, то для ее решения следует аналогичным образом разложить функцию $P(x)$ и минимизировать спектральный функционал $J(k_{1i}, k_{2j}, H_k)$:

$$P(x) = \sum_{k=1}^{81} S_k(x) P_k; P_1(x) = \sum_{k=1}^{81} S_k(x) P_{1k}(k_{1i}, k_{2j}, H_k), \quad (4)$$

$$J(k_{1i}, k_{2j}, H_k) = \sum_{k=1}^{81} (P_k - P_{1k}(k_{1i}, k_{2j}, H_k))^2. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственный перебор во всем диапазоне параметров приводит к необходимости решения 100^n прямых задач (в данном случае $n = 3$). Непосредственное применение градиентного метода к минимизации функции трех переменных (5) в заданном, достаточно широком диапазоне параметров, дает отрицательный результат. Однако с помощью достаточно простых алгоритмов диапазон искомых оптимальных параметров может быть существенно сужен (т. е. может быть получено достаточно качественное первое приближение). Параметр слоя k_1 в первом приближении определяется как среднее

значение нескольких минимумов функций одной переменной. Фактически задача расщепляется. Значения этого параметра перебираются при фиксированных минимальных и максимальных значениях иных параметров. Значения параметров k_1 (при фиксированных прочих параметрах), при которых достигаются минимумы функции одной переменной, отличаются не очень сильно.

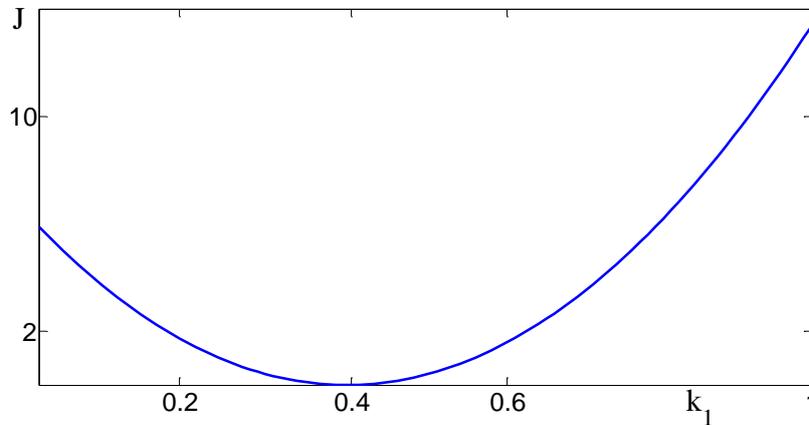


Рис. 3. Зависимость функционала (5) от параметра слоя k_1 при $k_2 = 0.1; H = 0.9$. Минимум близок к истинному значению $k_1 = 0.4$

На рисунке 3 представлена зависимость функционала от параметра слоя k_1 при $k_2 = 0.1; H = 0.9$. При этом минимум близок к истинному значению $k_1 = 0.4$. Причина, по которой минимум функционала значительно более чувствителен к акустическому свойству верхнего слоя, чем к остальным, по-видимому, следующая. Источник сгенерировал колебание, которое почти не замечает границу раздела. При этом функционал является энергетическим, но зависит, главным образом, от разности энергии колебаний на поверхности. Вклад в амплитуду толщины слоя и акустического параметра полупространства незначителен, около двух процентов.

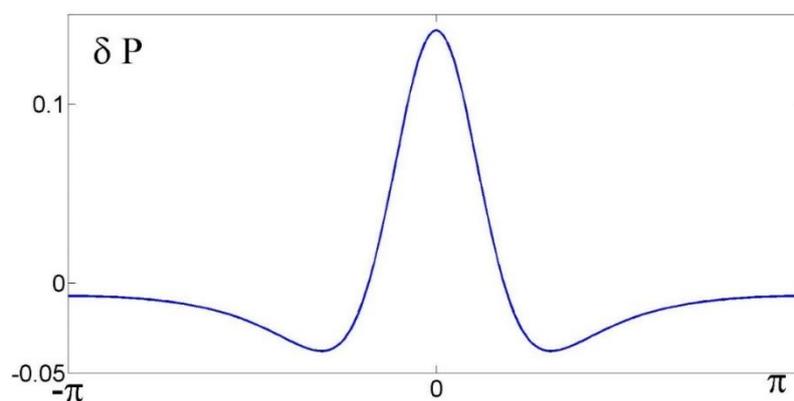


Рис. 4. Разность нормальных производных в данной постановке и для случая полупространства с параметром $k_1 = 0.4$

В частности, на рис. 4 представлена разность нормальной производной на поверхности для параметров задачи и для полупространства с параметром $k_1 = 0.4$ (граница отсутствует). Видно, что наличие такой почти невидимой для колебания границы уменьшает амплитуду почти пропорционально первой степени временной частоты и приводит к некоторому расплыванию сигнала.

Если параметр k_1 установлен близко к реальному значению, то для оставшейся функции двух переменных (в которую превращается функционал (5)) градиентный метод работает. Вычисление производных, как предложено в статье [Карчевский, Дедок, 2018], позволяет найти достоверный локальный минимум (и при необходимости уточнить параметр k_1).

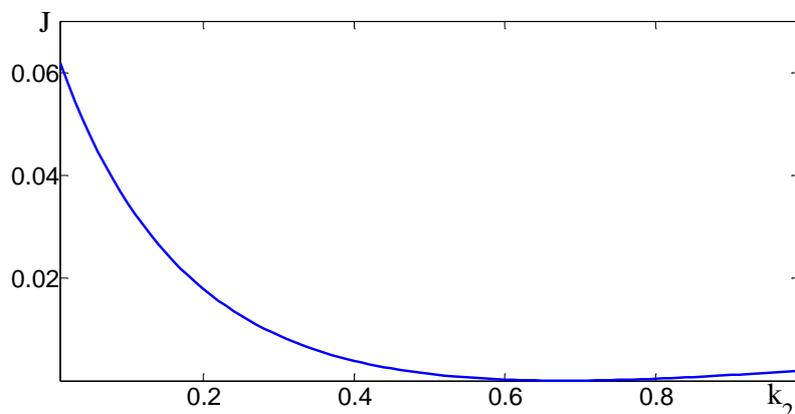


Рис. 5. Зависимость функционала (5) от параметра полупространства слоя k_2 при $k_1 = 0.4; H = 0.5$. Минимум близок к значению $k_2 = 0.7$

Перебор значений параметров при фиксированных прочих параметрах позволяет искать параметры среды в следующих пределах: $k_1 = 0.4 \pm 0.05; k_2 = 0.8 \pm 0.1; H = 0.4 \pm 0.1$. В частности, на рис. 5 представлена зависимость функционала (5) от параметра k_2 при $k_1 = 0.4$ и $H = 0.5$.

