

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ**

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2017

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН,
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, председатель Президиума
Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово; научный руководитель Института
нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук,
генеральный директор АО «СНИИГГиМС», Новосибирск
А. С. Ефимов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному
округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля
2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторожде-
ний полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т.
Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 237 с.

ISBN 978-5-906948-29-8 (т. 4)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

В сборнике опубликованы материалы XIII Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017», представленные на Международной научной конферен-
ции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и раз-
работки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-906948-29-8 (т. 4)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

© СГУГиТ, 2017

ЛАТЕРАЛЬНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД СИБИРСКИМ КРАТОНОМ

Елена Александровна Мельник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. (383)330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Владимир Дмитриевич Суворов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. (383)330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Евгений Владимирович Павлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. (383)330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Показаны результаты лучевого моделирования верхней мантии Сибири по данным мирных ядерных взрывов по профилям Рифт, Метеорит и Кратон. Используется слоисто-неоднородная модель с существенными латеральными вариациями скорости продольных волн. Обсуждаются вопросы разделения вертикальной расслоенности литосферы и ее латеральных неоднородностей совместно с гравитационным моделированием.

Ключевые слова: ядерные взрывы, верхняя мантия, Сибирская платформа, сейсмоплотностное моделирование.

LATERAL SEISMIC HETEROGENEITIES OF THE UPPER MANTLE BENEATH THE SIBERIAN CRATON

Elena A. Melnik

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Chief of laboratory of deep geophysical investigations and regional seismology, tel. (383)330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Vladimir D. Suvorov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Principal Research Scientist, Laboratory of deep geophysical investigations and regional seismology, tel. (383)330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Evgeny V. Pavlov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, Laboratory of deep geophysical investigations and regional seismology, tel. (383)330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

Shows the results of ray tracing modeling of the upper mantle of Siberia according to the peaceful nuclear explosions for the Rift, Kraton and Meteorite. Uses a layered-inhomogeneity mod-

el with significant lateral variations of the velocity of P waves. Discusses the separation of the vertical layering of the lithosphere and its lateral heterogeneities. To narrow the ambiguity of the solution was used seismic gravitational modeling.

Key words: nuclear explosions, upper mantle, Siberian platform, seismic and gravity modeling.

Оценка сейсмической мощности литосферы в Сибири остается дискуссионной, несмотря на имеющиеся уникальные наблюдения подземных ядерных взрывов вдоль сверхдлинных профилей. В работах [3, 4, 8, 11, 13–15] в верхней мантии выделяются протяженные слои с относительно пониженной и повышенной скоростью продольных волн. Вместе с тем при расстояниях между пунктами взрыва около 1000 км нет возможности однозначно разделить изменения скорости вследствие слоистости и/или латеральной неоднородности. В этой связи имеет смысл использовать латерально неоднородные модели, в которых введение протяженных субгоризонтальных, слабо неоднородных слоев рассматривается как вынужденная мера, без которой не удастся получить достаточную согласованность наблюдаемых и теоретических времен пробега волн. При таком подходе модель значительно упрощается, выделяемые аномалии скорости, отчетливо выраженные в изменениях кажущейся скорости, характеризуются размерами более 300 км и поэтому представляются достаточно обоснованными [9, 12, 16].

Построение сейсмических разрезов верхней мантии по профилям Рифт, Метеорит и Кратон (рис. 1) выполнено с применением двумерного лучевого моделирования непосредственно в сферической модели Земли [18].

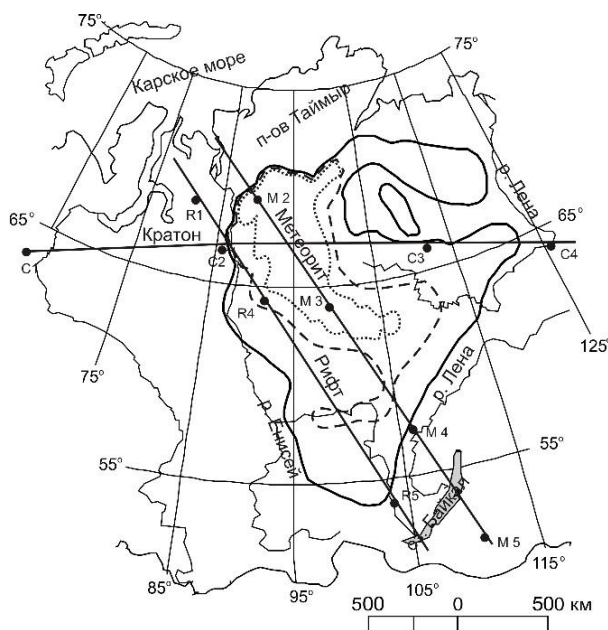


Рис. 1. Схема расположения профилей Рифт, Метеорит и Кратон.

Обозначены области преобладающего распространения траппов (контур точечной линией), туфогенных толщ (штриховой) и развития интрузивных траппов (силлы, дайки, сплошная линия) [5]. Кружки – положение и номера пунктов взрыва в соответствии с [17]

Интерес представляет сравнение скоростных неоднородностей литосферы под Сибирской платформой, Западно-Сибирской плитой, Тунгусской и Вилуйской синеклизами. Интерпретационный аспект наших моделей связан с проблемой изучения природы внутриплитного магматизма в Восточной Сибири за счет влияния высокотемпературных плюмов [2].

В качестве примера рассмотрим разрез по профилю Кратон (рис. 2) [16].

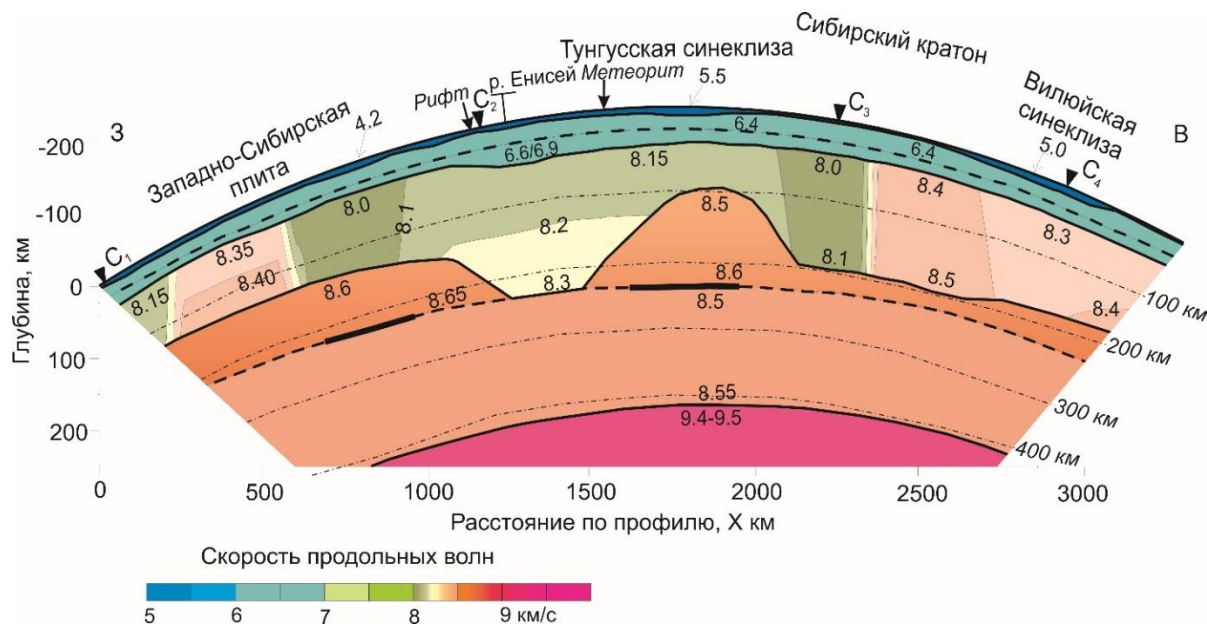


Рис. 2. Скоростная модель верхней мантии по профилю Кратон.

Тонкими линиями показаны изолинии скорости в км/с, толстыми – со скачком скорости, треугольники – пункты взрыва. Х – хорда сегмента большого круга Земли с длиной дуги $L=3570$ км. Штриховыми линиями показаны уровни глубин 100, 200, 300 и 400 км, а стрелками – пересечения с профилями Рифт и Метеорит

В верхней мантии выделяются два структурных этажа: наиболее неоднородный верхний и практически однородный до границы «410 км» нижний. Наблюдается исключительно контрастное латеральное изменение скорости в верхней мантии от 8,0 км/с в области сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы до 8,4 км/с на восточном борту Вилуйской синеклизы. Также скорость 8,4–8,5 км/с характерна для кимберлитовой провинции. Интерес вызывает область повышенной до 8,4 км/с скорости в центральной части Западно-Сибирской плиты. Видно, что для верхнего этажа характерна корреляция латеральных изменений скорости с региональными геологическими структурами фундамента. Пониженные значения скорости под Мохо соответствуют синеклизам, повышенные – выступам фундамента.

На глубине 110–180 км выделена кровля слоя мощностью до 100 км с аномально повышенной до 8,5–8,7 км/с скоростью. Существенно, что он может значительно утоняться или быть прерывистым. Подошва слоя по используемым

сейсмическим данным определяется неуверенно, так как ниже залегают породы с пониженной до 8,5 км/с скоростью. Так, на профиле Кратон мощность слоя с аномальной скоростью изменяется от утонения (выклинивания) в области сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы до 100 км под Тунгусской синеклизой.

Интервал глубины между подошвой литосферы и границей «410 км» характеризуется незначительным нарастанием скорости с глубиной от 8,5 до 8,55 км/с. На границе «410 км» скорость скачком увеличивается до 9,4–9,45 км/с.

В пространственном отношении наибольший интерес в структуре литосферы вызывает рельеф кровли слоя повышенной скорости, который резко меняется по площади. Области максимально глубокого залегания кровли слоя с повышенной скоростью (более 200 км) тяготеют к стабильным районам, включая алмазоносные области Иркутского амфитеатра и западную часть Якутской кимберлитовой провинции. Протяженность на юг может свидетельствовать о перспективах поиска кимберлитов в Красноярском крае и Иркутской области (имеются находки россыпных алмазов). Области минимальной глубины залегания кровли слоя с повышенной скоростью (100–130 км) тяготеют к областям проявления траппового магматизма на Сибирской платформе [10]. Это хорошо коррелируется с распределением в пространстве различных магматических фаций в Восточной Сибири. Так, эффузивы распространены в основном в северо-западной части Тунгусской синеклизы, где максимальная мощность трапповой формации достигает 3,5 км. Уменьшение мощности базальтовых потоков происходит в южном и юго-восточном направлениях, где они выклиниваются, фациально замещаясь туфогенными породами [7].

Двумерное сейсмогравитационное моделирование по программе решения прямой и обратной двухмерной гравитационной задачи ADM-3D [6] по профилям Метеорит и Кратон показывает удовлетворительное соответствие сейсмических и гравитационных данных. Выявленная в работе [1] положительная гравитационная аномалия для подкоровой части верхней мантии коррелируется с аномалией повышенной скорости на глубине 100–200 км на профилях Метеорит и Кратон. Особый интерес вызывает различие в изостатическом состоянии земной коры Вилюйской и Тунгусской синеклиз (профиль Кратон).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грачев А.Ф., Кабан М.К. О причинах высокого стояния Сибирской платформы // Физика Земли. – 2006. – № 12. – С. 20–33.
2. Добрецов Н.Л. Пермо-триасовые магматизм и осадконакопление в Евразии как отражение суперплюма // ДАН. – 1997. – Т. 354, № 2. – С. 220–223.
3. Егоркин А.В. Изучение мантии на сверхдлинных геотраверсах // Физика Земли. – 1999. – № 7–8. – С. 114–130.
4. Егоркин А.В. Строение мантии Сибирской платформы // Физика Земли. – 2004. – № 5. – С. 37–46.
5. Золотухин В.В., Альмухамедов А.И. Базальты Сибирской платформы: условия проявления, вещественный состав, механизм образования. Траппы Сибири и Декана: черты сходства и различия. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1991. – С. 7–39.

6. Кочнев В.А. Адаптивные методы решения обратных задач геофизики: учеб. пособие. – Красноярск: Красноярский госуниверситет, 1993. – 131 с.
7. Оценка объемов и проблема генезиса пермо-триасового траппового магматизма Сибирской платформы / Ю.Р. Васильев, В.В. Золотухин, Г.Д. Феоктистов, С.Н. Прусская // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1696–1705.
8. Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. – М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2014. – 192 с.
9. Сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном (профиль Метеорит) / В.Д. Суворов, Е.А. Мельник, З.Р. Мишенькина и др. // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 54 (9). – С. 1411–1426.
10. Старосельцев В.С. Тектоника базальтовых плато и нефтегазоносность подстилающих отложений. – М.: Недра, 1989. – 259 с.
11. Структура верхней мантии по профилю Байкал-Ямал (Рифт), полученная с применением мирных ядерных взрывов / А.В. Егоркин, Н.И. Павленкова, Т.В. Романюк, Л.Н. Солюдилов // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37, № 9. – С. 66–76.
12. Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Мельник Е.А. Сейсмические верхнемантийные корни структур фундамента Сибирской платформы по профилю Рифт // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51 (8). – С. 1134–1150.
13. Cipar J., Priestley K. Cantal Siberia upper mantle cross-section from deep seismic sounding explosions / Ed. K. Fuchs. Upper mantle heterogeneities from active and passive seismology. – Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997. – P. 75–87.
14. Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. – 2006. – N 416. – P. 33–52.
15. Pavlenkova N.I. Seismic structure of the upper mantle along the long-range PNE profiles – rheological implication // Tectonophysics. – 2011. – N 508. – P. 85–95.
16. Seismic and density heterogeneities of lithosphere beneath Siberia: Evidence from the Craton long-range seismic profile / E.A. Melnik, V.D. Suvorov, E.V. Pavlov, Z.R. Mishenkina // Polar Science. – 2015. – Vol. 9. – P. 119–129.
17. Sultanov, D.D., Murphy, J.R., Rubinstein, Kh.D. A seismic source summary for soviet peaceful nuclear explosions // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1999. – N 3. – P. 640–647.
18. Zelt C.A., Smith R. Seismic travelttime inversion for 2D crustal velocity structure // Geophys. J. Int. – 1992. – Vol. 108. – P. 183–204.

© Е. А. Мельник, В. Д. Суворов, Е. В. Павлов, 2017

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПОПУТНЫХ ВОД ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН

Виктор Сергеевич Пермяков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории гидрохимии Ямало-Ненецкого филиала, тел. (912)073-53-29, e-mail: permvi@yandex.ru

Андрей Николаевич Харитонов

Инженерно-технический центр ООО «Газпром добыча Надым», 629730, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Надым, ул. Зверева, 1/1, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по контролю за разработкой месторождений, тел. (3499)56-80-13, e-mail: A.haritonov@nadym-dobycha.gazprom.ru

Дмитрий Владимирович Манзырев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией гидрохимии Ямало-Ненецкого филиала, тел. (913)713-10-76, e-mail: ManzyrevDV@ipgg.sbras.ru

Алексей Викторович Еделев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией аналитической химии производственных процессов Ямало-Ненецкого филиала, тел. (923)243-19-24, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, тел. (383)330-75-55, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Анализируется комплекс методов газогидродинамических исследований скважин с позиций повышения оперативности и достоверности результатов диагностики происхождения попутных вод газоконденсатных скважин. Приведены рекомендации по использованию конкретных электрохимических методов анализа для оценки концентрации основных коррелятивных элементов и электропроводности жидкости непосредственно на месте отбора проб при проведении газогидродинамических исследований скважин.

Ключевые слова: газогидродинамические исследования скважин, гидрохимический контроль, химический анализ, электрохимические методы анализа, диагностика генезиса скважинной жидкости.

EMPLOYMENT ASPECTS OF ELECTROCHEMICAL METHODS OF ANALYSIS FOR TESTING OF GENESIS ASSOCIATED WATERS OF GAS CONDENSATE WELLS

Viktor S. Permyakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Researcher the Laboratory of Hydrochemistry in Yamal-Nenetsk Branch, tel. (912)073-53-29, e-mail: permvi@yandex.ru

Andrey N. Haritonov

Engineering-technical center Gazprom dobicha Nadym, LLC, 629730, Russia, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Nadym, Zvereva Str. 1/1, PhD, deputy director for monitoring of field development, tel. (3499)56-80-13, e-mail: A.haritonov@nadym-dobycha.gazprom.ru

Dmitriy V. Manzyrev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory of Hydrochemistry in Yamal-Nenetsk Branch, tel. (913)713-10-76, e-mail: ManzyrevDV@ipgg.sbras.ru

Aleksey V. Edelev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory of Analytical chemistry of industrial processes in Yamal-Nenetsk Branch, tel. (923)243-19-24, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

Igor' N. El'tsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Full Professor, Deputy Director for Science, tel. (383)330-75-55, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

It is analyzed the complex of methods of gas-hydrodynamic studies of wells, from the standpoint of increasing the efficiency and reliability of diagnostic results genesis associated water gas-condensate wells. It is recommend the use of specific electrochemical methods of analysis to assess the concentration of the main correlative elements and fluid conductivity in situ sampling during the gas-hydrodynamic studies of wells.

Key words: gas-hydrodynamic researches of wells, hydrochemical monitoring, chemical analysis, electrochemical methods of analysis, diagnostics of Genesis of the borehole fluid.

В настоящее время основным методом мониторинга за обводнением эксплуатационных газовых и газоконденсатных скважин является гидрохимический контроль. Широкое развитие данного метода обусловлено своеобразием химических составов различных типов попутных вод: пластовых, конденсационных и техногенных. В качестве основных индикаторных элементов выступают преобладающие макрокомпоненты химического состава вод и ряд микрокомпонентов. Содержание элементов устанавливается химическими анализом.

Стандартный перечень компонентов, подлежащих определению при выполнении анализа химического состава попутных вод, включает следующие макрокомпоненты: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . При этом, как правило, Na^+ и K^+ определяются по разности $r(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) - r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$, а минерализация рассчитывается как сумма анионов и катионов. Кроме того, определяются относительная плотность воды, величина pH и микрокомпоненты I^- , Br^- .

Дальнейшее совершенствование метода гидрохимического контроля обводнения связано с модернизацией приборной базы аналитических лабораторий, актуализацией и расширением перечня коррелятивных компонентов состава и критериев диагностики выносимых газом вод [1, 2]. Данная тенденция не способствует сокращению сроков и объемов соответствующих работ, поэтому

необходимо разрабатывать новые подходы к проведению оперативного анализа и диагностики пластовых и техногенных вод.

В таком контексте перспективным направлением является включение в комплекс газогидродинамических исследований (ГДИ) электрохимических методов анализа попутных вод. Существующий комплекс методов ГДИ позволяет в первую очередь определять продуктивные характеристики скважин. Кроме того, возможно определение коллекторских и фильтрационных свойств пласта, их изменение по площади и разрезу пласта; гидродинамические и термодинамические условия в стволе скважины в процессе эксплуатации; условия скопления и выноса жидкости и твердых примесей с забоя скважины, эффективность их удаления [3]. При этом важно не только знать условия для выноса воды, но и причины появления воды в скважине, так как это существенно повлияет на способ эксплуатации скважин и выбор конкретных геологических мероприятий.

При ГДИ скважин определяют количество воды, выносимой из скважины на каждом режиме, на основании измерения расхода воды на устье скважины. Методов для установления источника поступающей на забой скважины воды, которая может быть представлена пластовой, техногенной или конденсационной водой, а также их смесью, при газогидродинамических исследованиях не предусмотрено. Поэтому на каждом режиме исследований отбираются пробы воды и направляются в аналитическую лабораторию для проведения анализа химического состава жидкости и последующей диагностики ее происхождения гидрохимическим методом. Естественно, что транспортировка и хранение проб негативно отражаются на оперативности и достоверности результатов диагностики попутных вод. Поэтому выполнение данной операции при проведении газогидродинамических исследований скважины представляется целесообразным, так как может существенно повысить качество контроля за разработкой залежи при незначительных производственных издержках.

Диагностика происхождения попутных вод при проведении газогидродинамических исследований скважин подразумевает, что содержание пластовых, конденсационных и техногенных вод в пробе можно будет определить непосредственно на месте ее отбора, по результатам инструментальных измерений определенного ряда характеристик и компонентов состава выносимой жидкости. При этом очевидно, что данный набор компонентов состава имеет ограничения по количеству, а входящие в него компоненты должны быть широко представлены и иметь содержания, достаточные для выполнения инструментальных измерений их значений.

Для сеноман-апт-альбских залежей нефтегазоконденсатных месторождений Надым-Пур-Тазовского региона хлориды и натрий являются коррелятивными элементами состава пластовых вод, а хлориды и кальций – техногенных вод. При этом они являются и основными макрокомпонентами состава рассматриваемых вод. То есть хлориды, натрий и кальций удовлетворяют требованиям в отношении информативности и универсальности для целей диагностики попутных вод. Определять концентрации указанных элементов целесообразно

с помощью иономера и соответствующих ионоселективных электродов. Однако практическое использование хлоридного ионоселективного электрода показало его ненадежность для анализа попутных вод в связи с высоким содержанием в них жидких углеводородов (апт-альбские залежи), что приводит к загрязнению электрода с кристаллической мембраной и искажению результатов измерений. Указанная особенность хлоридных ионоселективных электродов не позволяет их использовать и для гидрогеохимического каротажа при исследованиях нефтяных скважин [4].

Поэтому для диагностики происхождения попутных вод следует использовать метод прямой потенциометрии для определения концентраций ионов натрия (Na^+) и кальция (Ca^{2+}) и кондуктометрический метод для измерения удельной электрической проводимости (УЭП). Тесная корреляционная связь между УЭП и концентрациями ионов натрия в пластовых и кальция в техногенных водах в совокупности с наличием серийно выпускаемого, практичного и надежного стеклянного натрий-селективного электрода, а также серийно выпускаемого кальций-селективного электрода с ПВХ-мембраной способствуют внедрению указанных методов электрохимического анализа в практику для диагностики генезиса попутных вод при проведении газогидродинамических исследований.

Апробация методики диагностики происхождения попутных вод, по результатам их анализа электрохимическими методами непосредственно на месте отбора проб, проведена на Ныдинском участке Медвежьего НГКМ при проведении газогидродинамических исследований скважин. Анализ экспериментального материала показал, что концентрации ионов натрия и кальция, полученные по результатам химического анализа и посредством иономера и ионоселективных электродов, отличаются по абсолютным значениям, но имеют между собой тесные корреляционные связи. Данное обстоятельство позволило установить поправочные коэффициенты для концентраций коррелятивных элементов, определенных электрохимическими методами анализа. Сравнение концентраций элементов, полученных разными методами, при использовании установленных поправочных коэффициентов показывает их хорошее согласование.

Результаты определения генетического профиля попутных вод с помощью разработанной математической модели, по данным полевого инструментального анализа о величине удельной электропроводности и концентрации натрия и кальция, согласуются с результатами их диагностики по данным лабораторного химического анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абукова Л.А., Абрамова О.П., Варягова Е.П. Гидрогеохимический мониторинг разработки месторождений углеводородов // Георесурсы, геознергетика, геополитика: электр. журнал. – 2015. – № 2. – URL: <http://oilgasjournal.center.ru/archive/issue/details/0/3240>
2. Кошелев А.В., Ли Г.С., Катаева М.А. Оперативный гидрохимический контроль за обводнением пластовыми водами объектов разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – №3 (19). – С. 106–115.

3. Р Газпром 086-2010. Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин. Часть I. – Москва, 2011. – 235 с.
4. Рубцов М.Г., Купер В.Я. Применение гидрогеохимического каротажа при исследованиях нефтяных скважин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 5(2). – С. 332–336.

© В. С. Пермяков, А. Н. Харитонов, Д. В. Манзырев, А. В. Еделев, И. Н. Ельцов, 2017

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В РАЗВИТИИ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА НА ПРИРОДНУЮ СЕЙСМИЧНОСТЬ БАЙКАЛА И КУЗБАССА

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Алексей Александрович Еманов

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Екатерина Викторовна Лескова

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Александр Владимирович Фатеев

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383) 330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Приведены результаты исследований эффектов наведенной сейсмичности на примере добычи полезных ископаемых в Кузбассе, движения составов по железной дороге в районе озера Байкал и экспериментов с мощным вибратором в Новосибирской области.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, вибрации, вибрационные источники, график повторяемости.

TRIGGER EFFECTS IN THE DEVELOPMENT OF INDUCED SEISMICITY AND THE INFLUENCE OF HUMAN BEING OVER THE NATURAL SEISMICITY OF KUZBASS AND BAIKAL REGIONS OF RUSSIA

Victor S. Seleznev

Seismological branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Alexey A. Bryksin

Seismological branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Alexey A. Emanov

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Deputy director, tel. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Alexander F. Emanov

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, D. Sc., Director, tel. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Ekaterina V. Leskova

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

Alexander V. Fateev

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)330-12-61, e-mail: asf@gs.nsc.ru

The results in study of induced seismicity in areas of coal mining in Kuzbass, railway near Baikal lake and experiments with powerful vibrational source near Novosibirsk are presented in this paper.

Key words: induced seismicity, vibrations, vibrational sources, Gutenberg-Richter law.

В течение нескольких десятилетий авторов [1–5] привлекает задача исследования эффекта человеческого вмешательства в природную (естественную) сейсмичность. С появлением современных цифровых регистрирующих устройств стало возможным более детально подойти к изучению поставленного вопроса.