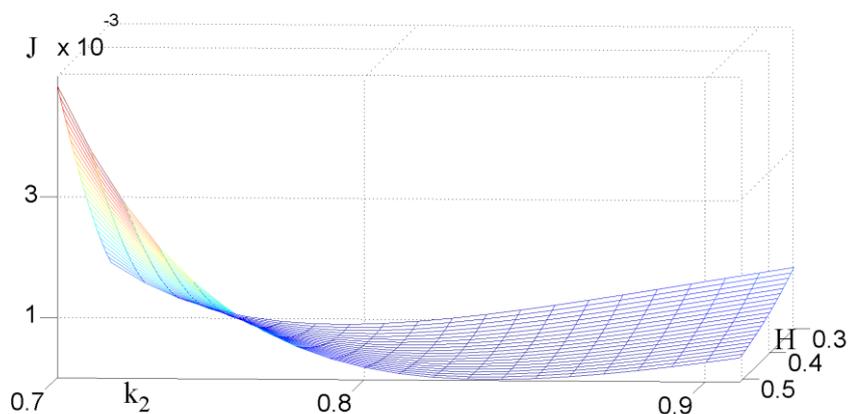


Рис. 6. Фрагмент функционала (5) как функции двух оставшихся переменных при установленном значении акустического параметра слоя

На рисунке 6, представлен фрагмент функционала при установленном значении параметра верхнего слоя. То есть для восстановления параметров сначала нужно восстанавливать те, которые вносят наибольший вклад в амплитуду сигнала, а потом восстанавливать остальные. Поэтому использовать минимизацию функционала невязки можно в том случае, если вклады параметров в реально измеренные данные сопоставимы, т. е. если вклад различается на один порядок, то оптимизировать с помощью подобного метода можно, если два порядка и более, то, по-видимому, уже нет.

Естественным образом возникает вопрос о том, сколько параметров можно восстановить в результате решения обратной задачи, при условии, что решение прямой задачи находится точно и

достоверно? При данном наборе параметров среды, заданной частоте и форме колебания на поверхности даже обнаружение одной границы можно считать хорошим результатом. Если снижать характерную пространственную длину колебаний, то можно будет восстановить большее количество параметров. Однако на более высоких частотах традиционные лучевые методы обработки сигналов могут дать значения начального приближения некоторых параметров с достаточно высокой степенью точности. В предельном случае лучевого приближения все параметры среды можно восстановить и без решения классических обратных задач. Это означает, что при решении обратной задачи методом минимизации функционала нужно принимать во внимание иерархию параметров по их влиянию на измеряемый сигнал. Тогда градиентные методы минимизации, по-видимому, будут работать надежно и достоверно.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача по восстановлению параметров слоя на полупространстве, слабо влияющего на волновое поле на поверхности. Для решения обратных задач для уравнения Гельмгольца предложено минимизировать функционал в спектральной области. Высказано обоснованное предположение, что при решении обратной задачи методом минимизации нужно принимать во внимание иерархию параметров по их влиянию на измеряемый сигнал. То есть оптимизировать функционал для нахождения параметров, влияние которых на сигнал отличается не более чем на порядок. Исходя из этого, выстраивать из предварительной информации иерархию параметров, подлежащих восстановлению. По этой причине находить решения обратных задачи методом оптимизации функционала следует только для одновременного нахождения тех параметров среды, влияние которых на сигнал сопоставимо по порядку величины. Возможно, что эти результаты можно будет использовать для решения задач пассивной сейсморазведки.

ЛИТЕРАТУРА

- Аникиев Д.В., Каштан Б.М., Благовещенский А.С., Мулдер В.А.** Точный динамический метод решения обратной задачи сейсмологии на основе интегральных уравнений Гельфанда–Левитана // Вопросы геофизики. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2012. – Вып. 44. – С. 49–81.
- Ватульян А.О., Плотников Д.К.** Обратные коэффициентные задачи в механике // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 3. – С. 37–47, doi: 10.15593/perm.mech/2019.3.04.
- Кабанихин С.И.** Обратные и некорректные задачи. Учебник для студентов высших учебных заведений. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – 457 с.
- Карчевский А.Л.** Корректная схема действий при численном решении обратной задачи оптимизационным методом // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2008. – № 11 (2). – С. 139–149.
- Карчевский А.Л., Фатьянов А.Г.** Численное решение обратной задачи для системы упругости с последствием для вертикально неоднородной среды // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2001. – № 4 (3). – С. 259–268.
- Карчевский А.Л., Дедок В.А.** Восстановление коэффициента диэлектрической проницаемости по модулю рассеянного электрического поля // Сибирский журнал промышленной математики. – 2018. – № 21 (3). – С. 50–59.
- Сабитов К.Б., Мартемьянова Н.В.** К вопросу о корректности обратных задач для неоднородного уравнения Гельмгольца // Вестник СГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2018. – № 22 (2). – С. 269–292.

Karchevsky A.L. Several remarks on numerical solution of the one-dimensional coefficient inverse problem // Journal of Inverse Ill-Posed Problems. – 2002. – Vol. 10 (4). – P. 361–383, doi: 10.1515/jiip.2002.10.4.361.

REFERENCES

Anikeev D.V., Kashtan B.M., Blagoveshenskii A.S., Mulder V.A. Exact dynamical method of the inverse seismic problem by integral Gelfand-Levitan equations // Problems of Geophysics. – St. Petersburg University Press, St. Petersburg, 2012. – Vol. 44. – P. 49–81.

Kabanikhin S.I. Inverse and Ill-posed Problems. Textbook for Students [in Russian]. – Siberian Scientific Publishing House, Novosibirsk, 2009. – 457 p.

Karchevsky A.L. Several remarks on numerical solution of the one-dimensional coefficient inverse problem // Journal of Inverse Ill-Posed Problems. – 2002. – Vol. 10 (4). – P. 361–383, doi: 10.1515/jiip.2002.10.4.361.

Karchevsky A.L. A proper flow chart for a numerical solution to an inverse problem by an optimization method // Numerical Analysis and Applications. – 2008. – Vol. 1. – P. 114–122, doi: 10.1134/S1995423908020031.

Karchevsky A.L., Fatianov A.G. Numerical solution of the inverse problem for a system of elasticity with the aftereffect for a vertically inhomogeneous medium // Sibirskii Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki. – 2001. – Vol. 4 (3). – P. 259–268.

Karchevsky A.L., Dedok V.A. Reconstruction of permittivity from the modulus of a scattered electric field // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – Vol. 12. – P. 470–478, doi: 10.1134/S1990478918030079.

Sabitov K.B., Martemyanova N.V. About correctness of inverse problem for the inhomogeneous Helmholtz equation // Vestnik SGTU. Ser. Physical and Mathematical Sciences. – 2018. – Vol. 22 (2). – P. 269–292.

Vatulyan A.O., Plotnikov D.K. Inverse coefficient problems in mechanics // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. – Vol. 3. – P. 37–47.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СИБИРЯКОВ Егор Борисович – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории вычислительной физики горных пород Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, профессор кафедры высшей математики Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Основные научные интересы: метод граничных элементов, микронеоднородные среды, удельная поверхность.



СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРРИГЕННОГО ВЕНДА НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ СКЛОНЕ НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

И.А. Коваленко^{1,2}, Ю.И. Кузнецова², А.Ю. Калинин^{1,2}, А.А. Дучков¹

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

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: I.Kovalenko9@g.nsu.ru

В результате комплексной интерпретации данных глубокого бурения и сейсмических материалов зоны сочленения Непско-Ботуобинской антеклизы и Ыгыаттинской впадины была построена сейсмогеологическая модель. Уточнено положение и распространение региональных высокоранговых разрывных нарушений и построена модель тектонических нарушений района исследования. В зависимости от стратиграфического интервала проявления все разрывные нарушения были разделены на три класса: секущие весь осадочный чехол; развитые в нижней части осадочного разреза, затухающие в солевой пачке кембрия; осложняющие верхний надсолевой комплекс пород. В рамках работы были разработаны критерии выделения зон выклинивания на примере отложений терригенного венда, с помощью которых были выделены нефтегазоперспективные объекты, связанные с литологическими ловушками в пределах талахского, улаханского и харыстанского продуктивных горизонтов.