На основе экспериментальных исследований с временными сетями станций в районе шахт [6] изучалось развитие техногенной сейсмичности около выработок и триггерные эффекты воздействия на нее техногенных факторов. Эксперименты проводились на четырех шахтах Кузбасса в различных геотектонических условиях (рис. 1).

Экспериментами доказана значительная роль вибрационного воздействия от мощного работающего оборудования лав в развитии техногенного сейсмического процесса. Изменения флюидного режима без вибрации недостаточно для того, чтобы сформировался интенсивный сейсмический процесс. Подтверждение тому эксперименты около Анжеро-Судженска и на шахте «Первомайская», где не было работы мощного вибрирующего оборудования и не зафиксировано сейсмических активизаций. Во всех случаях, когда разворачивались сети станций около выработок с работающими лавами, мы фиксировали сопровождающие процесс добычи сейсмические активизации.

Построены графики повторяемости для различных наборов сейсмических событий в Кузбассе и показано изменение их угла наклона, зависящее от времени наблюдений (рис. 2).

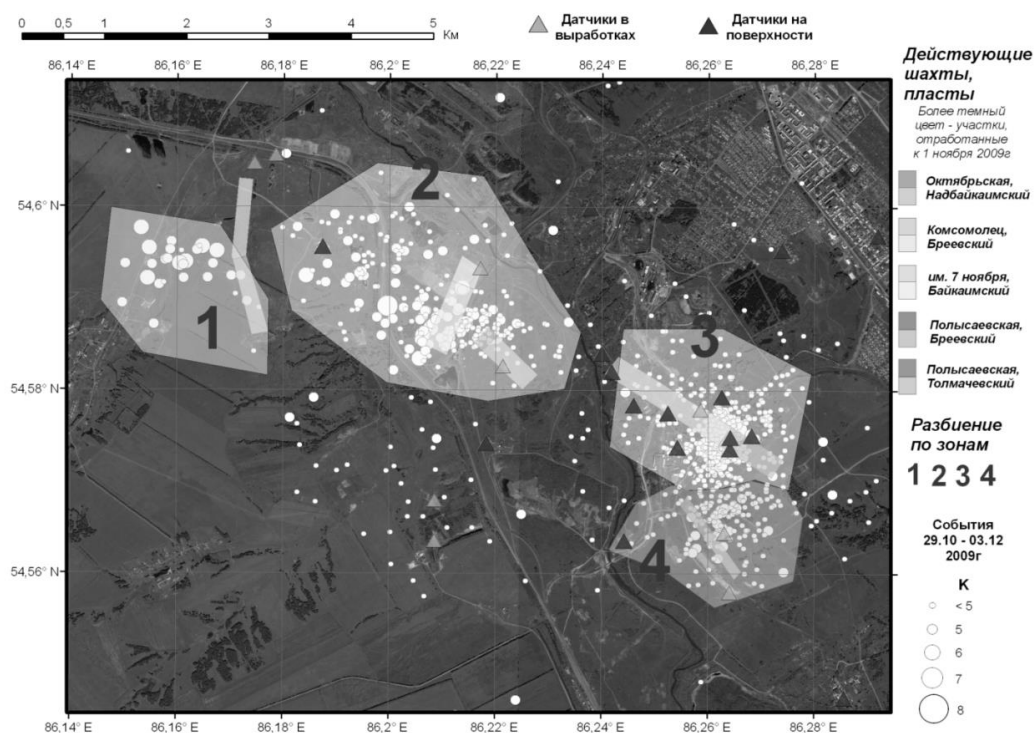


Рис. 1. Разделение активизированного района на зоны

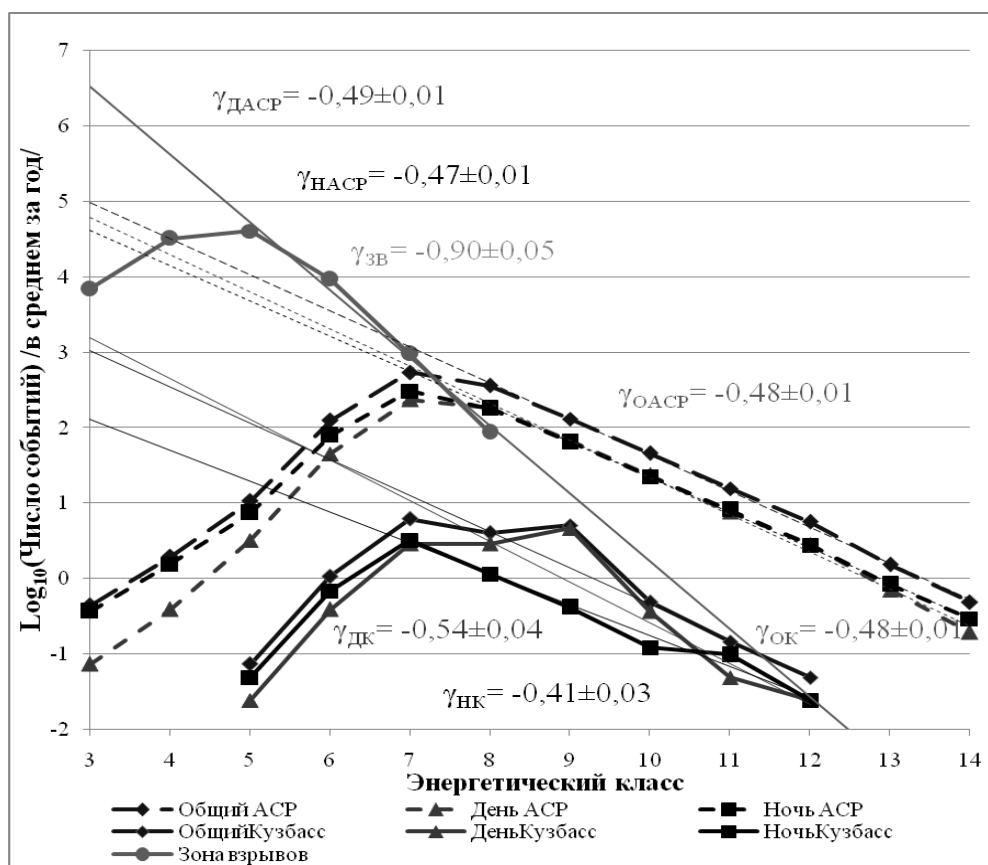


Рис. 2. Графики повторяемости, построенные на статистических данных по Кузбассу и Алтае-Саянскому региону (АСР)

Поскольку с увеличением угла наклона прямой растет скорость ее падения к оси X, то, в соответствии с законом повторяемости, это имеет физический смысл преобладания числа событий меньшего энергетического класса над более крупными землетрясениями.

Таким образом, анализ представленных данных показывает, что постоянные взрывные работы на рудниках (а они являются именно такими в дневное время суток) снимают напряжения и приводят к уменьшению вероятности возникновения разрушительных сильных землетрясений.

Аналогично проанализированы графики повторяемости для полос вдоль железной дороги, проходящей по берегу Байкала, и показано их изменение в зависимости от удаления от железнодорожного полотна (рис. 3).

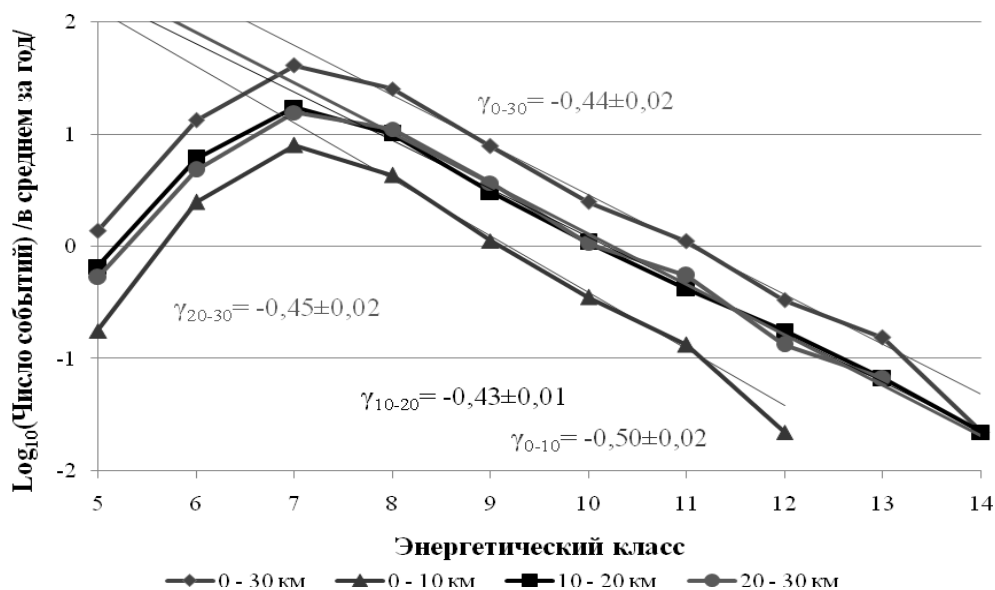


Рис. 3. Графики повторяемости, построенные на основе статистических данных по Байкалу

Можно сделать вывод, что регулярное движение поездов по железной дороге оказывает очевидное воздействие на напряженное состояние в ближней зоне, разгружая тем самым естественные сейсмические процессы.

Результаты экспериментов с использованием мощного вибросейсмического источника приведены на рис. 4. Нами выдвигается предположение о разгружающем эффекте сейсмического воздействия на малых удалениях (несколько сотен метров) в результате его работы.

Можно отметить, что, по сравнению с углом наклона прямой в контрольном наборе данных до начала эксперимента (индекс 0), углы наклона прямых после воздействий последовательно растут, что в физическом смысле означает насыщение грунта энергией и снятие накопленных напряжений через более низкий частотный диапазон.

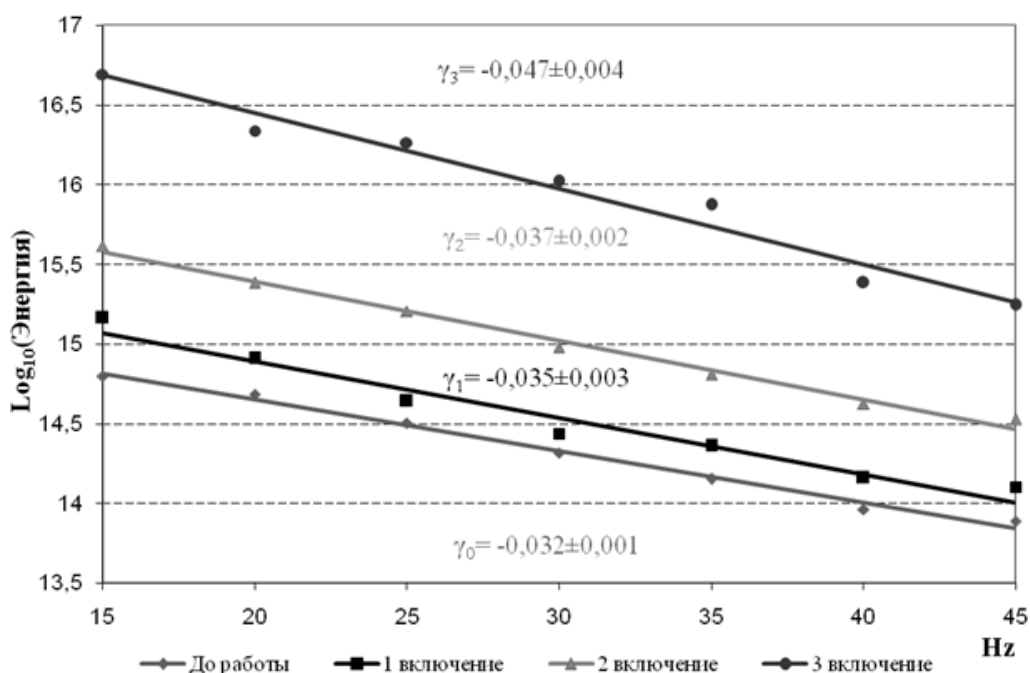


Рис. 4. Условные графики повторяемости для эксперимента с мощным вибратором

Выводы

Достаточно обоснованным будет утверждение, что высокопроизводительное по добыче угля оборудование лав является одновременно мощным вибрационным воздействием на недра совместно с изменением флюидного режима, формирующим ярко выраженную наведенную сейсмичность около выработок. Появление или исчезновение вибрации различной природы практически сразу сказывается на сейсмическом режиме активизированной области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дудушкина К.И., Бобров Г.Ф. Деформационные свойства пород глубоких горизонтов. – М.: Недра, 1974. – 129 с.
2. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова и др. // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 37–43.
3. Наведённая сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре / К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, А.А. Лукк, С.Л. Юнга // Физика Земли. – 2009. – № 10. – С. 49–68.
4. Кондратьев О.К., Люкэ Е.И. Наведенная сейсмичность. Реалии и мифы // Физика Земли. – 2007. – № 9. – С. 31–47.
5. Климанова В.Г., Батугин А.С. О влиянии техногенной сейсмичности на окружающую среду и техносферу // Неделя горняка. – 2003, семинар № 7.
6. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова и др. // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 1. – С. 37–43.

© В. С. Селезнев, А. А. Брыксин, А. А. Еманов,
А. Ф. Еманов, Е. В. Лескова, А. В. Фатеев, 2017

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ СРЕД

Антон Владимирович Чернышев

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Георгий Михайлович Тригубович

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор технических наук, профессор, научный руководитель геофизических исследований, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Яков Фридрихович Ковальский

НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Чернышевское шоссе, 16, старший научный сотрудник, тел. (411-36)9-09-33, e-mail: KovalskiyYaF@alrosa.ru

Александр Владимирович Куклин

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: kuklin@sniiggims.ru

Андрей Сергеевич Сверкунов

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, инженер, тел. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований при поиске объектов под поляризуемым экраном. Совместное использование технологии площадных зондирований от закрепленного источника и традиционной технологии с петлями малых размеров для выделения аномалий ВП позволяет восстанавливать параметры ВП экрана с точностью, достаточной для достоверного восстановления индукционного сигнала от закрепленного источника, и проводить 3D-интерпретацию без учета ВП.

Ключевые слова: электроразведка становлением поля, индукционно-вызванная поляризация, 3D-инверсия, EM-DataProcessor.

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES TO INCREASE THE RESOLUTION OF TEM IN POLARIZING MEDIUMS

Anton V. Chernyshev

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Ph. D., Leading Research Associate, tel. (383)222-42-03, e-mail: chernshv@sniiggims.ru

Georgiy M. Trigubovich

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, D. Sc., Professor, Academic adviser of geophysical research, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Yakov F. Kovalskiy

ALROSA Co. Ltd, 678174, Russia, Mirny, Chernyshevskoe Shosse 16, Senior Research Associate, tel. (411-36)9-09-33, e-mail: KovalskiyYaF@alrosa.ru

Aleksandr V. Kuklin

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Lead Engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: kuklin@sniiggims.ru

Andrey S. Sverkunov

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Engineer, tel. (383)222-42-03, e-mail: sverkunov86@mail.ru

The results of experimental studies for the search of objects under the polarizing layer are presented. Joint use of technology with fixed source areal soundings and traditional technologies with loops of small size for IP anomalies study allows us to recover the IP parameters of the upper part of the geological section with an accuracy sufficient for a reliable recovery of the induction part of the signal from the fixed source, and carry out a 3D interpretation without IP account.

Key words: TEM soundings, induction induced polarization, 3D-inversion, EM-DataProcessor.

При исследованиях поляризующихся сред с малыми размерами установок часто поляризационная часть сигнала превосходит индукционный аномальный сигнал от целевых объектов, снижая тем самым эффективность ЭМ- исследований. Уменьшения влияния ВП можно добиться путем увеличения размеров генераторного контура [1–4]. Однако неоднородная поляризующаяся верхняя часть разреза (ВЧР) может оказывать существенное влияние на результаты измерений, и его необходимо учесть. Выходом в данной ситуации является использование комбинированной технологии проведения измерений с двумя размерами источника: источник с малым размером служит для восстановления параметров ВП в верхней части разреза, а источник с большим размером отвечает за индукционную составляющую сигнала, по которой уже проводят 3D-инверсию без учета ВП [3–5].

В 2016 году на участке, где имеются повсеместные проявления ВП, для сравнения результатов, получаемых комбинированной технологией ПЗС-ЗИ с технологией ЗСБ (совмещенная и разнесенные установки), выполнены работы многоразностной модификацией М-ЗСБ и ПЗС-ЗИ (площадные исследования от закрепленного источника по плотной сети наблюдений). Площадь исследований составила 2,2 км². При работе по методике ПЗС-ЗИ с источником 500×500 м измерения проводились по сети наблюдений 50×50 м.

Для определения наличия и последующего учета эффекта индукционной ВП в неоднородной по проводимости и поляризуемости ВЧР измерения с установкой 500×500 м были дополнены измерениями с размером генераторной петли 100×100 м. Исследования с установками 100×100 м проводились по методике «петля к петле» многоразностной модификацией М-ЗСБ, при которой от каждой раскладки генераторного контура проводится по 5 зондирований (одно в центре ГП и четыре на расстоянии 50 м от середины каждой стороны, за его пределы).

По материалам измерений с петлями 100×100 м по всем измерениям для каждого положения источника отдельно с использованием программного комплекса EM-DataProcessor проведена совместная 1D-инверсия [5], по результатам которой вычислены индукционная и поляризационная составляющие ЭМ поля. Результаты разделения полей приведены на рис. 1, 2. Контурами указаны проекции известных объектов (трубок). Как видно из рисунков, поисковые объекты приурочены к зонам пониженного сопротивления и повышенных значений поляризационной составляющей сигнала.

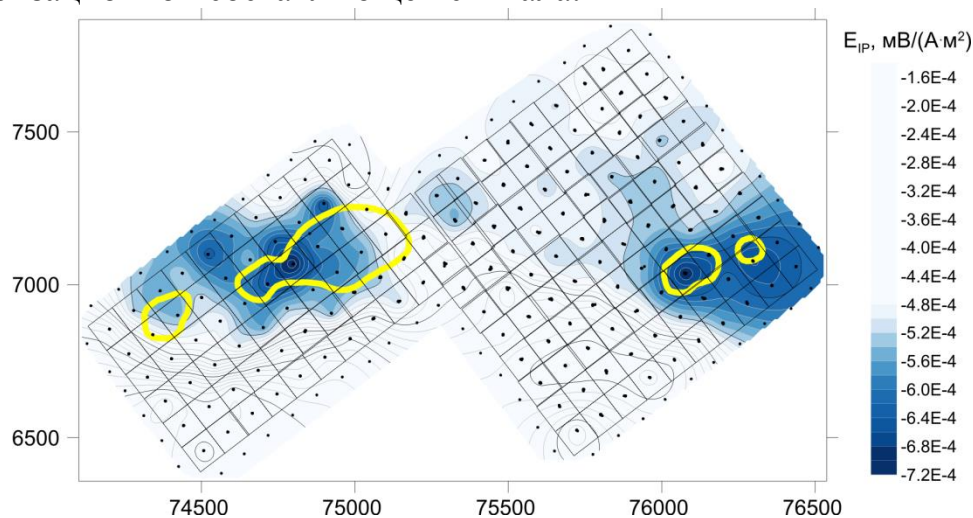


Рис. 1. ЭДС ВП на времени $t=100$ мкс

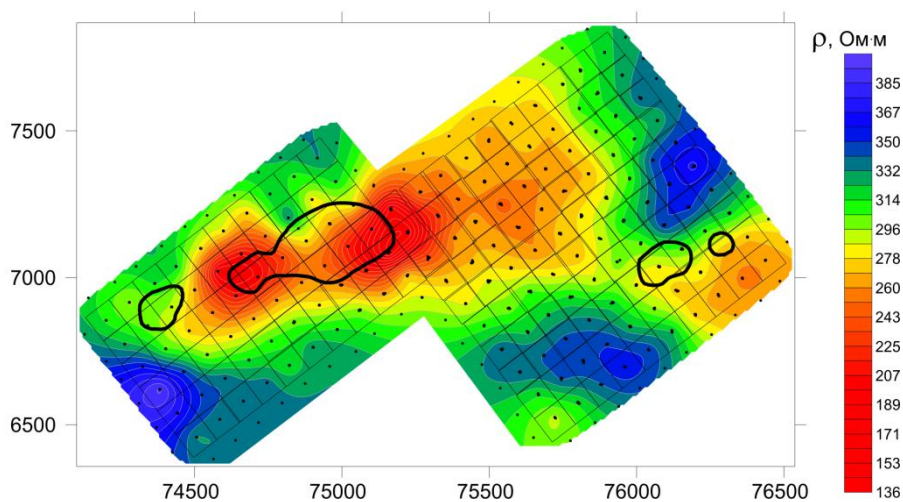


Рис. 2. Удельное сопротивление 1 слоя

Исследования с источником 100х100 м проводились с целью картирования параметров ВП в верхней части разреза, поэтому следующим этапом является учет их вклада в данные, полученные с источником 500х500 м.

Для этого в программном комплексе EM-DataProcessor вычисляется «сигнал ВП» для источника 500×500 м от восстановленной 3D-модели первого слоя с ВП как разница сигналов от модели с ВП и модели без ВП. Затем полученный «сигнал ВП» вычитается из исходного (экспериментального) сигнала с целью дальнейшей интерпретации уже без учета ВП.

На рис. 3 приведено распределение восстановленного удельного сопротивления на глубине 50 м, полученного в результате 3D-инверсии сигналов от источника 500х500 м после вычитания влияния ВП. Как видно из рисунка, основная аномалия повышенной проводимости связана с наиболее крупным поисковым объектом, при этом более мелкие объекты также проявляются как объекты повышенной проводимости.

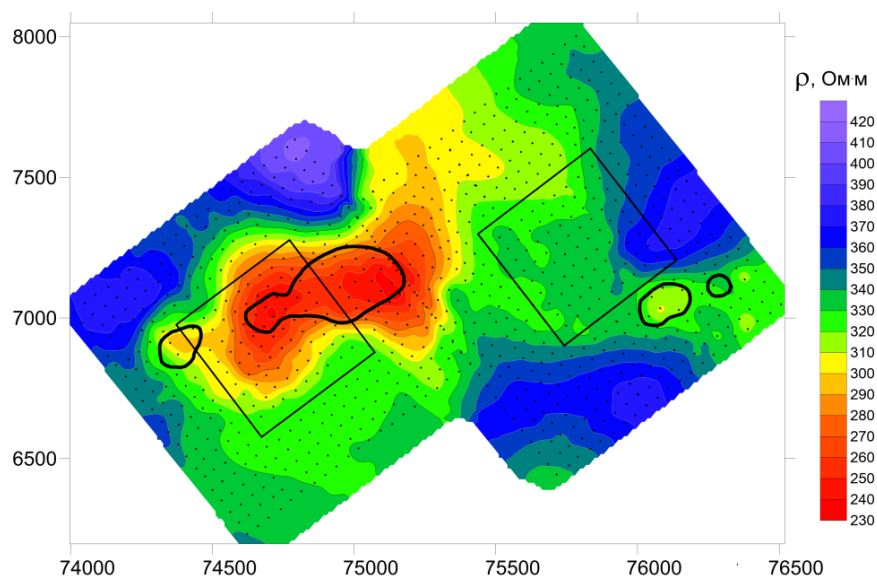


Рис. 3. Результат 3D-инверсии – удельное сопротивление на глубине 50 м

Таким образом, экспериментально подтверждена работоспособность способа учета параметров поляризации ВЧР на основе дополнительных измерений с источником малых размеров, с помощью которого проводится картирование параметров поляризации и корректируется сигнал от источника больших размеров, после чего проводится дальнейшая трехмерная интерпретация скорректированных сигналов без учета ВП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Что главное в геофизике: гео или физика? // Геофизика. – 2015. – № 2. – С. 69–78.

2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 181–190.

3. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Three lectures on geological medium induced polarization. – L-M University of Munich, Vela Verlag, 2014. – 56 p. – ISBN: 978-3-941352-65-0.

4. Повышение разрешающей способности импульсной индуктивной электроразведки при исследовании поляризующихся сред / А. В. Чернышев, Г. М. Тригубович, Я. Ф. Ковальский и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 261–265.

5. EM-DataProcessor: оперативная 3D-инверсия данных импульсной индуктивной электроразведки / Г. М. Тригубович, А. В. Чернышев, А. В. Куклин и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 3. – С. 95–101.

© А. В. Чернышев, Г. М. Тригубович, Я. Ф. Ковальский,
А. В. Куклин, А. С. Сверкунов, 2017

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПОВ ПОДВИЖЕК В ОЧАГАХ В ОБЛАСТЯХ ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ольга Анатольевна Кучай

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-05, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Пётр Георгиевич Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Юлия Михайловна Романенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Зарина Джумагалиева

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент

Выполнен анализ распределения землетрясений и афтершоков с разными типами подвижек в очагах до и после сильнейших землетрясений: Суматра-Андаманского землетрясения 2004 года ($M_w = 9.0$), землетрясения 2010 года ($M_w = 8.8$) в регионе Мауле (Чили) и землетрясения Тохоку (Япония), 2011 года ($M_w = 9.0$). Сильнейшие землетрясения создают условия для возникновения очагов сбросового типа с $M > 4.8$ вдоль зон разрывов под глубоководными океаническими желобами. По данным механизмов очагов, произошедших с 1976 года по настоящее время, произведен расчет сейсмотектонических деформаций в сегменте земной коры и подкоровой области зон контакта литосферных плит районов сильнейших землетрясений.

Ключевые слова: сейсмотектонические деформации, сильное землетрясение, механизм очага землетрясения, афтершоки.

FEATURES OF DISTRIBUTION OF TYPES OF SHIFTS IN THE FOCI IN THE AREAS OF PREPARATION AND IMPLEMENTATION OF THE STRONGEST EARTHQUAKES

Olga A. Kuchay

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)333-37-92, e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru

Peter G. Dyadkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Ph. D., Lead Senior, Associate Professor, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Yuliya M. Romanenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Research Scientist, tel. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Zarina Jumagalieva

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., student

The analysis of the distribution of earthquakes and aftershocks with different types of shifts in the centers before and after the strongest earthquake: Sumatra-Andaman earthquake of 2004 ($M_w = 9.0$), 2010 earthquake ($M_w = 8.8$) in the region of Maule (Chile) and the Tohoku earthquake (Japan), 2011 ($M_w = 9.0$). The strongest earthquakes create conditions for the emergence of foci of fault-type with $M > 4.8$ zones along fractures under deep ocean trenches. According to the focal mechanisms that occurred from 1976 to the present time, the calculation of seismotectonic deformations in a segment of the earth's crust and podkrovi region of the contact areas of tectonic plates areas of strongest earthquakes.

Key words: seismotectonic deformations, strong earthquake, earthquake focal mechanism, aftershocks.

Рассмотрены три крупнейших землетрясения начала нашего столетия: Суматра-Андаманское землетрясение 2004 года ($M_w=9.0$), землетрясение 2010 года ($M_w=8.8$) в регионе Мауле (Чили) и землетрясение Тохоку, 2011 года ($M_w=9.0$). Каждому из этих землетрясений было посвящено большое количество статей как за рубежом [7, 9, 11, 12], так и в России [2–4, 6]. В работе анализируются типы подвижек в очагах до и после сильнейших сейсмических событий и сопоставляются сеймотектонические деформации, полученные по данным механизмов очагов землетрясений с $M > 4.8$ [www.globalcmt.org/CMTsearch.html] на участках зон субдукции, где произошли наибольшие дислокационные смещения за счет сильнейших землетрясений.

Суматра-Андаманское землетрясение произошло в районе Зондской дуги, которая является проявлением конвергентной границы и отражает процессы взаимодействия при встречном движении Индо-Австралийской и Евразийской литосферных плит. Субдукционная зона высокосейсмична, с глубиной плотность гипоцентров землетрясений с $M > 4.8$ убывает, и на глубинах ниже 200 км отмечены редкие отдельные сильные события. Гипоцентры сейсмических событий смещаются от глубоководного желоба в сторону острова Суматра и острова Ява. Наиболее глубокие сейсмические события располагаются под хребтом Барисан, где проявляется современный вулканизм. Следующее сильнейшее землетрясение, зарегистрированное в начале 21 века, (произошло) в регионе Мауле (Чили) на контакте тектонических плит Наска, движущейся в В-СВ направлении со скоростью 8 см/год, и Южно-Американской плиты, смещающейся на З-СЗ со скоростью 1 см/год [10]. Основная сейсмичность сосредоточена

в коре и подкоровом слое до 300 км [8]. Небольшая часть землетрясений происходит на глубинах до 600–700 км. Землетрясение Тохоку является вторым по интенсивности событием (после Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 года) очередной глобальной активизации начала нашего века. Оно

произошло близ острова Хонсю (Япония), в зоне субдукции – поддвига Тихоокеанской плиты под Евроазиатскую континентальную плиту.

В данной работе механизмы очагов землетрясений и афтершоков разделялись на два типа: в очагах первого типа осуществляется надвиговая и сдвиго-надвиговая подвижка, второго типа – сбросовая и сдвиго-сбросовая подвижка. На рис. 1 приведены очаги землетрясений до возникновения сильнейшего Суматра-Андаманского события и после. Рассматриваются два слоя (0–35 км и 36–70 км), в которых зафиксированы землетрясения и афтершоки. Из анализа распределения подвижек в очагах землетрясений и афтершоках наблюдается следующее: до сильного события в зонах конвергентной границы двух плит очень редко возникают землетрясения сбросового и сдвиго-сбросового типа. Но после сильнейших главных сейсмических событий вдоль их плоскостей разрыва регистрируются афтершоки со сбросовым и сдвиго-сбросовым типом механизма очага (рис. 1, А, В, С).

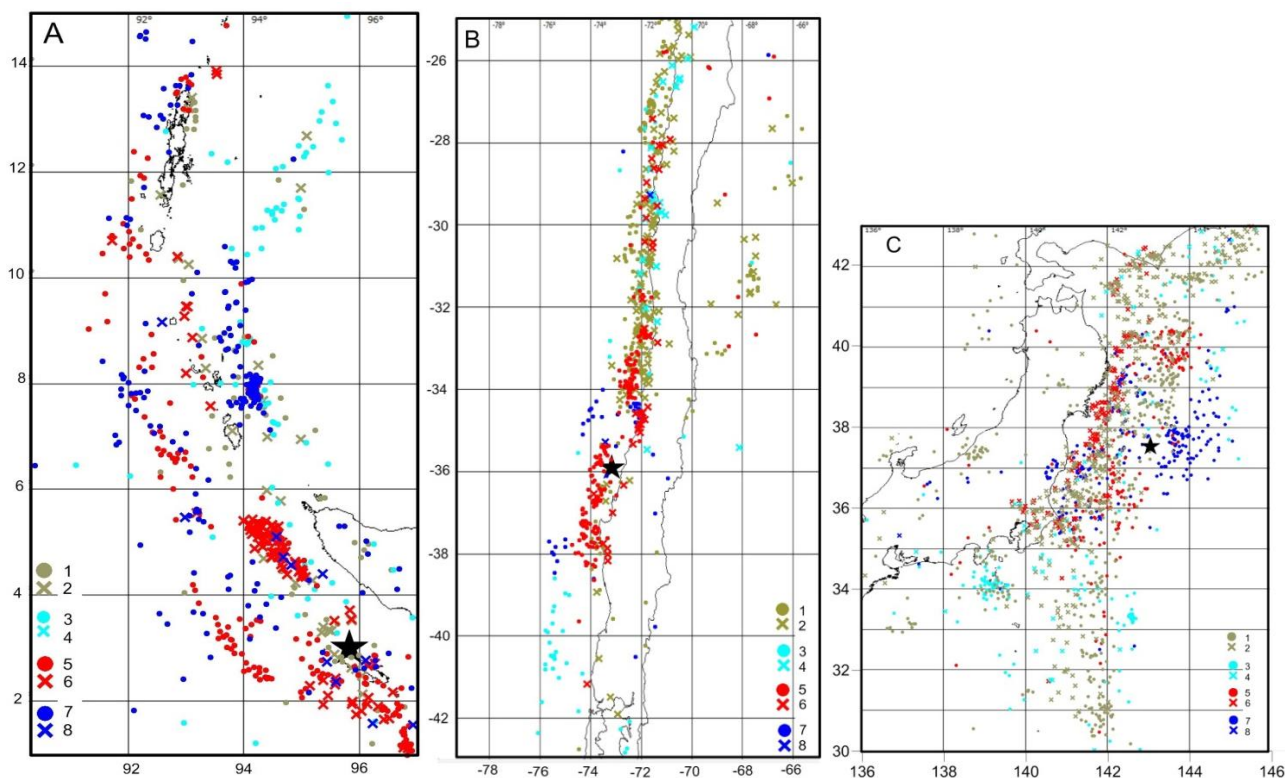


Рис. 1. Типы подвижек в очагах, произошедших в 1976–2013 гг. в афтершоковой области Суматра-Андаманского землетрясения 2004 года (А); в 1976–2015 гг. в афтершоковой области землетрясения в регионе Мауле (Чили) 2010 года (В); в 1976–2015 гг. в афтершоковой области землетрясения Тохоку (Япония) 2011 года (С).

1–4 – землетрясения, зарегистрированные до главного события; 5–8 – афтершоки и землетрясения, зарегистрированные после главного события. Кругом показаны землетрясения с глубиной 0–35 км, крестиком отмечены землетрясения, произошедшие глубже 35 км ($H=36–70$ км). Оливковый и красный цвета соответствуют очагам с надвиговой и сдвиго-надвиговой подвижками в очагах. Бирюзо-

вый и синий цвета указывают на очаги со сбросовой и сдвига-сбросовой подвижками в очагах. Звездочкой указан эпицентр главного землетрясения

Таким образом, наибольшая величина надвиговой подвижки в каждом из главных событий [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/>] осуществляется вблизи эпицентра и стимулирует возникновение не только афтершоков с надвиговым типом подвижки, но и афтершоков сбросового типа, располагающихся к западу, вдоль зон разрывов Суматра-Андаманского (рис. 1, А) и землетрясения в районе Мауле (рис. 1, В), в области прилегающего океанического поднятия, и к востоку при землетрясении в районе Тоху (рис. 1, С).

В зонах контакта литосферных плит, где проявлялись землетрясения большой магнитуды, проводилось достаточно много исследований по анализу параметров механизмов очагов землетрясений. Наиболее интересные работы связаны с восстановлением поля напряжений перед сильнейшими сейсмическими событиями [2–4]. Были попытки восстановить поле напряжений и деформаций различных участков территории [6], но работ, посвященных детальному анализу сейсмотектонических деформаций для разных глубинных слоев, не проводилось. Мы оценили деформирование объемов горных масс на разных глубинах за счет землетрясений и афтершоков, используя методику [1, 5], и сопоставили результаты, полученные в зонах контактов плит, где произошли сильнейшие землетрясения. В нашем случае деления на время не осуществлялось, а рассчитывалась суммарная сейсмотектоническая деформация за весь период наблюдения на разных глубинных уровнях. При построении карт для нас важным были не сами величины деформаций, а их знак, т. е. относительные удлинения и укорочения деформаций за счет землетрясений, положительные значения деформаций соответствовали относительному удлинению, отрицательные значения – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов земной коры в соответствующих направлениях. В работе исследуются поля вертикальных, меридиональных и широтных компонент сейсмотектонических деформаций.

Расчет сейсмотектонических деформаций, по данным механизмов очагов землетрясений в районе Суматра-Андаманского землетрясения, показал, что на всех глубинах наиболее устойчиво ведет себя компонента сейсмотектонических деформаций, отвечающая за вертикальное удлинение объемов горных масс. Участки земной коры (0–35 км) в окраинных районах с западной и восточной сторон Зондской дуги характеризуются деформациями противоположного знака по отношению к центральной части. В слое 70–150 км под эпицентральной областью Суматра-Андаманского землетрясения происходят деформации противоположного знака по отношению к деформациям рассматриваемой части Зондской дуги. В области очага землетрясения Мауле и севернее характер поля деформаций ($H=0-70$ км) является обычным для зон субдукции: наблюдается укорочение в направлении погружения океанической плиты. Ниже глубины 70 км характер деформирования резко меняется на горизонтальное растяжение.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ФНИ IX.128.2 и IX.128.1, гранта РФФИ № 17-05-01234а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
2. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.Б. Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004г. // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407, № 1. – С. 106–110.
3. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология и геофизика. – 2006а. – № 11. – С. 1192–1206.
4. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011г. // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – № 5(2). – С. 469–506.
5. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 407 с.
6. Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т. Суматранское землетрясение 26.12.2004 – проявление неплейттектонического процесса в литосфере // Физика Земли. – 2006. – № 12. – С. 55–76.
7. Seismicity Associated with the Sumatra-Andaman Island Earthquake of 26 December 2004 / Dewey J.W., Choy G., Presgrave B. et al. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – Vol. 97, N 1A. – S25–S41.
8. Bilek S.L. Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity // Tectonophysics. TECTO-124532. – 2009.
9. Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bull. Soc. Geol. Fr. – 2013. – Vol. 184, N 4–5. – P. 335–346.
10. Sánchez L., Seitz M. Recent activities of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS // DGFI Report No. 87. – 2011. – P. 0–46.
11. Coseismic Slip and Afterslip of the Great Mw 9.15 Sumatra–Andaman Earthquake of 2004 / Chlieh M., Avouac Jean-Philippe, Hjorleifsdottir Vala et al. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – Vol. 97, N 1A. – S152–S173.
12. Vallee M. Rupture Properties of the Giant Sumatra Earthquake Imaged by Empirical Greens Function Analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – Vol. 97, N 1A. – S103–S114.

© О. А. Кучай, П. Г. Дядьков, Ю. М. Романенко, З. Джумагалиева, 2017

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕСЧЕТА ГОЛОВНЫХ ВОЛН НА ОПОРНОМ ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ПРОФИЛЕ 3-ДВ

Павел Олегович Полянский

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (913)894-51-39, e-mail: PPavel6.10@gmail.com

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор филиала, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Александр Сергеевич Сальников

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом сейсморазведки, тел. (383)222-62-13, e-mail: assalnikov@mail.ru

В работе оценено влияние кривизны опорных профилей и рельефа местности на результаты динамического пересчета головных волн, зарегистрированных по системе наблюдения сверхглубинного ОГТ. Доказано, что криволинейность и рельеф действуют на результат пересчета как низкочастотные фильтры. Для условий Центрального участка опорного профиля 3-ДВ показано, что влияние кривизны и рельефа на динамический пересчет данных ОГТ – уменьшение амплитуд частотных компонент сигналов головных волн не превышает 2–10 % в полосе частот 13–25 Гц. Предложена геологическая интерпретация временного разреза головных волн по верхней части земной коры в пределах Нижнеалданской впадины.

Ключевые слова: опорный геофизический профиль 3-ДВ, головные волны, временной разрез, цифровая обработка сейсмических данных.

METHODOLOGICAL FEATURES OF HEAD WAVES DYNAMIC CONVERSION ON REFERENCE GEOPHYSICAL PROFILE 3-DV

Pavel O. Polyansky

Altay-Sayan branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey» RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Research Scientist, tel. (913)894-51-39, e-mail: PPavel6.10@gmail.com

Alexander F. Emanov

Altay-Sayan branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey» RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Branch Director, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Alexandr S. Salnikov

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 67, D. Sc., Head of department of exploration seismology, tel. (383)222-62-13, e-mail: assalnikov@mail.ru

Influence of reference profiles curvature and of ground relief of profiles to results of dynamic conversion of head waves are estimated in the article. Head waves data are registered on observation systems of CDP. It is proved that curvature and relief are have an effect on the conversion result like low-frequency filters. The conditions in the Central part of the 3-DV profile are shown to have slight influence on the dynamic conversion of the CDP data: decrease in head wave amplitudes of frequency components is in range 2-13% in the frequency range from 13 to 25 Hz. Geologic interpretation of head waves time sections of the upper crust on the Nizhnealdanskaya deep is suggested.

Key words: reference geophysical profile 3-DV, head waves, time section, digital processing of seismic data.

Введение

Метод динамического пересчета, обоснованный в [4] и развитый в [3], позволяет производить цифровую обработку данных головных волн, зарегистрированных по плотным системам наблюдений, и получать информацию о свойствах преломляющих границ в земной коре. В работах [1, 5] алгоритм с успехом применялся для обработки данных сверхглубинного ОГТ на опорном профиле 3-ДВ, длина которого более 3000 км. Линия профиля 3-ДВ характеризуется определенной кривизной в плоскости (X , Y) и неоднородностью рельефа дневной поверхности по высоте $H(X)$, вопрос влияния этих факторов на точность обработки данных сверхглубинного ОГТ методом динамического пересчета головных волн рассмотрен в первой части статьи. Вторая часть статьи посвящена результатам динамического пересчета головных волн на Центральном участке профиля 3-ДВ.

Влияние кривизны и рельефа линии профиля на динамический пересчет головных волн

В статье В.Н. Сергеева [7] показано, что при пересчете волнового поля головных волн из точки $(i, j+1)$ в точку $(i+1, j+1)$ обобщенной плоскости наблюдений по множеству трасс, входящих в область прослеживания целевой волны, в случае непараллельности нагоняющих годографов спектр сигнала-результата пересчета необходимо дополнительно умножить на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фильтра, учитывающего показатель непараллельности нагоняющих годографов (θ_a):

$$S_{i+1}^{j+1}(\omega) = F_i^{j+1}(\omega) \cdot \sum_{a=1}^n \exp(I \cdot \omega \cdot \theta_a), \quad (1)$$

где $F_i^{j+1}(\omega)$ – спектр трассы в точке $(i, j+1)$ после динамического пересчета, при параллельных нагоняющих годографов, а $S_{i+1}^{j+1}(\omega)$ – спектр трассы в точке $(i+1, j+1)$, с учетом непараллельности нагоняющих годографов. Такой фильтр является разновидностью фильтра низких частот. Вместе с тем очевидно, что непараллельность нагоняющих годографов может быть обусловлена не только

рефракцией, но и кривизной профиля и неоднородностью рельефа дневной поверхности.

Оценим влияние кривизны профиля на динамический пересчет головных волн: представим линию профиля $Y(X)$ в параметрическом виде (2):

$$Y(X) = A \cdot \sin(B \cdot X) \Rightarrow Y'(X) = A \cdot B \cdot \cos(B \cdot X), \quad (2)$$

где X, Y – географические координаты источников и сейсмоприемников, A, B – параметры, определяющие кривизну линии профиля. Любой участок Центрального участка профиля 3-ДВ можно представить в виде суперпозиции линий (2), характеризующихся разными значениями параметров A и B . Чтобы определить влияние кривизны линии профиля на динамический пересчет головных волн вне зависимости от параметров преломляющей границы, предположим, что граница горизонтальная и поэтому t_0 не зависит от X и Y . В этом случае годограф головной волны $t(X, Y(X))$ описывается выражением:

$$t(X, Y(X)) = t_0 + \frac{1}{V_{gr}} \cdot (\sqrt{X^2 + (A \cdot \sin(B \cdot X))^2}). \quad (3)$$

Здесь и далее $\Delta X, \Delta Y$ – это расстояние между соседними пунктами возбуждения по осям абсцисс и ординат в декартовой системе координат.

Показатель непараллельности нагоняющих годографов (θ_1), обусловленный различными факторами и используемый в (1), есть производная функции разности нагоняющих годографов [6]. Поэтому θ_1 – показатель непараллельности нагоняющих годографов головных волн, обусловленный криволинейным профилем, определяется так:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{d(\Delta t(X, Y(X)))}{dX} = \\ &= \frac{1}{V_{gr}} \cdot \left[\frac{X - \Delta X + 2 \cdot Y(X) \cdot Y'(X) - 2 \cdot \Delta Y \cdot Y'(X)}{\sqrt{(X - \Delta X)^2 + (Y(X) - \Delta Y)^2}} - \frac{X + 2 \cdot Y(X) \cdot Y'(X)}{\sqrt{X^2 + (Y(X))^2}} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь рассмотрим влияние рельефа дневной поверхности на непараллельность нагоняющих годографов головных волн: каждый источник и сейсмоприемник характеризуются высотой $H(X1)$ над уровнем моря. Здесь и далее $X1$ – это расстояние по профилю.

Предположим, что латеральная зависимость $H(X1)$ имеет вид, аналогичный (2), с параметрами рельефа C и D , тогда годограф головной волны будет выглядеть так:

$$t(X1, H(X1)) \approx t_0 + \frac{X1}{V_{gr}} + \frac{H(X1)}{V_0}. \quad (5)$$

В этом случае показатель непараллельности нагоняющих годографов головных волн определяется следующей формулой:

$$\theta_2 = \frac{d(\Delta t(X1, H(X1)))}{dX1} = \frac{2 \cdot C \cdot D}{V0} \cdot [\cos(D \cdot (X1 + L)) - \cos(D \cdot X1)], \quad (6)$$

где L – расстояние между соседними пунктами возбуждения, $V0$ – скорость волны в самой верхней части разреза, C и D – параметры, определяющие форму рельефа местности. В системе наблюдения, используемой в сверхглубинном ОГТ на опорных профилях, расстояние между источниками составляет 100 м, между сейсмоприемниками – 50 м. Длины годографов, от которых зависят значения p в (1), в среднем для регистрируемых головных волн составляют 5 км. На рис. 1, а показана линия профиля $Y(X)$, а на рис. 1, б – линия рельефа дневной поверхности $H(X)$ профиля.

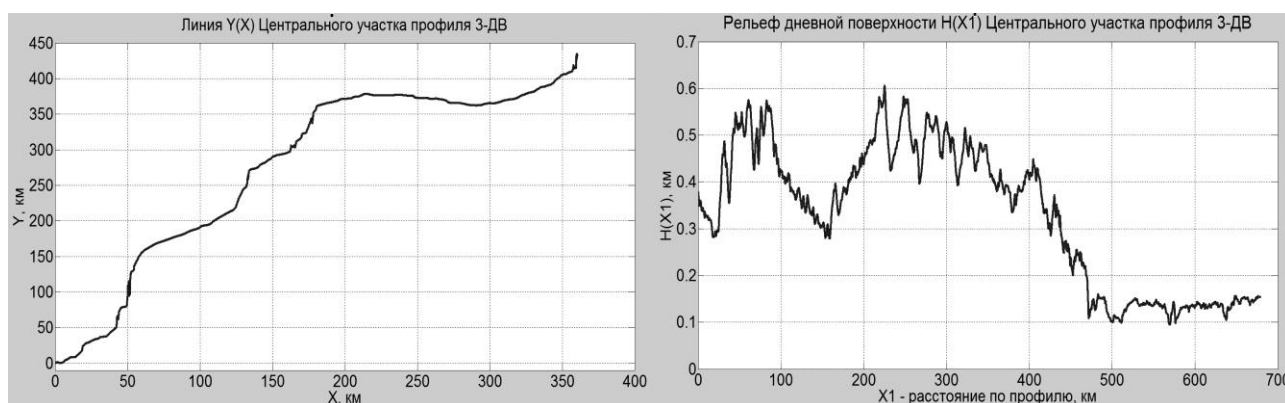


Рис. 1. Центральный участок профиля 3-ДВ:

а) линия профиля в плоскости (X, Y) ; б) линия рельефа $H(X1)$ дневной поверхности профиля

Частотный диапазон преломленных волн составляет в среднем по профилю 13–25 Гц. Для оценки влияния кривизны и рельефа Центрального участка профиля 3-ДВ вычислим модули АЧХ фильтров (рис. 2) согласно (1), (4), (6), задав разные значения параметров A и B , которые характерны для района исследований: 10 км и 100 км, 1 км и 5 км, 50 м и 100 м (модули АЧХ показаны кривыми 1, 2, 3 на рис. 1, а соответственно). Характерные значения параметров C и D таковы: 250 м и 200 км, 100 м и 20 км, 20 м и 10 км (модули АЧХ показаны кривыми 1, 2, 3 соответственно на рис. 2, б).

Влияние кривизны профиля на динамический пересчет выражается в виде низкочастотной фильтрации – происходит понижение амплитуд головных волн на результирующих временных разрезах. Для значений параметров A, B , встречающихся на Центральном участке, понижение амплитуд в целевом диапазоне частот не превышает 2–10 % для данных ОГТ, что не критично. В то же время неоднородность высот форм рельефа Центрального участка вовсе не влияет на

динамический пересчет и не приводит к уменьшению амплитуд сигналов – модули АЧХ фильтров во всем диапазоне частот принимают значения 1 (рис. 2, б). Однако при геоморфологических условиях, не характерных для профиля 3-ДВ, но теоретически возможных (сильная кривизна линий профиля – $A/B > 2$ и/или углы наклона форм рельефа, превышающие 30°), низкочастотная фильтрация, обусловленная кривизной профиля и неоднородностью рельефа, приведет к существенному уменьшению амплитуд головных волн на результирующих временных разрезах, вплоть до 80–100 % в целевом частотном диапазоне.

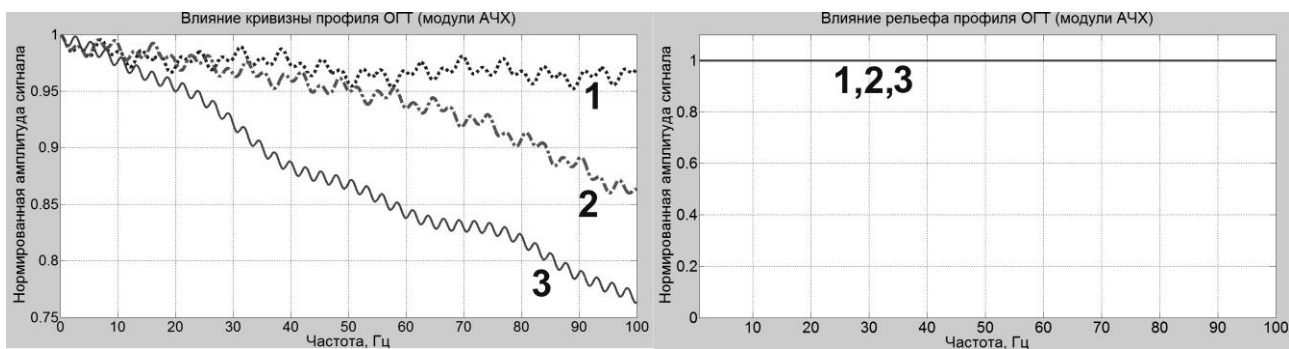


Рис. 2. Модули АЧХ фильтров, обусловленных влиянием кривизны (а) и рельефа дневной поверхности (б) Центрального участка профиля на результат динамического пересчета данных сверхглубинного ОГТ

Теперь рассмотрим результаты динамического пересчета головных волн на профиле 3-ДВ. На рис. 3, а изображен фрагмент временного разреза Центрального участка профиля 3-ДВ.