Сейсмогеологическая модель, Непско-Ботуобинская антеклиза, терригенный венд

SEISMOGEOLOGICAL MODEL OF THE TERRIGENOUS VENDIAN DEPOSITS ON THE NORTH–EASTERN SLOPE OF THE NEPA-BOTUOBA ANTECLISE

I.A. Kovalenko^{1,2}, Yu.I. Kuznetsova², A.Yu. Kalinin^{1,2}, A.A. Duchkov¹

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

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: I.Kovalenko9@g.nsu.ru

A seismogeological model of the junction zone of the Nepa-Botuoba antecline and the Ygyattinskaya depression was built based on the results of a comprehensive interpretation of deep drilling and seismic data. The position and propagation of regional high-rank faults have been specified, and a model of tectonic faults of the study area has been constructed. All faults of the study area were divided into three classes: those that cut the entire sedimentary cover; developed in the lower part of the sedimentary section, fading in the Cambrian salt pack; complicating the upper post-salt complex of rocks. Criteria for identifying thinning zones were developed and were made use of to identify oil and gas perspective objects within the Talakh, Ulakhan and Kharystan productive horizons.

Seismological model, Nepa-Botuoba antecline, terrigenous Vendian

ВВЕДЕНИЕ

В административном отношении район исследования расположен в республике Саха (Якутия). Согласно схеме нефтегазогеологического районирования район относится к Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, охватывая северо-восточную часть Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области и юго-западную часть Западно-Виллюйской нефтегазоносной области. В тектоническом отношении изучаемый район приурочен к юго-восточной части Сибирской платформы, находится на северо-восточном склоне Непско-Ботуобинской антеклизы в зоне ее сочленения с Ыгыаттинской впадиной (рис. 1). Северо-восточная часть Непско-Ботуобинской антеклизы по плотности ресурсов нефти и газа занимает одно из ведущих мест на территории Сибирской платформы.

Район исследования расположен в непосредственной близости от уже открытых месторождений с промышленными запасами нефти и газа. Это группа мелких и средних газовых и газонефтяных месторождений в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы в северной части Мирнинского выступа (Станаское, Иреляхское, Маччобинское, Нелбинское, Северо-Нелбинское и Мирнинское), и южнее на Виллючанской седловине расположены Верхневиллючанское, Виллюйско-Джербинское и Иктехское месторождения.

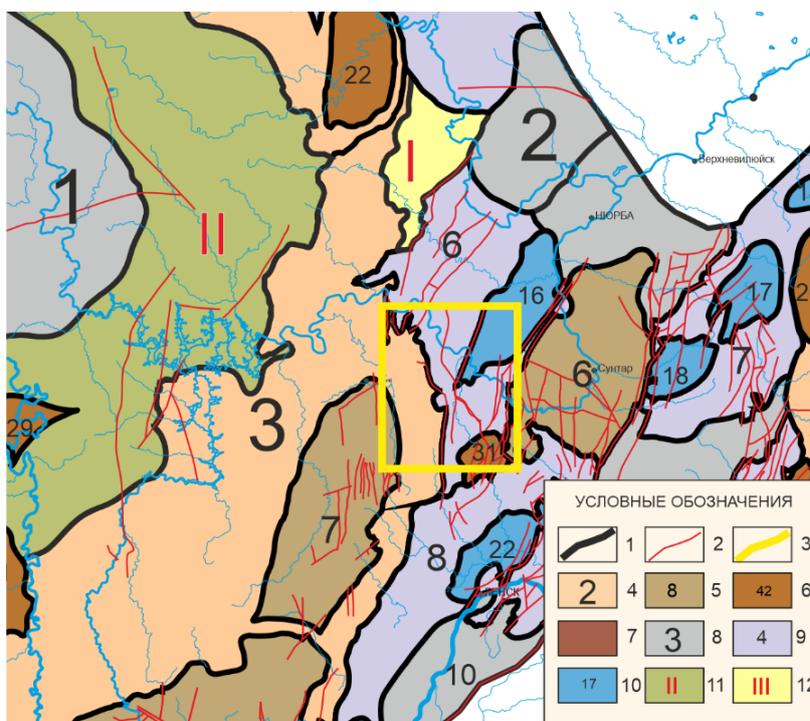


Рис. 1. Фрагмент тектонической карты венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (Конторович и др., 2009):

Условные обозначения: 1 – границы тектонических элементов, 2 – разрывные нарушения, 3 – граница исследуемой территории; 4–12 – тектонические элементы: 4–7 положительные: 4 – надпорядковые, 5 – I порядка, 6 – II порядка, 7 – III порядка; 8–10 – отрицательные: 8 – надпорядковые, 9 – I порядка, 10 – II порядка; 11–12 – промежуточные: 11 – моноклинали, 12 – седловины.

Положительные структуры: надпорядковые: 3 – Непско-Ботуобинская антеклизы; I порядка: 6 – Сунтарский свод, 7 – Мирнинский выступ; II порядка: 22 – Мархинское куполовидное поднятие, 26 – Наманинский вал, 29 – Наканновский структурный мыс, 31 – Верхневиллючанское куполовидное поднятие. **Отрицательные структуры:** надпорядковые: 2 – Виллюйская гемисинеклиза; I порядка: 6 – Ыгыаттинская впадина, 7 – Кемпендяйская впадина, 8 – Ньюско-Джербинская впадина; II порядка: 14 – Сарсанская котловина, 16 – Восточно-Ыгыаттинская котловина, 17 – Северо-Ботомоютская котловина, 18 – Южно-Ботомоютская котловина, 22 – Мурбайская котловина. Промежуточные структуры: I – Сюджерская мезоседловина, II – Мархино-Чуньская мегамоноклинали

Район характеризуется весьма сложным строением плитного комплекса – осадочный чехол разбит многочисленными тектоническими нарушениями и имеет блоковое строение. В.А. Топешко и Л.В. Рябкова в работе по типизации залежей нефти и газа юга Сибирской платформы [2000] установили, что наиболее интенсивно разломная тектоника проявилась именно на северо-востоке Непско-Ботубинской антеклизы, где 26 залежей из 38 экранированы плоскостью разлома. Вследствие чего тектонический фактор приобретает особое значение на исследуемой территории.

Основная нефтегазоносность Лено-Тунгусской провинции связана с вендским и венд-нижнекембрийским комплексами. Несмотря на относительно малую мощность вендского терригенного комплекса, в нем сосредоточено более половины от всех начальных суммарных ресурсов газа провинции и 18 % нефти. Лено-Тунгусская провинция характеризуется резкой изменчивостью ФЕС резервуаров и наличием литологических ловушек. Порядка 30 % открытых запасов углеводородов приходится на неантиклинальные ловушки рифей-венд-нижнекембрийских отложений, что выдвигает актуальную проблему прогноза коллектора. Отложения терригенного комплекса венда недостаточно изучены бурением в пределах исследуемого района, наличие открытых месторождений вблизи него указывают на возможность выделения и научного обоснования новых нефтегазоперспективных объектов.

Объект исследования является одним из перспективных неизученных участков Западной Якутии. Его перспективы определяются расположением района в доказанной зоне нефтегазонакопления северно-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы. И в связи с развитием работ по освоению нефтегазовых ресурсов Восточной Сибири, а также мегапроектом, объединяющим системы нефтегазопроводов центральной и западной Якутии, предлагаемый участок является высокоперспективным для дальнейшей постановки геологоразведочных работ.