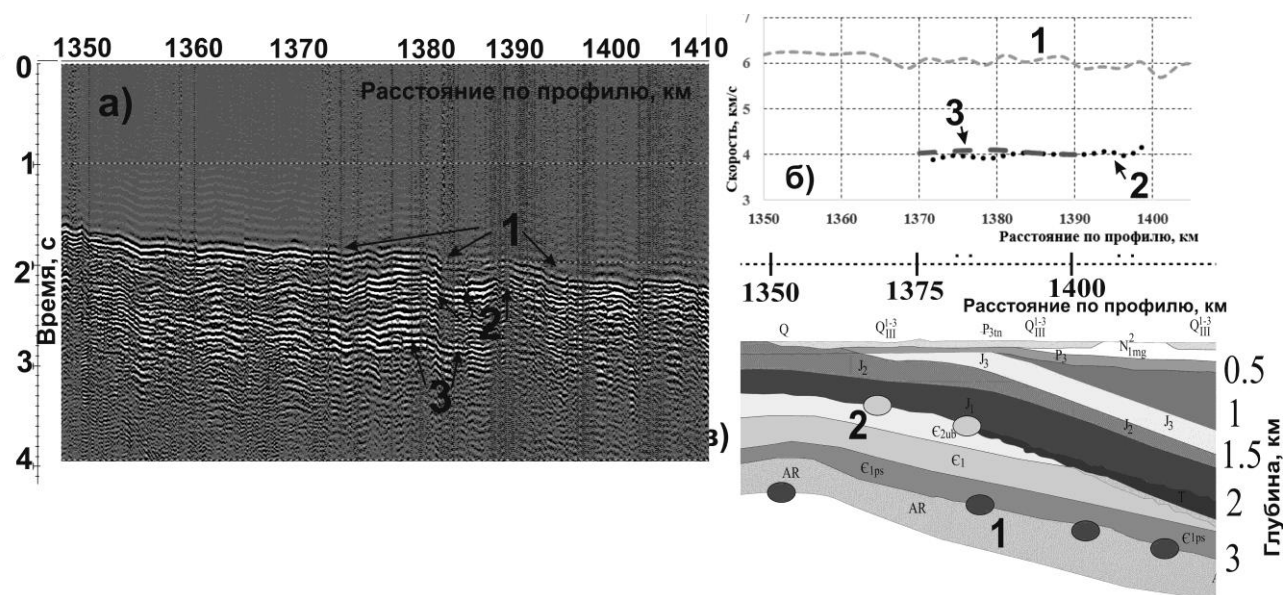


Рис. 3. Центральный участок профиля 3-ДВ:

а) фрагмент временного разреза ($L = \text{const} = 7$ км); б) граничные скорости головных и кратной отраженно-преломленной волны; в) фрагмент геологического разреза

Волны первых вступлений (на временном разрезе оси этих волн синфазности показаны стрелками 1) характеризуются граничными скоростями 5.9–6.1 км/с (рис. 3, б), а волны последующих вступлений (с осями синфазности, показанными стрелками 2 и 3) – граничными скоростями 4–4.2 км/с. Значения скоростей волн первых вступлений типичны для магматических пород, а значения скоростей продольных волн последующих вступлений типичны для осадочных горных пород [2]. Так как граничные скорости волн с осями синфазности, показанными 2 и 3, очень близки, то, вероятно, эти волны соответствуют одной и той же преломляющей границе, причем волна с осью синфазности 3 является кратной отраженно-головной. Несмотря на то что на временном разрезе на базе 7 км эти волны прослеживаются в последующих вступлениях, они соответствуют менее глубокозалегающей границе (ее глубина залегания изменяется по профилю от 1.2 до 1.4 км), чем волна первых вступлений. Эта преломляющая граница расположена в осадочном чехле и разделяет осадочные толщи кембрийского и юрского возраста (значения глубины показаны светлыми кружками (2) на рис. 3, в). Граница, которой соответствует преломленная волна первых вступлений, залегает на глубинах, увеличивающихся по профилю от 2.3 до 2.9 км, и представляет собой кровлю кристаллического фундамента (значения глубины показаны темными кружками (1) на рис. 3, в). Таким образом, для Нижнеалданской впадины – переходной зоны от Вилуйской синеклизы к Предверхолянскому краевому прогибу – характерно увеличение глубины залегания фундамента и возрастание мощности осадочного чехла соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Временные разрезы головных волн верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (Северо-восточный участок) / П.О. Полянский, А.С. Сальников, А.Ф. Еманов, В.В. Жабин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 2. – С. 86–95.
2. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. 2-е изд. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
3. Еманов А.Ф, Селезнев В.С, Коршик Н.А. Динамический пересчет головных волн при обработке данных сейсморазведки // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 10. – С. 1031–1045.
4. Крылов С.В., Сергеев В.Н. Свойства головных волн и новые возможности автоматизации их обработки // Геология и геофизика. – 1985. – № 4.- С. 92–102.
5. Полянский П. О., Сальников А. С., Еманов А. Ф. Применение метода динамического пересчета головных волн на Центральном участке профиля 3-ДВ (республика Якутия) для изучения преломляющих границ верхней части земной коры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 210–215.
6. Пузырев Н.Н. Об интерпретации данных метода преломленных волн при наличии градиента скорости в нижней среде // Геология и геофизика. – 1960. – № 10. – С. 120–128.
7. Сергеев В.Н. Учет геометрического расхождения и рефракции при пересчете поля колебаний преломленных волн // Геология и геофизика. – 1988. – № 3. – С. 93–102.

© П. О. Полянский, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников, 2017

О ВЛИЯНИИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДЫ ПОД ВИБРАТОРОМ ЦВ-40 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА)

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Владимир Николаевич Кашун

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра ««Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, главный инженер, тел. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Николай Александрович Серезников

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)333-25-35, e-mail: bestyah21@gs.nsc.ru

Наталья Александровна Галёва

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Илья Александрович Антонов

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба СО РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)330-75-68, e-mail: antonovilyha@gmail.com

Проведены исследования в ближней зоне вибратора ЦВ-40 по влиянию промерзания и оттаивания грунта на характеристики излучения. Установлена линейная зависимость уменьшения максимальной амплитуды излучения вибратора от мощности промерзшего слоя до глубин 1.5 м. При оттаивании грунта сильное изменение амплитуд излучения происходит сразу после оттайки первых 10–20 см. Кроме амплитуд, в зимний период значительно, до 0.5–1 Гц, уменьшается эффективный частотный диапазон излучения. Полученные результаты представляются важными и будут использованы при активном вибросейсмическом мониторинге в Сибири и работах ГСЗ с вибраторами в восточной части России в зонах вечной мерзлоты.

Ключевые слова: вибратор ЦВ-40, коррелограммы, вибросейсмический мониторинг, амплитудные спектры, ближняя зона, промерзание и оттаивание грунта, характеристики излучения ЦВ-40.

SEASONAL GROUND CHANGES AT UPPER LAYER UNDER CV-40 VIBRATOR AND ITS EFFECT ON EMISSION CHARACTERISTICS (DURING VIBRO SEISMIC MONITORING AT ALTAY-SAYAN REGION)

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Deputy director, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Vladimir N. Kashun

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)333-38-01, e-mail: kashun@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Nikolai A. Serezhnikov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Engineer, tel. (383)333-25-35, e-mail: bestyah21@gs.nsc.ru

Natalya A. Galyova

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Ilya A. Antonov

Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Engineer, tel. (383)330-75-68, e-mail: antonovilyha@gmail.com

The paper studies CV-40 vibrator near field affected by freezing and thawing of the soil on the emission characteristics. A linear dependence between low amplitude emission and thickness of frozen layer up to 1.5 m have been obtained. When thawing a strong change in the amplitude take place even defrost of first upper 10–20 cm. Besides the amplitude changes at winter time there is a 0.5–1 Hz decreased effective frequency range. This results will be used during active seismic monitoring at Siberia region and deep sounding field works at the eastern part is Russian Federation on permafrost grounds.

Key words: vibrator CV40, correlograms, vibro seismic monitoring, amplitude spectrum, near zone, frozen layer, permafrost, ground thaw, emission characteristics.

Работами ГСЗ на опорных профилях в восточной части России накоплен значительный материал по излучению мощных вибраторов на более чем 10-и тысячах километров профилей [1, 4]. Наряду с высокой стабильностью и повторяемостью вибрационных воздействий установлена сильная изменчивость волновых полей мощных вибраторов в ближней и дальней зонах при излучении на неоднородных грунтах (осадочных, горных, мерзлотных). Установлено, что для излучения широкополосного спектра от вибратора необходимо наличие мощной (5–10 м) низкоскоростной ($V_p \approx 300$ м/с) толщи. В этом случае в спектрах излучения преобладает основная гармоника, а кратные существенно меньше. Когда мощность низкоскоростного слоя меньше 2 м либо скорости

в верхней части разреза достаточно высоки (2000–5000 м/с), основная гармоника в два и более раз уступает кратным гармоникам [1, 2, 4]. Хорошей экспериментальной моделью площадки под вибратор с изменением физических свойств грунтов является Быстровский полигон с мощной (до 10 м) низкоскоростной песчаной толщей, которая в зимнее время промерзает до 2 м. Сезонные изменения грунта под вибраторами приводят к сильному изменению их характеристик излучения и регистрируемых волновых полей (рис. 1). Как видно из рис. 1, широкополосные частотные характеристики излучения 100-тонного вибратора и 40-тонного вибратора в летнее время одинаково сдвигаются в высокочастотную область и становятся узкополосными в зимнее время [1–4].

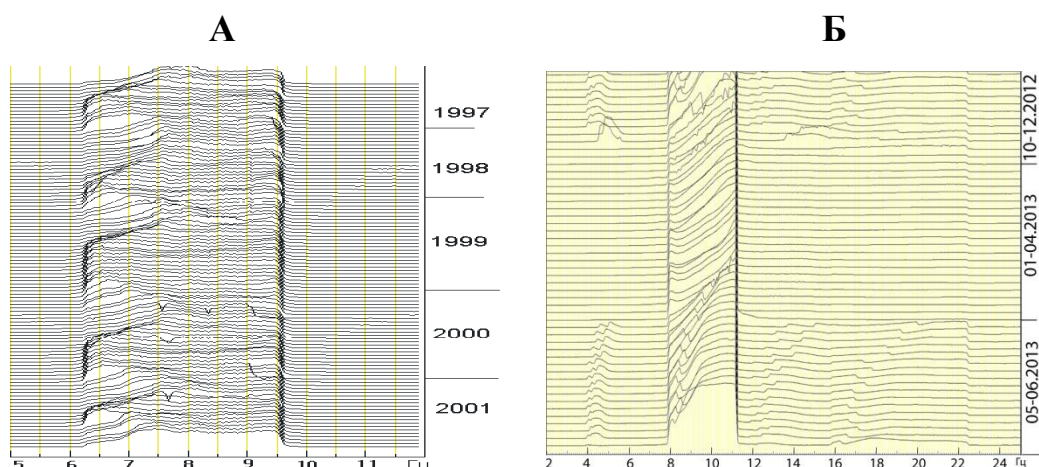


Рис. 1. Примеры амплитудно-частотных характеристик вибраторов ЦВ-100 (А) и ЦВ-40 (Б) в ближней зоне

Резкий спад амплитуд излучения начинается с первых чисел ноября, минимум наблюдается в середине марта, а максимум излучения – с середины мая по конец октября. В январских и особенно в февральских сеансах отмечается близко к линейному увеличение амплитуд излучения вибратора в диапазоне 7.91–11.23 Гц (рис. 1, Б); фактически эффективное излучение начинается лишь в самом конце (в диапазоне ~10.5–11 Гц). При этом резко падают амплитуды излучения в ближней зоне [4] и амплитуды регистрируемых сигналов в дальней зоне. В волновых полях в зимнее время сильно уменьшаются амплитуды опорных волн и соотношение сигнал/шум. В особенности это отражается на записях S-волн, которые практически «пропадают».

Начиная с 2010 года в ближней зоне вибросисточника эпизодически, а с 2015 года постоянно, с температурным датчиком проводятся измерения температуры на разных глубинах [5]. Наряду с установлением исследователями [5] сейсмотермического эффекта от работающего вибратора, данные по температуре грунта на разных глубинах под вибратором позволяют выполнить оценку влияния мощности промерзшего (или оттаявшего) грунта (рис. 2) на характеристики излучения вибратора. В целом, по сравнению с оттаиванием, про-

мерзание грунта происходит более медленно, особенно после 0.8 м, и очень медленно на глубинах от 1.5 до 2 м (рис. 2, А). Оттаивание грунта происходит практически за полтора месяца, начиная со второй декады апреля. На рис. 2, Б приведены зависимости амплитуд излучения вибратора от глубины промерзания и мощности оттаявшего грунта, построенные с использованием данных температурного датчика и амплитуд с глубинного датчика (на глубине 5 м под вибратором). Практически линейно происходит уменьшение амплитуд излучения вибратора в зависимости от мощности промерзшего слоя до глубины 1.5 м; далее спад амплитуд излучения практически останавливается. При оттаивании увеличение мощности излучения начинается сразу с процессом оттайки первых 10 см и резко увеличивается при мощности оттаявшего слоя в 20 см; дальнейшее увеличение амплитуд излучения до максимума достигается при мощности оттаявшего грунта в 1 м.

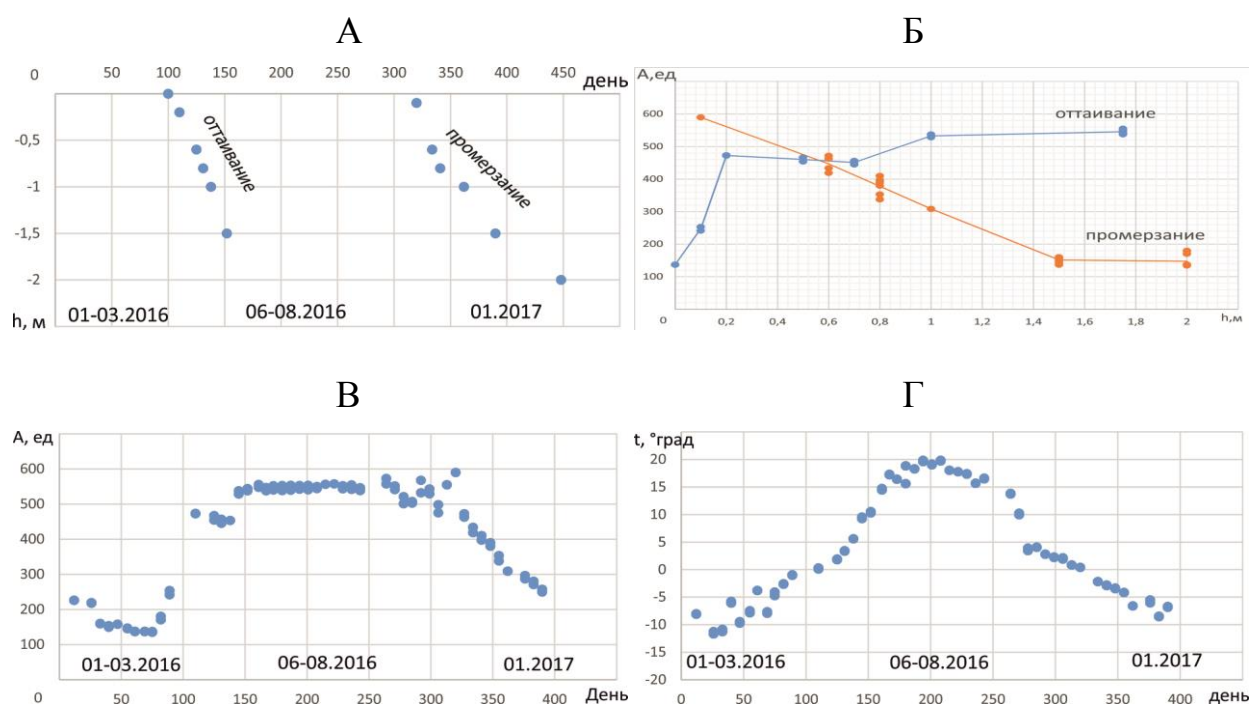


Рис. 2. К изучению характеристик излучения вибратора ЦВ-40 при промерзании и оттаивании грунта под вибратором:

А – графики промерзания и оттаивания грунта под ЦВ-40 в 2016–2017 гг.;
 Б – зависимость амплитуды излучения вибратора от глубины промерзания грунта и мощности оттаявшего слоя; В – график максимальных амплитуд излучения ЦВ-40 на глубинном датчике в 2016–2017 гг.; Г – распределение температуры в грунте под вибратором на глубине 0.2 м

В целом неравномерный по времени процесс промерзания и оттаивания грунта наглядно иллюстрирует рис. 2, В. Из рисунка видно, что стабильное (по амплитуде) излучение сохраняется в течении четырех летне-осенних месяцев и короткий период зимой в феврале-марте. В конце марта и апреле и в пе-

реходный осенне-зимний период отмечается сильный разброс амплитуд. Из графиков (на рис. 2, А, В) видно также, что период оттайки более быстрый по сравнению с временем промерзания грунта. Несовпадение значений амплитуд в январе 2016 и 2017 годов объясняется более сильным промерзанием грунта под вибратором в январе-феврале 2016 года (рис. 2, Г).

Таким образом, стабильное и максимальное по амплитуде излучение отмечается летом и в начале осени. При работах с виброисточником в данный период были получены коррелограммы с высоким отношением сигнал/шум на предельно больших расстояниях в 360–455 км (рис. 3).

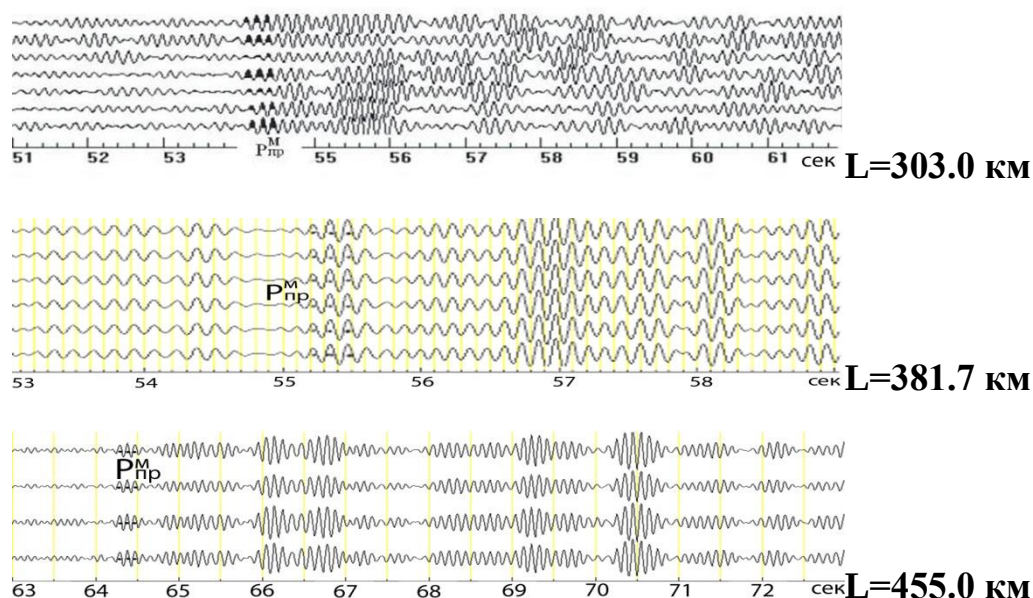


Рис. 3. Примеры коррелограмм от виброисточника ЦВ-40, зарегистрированные в Алтае-Саянском регионе в летне-осенний период в 2002–2009 гг.

Проведенные исследования чрезвычайно важны при выполнении работ по мониторингу сейсмоактивных зон Алтае-Саянского региона и работах ГСЗ с вибраторами в восточной части России в зонах вечной мерзлоты.

При работах ГСЗ, проводя малозатратные инженерно-сейсморазведочные исследования в местах установки виброисточника, можно до установки реально оценивать максимальную мощность излучения вибратора на исследованной площадке, необходимое количество повторных сеансов и перспективы получения коррелограмм на больших удалениях. Выполнение мониторинговых экспериментов в Алтае-Саянском регионе с большими охватами зондируемой площади, с высокой точностью и повторяемостью сеансов целесообразно осуществлять с мая по октябрь. Для исключения промерзания грунта целесообразно также установка легкого отапливаемого ангара над вибратором ЦВ-40 с площадью $\sim(50\text{--}60) \text{ м}^2$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, Н.И. Геза и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2004. – 350 с.
2. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области / В.М. Соловьев, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов и др. // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: матер. 2-го Междунар. симпозиума. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – С. 64–70.
3. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев и др. // Геология и геофизика. – 1999. – № 3. – С. 474–486.
4. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмических исследованиях и активном мониторинге среды / В.М. Соловьев, В.Н. Кашун, И.Е. Романенко и др. // Проблемы информатики. – 2016. – № 1. – С. 58–72.
5. Юшин В. И., Аюнов Д. Е., Дучков А. Д. Мониторинг изменения температуры под плитой действующего сейсмического вибратора // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 2, ч. 2. – С. 32–36.

© В. М. Соловьев, В. Н. Кашун, С. А. Елагин, Н. А. Серезжников,
Н. А. Галёва, И. А. Антонов, 2017

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ИСТОЧНИКА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

Николай Егорович Сибиряков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (383)330-90-02, e-mail: kolyasibir@yandex.ru

Егор Борисович Сибиряков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-90-02, e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

В данной работе численно исследовалась эффективность взрывного возбуждения поперечной упругой волны с использованием барьера в ближней зоне. Давление на стенки вычислялось с помощью итерационного метода решения уравнения Лапласа. Перемещение в дальней зоне (в упругой среде) находилось с помощью модифицированного метода граничных элементов в достаточно широком диапазоне частот. Расчет давлений на стенки показал слабое изменение максимальной разности давлений на противоположные стенки при увеличении количества зарядов. При этом наибольшее отношение давлений на противоположные стенки достигалась в случае одного заряда, помещенного между барьером и ближайшей стенкой ямы. Результаты вычислений вектора перемещений на некоторой глубине в полубесконечной среде показывают преобладание сдвиговой компоненты вектора перемещений в некотором диапазоне частот. Можно сделать вывод о перспективности использования барьеров для возбуждения поперечных волн в обводненных грунтах.

Ключевые слова: метод граничных элементов, уравнение Лапласа, итерационные методы, граничные задачи, поперечные волны, упругость.

NUMERICAL MODELLING METHOD OF THE S-WAVE EXPLOSIVE SOURCE

Nicolay E. Sibiriakov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, tel. (383)330-90-02, e-mail: kolyasibir@yandex.ru

Egor B. Sibiriakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-90-02, e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

An efficiency of the S wave explosive excitation by using of a barrier at the nearfield zone investigated numerically. Pressure on the walls calculated by iteration method of the Laplace equation solution finding. Displacement vector on the far-field zone (elastic medium) calculated by modified boundary element method at wide enough frequency range. We found that maximal pressure ratio weakly decrease with the number of charges. Also, we showed the domination of the displacement vector shear component at some frequency domain. The using of the barriers gives a possibility of S wave excitation in watered grounds.

Key words: method of boundary elements, Laplace equation, boundary conditions, S waves, elasticity, iteration method.

Введение

Взрывные источники поперечных волн были разработаны достаточно давно. Для их эффективного применения обычно необходимо использовать пару зарядов на противоположных стенках траншеи, между которыми находится разрыхленный грунт, скорость ударных волн в котором во много раз меньше, чем в нетронutom грунте [1, 2]. Однако в обводненных грунтах реализация этого метода возбуждения становится невозможной. В этих условиях для создания существенно различных давлений на противоположные стенки можно использовать массивную преграду. Жидкость в полости предполагается несжимаемой. Это значит, что элементарные акты отражения и преломления волн в полости с преградой происходят бесконечно быстро по сравнению с периодом возбуждаемых сейсмических волн. Модель источника в этом случае сводится к решению уравнения Лапласа со смешанными граничными условиями. На верхней границе ямы ноль давлений (свободная граница). На всех остальных стенках ямы, а также на стенках барьера выполняется условие непротекания ($\partial p / \partial n = 0$).

Постановка задач в ближней зоне и в однородной полубесконечной упругой среде

Граница полубесконечной упругой среды состоит из граней куба и плоской свободной поверхности. Идея заключается в том, чтобы найти распределение давлений на границе полубесконечной среды (т. е. на стенках куба) как решение уравнения Лапласа с упомянутыми выше граничными условиями. При этом барьер используется для создания максимальной разности давлений на противоположных стенках куба (рис. 1).

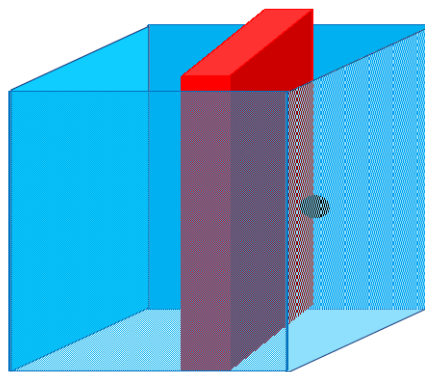


Рис. 1. Схема источника возбуждения.

Голубой и прозрачный цвет – яма. Красный – барьер.
Черное пятно между ямой и барьером – заряд ВВ

Далее найденные давления использовать в качестве нормальной компоненты вектора нагрузок в полубесконечной среде (касательная компонента есть ноль, а также все компоненты на свободной поверхности). То есть решение

граничной задачи смешанного типа для уравнения Лапласа использовалось в качестве начальных данных для упругой задачи стационарных колебаний – о нахождении перемещений в объеме (дальней зоне), вызванных заданным вектором нагрузок на поверхности. При этом нагрузка на всех частотах считалась одинаковой (так как нагрузка импульсная).

Краевая задача для уравнения Лапласа решалась итерационным методом аналогично [3], но для граничных условий смешанного типа. При разбиении в объеме куба (включая барьер) $40 \times 40 \times 40$ погрешность решения краевой задачи не превышала 10^{-4} .

Таким образом, модель излучения упругих волн сводится к задаче динамической теории упругости для заданного распределения нагрузок на заданной (достаточно сложной) границе. Соответственно, для нахождения перемещений в объеме среды при известных нагрузках, порождаемых источником, необходимо решать упругую задачу. Как отмечено в обзоре [4], метод граничных элементов (МГЭ) хорошо подходит для нахождения решений в неограниченных, хотя бы по одному из измерений, объемах. Кроме того, при использовании данного источника вектор нормали к поверхности изменяется практически скачком. Также очень быстро изменяется вектор нагрузок. В условиях совсем не гладких поверхностей, на которых задаются граничные условия, интегральный метод будет иметь преимущество в части достоверности получаемых результатов. Для решения этой упругой задачи использовался модифицированный метод граничных элементов, изложенный в [5]. Суть метода в том, что перемещение, которое есть решение уравнения упругих стационарных колебаний

$$\Delta \mathbf{u} + k^2 \mathbf{u} + \frac{\lambda + \mu}{\mu} \text{grad}(\text{div} \mathbf{u}) = 0, \quad k^2 = \frac{\rho \omega^2}{\mu}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор перемещений, μ и λ – упругие модули, ρ – плотность, ищется не в виде интеграла, но может быть представлена как конечная сумма:

$$u_i(x_0) = \sum M_{ij}(x_0, x) f_j(x).$$

При этом x_0 есть фиксированная точка объема (включая поверхность), а x – бегущая точка поверхности, по которой происходит суммирование. $M_{ij}(x_0, x)$ представляет набор трех векторов, удовлетворяющих системе (1) точно (аналитически) в каждой точке x_0 при фиксированном j . При этом вектор потенциала f необходимо вычислить так, чтобы удовлетворить граничным условиям. Вектор нагрузок может быть вычислен аналитически, путем вычисления производных от вектора перемещений ($p_i = \sigma_{ik} n_k$, напряжения вычисляются по закону Гука):

$$p_i(x_0) = - \sum P_{ij}(x_0, x) f_j(x).$$

Модификация МГЭ, описанная в [6], заключается в использовании конечных и гладких ядер, что позволяет существенно повысить точность при незначительной потере обусловленности.

Яма кубической формы с длиной $T=0.226048$ была аппроксимирована формулой $H = T * \exp(-[10x]^{10} - [10y]^{10})$ (рис. 2) с целью сглаживания углов и использования одной поверхности. Нормальная компонента вектора нагрузки на этой поверхности, вычисленная ранее с помощью решения уравнения Лапласа, является сильно локализованной функцией (рис. 3). Необходимо вычислить компоненты вектора перемещений на глубине $h_0=1.5$ и оценить эффективность источника. Поскольку источник является сосредоточенным на очень малой площадке, использовались цилиндрические координаты. Разбиение всей поверхности (рис. 2) – 60×60 по радиусу и углу соответственно.

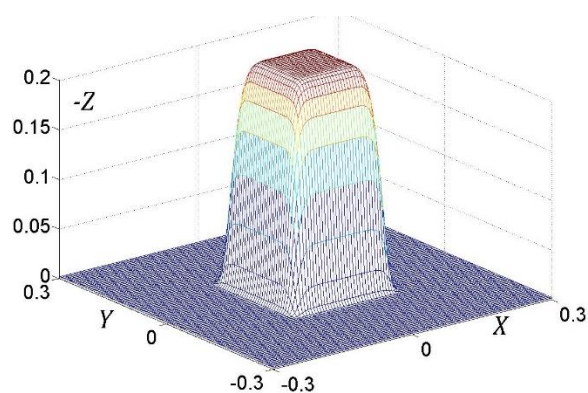


Рис. 2. Свободная поверхность с ямой кубической формы – источником волн. По оси z , масштаб по которой увеличен, – углубление

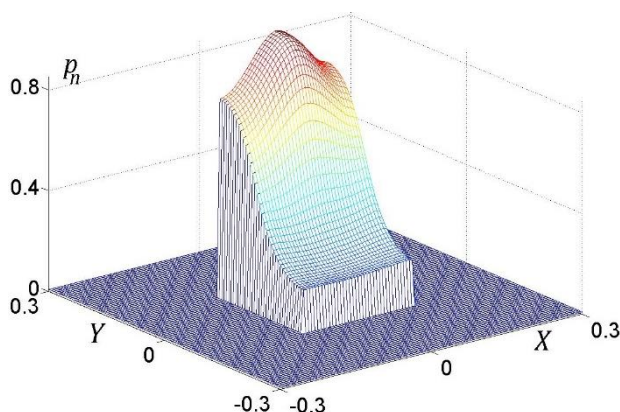


Рис. 3. Нормальная компонента вектора нагрузок на поверхности. Существенное различие нагрузки на поверхностях есть результат действия барьера

Результаты

При расчете давления на стенки мы обнаружили, что наибольшая разность в нормальной нагрузке на противоположные стенки достигается при подрыве одного заряда, расположенного между массивным барьером и ближайшей к нему стенкой. На рис. 4, 5 изображены x -компоненты вектора перемещений на указанной глубине и частотах $k = 0.5\pi$, 2π соответственно, что соответствует сдвигу в плоскости xu в направлении x . Эти компоненты соответствуют волне SH. На рис. 5, в отличие от рис. 4, фактически изображен сдвиговый диполь. На рис. 6 для сравнения представлена z -компонента вектора перемещений на той же глубине при $k = 0.5\pi$. Видно, что амплитуда x -компоненты примерно в два раза больше (рис. 4). Результаты показывают, что на параметры излучаемых поперечных волн можно влиять как с помощью барьера, так и геометрических параметров ямы.

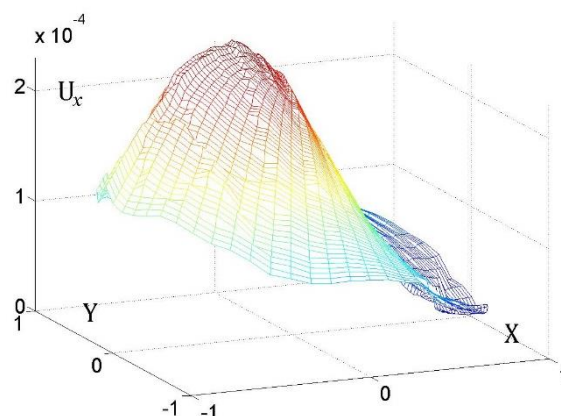


Рис. 4. x -компонента вектора перемещений, порожденная нормальной нагрузкой на поверхности (рис. 2, 3), на глубине $h_0 = 1.5$ при пространственной частоте $k = 0.5 \pi$

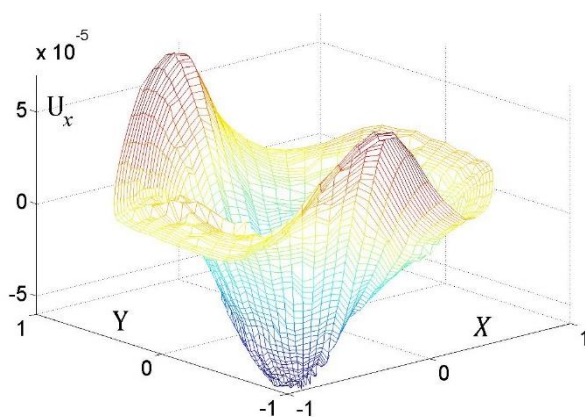


Рис. 5. x -компонента вектора перемещений, порожденная нормальной нагрузкой на поверхности (рис. 2, 3) на глубине $h_0 = 1.5$ при $k = 2\pi$

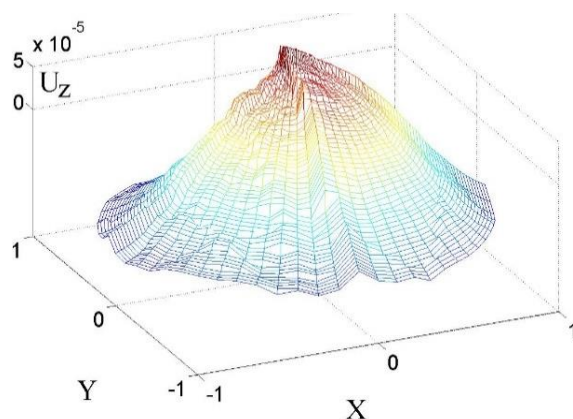


Рис. 6. z-компонента вектора перемещений, порожденная нормальной нагрузкой на поверхности (рис. 2, 3) на глубине $h_0 = 1.5$ при $k = 0.5\pi$

Выводы

1. Комбинированный способ моделирования источника, заключающийся в использовании решения уравнения Лапласа со смешанными граничными условиями в ближней зоне, и модифицированный МГЭ в дальней зоне представляется авторам перспективными.
2. Использовать барьеры для возбуждения SH-волн в обводненных средах для достижения максимально возможной разницы давлений на противоположных стенках возможно.
3. Наибольшее отношение средних давлений на противоположные стенки достигается при подрыве одного заряда, помещенного между барьером и ближайшей стенкой ямы.
4. С ростом частоты подобная схема нагружения будет приводить на глубине к более сложным, мультипольным сдвигам.
5. На параметры излучаемых поперечных волн можно влиять как с помощью массивной преграды, так и размеров ямы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Прууэлу Э.Р., заместителю директора ИГиЛ СО РАН, Сибирякову Б.П., главному научному сотруднику ИНГГ СО РАН, за плодотворные консультации и обсуждение работы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 15-05-04165).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пузырёв Н.Н. Методы сейсмических исследований. – Новосибирск: Наука, 1992. – 236 с.
2. Пузырёв Н.Н., Лебедев К.А., Лебедева Г.Н. Возбуждение поперечных и обменных волн взрывами // Геология и геофизика. – 1966. – № 2. – С. 88–89.
3. Кунин С. Вычислительная физика. – М.: Мир, 1992. – 518 с.

4. Manolis G., Dineva P. Elastic waves in continuous and discontinuous geological media by boundary integral equation methods: A review // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2015. – Vol. 70. – P. 11–29.

5. Сибиряков Е. Б. Использование метода граничных элементов для моделирования отражения от шероховатых границ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 262–267.

6. Сибиряков Б.П., Сибиряков Е.Б. Области локального понижения давлений как вероятные аккумуляторы флюидов в геологических структурах // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 7. – С. 1391–1397.

© Н. Е. Сибиряков, Е. Б. Сибиряков, 2017

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОНАВИГАЦИИ

Михаил Владимирович Свиридов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Антон Павлович Мосин

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 141), e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

Юрий Евгеньевич Антонов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 140), e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

В работе представлен краткий обзор существующих подходов для картирования областей неопределенности параметров. Предложен новый метод картирования областей неопределенности параметров применительно к задачам геонавигации. Для подтверждения работоспособности предложенного метода приведены результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: область неопределенности параметров, геонавигация, глубинный прибор электромагнитного каротажа с азимутальной чувствительностью измерений, инверсия данных электромагнитного каротажа.

HIGH-PERFORMANCE MAPPING OF PARAMETER UNCERTAINTY REGION IN RESERVOIR NAVIGATION APPLICATIONS

Mikhail V. Sviridov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Anton P. Mosin

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 141), e-mail: Anton.Mosin@bakerhughes.com

Yuriy E. Antonov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 140), e-mail: Yuriy.Antonov@bakerhughes.com

The paper provides a brief overview of existing approaches to mapping of parameter uncertainty region. New method of parameter uncertainty region mapping is proposed for reservoir navigation applications. The results of test computations are presented to confirm the efficiency of the proposed method.

Key words: parameter uncertainty region, reservoir navigation, deep-azimuthal resistivity tool, resistivity data inversion.

Modern exploration resistivity tools utilized in the oil industry for reservoir navigation and formation evaluation purposes provide a large range of measurements. This data is subsequently used for resolving parameters of the surrounding formation through sophisticated multi-parametric inversion techniques. The question of inversion results accuracy is very important because in some unfavorable cases poor quality of formation parameter resolution can lead to the erroneous perception of reservoir structure.

The accuracy of inversion results can be evaluated by means of the uncertainty analysis algorithms. The purpose of these algorithms is to map uncertainty region in parameter domain and then estimate the uncertainty ranges for each formation parameter. For example, if the range is narrow, an appropriate formation parameter can be reliably recovered. On the contrary, a wide range means that the inversion cannot accurately resolve the value of the appropriate parameter.

Another application of uncertainty analysis algorithms is investigation of exploration tool capabilities in known formation.

Following items should be specified as an input for uncertainty analysis algorithms:

- configuration of exploration tool (set of measurements that tool is able to provide for the processing)
- noise model (value of measurement noise and its distribution law) for each measurement composing tool configuration
- formation model (maybe a priori known or recovered from tool measurements through inversion)

There are several basic approaches to perform uncertainty analysis and map parameter uncertainty region [1]:

- Construction of linear approximation and mapping of parameter uncertainty region as an equivalency ellipsoid in the parameter domain. This approach is high-performance even in case of high dimensionality of parameter domain, but in some cases linear approximation can be inaccurate, so real uncertainty region cannot be represented as an ellipsoid. Another disadvantage of this approach enables mapping of only local uncertainty region
- Full scanning in the parameter domain with some specified step size (sufficiently small) for each parameter, and check if scanning point belongs to parameter uncertainty region or not. This approach enables mapping of both local and global parameter uncertainty region and ensures reliable results, but it is very time-consuming in case of high dimensionality of parameter domain because a lot of points should be examined.
- Variations of the Monte-Carlo method that generates random points over parameter domain, and check the scanning point belonging to parameter uncertainty region. This approach is able to map both local and global parameter uncertainty region, but requires a lot of computational time in case of high dimensionality of parameter domain because not all examined points belong to uncertainty region. Nevertheless, reliable result is guaranteed in case of large number of random points generated.

We propose a method for high-performance mapping of parameter uncertainty region in reservoir navigation applications. This method can be referred to response surface [1] approaches and consists of two steps. First, tool responses are simulated for specified formation model according to the actual tool configuration. Second, a high-performance inversion [2] of the simulated responses is carried out using the random set of model parameters as an expected value. Inversion assumes that measurements were contaminated with a preset level of noise according to the noise model. In the case of good quality inversion results, the set of recovered parameters represents some point inside of uncertainty parameter region. These two steps should be repeated many times to generate some statistics and eventually map the parameter uncertainty region. Then uncertainty ranges for each model parameter can be estimated through the analysis of this statistics.

This method has a good performance due to the capability of inversion algorithm to eliminate the redundant examination of parameter domain points located at a great distance away from the parameter uncertainty region. Moreover, usually there is high percentage of successful inversions that lead to points inside of uncertainty parameter region.

Let us illustrate the efficiency of proposed method with a very simple example reconstructing the conditions of the Russian West-Siberian fields (Fig. 1). This region is characterized by the low resistivity contrast between shale, oil- and water-bearing layers, which complicates reservoir properties evaluation and reservoir navigation process [3]. Imagine the deep-azimuthal resistivity tool [4, 5] is moving up (relative dip is 91°) in an oil-bearing layer with a resistivity of $10 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ to the shale layer interface located above. The resistivity of the shale layer is $5 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Let us assume that tool performs measurements each 50 cm and consider 3-m interval of borehole trajectory where the start point of interval is 1 m away from the boundary.

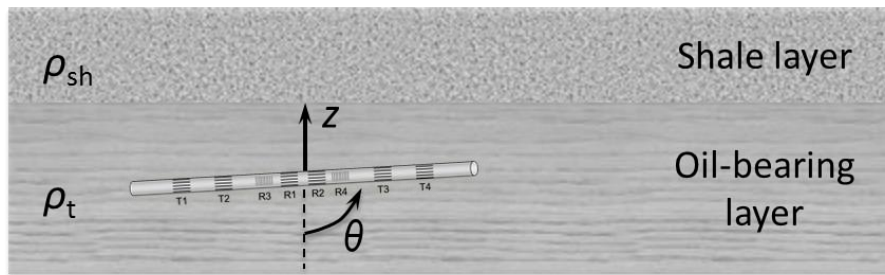


Fig. 1. Resistivity model reconstructing the conditions of West-Siberian fields

Let us specify the size of model parameter domain: both layer resistivities belong to the interval $[0.1, 100] \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, distance to boundary can vary in the interval $[-5, 5] \text{ m}$, and the range for relative dip angle is $[50, 130] \text{ deg}$.

Let us investigate three scenarios based on different combinations of measurements of deep-azimuthal resistivity tool. In the first scenario we simulate the process of reservoir navigation based on only conventional co-axial measurements (without azimuthal sensitivity) of deep-azimuthal resistivity tool. For the second scenario we enlarged the set of conventional co-axial measurements by low-frequency cross-component signal with azimuthal sensitivity. Measurement configuration for the third scenario includes conventional co-axial measurements and both low- and high-frequency cross-component signals with azimuthal sensitivity.

Assuming that the tool measurements can be contaminated with 2 % relative noise and an absolute noise dependent on signal type (0.01 dB for all attenuation signals, 0.1 degree for all phase difference signals and 10 nV for cross-component signals), we map the parameter uncertainty region for each scenario and present it in Fig. 2–4 below. Moreover, we compare our results with parameter uncertainty ranges estimated through another approach [6] based on the linear approximation of task.

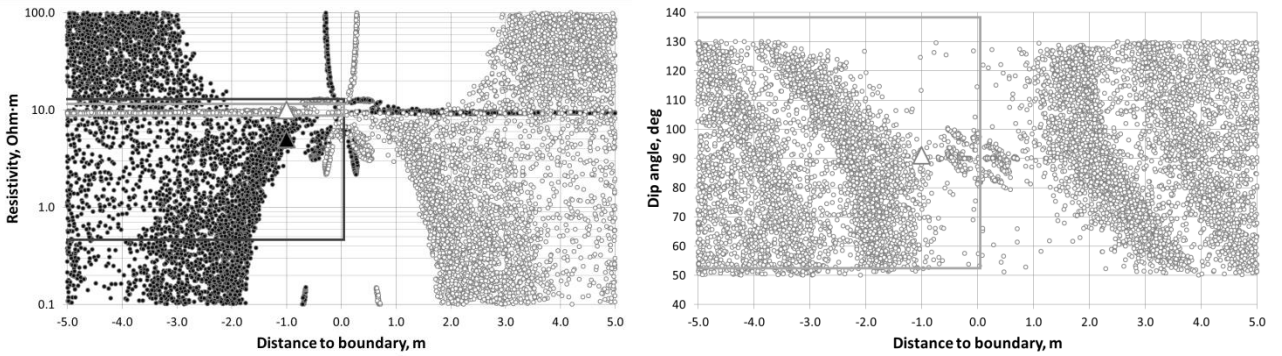


Fig. 2. Projection of parameter uncertainty region for the first scenario (tool configuration contains only conventional co-axial measurements without azimuthal sensitivity). The left picture is a plot of layer resistivities against distance to boundary. Black and grey points represent the resistivity of top and bottom layers respectively. The right picture is a graph of tool relative angle versus distance to boundary. Value of true model parameters is shown with a triangle. Uncertainty range estimated from linear approximation of task is shown as rectangle for each parameter. Extremely broad parameter uncertainty region for this scenario means that model parameters cannot be resolved without a priori data involvement

Considered scenarios show that parameter uncertainty region is characterized by complex shape and can be mapped by proposed method. Parameter uncertainty region can be locally bordered using the estimates of parameter uncertainty ranges computed through the linear approximation of task, but not globally. Third scenario shows that the use of high-frequency cross-component signal of deep-azimuthal resistivity tool enables the accurate resolution of model parameters even in case of formation with low resistivity contrast.

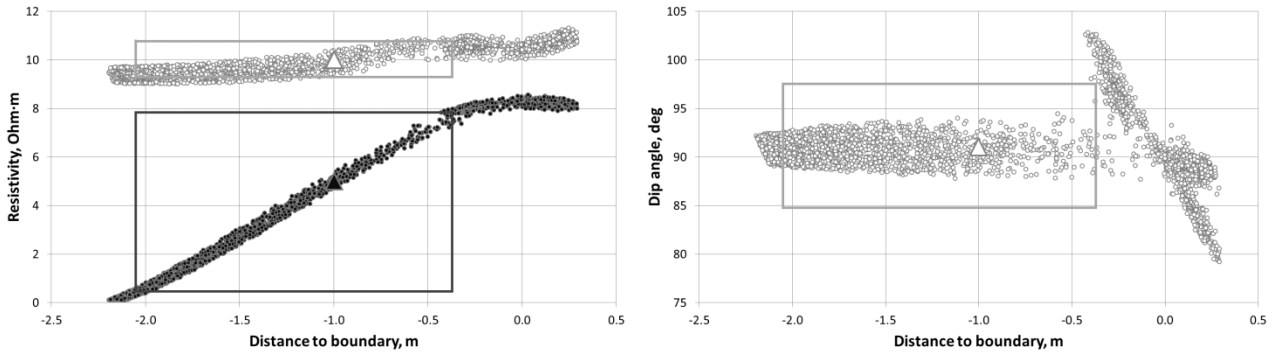


Fig. 3. Projection of parameter uncertainty region for the second scenario (tool configuration includes conventional co-axial measurements and low-frequency cross-component measurement with azimuthal sensitivity). The left picture is a plot of layer resistivities against distance to boundary. Black and grey points represent the resistivity of top and bottom layers respectively. The right picture is a graph of tool relative angle versus distance to boundary. Value of true model parameters is shown with a triangle. Uncertainty range estimated from linear approximation of task is shown as rectangle for each parameter. Wide parameter uncertainty region denotes that model parameters cannot be reliably recovered without the use of a priori knowledge about the reservoir structure

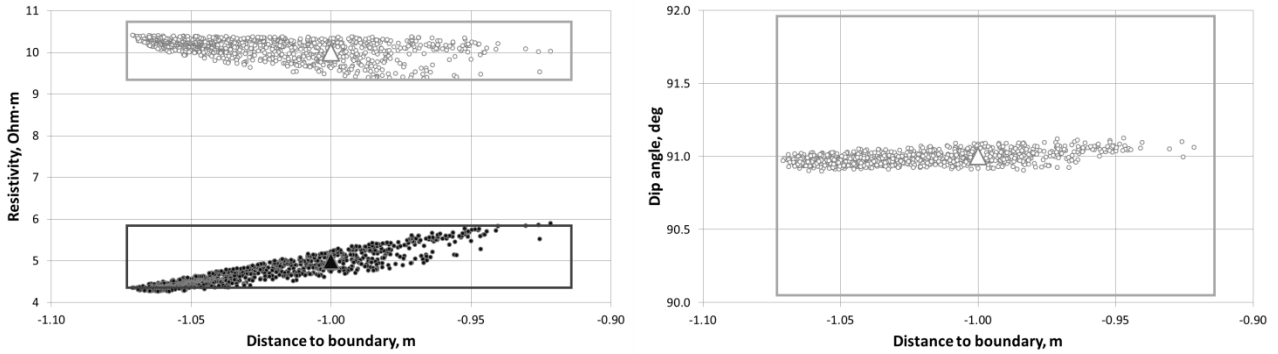


Fig. 4. Projection of parameter uncertainty region for the third scenario (tool configuration includes conventional co-axial measurements and both low- and high-frequency cross-component measurements with azimuthal sensitivity). The left picture is a plot of layer resistivities against distance to boundary. Black and grey points represent the resistivity of top and bottom layers respectively. The right picture is a graph of tool relative angle versus distance to boundary. Value of true model parameters is shown with a triangle. Uncertainty range estimated from linear approximation of task is shown as rectangle for each parameter. Narrow parameter uncertainty region indicates that all model parameters can be accurately resolved

REFERENCES

1. Lin G., Engel D.W., Eslinger P.W. Survey and evaluate uncertainty quantification methodologies // PNNL-20914 Report. – Richland, Washington, 2012. doi: 10.2172/1035732.
2. New Software for Processing of LWD Extradeep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data / M. Sviridov, A. Mosin, Yu. Antonov et al. <http://www.ipgg.sbras.ru/en/science/publications/publ-new-software-for-processing-of-lwd-extradeep-resistivity-2014-041834> // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 2014. – Vol. 17, N 2. – P. 109–127
3. First Application of LWD Deep-Azimuthal Resistivity Tool and Advanced Data Interpretation Software for Reservoir Navigation at West Salym Field in Russia / O. Belyaeva, M. Podberezhnnyy, V. Zverev et al. // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. – 2016.
4. A New Slimhole Multiple Propagation Resistivity Tool / W.H. Meyer, L.W. Thompson, M.M. Wisler et al. // 35th annual logging symposium transactions. – 1994. – 21 p.
5. Navigating and Imaging in Complex Geology With Azimuthal Propagation Resistivity While Drilling / C. Bell, J. Hampson, P. Eadsforth et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006). – SPE-102637.
6. Evaluation of Parameter Uncertainty Utilizing Resolution Analysis In Reservoir Navigation Increases the Degree of Accuracy And Confidence In Well-bore Placement / G. Nardi, S. Martakov, M. Nikitenko, M. Rabinovich // 51st Annual Symposium. – 2010.

© М. В. Свиридов, А. П. Мосин, Ю. Е. Антонов, 2017

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С ФОКУСИРОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРОВ

Александр Сергеевич Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Институт горного дела СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Александр Викторович Яблоков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru

Метод многоканального анализа поверхностных волн предназначен для определения скоростей поперечных волн на глубины до нескольких десятков метров. В основе этого метода лежит предположение о горизонтально-слоистом строении среды. При обработке реальных данных для уменьшения влияния горизонтальных неоднородностей используются короткие базы наблюдения. Это приводит к уменьшению точности построения скоростных разрезов. Для решения данной проблемы в работе предлагается способ, позволяющий использовать записи выносных источников.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, многоканальный анализ поверхностных волн, спектральный анализ, методы суммирования.