Настоящая статья посвящена построению сейсмогеологической модели отложений терригенного венда и выявлению нефтегазоперспективных объектов на основе комплексной интерпретации данных сейсморазведки и глубокого бурения.

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В основу комплексной интерпретации легли пять профилей северо–северо-западного и северо–северо-восточного простирания, общей протяженностью порядка 500 км и охватывающие площадь около 13 тыс. км² (средняя плотность сейсморазведочных работ 0.12 пог. км/км²), данные глубокого бурения, включавшие дела скважин, геофизические исследования скважин и стратиграфические разбивки по шести скважинам (Багдынская 2810, Станакская 2611, Верхневиллючанская 620, Кугаская 3640, Виллюско-Джербинская 644, Виллюско-Джербинская 647), материалы вертикального сеймопрофилирования и информацию по интервальным скоростям распространения продольных волн (рис. 2). Для интерпретации сейсмических данных был использован сеймостратиграфический подход, в рамках которого были выделены и прослежены отражающие горизонты и ограниченные ими сейсмогеологические комплексы.

В пределах исследуемого объекта выделяются следующие отражающие горизонты: ДЗ – кровля аппаинской свиты девона (кровля девона), S – кровля меикской свиты силура, О1 – кровля балыктахской свиты ордовика (кровля ордовика), ОК – кровля верхнего кембрия, К – кровля чарской свиты, ОЧ – соленосные пачки в нижней части чарской свиты, I – кровля юрегинской свиты, II – кровля карбонатов билирской свиты или подошва юрегинских солей, KB – кровля терригенных отложений венда, Ф – поверхность кристаллического фундамента.

При интерпретации сейсмических данных в осадочном комплексе были выделены несколько сейсмических комплексов, ограниченных отражающими горизонтами (рис. 3): архей-протерозойский,

вендский, венд-нижнекембрийский, ниже-среднекембрийский, верхнекембрийско-силурийский и постдевонский.



Рис. 2. Схема изученности сейсморазведкой и глубоким бурением

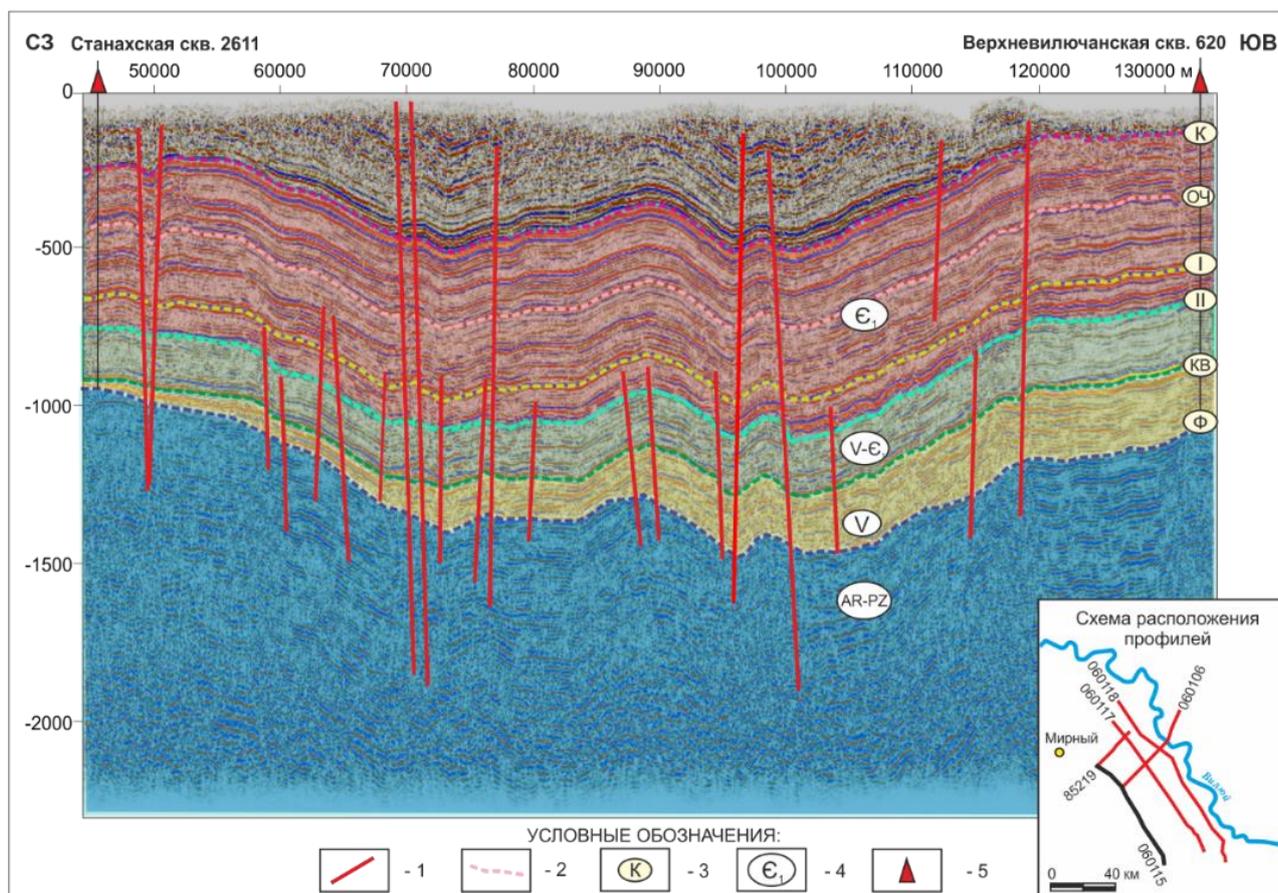


Рис. 3. Профиль с выделенными сейсмокомплексами и отражающими горизонтами: 1 – разрывные нарушения; 2 – основные отражающие горизонты; 3 – индексы отражающих горизонтов (Ф – кровля кристаллического фундамента; KB – кровля терригенных отложений венда (V); II – кровля билирской свиты (Є₁); I – кровля юрегинской свиты (Є₁); OЧ – кровля олекминской свиты (Є₁); K – кровля чарской свиты (Є₁); 4 – индексы сейсмических комплексов; 5 – скважины

В рамках выполнения данной работы была разработана классификация разрывных нарушений. В зависимости от стратиграфического интервала проявления все разрывные нарушения района исследования подразделяются на три класса (рис. 4):

- 1) Развитые в фундаменте, секущие всю толщу осадочного чехла (сквозные);
- 2) развитые в фундаменте, осложняющие только нижнюю часть разреза и затухающие в чехле;
- 3) развитые в верхней части осадочного разреза и затухающие в чехле.