SURFACE WAVES MULTICHANEL ANALYSIS USING TIME-SPATIAL POWER SPECTRUM FOCUSING

Aleksander S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Researcher; Institute of Mining SB RAS, 630090, Russia, 54 Krasny Propect, Junior Researcher, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Aleksander V. Yablokov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Engineer, e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru

Multichannel analysis of surface waves (MASW) is widely used in near surface geotechnical studies. Horizontal stratified medium model is the serious limitation of the method. In many practical situations short profiles have to be used. That leads to spectral leakage and poor resolution while picking phase velocity curves. We solve this problem by using special shot gathering techniques.

Key words: MASW, beamforming, phase shift.

В работе рассматривается метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для линейных систем наблюдения с активными источниками [1]. Суть данного подхода состоит в построении горизонтально однородной слоистой модели скоростей поперечных волн на основе дисперсионных кривых фазовой скорости волн Рэлея. Данные кривые могут быть выделены при помощи

спектрального анализа сейсмограмм за счет более высокого уровня энергии поверхностных волн по сравнению с объемными. Осуществляется подбор распределения скоростей, обеспечивающий минимальное значение невязки между наблюдаемой и рассчитанной (для данного распределения) дисперсионными кривыми.

Распространенным подходом решения обратной задачи является инверсия Оккама [2]. Этот алгоритм позволяет избежать осцилляций решения. Для решения прямой задачи расчета фазовых кривых применяются алгоритмы поиска нулей дисперсионного соотношения, получаемого при помощи метода матричных пропагаторов Томсона-Хаскелла [3].

Метод MASW применяется при решении различных инженерно-геологических задач. Определение скоростей поперечных волн важно для оценок сейсмической жесткости оснований сооружений при проведении сейсмического микрорайонирования. Совместный анализ скоростных разрезов поперечных волн, построенных методом MASW, с разрезами скоростей продольных волн, построенных на основе преломленных и рефрагированных волн, позволяет оценивать физико-механические свойства связных грунтов [4].

Многоканальный анализ поверхностных волн основан на предположении о горизонтально однородном строении среды. На практике получаемые одномерные скоростные профили привязываются к средней точке расстановки. На основе интерполяции далее можно получать двумерные и трехмерные скоростные разрезы. При выборе длины профилей наблюдения следует учитывать степень горизонтальной неоднородности исследуемого объекта. Использование коротких баз приводит к размыванию спектра, ухудшению точности определения скоростей поверхностных волн и уменьшению глубины построения разрезов.

Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать дополнительные выносные источники. Из-за наличия горизонтальных неоднородностей происходит набег фаз плоских (цилиндрических в трехмерном случае) волн. В случае поверхностных волн эти фазовые сдвиги зависят от временной частоты [5], поэтому добиться накопления поверхностных волн за счет расширения сейсмограмм путем простого добавления записей с дополнительных выносов не удастся.

Для построения f - k спектров часто используют быстрое преобразование Фурье, как по времени, так и по пространству. Такой способ эффективен с вычислительной точки зрения. Тем не менее существуют более помехоустойчивые и универсальные алгоритмы оценки спектрального распределения амплитуд. Рассмотрим метод «формирования пучков» (beamforming) в пространственно-временной частотной области [6].

На первом шаге метода для каждой временной частоты ω составляется корреляционная матрица:

$$\mathbf{R}_{i,j}(\omega) = \mathbf{S}_i(\omega)\mathbf{S}_j^*(\omega), \quad i, j = 1 \dots N,$$

где $\mathbf{S}_i(\omega)$, $\mathbf{S}_j(\omega)$ – дискретные временные спектры (векторы) записей i -го и j -го приемников, а $*$ означает комплексное сопряжение.

Далее для каждой пространственной частоты k строится пробный вектор фазовых сдвигов:

$$\mathbf{e}(k) = [\exp(-ikx_1), \exp(-ikx_2), \dots, \exp(-ikx_N)]^T,$$

где x_n – выносы приемников.

Плотность спектрального распределения амплитуды оценивается по формуле:

$$\mathbf{P}(k, \omega) = \mathbf{e}^H(k) \mathbf{R}(\omega) \mathbf{e}(k).$$

Пусть есть дополнительный (второй) источник колебаний, находящийся на расстоянии x_0 от первого (рис. 1). Получается N дополнительных записей. В горизонтально однородной среде это эквивалентно тому, что есть N дополнительных приемников с выносами $x_j = x_{j-N} + x_0$, $j = (N+1) \dots 2N$. Как видно из рис. 2, использование этих записей приводит к повышению разрешения f-k изображения. Введем поправки θ , компенсирующие набег фаз на участке между вторым и первым приемниками из-за присутствия горизонтальных неоднородностей. Получаем пробный вектор:

$$\mathbf{e}_j(k, \omega) = \begin{cases} \exp(-ikx_j), & j = 1 \dots N, \\ \exp[-i(k(x_{j-N} + x_0) + \theta(k, \omega))], & j = (N+1) \dots 2N. \end{cases}$$

Будем рассматривать случай, когда большая часть энергии уходит на формирование фундаментальной моды волны Релея. Можно считать, что поправки θ зависят только от временной частоты. Определим оптимальные поправки $\theta_{\text{опт}}(\omega)$, исходя из условия максимального фокусирования энергии:

$$\theta_{\text{опт}}(\omega) = \arg \max_{\theta} \left(\max_k |\mathbf{P}(k, \omega, \theta)| \right).$$

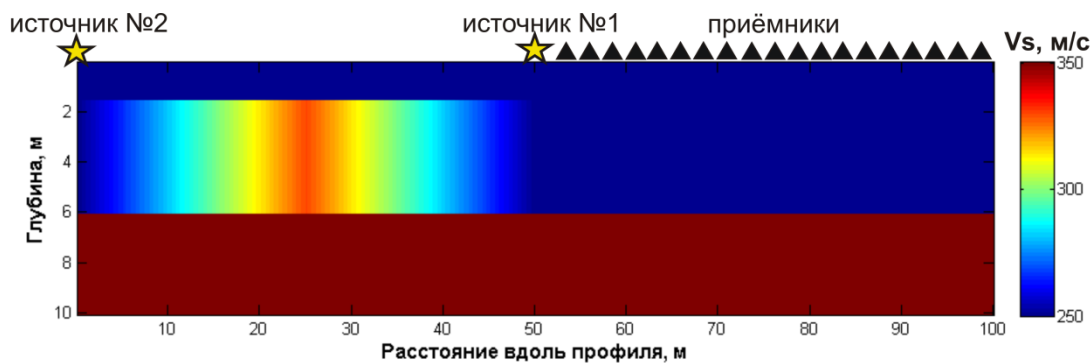


Рис. 1. Скоростная модель (показаны скорости поперечных волн), положения источников и приемников

Проиллюстрируем предлагаемый способ на примере синтетических данных, рассчитанных для скоростной модели, приведенной на рис. 1, при помощи стандартного метода конечных разностей на сдвинутых сетках. Для чистоты эксперимента под приемниками среда была выбрана горизонтально однородной.

На рис. 2. показаны спектры в горизонтально однородной среде: для короткой базы наблюдения 50 м (рис. 2, а) и для базы наблюдения 100 м.

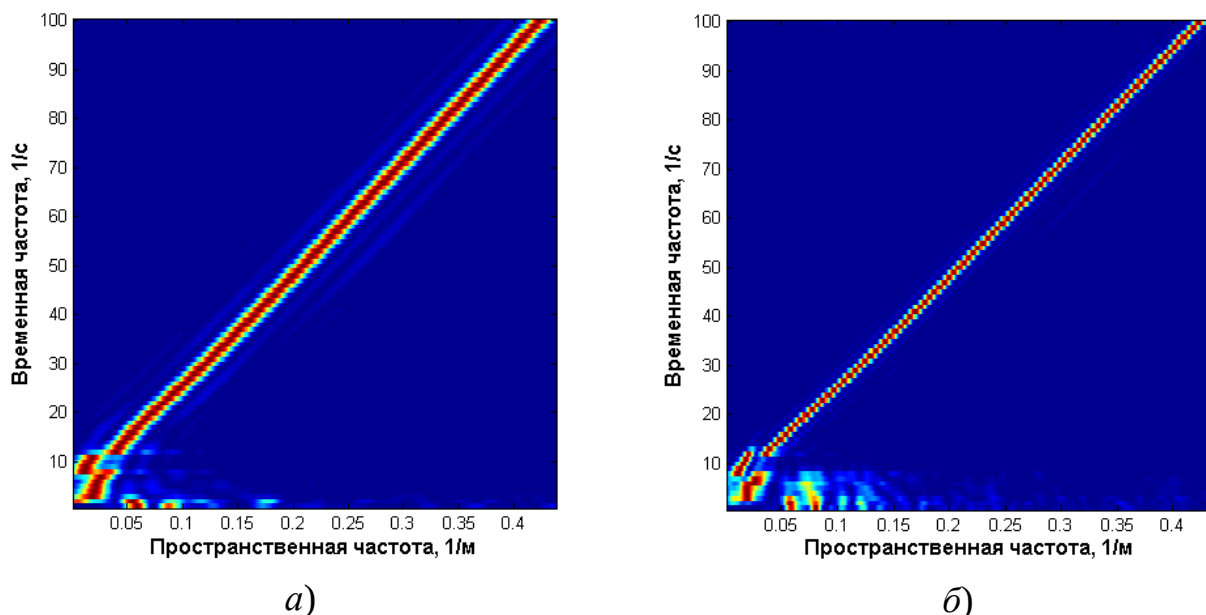


Рис. 2. Пространственно-временные спектры
в горизонтально-однородной среде:
а) база наблюдений 50 м, б) база наблюдений 100 м

На рис. 3, а показан спектр, рассчитанный путем добавления к записям источника № 1 (рис. 1) дополнительных записей от источника № 2 без коррекции спектров – с нулевыми поправками θ . Происходит раздвоение дисперсионной кривой. На рис. 3, б показан спектр с использованием оптимальных поправок $\theta_{\text{опт}}$. Спектральное изображение на рис. 3, б большей частью совпадает со спектром на рис. 2, б. Некоторые различия видны в области низких частот. Они обусловлены особенностью скоростной модели – в низкочастотной области доминирует вторая мода. Фокусирование спектра в один максимум не учитывает «перетекание» энергии в высшую моду. Очевидно, что при необходимости этот эффект можно также учесть. В целом же приведенный пример показывает работоспособность предлагаемого способа фокусирования спектров поверхностных волн.

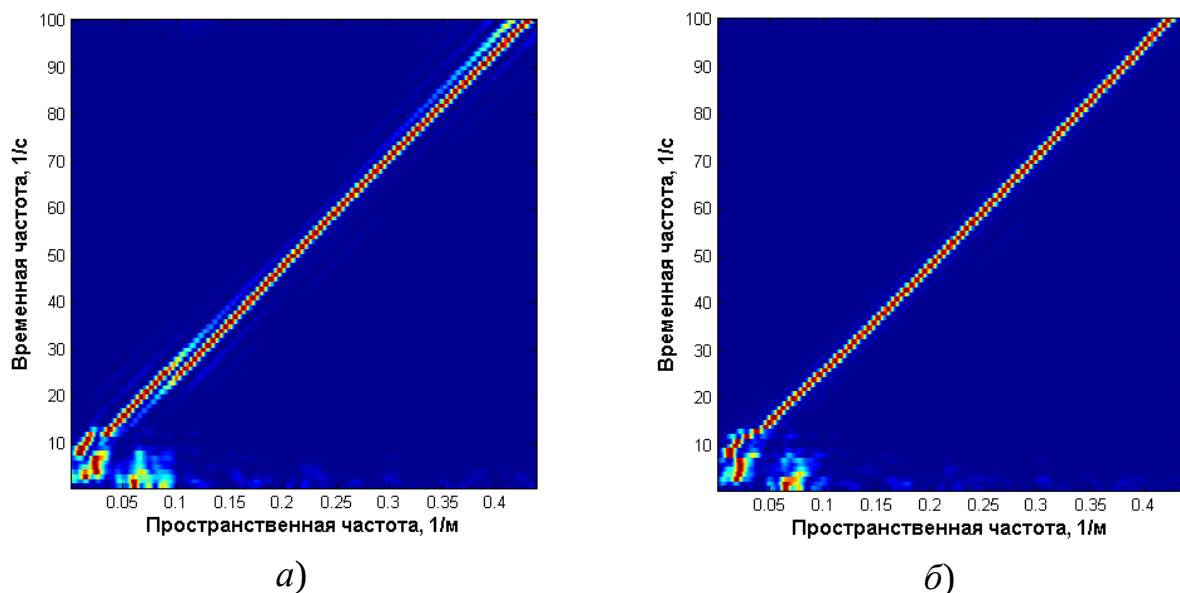


Рис. 3. Пространственно-временные спектры
в горизонтально-неоднородной среде:

а) без учета фазовых поправок, б) с учетом фазовых поправок

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант РФФИ № 16-35-60062. Авторы выражают благодарность Георгию Михайловичу Митрофанову за ценные замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods / C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia, J. Ivanov // *The Leading Edge*. – 2007. – Vol. 26, N 1. – P. 60–64.
2. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. – 1987. – Vol. 52, N 3. – P. 289–300.
3. Haskell N.A. The dispersion of surface waves on multilayered media // *Bulletin of the seismological Society of America*. – 1953. – Vol. 43, N 1. – P. 17–34.
4. Методика и результаты исследования физико-механических свойств связных грунтов сейсмическим методом / М.В. Курленя, А.С. Сердюков, Г.С. Чернышов и др. // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 3. – С. 3–10.
5. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. – Наука, 1987. – 279 с.
6. Johnson D.H., Dudgeon D.E. *Array signal processing: concepts and techniques*. – Simon & Schuster, 1992.

© А. С. Сердюков, А. В. Яблоков, 2017

ТОМОГРАФИЯ ВРЕМЕН ПЕРВЫХ ВСТУПЛЕНИЙ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Максим Игоревич Протасов

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, младший научный сотрудник, тел. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Проведено исследование задачи томографии времен первых вступлений с целью оценки ее применимости для определения скоростного строения угольного пласта. Приемники сейсмических волн располагаются в штреке вдоль отрабатываемого слоя. Регистрация волн в массиве ведется по мере отработки слоя. В исследовании использованы экспериментальные зависимости скоростей распространения упругих волн от гидростатического напряжения, устанавливаемые в лабораторных условиях при испытании образцов горных пород.

Ключевые слова: томография, времена первых вступлений, угольный массив.

TOMOGRAPHY OF THE FIRST ARRIVAL TRAVEL TIMES IN COAL-ROCK MASS

Maxim I. Protasov

ICEMR RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky, Junior Research Scientist, tel. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.nsc.ru

Leonid A. Nazarov

ICEMR RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky, D. Sc., Head of the laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Larisa A. Nazarova

ICEMR RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky, D. Sc., Main Research Scientist, tel. (383)217-24-46, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

The task of tomography of the first arrival travel times is investigated with the purpose of evaluating its applicability for determining the velocity structure of a coal mass. Receivers of seismic waves are located along the layer being processed. Wave registration in the coal mass carried out as the layer is worked out. In the study, the experimental dependences of the velocities of elastic waves with respect to the hydrostatic stress are used, which are established in laboratory conditions during the testing of rock samples.

Key words: tomography, first arrivals, coal-rock mass.

Введение

Существует обширная литература, посвященная анализу различных аспектов томографии, связанных как с ее теоретическим исследованием (существование и единственность решения, оценки его устойчивости), так и с численной реализацией. Наиболее детально изучен случай так называемых полных данных, когда источники и приемники заполняют некоторую кривую, целиком окружающую целевую область [3]. Существует ряд результатов и для решения обратной задачи при неполных данных для некоторых специальных геометрий расположения источников и приемников [1]. Для произвольной неполной системы наблюдения все известные нам результаты основываются на численной реализации решения системы линейных алгебраических уравнений, возникающих при конечномерной аппроксимации исходного интегрального оператора. Здесь надо подчеркнуть, что задача томографии является классическим примером условно-корректной задачи, так как она сводится к решению линейного интегрального уравнения первого рода с компактным оператором [2]. Следовательно, для построения ее численного решения необходимо привлечение регуляризирующей процедуры, наиболее удачной из которых, на наш взгляд, является сглаживание получаемого на промежуточных итерациях численного решения путем проектирования его на построенный специальным образом базис [4]. Именно такой подход, основанный на использовании многомасштабного базиса, реализован нами для исследования и решения задачи томографии угольного пласта.

Метод и теория

Задача томографии сводится к решению томографической системы линейных уравнений:

$$M\Delta n = \Delta T. \quad (1)$$

Здесь Δn – это искомая поправка модели (медленность), M – это томографическая матрица, т. е. матрица производных от времен пробега по медленности, ΔT – это невязка времен пробега, т. е. разница между наблюдаемыми временами и вычисленными в текущей модели.

Как было сказано ранее, задача является условно-корректной, поэтому необходимо использовать регуляризирующие процедуры. Прежде всего нами решается предобусловленная система [4]:

$$LMRS\Delta n' = L\Delta T. \quad (2)$$

Здесь $L \equiv \text{diag}(L_{jj}) = \exp(-\lambda\Delta T_j) \cdot \|M_{ij}\|_2^{-1}$ – это диагональная матрица ковариации данных. Она отвечает за взвешивание строк, нормирует влияние каждого луча и «наблюдения» и уменьшает влияние «плохих» данных. Матрица

$R \equiv \text{diag}(R_{jj}) = \left(\sum_j |M_{ij}| \right)^{-1}$ отвечает за взвешивание столбцов и нормирует вклад каждой ячейки при решении системы методом наименьших квадратов. Матрица S – это сглаживающий оператор, он является 3D-сверткой по пространству. В процессе решения эта матрица накладывает ограничения на пространственную гладкость поправки. На самом деле вначале находится самая гладкая составляющая модели, далее происходит ее уточнение путем уменьшения окна сглаживания. Полное решение линейной задачи представляется как сумма решений, полученных на каждом шаге сглаживания: $\Delta n' = \sum_{j=1}^N S_j \Delta n_j$. Поэтому в итоге решается система:

$$LMR \sum_{j=1}^N S_j \Delta n_j = L \Delta T. \quad (3)$$

Далее преобусловленная система решается в норме $L_{1.5}$, при этом целевая функция записывается в следующем виде:

$$F = \|LMRS \Delta n' - L \Delta T\|_{1.5}^{1.5} + \lambda^2 \|\Delta \alpha'\|_2^2. \quad (4)$$

Решение находится методом IRLS (Iterative Reweighted Least-Squares). IRLS решает набор взвешенных задач методом наименьших квадратов с рекурсивно обновляемой матрицей весов.

Численные примеры исследования задачи томографии угольного пласта

На рис. 1 представлена синтетическая модель угольного пласта перед началом выработки, которую мы использовали для тестирования и исследования решения задачи томографии. В качестве начальной модели была использована однородная среда со скоростью продольных волн, равной 1000 м/с. На рис. 2 представлена восстановленная модель пласта в случае, когда приемники размещены на противоположной границе относительно границы, где работает комбайн. Соответствующие невязки времен для начальной модели и для восстановленной модели представлены на рис. 3. Входные невязки составляют порядка 15–20 мс, невязки в восстановленной модели составляют 1–2 мс. Необходимо отметить, что такие невязки чувствительны для достаточно высокочастотного сигнала порядка сотен Герц. Однако модель в этом случае далека от истинной ввиду недостаточной освещенности. На рис. 4 представлены восстановленные модели пласта в случае, когда приемники размещены на боковых границах относительно границы, где работает комбайн. Соответствующие невязки времен представлены на рис. 5. Вновь невязки в восстановленных моделях составляют порядка 1–2 мс. Модель при таких расстановках приемников

восстанавливается достаточно хорошо в части, которая находится ближе к стороне работы комбайна. В части модели, которая находится ближе к противоположной стороне, восстановление модели недостаточно корректное. Такой эффект объясняется недостаточной освещенностью этой части модели. На рис. 6 представлена восстановленная модель пласта в случае, когда работают два комбайна, а приемники размещены на боковых границах. Соответствующие невязки времен представлены на рис. 7. Невязки времен имеют поведение, аналогичное предыдущим случаям, однако модель в данном примере восстанавливается достаточно корректно во всей области. Объяснением данному результату вновь является освещенность, в этом случае она достаточно хорошая для всей модели.

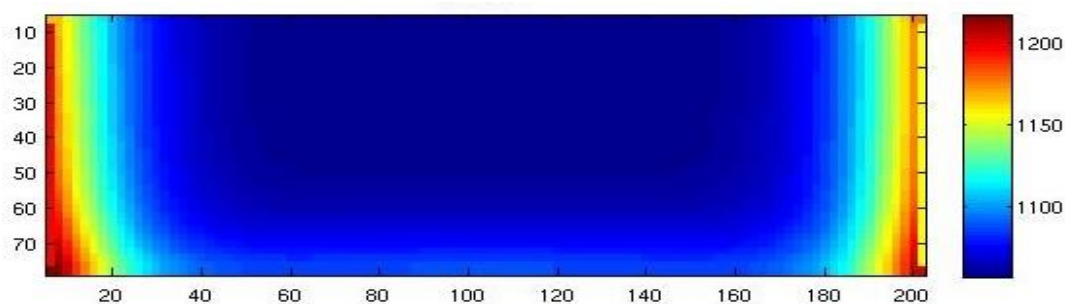


Рис 1. Синтетическая модель угольного пласта

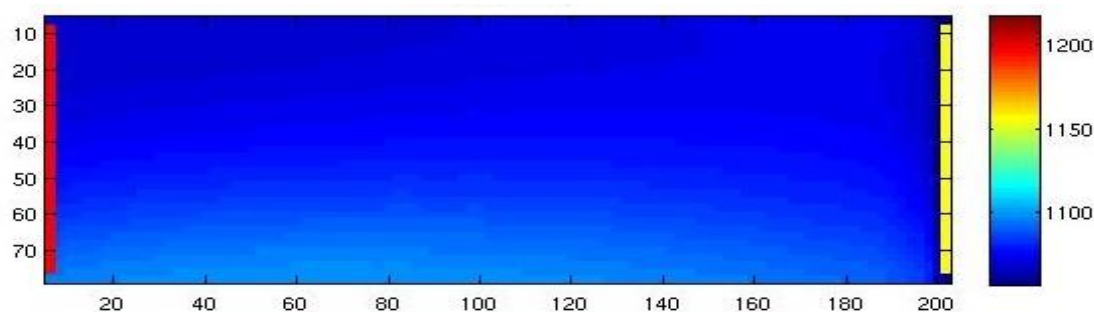


Рис. 2. Восстановленная модель пласта в случае, когда приемники (желтым) размещены на противоположной границе относительно границы, где работает комбайн (красным)

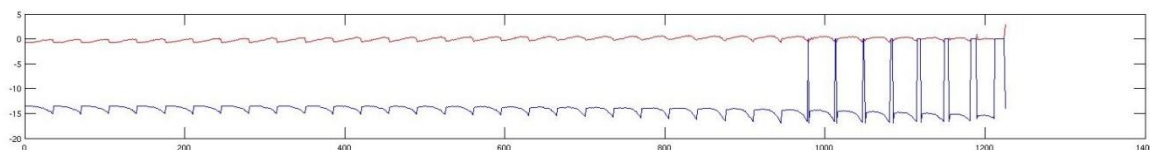


Рис. 3. Входные невязки времен (синим) и невязки времен в восстановленной модели (красным), когда приемники размещены на противоположной границе относительно границы, где работает комбайн

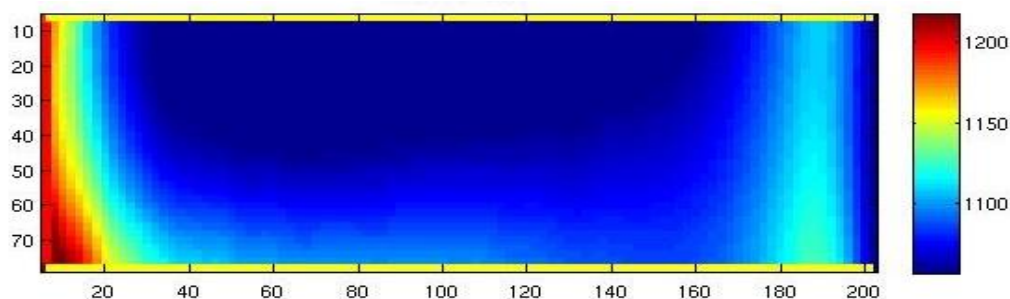


Рис. 4. Восстановленная модель пласта в случае, когда приемники (желтым) размещены на боковых границах относительно границы, где работает комбайн (красным)

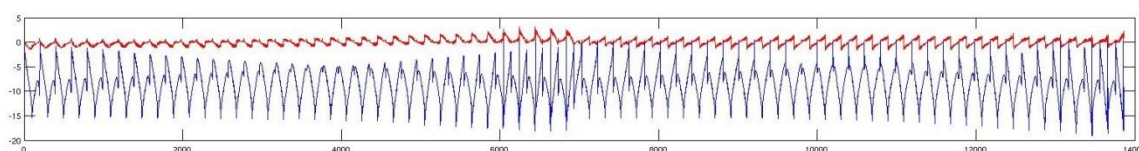


Рис. 5. Входные невязки времен (синим) и невязки времен в восстановленной модели (красным), когда приемники размещены на боковых границах относительно границы, где работает комбайн

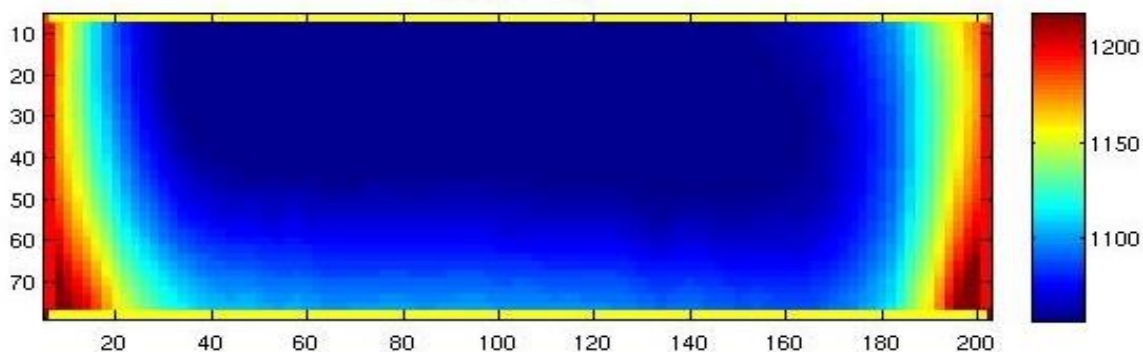


Рис. 6. Восстановленная модель пласта в случае, когда приемники (желтым) размещены на боковых границах относительно границы, где работают два комбайна (красным)

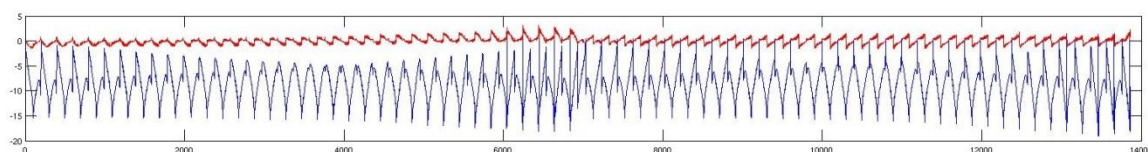


Рис. 7. Входные невязки времен (синим) и невязки времен в восстановленной модели (красным), когда приемники размещены на боковых границах относительно границы, где работают два комбайна

Заключение

При условии, если возможно выделить и извлечь времена пробега сигнала от комбайна на частоте порядка сотен герц, можно использовать томографию для определения скоростной структуры. Система наблюдения, когда приемники расположены на боковых границах пласта, дает возможность определить корректно структуру скоростной модели при условии, если работают два комбайна на противоположных сторонах либо получены времена отражения от границ пласта волны.

Исследования, описанные в данной работе, были поддержаны Российским Научным Фондом, грант №16-17-00029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдин С.В. К теории лучевой сейсмической томографии: 1. Преобразование Радона в полосу и его обращение // Геология и геофизика. – 1996. – № 5. – С. 3–18.
2. Кабаник А.В., Орлов Ю.А., Чеверда В.А. Численное решение задачи линейной сейсмической томографии на проходящих волнах: случай неполных данных // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2004. – Т. 7, № 2(18). – С. 54–67.
3. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. – М.: Мир, 1990. – 280 с.
4. A decade of tomography / Marta Jo Woodward, Dave Nichols, Olga Zdraveva et al. // Geophysics. – 2008. – Vol. 73(5). – P. VE5–VE11.

© М. И. Протасов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, 2017

**КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА ЮВ₁ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ
И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ В УСЛОВИЯХ УНАСЛЕДОВАННОГО РОСТА
СТРУКТУР СЕВЕРО-ПОКАЧЕВСКОЙ МОНОКЛИНАЛИ В ВЕРХНЕЮРСКОМ
МЕЛКОВОДНО-МОРСКОМ БАСЕЙНЕ СЕДИМЕНТАЦИИ**

Зоя Яковлевна Сердюк

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, кандидат геолого-минералогических наук, зав. литолого-петрографической лабораторией, тел. (383)222-24-05, e-mail: serdiukzy@sniiggims.ru

Сергей Валерьевич Арефьев

ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», 628486, Россия, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Когалым, ул. Прибалтийская, 20, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора по разработке месторождений – главный геолог, тел. (34667)6-10-84, e-mail: Sergej.Arefiev@lukoil.com

Марат Рафаэлович Мазитов

ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», 628486, Россия, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Когалым, ул. Прибалтийская, 20, заместитель генерального директора по геологоразведке, тел. (34667)6-10-10, e-mail: Marat.Mazitov@lukoil.com

Ильфат Ильсурович Гарифуллин

ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», 628486, Россия, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Когалым, ул. Прибалтийская, 20, начальник отдела запасов углеводородов, тел. (34667)6-41-53, e-mail: Ilfat.Garifullin@lukoil.com

Николай Валерьевич Белов

ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», 628486, Россия, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Когалым, ул. Прибалтийская, 20, начальник отдела геологоразведочных работ по Лангепасско-Покачевскому региону, тел. (34667)6-41-80, e-mail: Nikolay.Belov@lukoil.com

Любовь Ивановна Зубарева

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер литолого-петрографической лаборатории, тел. (383)222-24-05, e-mail: zubareva@sniiggims.ru

Ольга Николаевна Стефаненко

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер литолого-петрографической лаборатории, тел. (383)222-24-05, e-mail: stefanenko@sniiggims.ru

Ирина Евгеньевна Стариченко

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, инженер II категории литолого-петрографической лаборатории, тел. (383)222-24-05, e-mail: starichenko@sniiggims.ru

Выполнена комплексная интерпретация геолого-геофизических параметров верхнеюрского пласта ЮВ₁ с целью изучения осадконакопления и нефтегазоносности в условиях унаследованного роста структур Северо-Покачевской моноклинали мелководно-морского бассейна. Элементы рельефа в период осадконакопления пласта ЮВ₁ представлены сводами, водоразделами, холмами, локальными поднятиями, палеоложбинами, равнинами и впадинами. Алеврито-песчаные отложения накапливались в нижней части склонов водоразделов. К ним приурочены нефтегазовые залежи.

Ключевые слова: Северо-Покачевская моноклинали, пласт ЮВ₁, тектоника, литология, петрофизика, сейсмика, палеогеоморфология, литофации.

**COMPLEX INTERPRETATION OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL
PARAMETERS OF YuV₁ LAYER TO STUDY SEDIMENTATION AND OIL
AND GAS POTENTIAL UNDER THE CONDITIONS OF INHERITED GROWTH
OF STRUCTURES IN THE SEVERO-POKACHEVSKY MONOCLINE
IN UPPER JURASSIC SHALLOW-MARINE SEDIMENTATION BASIN**

Zoya Ya. Serdyuk

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Ph. D., Head of Lithology and Petrography Laboratory, tel. (383)222-24-05, e-mail: serdiukzy@sniiggims.ru

Sergey V. Arefiev

Limited Liability Company «LUKOIL-Western Siberia», 628486, Russia, Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Kogalym, 20 Pribaltiyskaya St., Ph. D., Deputy General Director for Field Development – Chief Geologist, tel. (34667)6-10-84, e-mail: Sergej.Arefiev@lukoil.com

Marat R. Mazitov

Limited Liability Company «LUKOIL-Western Siberia», 628486, Russia, Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Kogalym, 20 Pribaltiyskaya St., Deputy General Director for Geological Exploration, tel. (34667)6-10-10, e-mail: Marat.Mazitov@lukoil.com

Ilfat I. Garifullin

Limited Liability Company «LUKOIL-Western Siberia», 628486, Russia, Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Kogalym, 20 Pribaltiyskaya St., Head of Hydrocarbon Reserves Department, tel. (34667)6-41-53, e-mail: Ilfat.Garifullin@lukoil.com

Nikolai V. Belov

Limited Liability Company «LUKOIL-Western Siberia», 628486, Russia, Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Kogalym, 20 Pribaltiyskaya St., Head of the Department of Geological Exploration for the Langepasko-Pokachevsky Region, tel. (34667)6-41-80, e-mail: Nikolay.Belov@lukoil.com

Lyubov I. Zubareva

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Leading Engineer of the Lithological and Petrographic Laboratory, tel. (383)222-24-05, e-mail: zubareva@sniiggims.ru

Olga N. Stefanenko

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Leading Engineer of the Lithological and Petrographic Laboratory, tel. (383)222-24-05, e-mail: stefanenko@sniiggims.ru

Irina E. Starichenko

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Engineer of II Category of Lithology and Petrography Laboratory, tel. (383)222-24-05, e-mail: starichenko@sniiggims.ru

A complex interpretation of the geological and geophysical parameters of the upper Jurassic YuV₁ layer was carried out with the aim of studying sedimentation and oil and gas potential under the conditions of the inherited growth of structures of the Severo-Pocachevsky monocline in shallow-water sea basin. Elements of the relief in the period of sedimentation of YuV₁ layer are represented by arches, watersheds, hills, local uplifts, hollows, plains and depressions. Aleurite-sand deposits accumulated in the lower part of slopes of the watersheds. Oil and gas deposits are confined to them.

Key words: Severo-Pokachevsky monocline, YuV₁ layer, tectonics, lithology, petrophysics, seismic survey, paleogeomorphology, lithofacies.

В настоящее время центральная часть Западно-Сибирской НГП хорошо покрыта сейсмопрофилями 2D и значительными объемами сейсмике 3D. К сожалению, геологи-нефтяники редко используют их в своих исследованиях. Известный геофизик ЗАО «Пангея» В.В. Колосов считает, что геологическую модель строения продуктивных пластов нельзя построить только по сейсмическим профилям, без привлечения главных геологических атрибутов [2]. К ним отнесены: общая и нефтенасыщенная эффективная мощности, литологический состав, расчлененность, петрофизика, класс коллекторов, продуктивность, элементы рельефа, типы разрезов, литофации, типы ловушек нефтегазовых залежей [1, 2–4, 7, 8]. Предложенная В.В. Колосовым технология Многомерной интерпретации геолого-геофизической информации является весьма актуальной, и ею мы успешно пользуемся с 2000 года.

О значении элементов рельефа дна бассейна осадконакопления пласта ЮВ₁ (верхняя юра, оксфордский ярус) с целью поиска в нем благоприятных пород-коллекторов обстоятельно приведено в работе М.В. Проничевой [6]. Она считает, что «для доразведки месторождений Янчинско-Сардаковской зоны следует учесть неоднородный характер резервуара Ю₁, что требует провести геолого-геофизическую интерпретацию главных его параметров при широком использовании сейсмике 2Д и 3Д, выделив по ним структурно-палеогеоморфологические элементы рельефа дна, благоприятные для формирования в них песчано-алевритовых осадков» (рис. 1, 2). Состав осадка в разных элементах рельефа (пески, алевриты, глины) на унаследовано растущих структурах тот же, что и в современных разрезах, но уже в виде литифицированных пород (песчаники, алевролиты, аргиллиты).

Для подтверждения унаследованного роста структур в юрский период нами использованы графики роста амплитуд структур различного типа, построенные авторским коллективом, возглавляемым В.А. Волковым (НАЦРН им. В.И. Шпильмана), на которых отображаются рисунок волновой картины временных разрезов, амплитуды структур, тектонические нарушения [1, 7]. Графики хорошо согласуются с временными разрезами амплитуд сейсмопро-

67

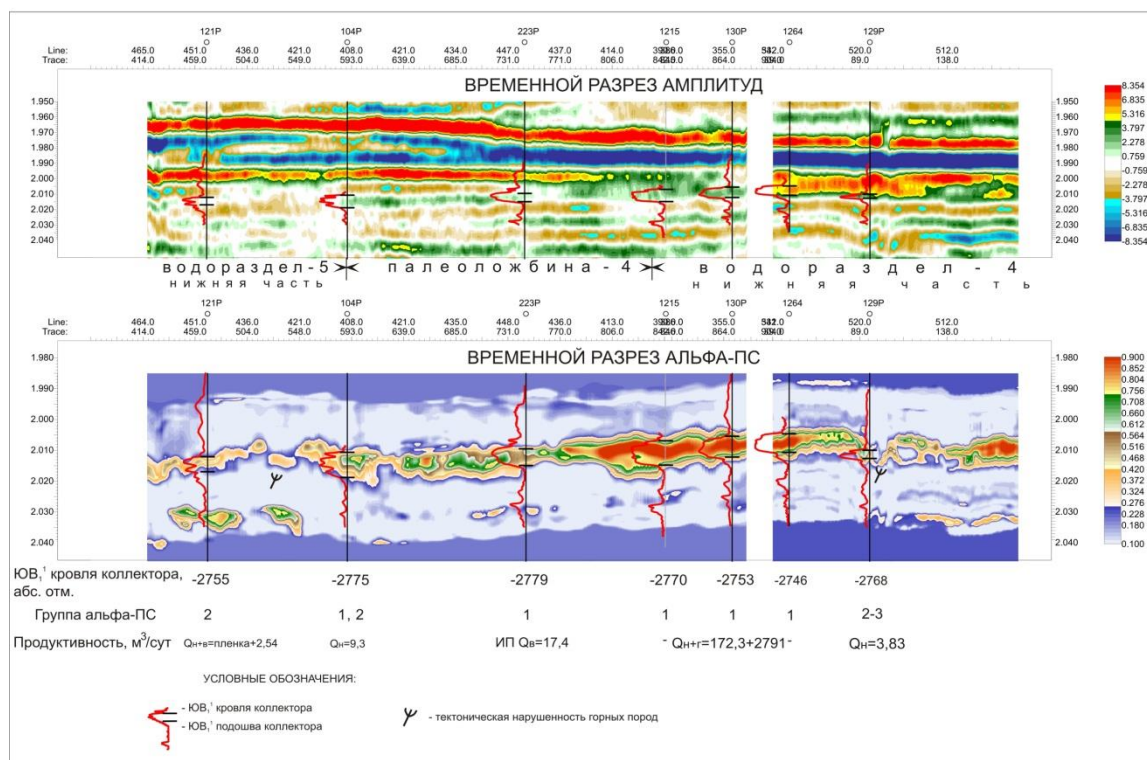


Рис. 3. Сопоставление временных разрезов амплитуд и αПС сейсмопрофилей 3D со структурно-палеогеоморфологическими элементами рельефа, тектоническим фактором и продуктивностью пласта ЮВ₁ по линии Г – Г

В результате комплексного изучения геолого-геофизических параметров пласта ЮВ₁ использованы материалы 73 скважин, 63 временных разрезов сейсмопрофилей 2D и 3D по Северо-Покачевской моноклинали. Элементы рельефа поверхности осадконакопления пласта ЮВ₁ на Северо-Покачевской моноклинали воспроизведены на рис. 2–4. На рис. 4 показаны рекомендуемые к бурению скважины: Р-5 – на малоамплитудном холме нижней части склона палеоводораздела и Р-3 – на своде малоамплитудного холма локального поднятия в пределах обширной подводной равнины.

Структурно-палеогеоморфологические элементы рельефа по результатам исследований представлены: сводами (вершинами), водоразделами, осложненными малоамплитудными (<5 м) холмами-куполами площадью от 1,6 до 2–4 км² (реже больше), локальными поднятиями с амплитудами > 30–40 м, седловинами, палеоложбинами с бортами и устьями, подводными равнинами, впадинами. Малоамплитудные холмы, осложняющие палеоводоразделы, прослеживаются на временных разрезах амплитуд и структурных картах и в разрезах скважин с характерным рисунком αПС. Пласт ЮВ₁ представлен алевроито-песчаниками с хорошими коллекторскими свойствами, часто нефтегазонасыщенный. Алевроито-песчаные осадки накапливались в нижней части водоразделов за счет сноса обломочного материала с размываемых сводов. Выявленные

нефтегазовые залежи в пласте ЮВ₁ в основном приурочены к нижней части водоразделов. По размерам залежи небольшие по площади (1,6–4,5 км²) (рис. 2, 3).

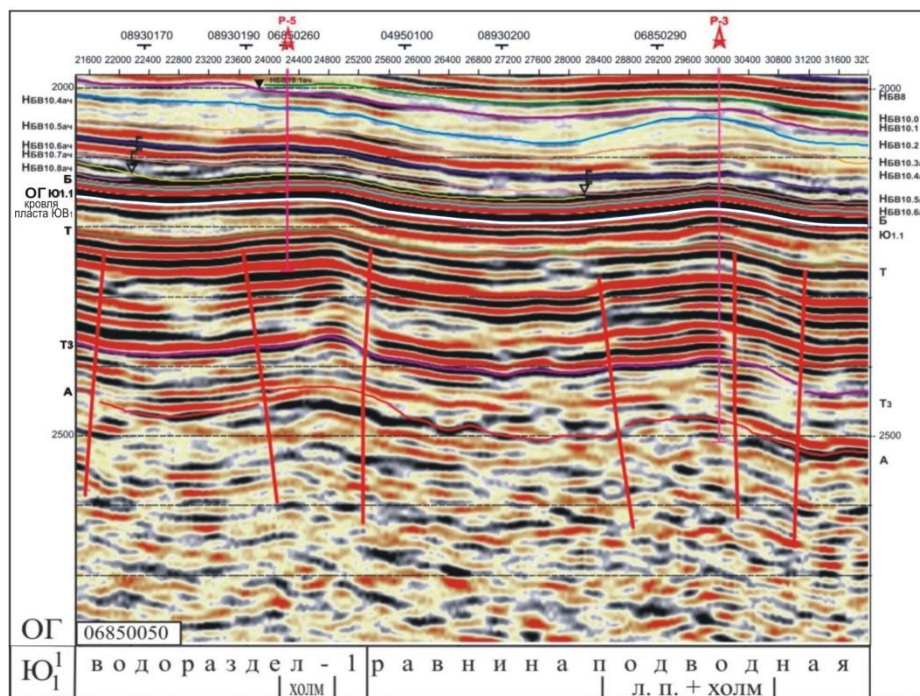


Рис. 4. Фрагмент временного разреза с/п 2D со структурно-палеогеоморфологическими элементами рельефа пласта ЮВ₁ и рекомендуемыми скважинами 5 и 3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков В.А., Гончарова В.Н. Об истории тектонического развития центральной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского АО – Югры (XV науч.-практ. конф.). – Ханты-Мансийск: «ИздатНаукаСервис», 2012. – Т. I. – С. 213–224.
2. Колосов В.В. Роль геофизических данных в геологических моделях нефтегазовых месторождений и технология многомерной интерпретации // Конференция «Пангея». – М.: Изд. ЗАО «Пангея», 2002. – С. 50–56.
3. Методика палеогеоморфологических исследований нефтегазоносных областей СССР/ Под ред. А.Н. Золотова, М.В. Проницовой А.П., Рождественского // Труды ВНИГНИ. – М: Недра, 1985. – Вып. 250. – 190 с.
4. Обобщение опыта эксплуатации объекта ЮВ₁ и ЮС₁ месторождений ООО «Лукойл – Западная Сибирь» / Л.Д. Рачева, С.В. Левагин, И.С. Соколов, В.Н. Мельников // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского АО – Югры (XVI науч.-практ. конф.). – Ханты-Мансийск: «ИздатНаукаСервис», 2013. – Т. 1. – С. 343–351.
5. Пояснительная записка к «Тектонической карте центральной части Западно-Сибирской плиты, 1998 г.» / В.И. Шпильман, Н.И. Змановский, Л.Л. Подсосова и др. – Ханты-Мансийск; Тюмень, 1999. – 40 с.
6. Применение методов структурной палеогеоморфологии для изучения Янчинско-Сардаковской зоны нефтегазонакопления: отчет к договору № 87-4-91 от 12 декабря 1990 г.

с ПО «Мегионнефтегазгеология» / Отв. исп. М.В. Проничева, Г.Н. Саввинова, А.Г. Мухер и др. – Тюмень, 1991. – 163 с.

7. Распознавание особенностей строения верхнеюрских и нижнемеловых аномальных разрезов на примере Северо-Покачевского месторождения и ачимовских клиноформ на примере Дружного месторождения на основе детальной корреляции разрезов скважин / И.С. Гутман, Е.А. Качкина, А.В. Шалупина и др. // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского АО – Югры (XVI науч.-практ. конф.). – Ханты-Мансийск: «ИздатНаукаСервис», 2013. – Т. 1. – С. 87–112.

8. Тектоно-седиментационная модель формирования структурно-литологических и структурно-стратиграфических ловушек и залежей УВ в юрском формационном комплексе / З.Я. Сердюк, Л.Д. Слепокурова, Н.В. Кирилова, Л.И. Исакова // Тюменский научный журнал «Горные ведомости». – Тюмень: «СибНАЦ», 2005. – № 5. – С. 24–39.

© З. Я. Сердюк, С. В. Арефьев, М. Р. Мазитов, И. И. Гарифуллин, Н. В. Белов,
Л. И. Зубарева, О. Н. Стефаненко, И. Е. Стариченко, 2017

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Семен Ийнович Шерман

Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (395)242-82-61, e-mail: ssherman@crust.irk.ru

Ольга Анатольевна Кучай

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-05, e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Наталья Анатольевна Бушенкова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, тел. (383)330-92-01, e-mail: BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru

В континентальной литосфере Центральной Азии выделяется единственный в мире регион, в котором эпицентры сильнейших землетрясений ($M \geq 7.5$), произошедшие за последнее столетие, образуют большой и четкий кластер. Его формированию и накоплению высоких напряжений способствуют окружающие территории: на юге – Индостанская плита как индентор напряжений, на востоке – трансрегиональная субмеридиональная пограничная структура по известному 105° в.д., на севере – громадная Сибирская платформа, своеобразный упор и противодействие силам индентора, на западе границу образует территория сближения Памира, Тянь-Шаня и Казахской плиты. Сильнейшие землетрясения последних столетий и их неудачные прогнозы предопределяют необходимость разработки принципиально новых подходов к пониманию генезиса сильнейших землетрясений в континентальной литосфере Земли и их сейсмической опасности.

Ключевые слова: сильнейшие землетрясения, Центральная Азия, сейсмичность, сейсмическая зональность, геодинамика, кластер, сейсмическая опасность.

GEODYNAMIC AND SEISMIC ZONATION OF THE FORMATION OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN CENTRAL ASIA

Semen I. Sherman

Institute of the earth's crust SB RAS, Russia, 664033, Irkutsk, Lermontova Str. 128, Professor, Principal Research Scientist, tel. (395)242-82-61, e-mail: ssherman@crust.irk.ru

Olga A. Kuchay

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)333-87-05, e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru

Natalia A. Bushenkova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Researcher; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., tel. (383)330-92-01, e-mail: BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru

The world's only region with large and clear cluster of the epicenters of strongest earthquakes ($M \geq 7.5$), which were occurred over the last century in a continental lithosphere, stands out in the Central Asia. Its formation and accumulation of high voltages contribute to the surrounding area. The Indian plate as an indenter of stresses is to the South. To the East is submeridional border of well-known transregional structure which going along the 105°E . The huge Siberian platform is to the North, as a kind of detent to counter the forces of the indenter. From the West the cluster border formed by the area of convergence the Pamirs, Tien Shan and the Kazakh plate. The strongest earthquakes of the last centuries, and their failed predictions necessitate development of fundamentally new approaches to the understanding of the strongest earthquakes genesis in the continental lithosphere and seismic hazard.

Key words: strong earthquake, Central Asia, seismicity, seismic zonation, geodynamics, cluster, seismic hazard.

В континентальной литосфере Центральной Азии выделяется единственный в мире регион, в котором эпицентры сильнейших землетрясений ($M \geq 7.5$), произошедшие за последнее столетие, образуют большой и четкий кластер (рис. 1).

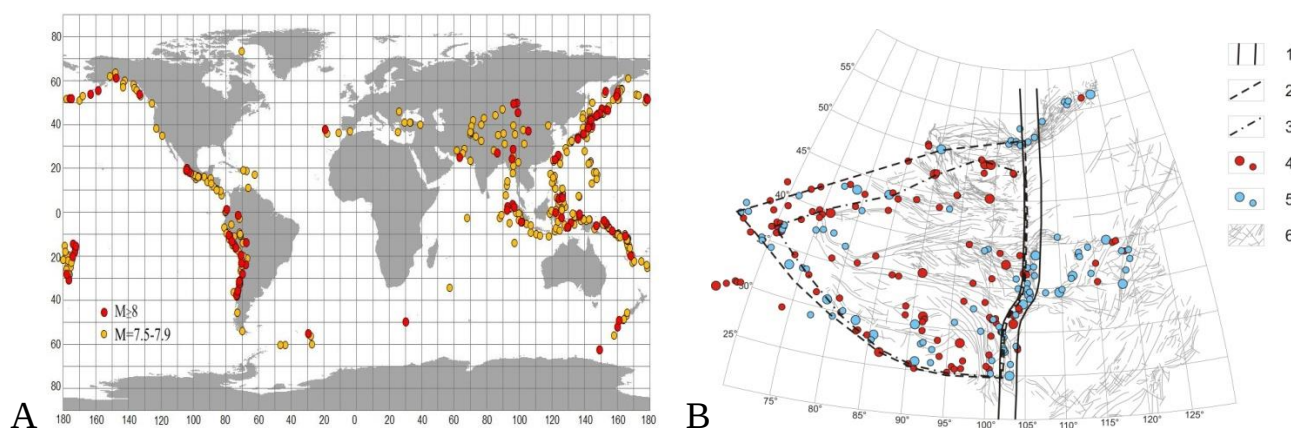


Рис. 1. Схема локализации сильнейших землетрясений вдоль литосферных плит и в пределах континентальной литосферы:

(А) – схема распределения сильнейших землетрясений мира. Красным цветом показаны землетрясения с $M \geq 8.0$, желтым – $7.5 \leq M < 8.0$; (В) – схема локализации сильнейших землетрясений в континентальной литосфере Центральной Азии. Красным цветом выделены эпицентры землетрясений последнего столетия (1900–2012 гг.), голубым – эпицентры землетрясений, произошедших до 1900 года. Трапеция – площадь распространения

Его формирование определяется современной геодинамической зональностью громадной территории [8, 14]. Она сформирована пятью геодинамическими зонами (рис. 2), различающимися современной сейсмической активностью. Распределение очагов землетрясений по глубине для территории Китая достаточно подробно освещено в опубликованных статьях [10, 13]. Для построения карты глубин нами использовались данные за период с 1970 по 2010 годы по

материалам Международного сейсмологического центра [<http://www.isc.ac.uk>] для землетрясений с достаточно большой энергией ($M \geq 4.6$). На рассматриваемой территории глубины очагов землетрясений располагаются преимущественно в земной коре в интервале от 0 до 40 км. Более глубокие события ($H=40-70$ км) зарегистрированы в Памиро-Гиндукушской и Бирманской глубокофокусных зонах, а также фрагментарно в Гималаях, Тибете и Тянь-Шане. К северу от 35° с.ш. количество очагов с $H=40-50$ км незначительное. По данным местной сети сейсмических станций Киргизии, на западном и центральном Тянь-Шане очаги землетрясений глубже 40 км не фиксировались [2]. В Алтае-Саянской горной области и Байкальской рифтовой системе, по данным Байкальского и Алтае-Саянского филиалов Геофизической службы РАН и ряда авторов [1, 4–6], сейсмически активный слой ограничен глубиной 30 км. Получается, что по разным литературным источникам и разным данным мощность сейсмоактивного слоя в ряде регионах различается.