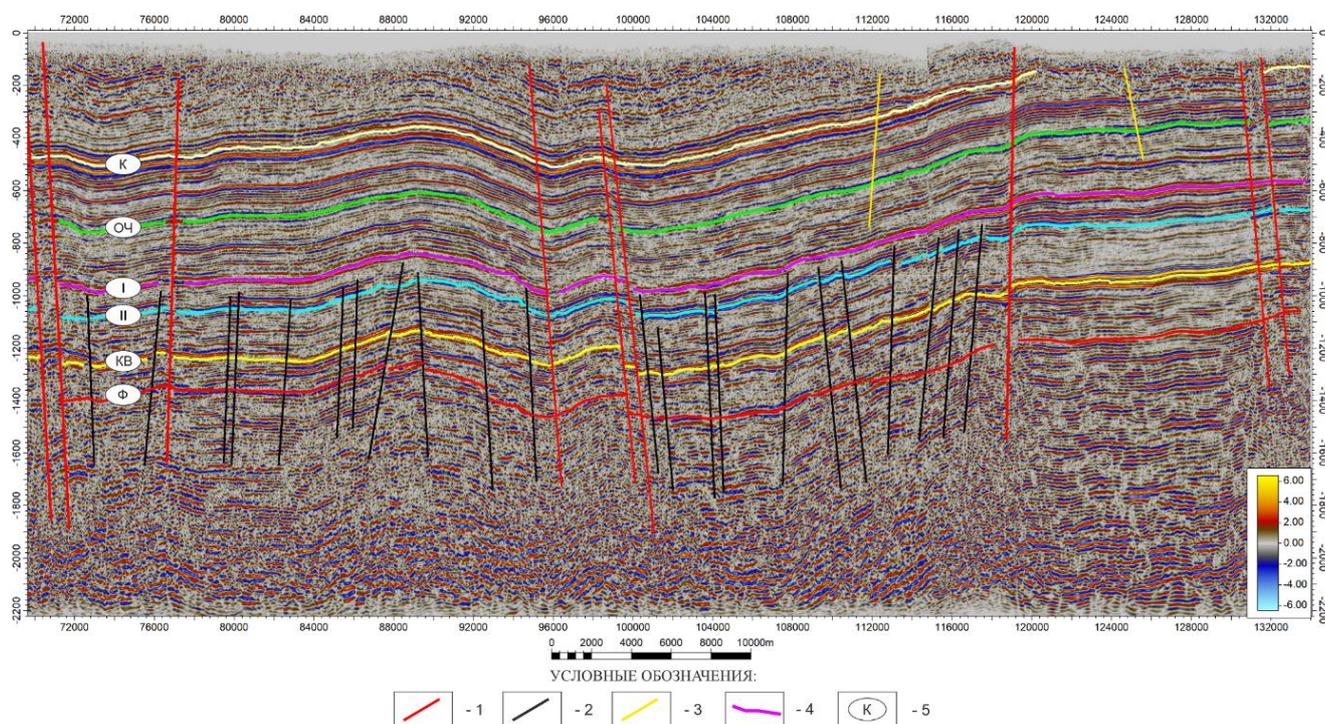


Рис. 4. Фрагмент временного сейсмического разреза. Разрывные нарушения: 1 – первого класса, 2 – второго класса, 3 – третьего класса; 4 – отражающие горизонты, 5 – индексы отражающих горизонтов

Первый класс разрывных нарушений широко распространен на исследуемой территории и представлен сбросами и взбросами регионального распространения субмеридионального северо–северо-восточного простирания. На временных разрезах они протрассированы по признакам: однотипности плоскости сместителя, по амплитуде, по затрагиваемым отложениям. В рамках выполнения работы были уточнены линии трассирования ранее выделенных Куранахского и Курунг-Юряхского сбросов, а также линии Ыгыаттинского сброса и Харыстанского разлома. Данные разрывные нарушения обладают высокой амплитудой до 1000 м и широкими зонами дробления от 500 до 2000 м. Заложение разрывных нарушений первого класса связано с развитием Вилюйской рифтовой системы и формированием Ыгыаттинской впадины в начале среднего девона [Гайдук, 1988].

Второй класс представлен разрывными нарушениями, развитыми в фундаменте и секущими только нижнюю часть осадочного разреза. Нарушения осложняют подсолевой осадочный комплекс и затухают под отражающим горизонтом I, который приурочен к кровле соленосной юрегинской свиты. Данный класс является самым многочисленным на территории исследования. Заложение разрывных нарушений второго класса может быть связано с перерывом в осадконакоплении и с тектоническими подвижками раннеаттабанского времени.

Разрывные нарушения, проявлявшие себя только в верхней части разреза, отнесены к третьему классу. Все они выявлены в галогенно-карбонатном надсолевом комплексе, обычно затухающие над

сейсмическим отражающим горизонтом ОЧ, приуроченным к кровле олёкминской свиты. Разрывные нарушения этого класса достаточно уверенно трассируются на сейсмических временных разрезах. Эти дизъюнктивные нарушения, как правило, не имеют связи с блоковым строением фундамента. Причинами их образования могут быть процессы выщелачивания активными растворами и перераспределения солей в кембрийском разрезе вследствие соляной тектоники [Шемин, 2007].

В данной работе была предпринята попытка картирования разрывных нарушений в плане. Изучаемая территория включает в себя три региональных профиля северо-западного простирания и два профиля северо-восточного простирания. Сложность трассирования разрывных нарушений между профилями заключалась в большом расстоянии между ними (в среднем около 30 км). Прослеживание малоамплитудных разрывных нарушений было практически невозможным на таком расстоянии. Поэтому были отслежены в плане и на временных сейсмических профилях только высокоранговые региональные тектонические нарушения по признакам однотипности плоскости сместителя, по амплитуде и по затрагиваемым отложениям (рис. 5).

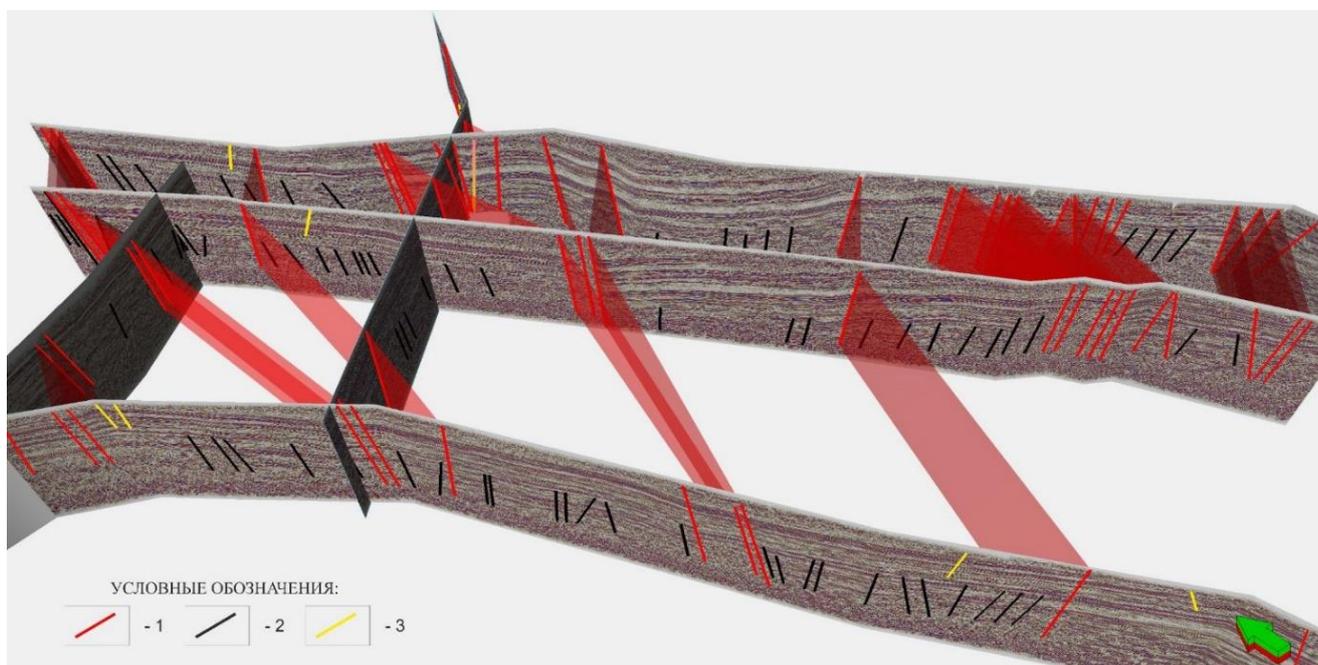


Рис. 5. Схема распространения разрывных нарушений: 1 – секущие весь осадочный чехол; 2 – развитые в нижнем подсолевом комплексе; 3 – осложняющие верхнюю часть разреза

В результате комплексной интерпретации данных сейсмической разведки и глубокого бурения была построена модель разрывных нарушений исследуемого района, которая включает в себя более 120 разрывных нарушений, 12 из которых имеют региональное распространение.

На нефтегазоносность района исследования оказали свое влияние только разрывные нарушения первого и второго классов. Разрывные нарушения, развитые в фундаменте и секущие только нижнюю часть разреза, должны учитываться при нефтегазопоисковых и разведочных работах по ряду причин:

- развиты в венд-нижнекембрийском интервале осадочного чехла, содержащим терригенные и карбонатные потенциально продуктивные горизонты;
- перекрыты региональным флюидоупором – галогенно-карбонатным экраном, представленным юрегинской свитой;

• предположительно являются непроницаемыми, следовательно, могут выполнять роль тектонических экранов.

Разрывные нарушения, секущие весь осадочный чехол, также предположительно являются экранирующими, поскольку они секут соледержащие слои, и формируемые ими проницаемые каналы быстро залечиваются галитом.

ДЕТАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРРИГЕННОГО ВЕНДА

Отложения терригенного венда являются одними из наиболее перспективных и малоизученных на исследуемой территории. В рамках работы они объединены в вендский сейсмогеологический комплекс (V), который ограничен в кровле отражающим горизонтом КВ и в подошве горизонтом Ф. Согласно стратиграфическим разбивкам по скважинам и детальной корреляции отложения терригенного венда наращивают свою мощность с северо-запада (северо-восточный склон Мирнинского выступа) на юго-восток (Сунтарский свод) от 40 до 584 м.

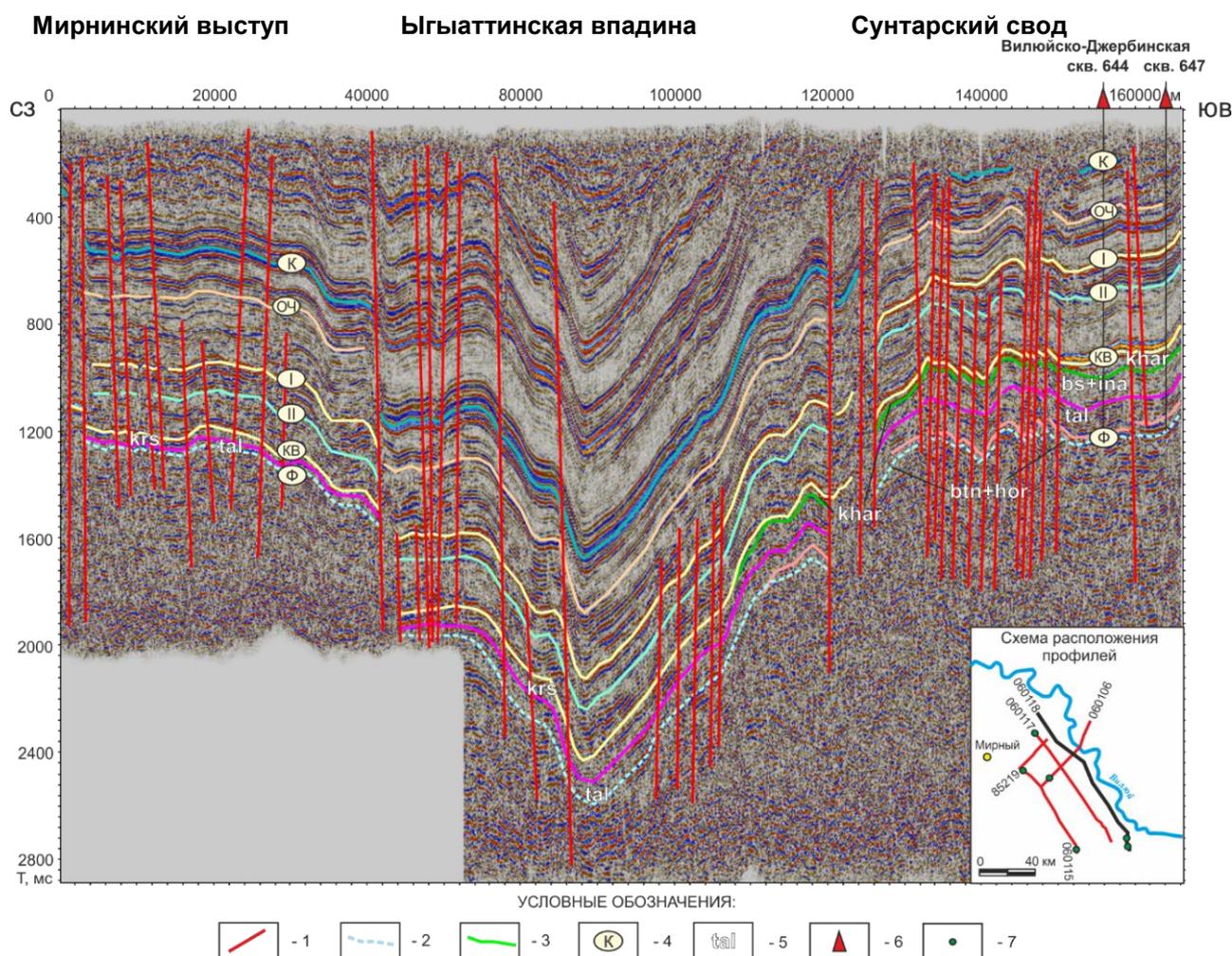


Рис. 6. Временной сейсмический разрез по профилю 060118: 1 – разрывные нарушения; 2, 3 – основные отражающие горизонты; 4 – индексы отражающих горизонтов: К – кровля чарской свиты, ОЧ – соленосные пакки в нижней части чарской свиты, I – кровля юрегинской свиты, II – кровля карбонатов билирской свиты или подошва юрегинских солей, КВ – кровля терригенных отложений венда, Ф- поверхность кристаллического фундамента; 5 – индексы свит: bet – бетинчинская, hor – хоронохская, tal – талахская, bs – бесоряхская, ina – ынахская, khar – харыстанская, krs – курсовская свита; 6, 7 – скважины

Район исследования находится на стыке крупных надпорядковых структур – Непско-Ботуобинской антеклизы и Вилюйской гемисинеклизы и их элементов I порядка: Мирнинского выступа, Ыгыаттинской впадины и Сунтарского свода (рис. 6). В пределах исследуемого района выделяются две структурно-фациальные зоны – Ботуобинская и Вилючанская, строение нижнего венда в которых принципиально различается (Стратиграфия..., 2005). Вилючанская структурно-фациальная зона находится на северо-востоке от Непско-Ботуобинской НГО, охватывая Сунтарский свод и северную часть Ыгыаттинской впадины. В ее пределах выделяются следующие свиты нижнего венда снизу вверх: бетинчинская, хоронохская, талахская, бесюряхская, ынахская, харыстанская и свиты верхнего венда: бюкская, успунская, кудулахская и юряхская. В пределах Ботуобинской зоны бетинчинская и хоронохская свиты отсутствуют, бесюряхской, ынахской, харыстанской соответствует курсовская свита (нижний венд), также вверх по разрезу выделяют бюкскую, успунскую, кудулахскую и юряхскую свиты.

Территория характеризуется латеральной неоднородностью среды, так как в отложениях терригенного венда существуют фациальные переходы, приводящие к изменению литологического состава, наличию зон выклинивания пластов и изменению их мощностей как по разрезу, так и по площади, что приводит к соответствующему изменению акустических свойств и, как следствие, к изменчивости волновой картины. Сложная волновая картина, ухудшение динамических свойств и связанные с ними потери прослеживаемости обусловлены глубоким залеганием отложений, влиянием вышележащих толщ, например, мощных слоев ниже-среднекембрийских солей, отсутствием резких скачков акустической жесткости в терригенном разрезе и наличием множества протяженных зон дизъюнктивных нарушений, затрагивающих весь осадочный комплекс, а также выходами траппов, находящихся на различной глубине.

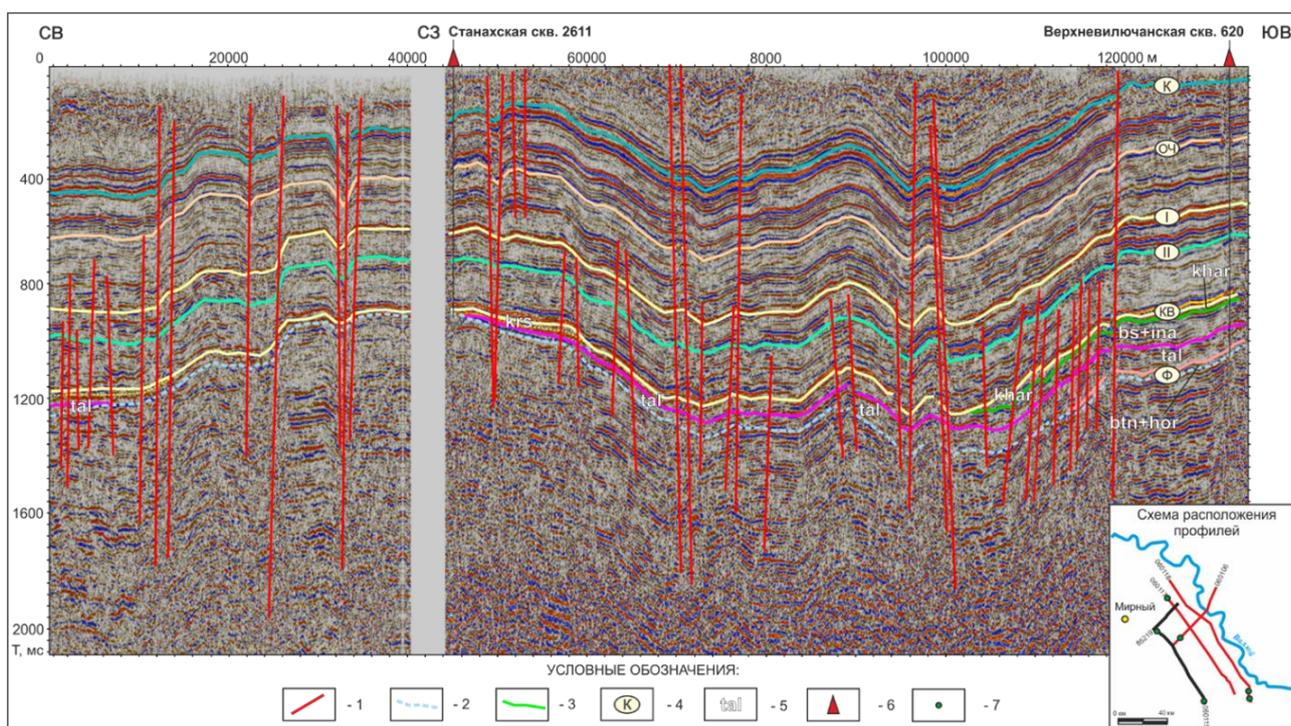


Рис. 7. Проинтерпретированные профили 851219 и 060115. Усл. обозн. см. рис. 6

На рисунке 7 представлен временной сейсмический разрез по профилю 060115, который протягивается от северо-восточного склона Непско-Ботуобинской антеклизы до Верхневилучанского куполовидного поднятия. Согласно стратиграфическим разбивкам в левой части профиля в составе

терригенного венда выделяется курсовская свита (23 м), ее мощность увеличивается в юго-восточном направлении за счет доломитов и разделяется на бесюряхскую, ынахскую и местами харыстанскую свиты, преимущественно глинисто-карбонатного состава. В южной части профиля общая мощность бесюряхской и ынахской свит составляет 141 м, харыстанской 33 м.

Отражение кровли талахской свиты появляется в волновом поле вблизи Станахской скважины, ее мощность увеличивается в юго-восточном направлении от 0 до 100 м (Верхневиллючанская скв. 620). В правой части профиля в основании выделяются бетинчинская и хоронохская свиты, имеющие общую мощность 44 м и выклинивающиеся в северо-западном направлении.

На базе комплексной интерпретации имеющихся данных были разработаны критерии выделения зон выклинивания отложений терригенного венда в пределах исследуемого района: появление новой фазы, усложнение и раздваивание фаз, появление зон падения амплитудных характеристик, сокращение временной мощности за счет увеличения терригенной составляющей.

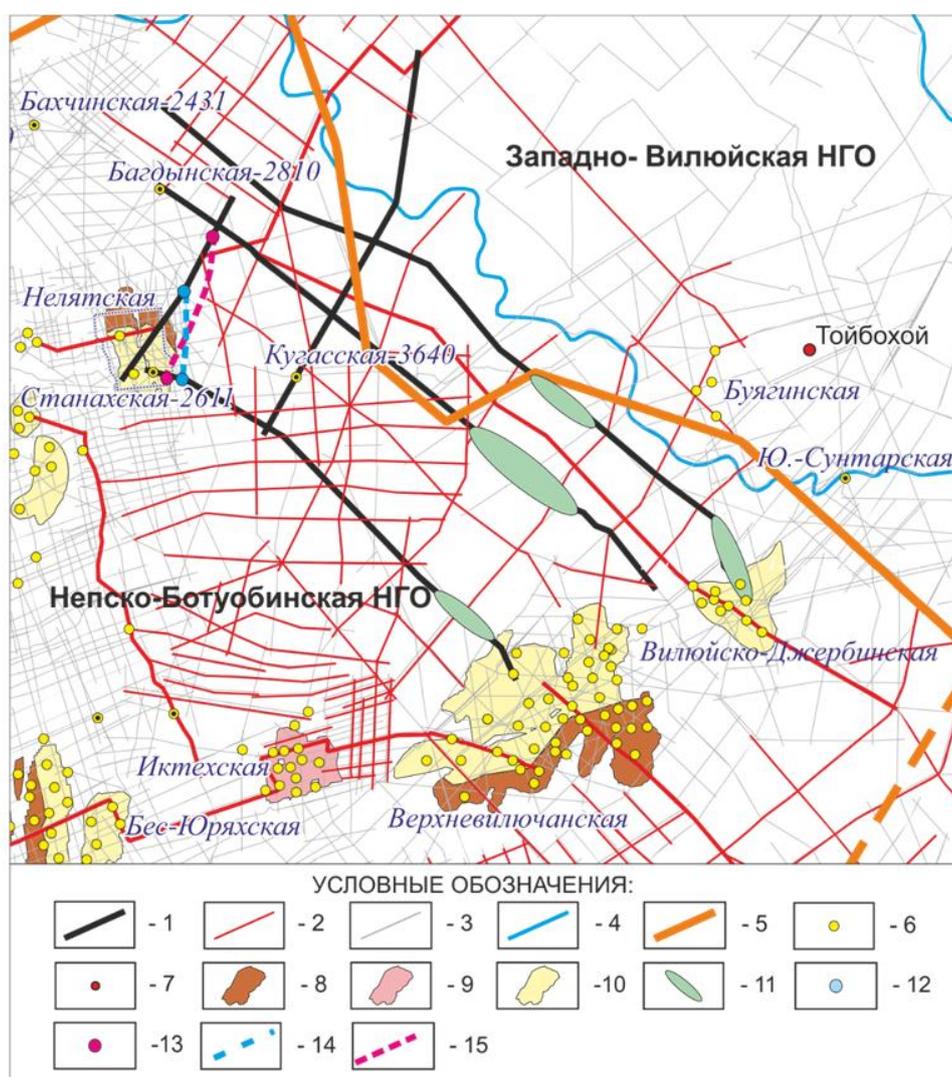


Рис. 8. Прогнозная схема распределения перспективных объектов. 1 – профили, используемые в работе; 2, 3 – все сейсмические профили участка; 4 – гидросеть; 5 – границы нефтегазоносных областей; 6 – скважины; 7 – населенные пункты; 8, 9, 10 – месторождения, 8 – нефтяные, 9 – газоконденсатные, 10 – газовые; 11 – предполагаемая область распространения харыстанских песчаников; 12, 13 – предполагаемые зоны выклинивания продуктивных горизонтов, 12 – улаханского, 13 – талахского; 14, 15 – предполагаемая линия выклинивания продуктивных горизонтов, 14 – улаханского, 15 – талахского

В рамках работы на базе разработанных критериев были выделены шесть предполагаемых нефтегазоперспективных объектов, связанные с литологическими ловушками в улаханском, талахском и харыстанском продуктивных горизонтах. Обнаружены предположительно песчаные линзовидные тела в харыстанской свите на юго-восточном склоне Вилючанской седловины и юго-западном склоне Сунтарского свода. Выклинивание улаханского продуктивного горизонта отмечено в пределах северо-восточного склона Мирнинского выступа на Станакской площади. Также в пределах Станакской площади была выделена предполагаемая ловушка, связанная с выклиниванием талахского горизонта, прослеживаемого в северо-восточном направлении вдоль восточного склона Мирнинского выступа (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы было уточнено положение и распространение региональных высокоранговых разрывных нарушений и построена модель тектонических нарушений района исследования. Предложена классификация разрывных нарушений в зависимости от стратиграфического интервала их проявления. Разрывные нарушения второго класса, развитые в фундаменте и секущие только нижнюю часть разреза, являются экранирующими для потенциальных нефтегазовых залежей, локализованных в терригенном комплексе венда и карбонатном комплексе венда–нижнего кембрия.

Были разработаны критерии выделения зон выклинивания на временных разрезах на примере отложений терригенного венда, с помощью которых были выделены шесть нефтегазоперспективных объектов, которые могут выступать в роли неантиклинальных ловушек. На северо-восточном склоне Непско-Ботуобинской антеклизы намечены линии выклинивания талахского и улаханского продуктивных горизонтов, на северо-западном склоне Вилючанской седловины выделены выклинивания харыстанского и вилючанского горизонтов. Также в пределах юго-западной части Сунтарского склона выделен объект, интерпретируемый как зона выклинивания харыстанского горизонта. К предварительно намеченным зонам выклинивания, которые нуждаются в уточнении с привлечением дополнительной геолого-геофизической информации, вероятно, приурочены нефтегазоперспективные объекты, по аналогии с уже открытыми месторождениями вблизи исследуемого района.

Авторы благодарны к.г.-м.н., заведующему лаборатории геологии нефти и газа Сибирской платформы ИНГГ СО РАН И.А. Губину за предоставленные данные для исследования.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований ИНГГ СО РАН (Проект в ИСГЗ Минобрнауки № 0266-2022-0008) и при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0025.

ЛИТЕРАТУРА

- Гайдук В.В.** Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. – Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1988. – 126 с.
- Конторович А.Э., Беляев С.Ю., Конторович А.А., Старосельцев В.С., Мандельбаум М.М., Мигурский А.В., Моисеев С.А., Сафронов А.Ф., Ситников В.С., Филипцов Ю.А., Хоменко А.В., Ерёмин Ю.Г., Быкова О.В.** Тектоническая карта венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. – 2009. – № 50 (8). – С. 851–862.

Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. – Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО», 2005. – 428 с.

Топешко В.А., Рябкова Л.В. Типы залежей нефти и газа юга Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2000. – № 41 (6). – С. 896–904.

Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2007. – 467 с.

REFERENCES

Gaiduk V.V. Vilyui Middle Paleozoic Rift System [in Russian]. – YAF SO AN SSSR, Yakutsk, 1988, – 126 p.

Kontorovich A.E., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.A., Starosel'tsev V.S., Mandel'baum M.M., Migurskii A.V., Moiseev S.A., Safronov A.F., Sitnikov V.S., Filiptsov Yu.A., Khomenko A.V., Eremin Yu.G., Bykova O.V. Tectonic map of the Vendian–Lower Paleozoic structural stage of the Lena–Tunguska petroleum province, Siberian Platform // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50 (8). – P. 657–667, doi: 10.1016/j.rgg.2008.10.005.

Stratigraphy of Oil and Gas Bearing Basins in Siberia. Riphean and Vendian of the Siberian Platform and Its Folded Frame [in Russian]. – GEO, Novosibirsk, 2005. – 428 p.

Topeshko V.A., Ryabkova L.V. Types of oil and gas deposits in the south of the Siberian platform // Russian Geology and Geophysics. – 2000. – Vol. 41 (6). – P. 896–904.

Shemin G.G. Geology and Prospects of Oil and Gas Potential of the Vendian and Lower Cambrian of the Central Regions of the Siberian Platform (Nepa-Botuoba, Baikitskaya anteklises and Katanga Saddle) [in Russian]. – Izd. SO RAN, Novosibirsk, 2007. – 467 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КОВАЛЕНКО Илья Андреевич – инженер лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, аспирант НГУ. Основные научные интересы: интерпретация сейсморазведочных данных, атрибутный анализ.

КУЗНЕЦОВА Юлия Игоревна – младший научный сотрудник лаборатории программных систем оптимизации добычи углеводородов НГУ. Основные научные интересы: интерпретация скважинных и сейсморазведочных данных.

КАЛИНИН Александр Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем. Основные научные интересы: разработка методических приемов картирования зон распространения и оценки качества коллекторов на базе комплексирования данных сейсморазведки, ГИС и глубокого бурения.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая миграция; алгоритмы обработки сейсморазведочных данных, микросейсмический мониторинг гидроразрыва.