По вариациям мощности земной коры [9, 12] граница между западной и восточной частями территории Центральной Азии представлена меняющейся по ширине меридиональной зоной с постоянной, около 42–44 км, толщиной коры. Характеризуемая меридиональная граница находит отражение на схемах глубинного строения литосферы Центральной Азии по интерпретации скоростей P - и S -волн [11].

Таким образом, анализ распределения глубин очагов и мощности земной коры показывает следующее. Изменение глубин в западной части Центральной Азии при движении с юга (Гималаи) на север (Тянь-Шань) происходит с уменьшением глубин землетрясений с 70 до 30–40 км. В восточной части, включающей Северо-Китайскую равнину, Монгольский Гоби-Алтай, пустыню Гоби и Прибайкалье, мощность сейсмоактивного слоя земной коры не превышает 40 км, увеличиваясь только в северной окраине Восточно-Китайской равнины. И, соответственно, общая картина распределения землетрясений позволяет констатировать тенденцию к увеличению глубины сейсмоактивного слоя в областях с повышенной мощностью земной коры (Тибет, Памир, Гималаи) в западной части рассматриваемой области. Изложенное характерно для выделения первой основной и центральной геодинамических зон.

Первая геодинамическая зона характеризуется локализацией сильнейших землетрясений ($M \geq 8$) (рис. 2) [3, 7, 8]. Ее геолого-геофизическая специфика заключается в повышенной толщине земной коры, высоких скоростях ее современных движений, фиксировании в разрезе литосферы слоев с реологической текучестью материала, а также специфическим окружением: геодинамическими зонами со сравнительно пониженной геодинамической активностью. На юге главным индентором напряжений выступает практически асейсмичная Индостанская плита (рис. 2). Накоплению высоких напряжений благоприятствуют три, окружающие с востока, севера и запада, геодинамические зоны, играющие роль специфических геодинамических границ. На востоке – трансрегиональная субмеридиональная пограничная структура в континентальной литосфере Центральной Азии по хорошо известному 105° в.д., разделяющая в континентальной

Центральной Азии регионы с интенсивной сейсмической активностью от относительно пассивных. На севере – громадная Сибирская платформа, своеобразный упор и противодействие силам индентора. Западную границу образует территория сближения Памира, Тянь-Шаня и Казахской плиты. Фактически граница не выражена полноценной геологической структурой. Она сформирована сближающимися блоками в области квазипластического течения материала.



Рис. 2. Геодинамическая зональность Центральной Азии:

1 – меридиональная пограничная зона Центральной Азии – восточная граница зоны высокой геодинамической активности; 2 – границы между геодинамическими зонами; 3 – зоны высокой геодинамической активности: I – центральная зона интенсивного сжатия литосферы и локализации сильных землетрясений; II – зона Индостанской плиты – индентора напряжений сжатия; III – зона схождения блоковых структур Памира, Тянь-Шаня и Казахской глыбы, затрудняющая разрядку напряжений сжатия и течения вещества на запад; 4 – зоны относительно слабой тектонической активности и стабильные: IV – зона Амурской плиты и крупных блоковых структур юго-восточного Китая; V – стабильная зона Сибирской платформы. Знаки: 1 – пунктир; 2 – штрих-пунктир, очерчивающий границы каждой зоны; I, II, III, IV и V – это цветовая гамма (I – оранжевая; II – интенсивно-красная; III – светло-оранжевая; IV – светло-зеленая; V – светло-синяя)

Плиты создают упор выжимаемым с запада движениям масс земной коры, а суженный межблоковый участок препятствует движениям скапливающихся объемов горных масс. Созданный естественными тектоническими процессами рубеж играет роль своеобразного упора и сопротивления процессу «выдавливания» и квазивязкого течения горных масс.

Сформированные природными геодинамическими процессами активная южная граница центральной геодинамической зоны с ее высокой сейсмично-

стью и пассивные три других создали благоприятные условия для накопления высоких напряжений и их периодической разрядки сильнейшими землетрясениями. Подобное место на земном шаре уникально. Его сейсмическая опасность последних столетий и неудачные прогнозы произошедших катастрофических землетрясений определяют необходимость разработки принципиально новых подходов к пониманию генезиса сильнейших землетрясений в континентальной литосфере Земли и их сейсмической опасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голенецкий С.И. Анализ эпицентрального поля. Сейсмическая активность. Глубин очагов землетрясений Прибайкалья // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 163–184.
2. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Под ред. А.Б. Бакиров. – Бишкек: Илим, 2006. – 116 с.
3. Кучай О.А., Бушенкова Н.А. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 12 (I). – С. 17–24.
4. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья / Н.А. Гилева, В.И. Мельникова, Н.А. Радзиминович и др. // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 5. – С. 629–636.
5. Суворов В.Д., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под центральным Байкалом // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 8. – С. 805–818.
6. Цибульчик И.Д. О глубинах очагов землетрясений Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. – 1966. – №5. – С. 170–173.
7. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. – 359 с.
8. Шерман С.И. Локализация современных сильных землетрясений в Центральной Азии: редкое сочетание геодинамических и триггерных факторов // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы 3-го Всероссийского семинара-совещания / ИДГ РАН. – Москва: ГЕОС, 2015. – С. 138–149.
9. Depth distribution of Moho and tectonic framework in eastern Asian continent and its adjacent ocean areas / Jiwen Teng, Rongsheng Zeng, Yafen Yan, Hui Zhang // Science in China (Series D). – 2003. – Vol. 46, N 5.
10. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles / Jiwen Teng, Zhang Zhongjie, Zhang Xiankang et al. // Tectonophysics. – 2013. – Vol. 609. – P. 202–216.
11. Koulakov I.Y. High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide travel time data // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2011. – Vol. 116. – P. B0401.
12. Li S., Mooney W.D., Fan J. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data // Tectonophysics. – 2006. – Vol. 420, N 1–2. – P. 239–252.
13. Moho depth, seismicity and seismogenic structure in China mainland / Jiwen Teng, Deng Yangfan, Badal José, Zhang Yongqian // Tectonophysics. – 2014. – Vol. 627. – P. 108–121.
14. Sherman S.I., Ma Jin, Gorbunova E.A. Recent strong earthquakes in Central Asia: regular tectonophysical features of locations in the structure and geodynamics of the lithosphere. Part 1. Main geodynamic factors predetermining locations of strong earthquakes in the structure of the lithosphere in Central Asia // Geodynamics & Tectonophysics. – 2015. – Vol. 6(4). – P. 409–436.

© С. И. Шерман, О. А. Кучай, Н. А. Бушенкова, 2017

АТЛАС ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЫ

Андрей Юрьевич Соболев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доцент кафедры геофизических систем ФТФ, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

Галина Владимировна Нестерова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией электромагнитных полей; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, зав. кафедрой геофизических систем, тел. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Атлас представляет собой систематизированный набор многофизичных моделей, характеризующих типичные водонефтенасыщенные пласты и наиболее часто применяемые технологии бурения с учётом напряженного состояния в окрестности скважины. Таким образом, впервые собраны модельные ситуации, включающие анализ геомеханических, гидродинамических и геоэлектрических процессов в окрестности скважины. Атлас позволяет изучить и наглядно представить влияние каждого из гидрофизических и геомеханических параметров на процесс проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, геоэлектрическую модель пласта, показания приборов электрического и электромагнитного каротажа. Для выбора и отображения диапазона параметров используется реализация метода параллельных координат с помощью библиотеки D3.js.

Ключевые слова: многофизичные модели, фильтрация, электропроводность, упругие и прочностные параметры.

ATLAS OF THE ELECTROHYDRODYNAMIC MODELS OF BOREHOLE ENVIRONMENT

Andrey Yu. Sobolev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of electromagnetic fields; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks Prospect, Associate Professor, e-mail: SobolevAY@ipgg.sbras.ru

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientist of Laboratory of electromagnetic fields, tel. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Igor N. Yeltsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Professor, Deputy director on scientific work; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks Prospect, Faculty of Physical Engineering, head of Geophysical Systems Department, principal researcher, tel. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

Atlas is the collection of multiphysics reservoir models. Each model describes typical water-oil-saturated formations and most frequently used technologies taking into account in situ stress state. The model situations of geomechanical, hydrodynamic and geoelectric processes in the borehole environment were collected for the first time. The influence of each model parameters over mud filtration, geoelectrical model, electrical and electromagnetic logs can be analyzed and visualized by Atlas. Parallel coordinates method, implemented by d3.parcoords.js toolkit and D3.js library, is used to select and display parameter ranges.

Key words: multiphysics, filtration, conductivity, elastic and strength parameters.

Ранее была разработана методика создания многофизичной (multiphysics) модели прискважинной зоны [1–7]. Рассматриваются взаимосвязанные и взаимообусловленные геомеханические процессы при бурении скважины, изменение вследствие этого фильтрационно-емкостных свойств пород, процессы двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей (воды и нефти), солеперенос, рост и разрушение глинистой корки, изменение электрофизических характеристик пород, отражающихся в показаниях приборов электрического и электромагнитного каротажа (рис. 1). Такая единая модель включает параметрическое описание среды, бурового раствора и режима бурения, которые численно моделируются для расчетов эволюции полей напряжений, водонасыщенности, солёности, удельного электрического сопротивления. На заключительной стадии вычисляются синтетические диаграммы каротажных комплектов ВИКИЗ и БКЗ, которые рассматриваются нами как следствие процессов, сопровождающих бурение скважины.

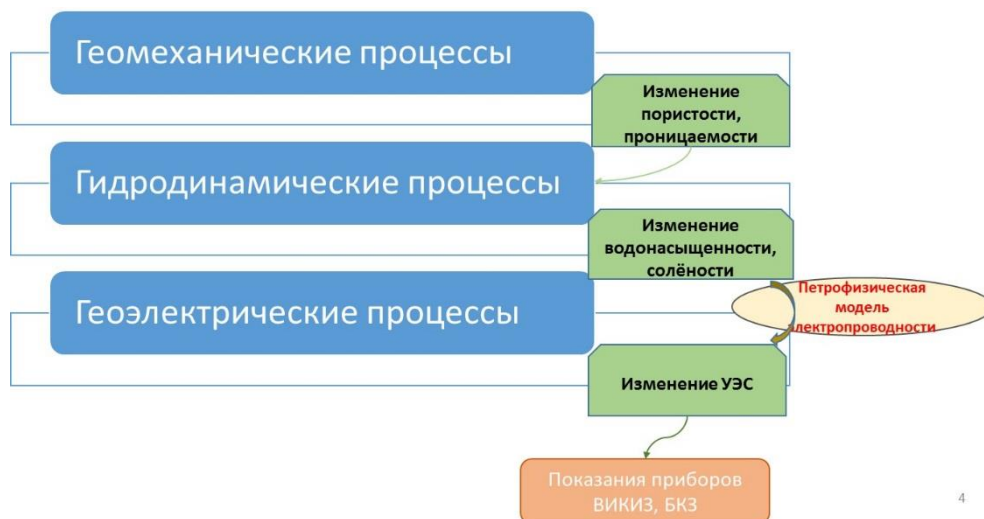


Рис. 1. Схема многофизичной модели пласта

Промышленное использование созданного программного обеспечения для решения задачи оценки пласта на основе комплексной интерпретации данных геофизических (ГИС) и геолого-технологических (ГТИ) исследований скважины затруднено из-за огромного числа (около 30) параметров комплексной модели и большого объема расчетов. Поэтому первым этапом пути к комплексной интерпретации ГИС+ГТИ на основе 2D электрогидродинамических и геомеханических моделей (ЭГДиГМ) стало создание Атласа (базы) таких многофизических моделей по аналогии с атласами из других областей знания [8, 9]. Атлас включает распределения водонасыщенности, солёности, удельного электрического сопротивления (УЭС), давления в окрестности скважины в каждый момент расчетного времени в цифровом виде, визуализацию их в виде 2D-рисунков, анимацию процессов изменения этих полей во времени. На рис. 2 приведена иллюстрация того, как будет меняться УЭС прискважинной зоны, если при прочих совпадающих параметрах изменяется соотношение коэффициентов бокового отпора в двух ортогональных направлениях ($q_{\min}$, $q_{\max}$).

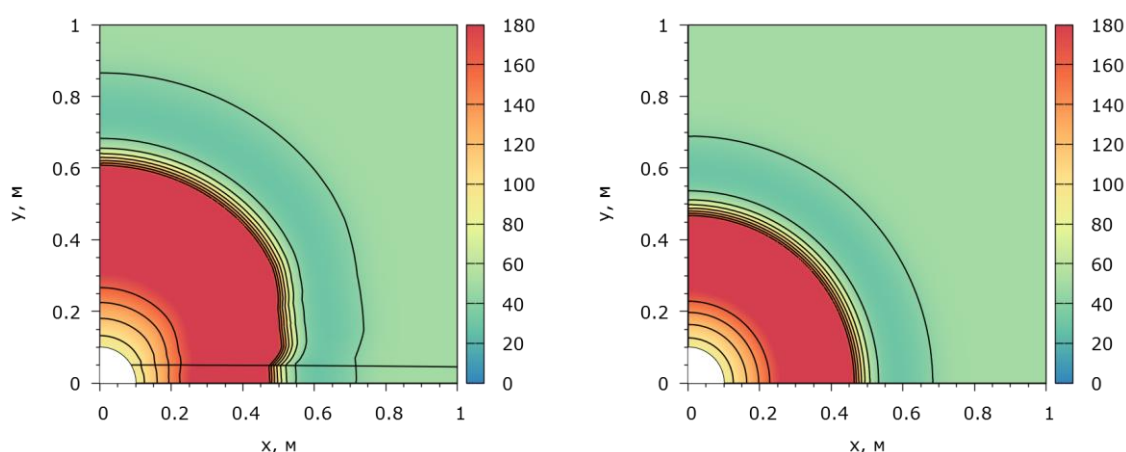


Рис. 2. Изменение полей УЭС при изменении соотношений коэффициентов бокового отпора. Глубина 4000 м, $K_p=10\%$, $K_{pr}=20$ мД, $q_{\max}=0.8$, $q_{\min}=0.67$ (слева), $q_{\min}=0.78$ (справа)

Для визуализации многомерных данных выбран метод параллельных координат [10, 11]. Используется реализация этого метода `d3.parcoords.js` [12] с помощью библиотеки `D3` [13, 14] на языке JavaScript. Реализация в виде веб-приложения позволяет отделить сервер Атласа, хранящий значительный объем данных (десятки Мб для одной модели, включающей все моменты времени), и клиентское приложение, позволяющее осуществлять выборку значений или диапазонов значений параметров модели, фильтрацию по иным признакам и отображение результатов. На рис. 3 приведен пример группы из 1000 моделей; варьировались 7 параметров (коэффициент бокового распора Q_x , предел прочности T_s , коэффициенты в формуле проницаемости kk_per_0 , kk_per_1 , проницаемость пласта Per , пористость Por , пористость глинистой корки Por_cake) при неизменных остальных.

И.Н. Ельцов, Л.А. Назаров и др. // Тезисы конференции «Геомодель-2014: 16-я научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа», (г. Геленджик, Россия, 8–11 сентября 2014 г.). – 4 с. – URL: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=77927>.

5. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. ГЕНМ / Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, Г.В. Нестерова, И.Н. Ельцов. Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. – № 2012619496 от 19.10.2012.

6. Jalali, M.R., Dusseault M.R. Coupling geomechanics and transport in naturally fractured reservoirs // Int. J. Min & Geo-Eng. (IJMGE). – 2012. – Vol. 46, N 1. – P. 1–26.

7. Multidisciplinary model of borehole environment and formation evaluation [Электронный ресурс] / I. Yeltsov, G. Nesterova, L. Nazarova, L. Nazarov // The World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium – WMESS 2015 (Prague, Czech Republic, 7–11 September 2015): Abstract Collection. – Prague, 2015. – P. 318–318. – CD-ROM.

8. Электронный атлас по океанографии Южно-Китайского моря / И.Д. Ростов, В.В. Мороз, Н.И. Рудых, В.И. Ростов // Океанология. – 2009. – Т. 49, № 6. – С. 942–946.

9. Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Куркина О.Е. Электронный атлас кинематических и нелинейных параметров внутренних гравитационных волн в мировом океане // Датчики и системы. – 2011. – № 12. – С. 49–52.

10. Heinrich J., Weiskopf D. State of the Art of Parallel Coordinates // Eurographics (STARs). – 2013. – P. 95–116.

11. Inselberg A. Parallel Coordinates: Visual Multidimensional Geometry and Its Applications. – New York: Springer, 2009. – 554 p.

12. Chang Kai. Parallel Coordinates. A visual toolkit for multidimensional detectives [Электронный ресурс]. – 2012–2017. – URL: <http://syntagmatic.github.io/parallel-coordinates>

13. Bostock M., Ogievetsky V., Heer J. D³ data-driven documents // IEEE transactions on visualization and computer graphics. – 2011. – Vol. 17, N 12. – P. 2301–2309.

14. D3 // D3.js Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://d3js.org>

© А. Ю. Соболев, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, 2017

КАРТИРОВАНИЕ НОВЕЙШИХ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ)

Елена Валентиновна Поспеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (953)869-78-88, e-mail: PospeevaEV@ipgg.sbras.ru

Построенные по магнитотеллурическим данным геоэлектрические разрезы позволяют проследить поведение на глубине основных неотектонических нарушений, которые отчетливо маркируются неоднородностями с аномально низкими значениями удельного сопротивления (менее 0.5 Ом·м). В целом магнитотеллурические данные подтверждают кинематические характеристики разломов, ранее определенные по морфотектоническим и геологическим данным. Для сбросов и сдвигов установлены вертикальные падения плоскостей сместителей, а для взбросов – наклонные. На глубине 10–15 км субвертикальные и наклонные зоны новейших разрывных нарушений пересекают субгоризонтальную зону повышенной проводимости. Наличие субгоризонтального проводящего слоя обеспечивает высокий потенциал тектонической и сейсмической активности верхней, наиболее хрупкой части литосферы на территории Горного Алтая.

Ключевые слова: Горный Алтай, магнитотеллурические зондирования, геоэлектрический разрез, электрическое сопротивление, новейший разлом, земная кора, проводящий слой.

MAPPING NEW FAULTS BY MAGNETOTELLURIC SOUNDING (FOR EXAMPAL, THE EASTEN PARTH OF THE GORNY ALTAI)

Elena V. Pospeeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Leading Researcher, tel. (953)869-78-88, e-mail: PospeevaEV@ipgg.sbras.ru

Built on magnetotelluric data geoelectric sections allow us to trace the behavior at a depth of major neotectonic violations are clearly marked irregularities with abnormally low values of resistivity (less than 0.5 ohm-meters). Overall magnetotelluric data confirm the kinematic characteristics of the faults previously identified by morphotectonic and geological data. For discharges and vertical offsets Factory settings fall mixers planes, and for reverse faults - inclined. At a depth of 10-15 km and inclined subvertical zones of the latest faults crossing sub-horizontal zone of increased conductivity. The presence of subhorizontal conductive layer provides a high potential tectonic and seismic activity of the upper, the most fragile part of the lithosphere in the territory of Mountain Altai.

Key words: Gorny Altai, magnetotelluric sounding, geoelectric section, electrical resistivity, new fault, earth crust, conductor layer.

Тектонические структуры, формирующиеся в позднем кайнозое, традиционно изучаются морфотектоническими и геоморфологическими методами, поскольку новейшие движения создают основу для формирования современного

рельефа, обуславливая конфигурацию и позицию наиболее крупных его форм [6, 7]. Однако эти методы способны выявить лишь плановую (двухмерную) сеть новейших разрывных нарушений и основные характеристики пликтивных деформаций. В силу своей специфики проследить поведение новейших структур на глубине они не позволяют. В связи с этим выводы о кинематике и глубинной позиции новейших структур (т. е. их трехмерные модели), сделанные с помощью морфотектонического анализа, часто носят предположительный характер, поскольку вынуждены опираться на разрозненные геологические наблюдения. Более полная информация о морфологии новейших структур может быть получена главным образом геофизическими методами, среди которых одно из ведущих мест занимает метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

Основными функциями отклика в МТЗ являются тензор импеданса:

$$|Z| = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{vmatrix} \text{ и кажущееся сопротивление } \rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / \omega \mu_0, \rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / \omega \mu_0.$$

При вращении тензора импеданса получается множество амплитудных и фазовых кривых, конфигурация которых зависит от их ориентации. Поэтому одной из основных методических задач является определение главных значений и главных направлений тензора импеданса. При решении этой задачи используется вся информация, которую несут компоненты тензора импеданса на главных направлениях, зависящих от строения геоэлектрической среды. На этом этапе важную роль играет анализ магнитотеллурических параметров – N_{mt} , $Skew_s$ и $Skew_b$, где N_{mt} – параметр неоднородности [2]; $skew_s$ – параметр асимметрии Свифта [10]; $skew_b$ – параметр асимметрии Бара [9], а также круговых полярных диаграмм тензора импеданса. Параметр неоднородности N_{mt} является исходной точкой в анализе теста Бердичевского [2], оценивая который оконтуриваются горизонтально-однородные ($N_{mt} \leq \delta$) и горизонтально-неоднородные области ($N_{mt} \gg \delta$). Последние являются предметом дальнейшего анализа, согласно которому исследуемый район в целом можно рассматривать как региональную двумерную структуру северо-западного простираения: $N_{mt} \gg \delta \rightarrow skew_s \geq \delta \rightarrow skew_b \leq \delta$. Двумерный тензор, определенный на его главных направлениях, имеет нулевую главную диагональ $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, поскольку в этих направлениях равны нулю соответствующие компоненты магнитного поля [2]. Если простираение двумерной модели совпадает с осью Y , тогда: $Z_{xy} = -Z^\perp$, $Z_{yx} = Z^\parallel$. Главные значения тензора импеданса совпадают с продольным и поперечным импедансами, а главными направлениями являются продольное и поперечное направления, по которым вычисляются кривые главных кажущихся сопротивлений.

В случае несовпадения простираения геоэлектрических неоднородностей с простираением региональной структуры на некотором «критическом» периоде происходит вращение полярных диаграмм на 90° , а на графиках $M = f(\sqrt{T})$ и $\theta = f(\sqrt{T})$ наблюдается «скачок» значений: θ изменяется на 90° , а M становится намного меньше 1. Здесь M – отношение модулей продольного и поперечного импеданса, θ – угол между положительным направлением оси X и максимальным импедансом. В этом случае, для того чтобы кривые ρ_k соответствовали

продольному и поперечному направлению всех изучаемых структур, производится процедура замены ветвей кривых (Z_{xy} на Z_{yx} , φ_{xy} на φ_{yx}), начиная с этого «критического» периода. Еще одной важной задачей при проведении МТ-исследований является выявление на кривых зондирования искажений, связанных с горизонтальной неоднородностью разреза. Исследуемый регион в геологическом отношении принадлежит обширному ареалу развития палеозойских интрузивных и метаморфических комплексов, удельное электрическое сопротивление (УЭС) которых может достигать значений свыше 10000 Ом·м. Эти структуры формируют в МТ-поле эффекты гальванической природы, связанные с обтеканием электрическим током высокоомных объектов и его концентрацией в проводящих объектах. Наиболее распространенными типами гальванических искажений являются «р-эффект» и «S-эффект». Они проявляются в статическом смещении поперечной составляющей МТ-поля по оси сопротивлений вверх [2]. В случае «р-эффекта» наблюдается постоянный «статический» сдвиг поперечных кривых. В случае «S-эффекта» сдвиг только их низкочастотных ветвей. Теоретические расчеты [2] и практические наблюдения показывают, что при наличии в разрезе осадочного чехла неоднородностей, формирующих подобные эффекты, близкими к локально-нормальной кривой остаются продольные кривые. Для анализа возможностей и реализации такого подхода было проведено трехмерное математическое моделирование по профилю р. Ильдугем – р. Верх. Тар-Таган. Здесь полностью отсутствуют кайнозойские осадки, а породы верхнего структурного этажа представлены алевритами и песчаниками горноалтайской свиты, а также метаморфическими сланцами теректинской свиты. Эти образования характеризуются высокими значениями УЭС, которое изменяется от 2000–2500 Ом·м в юго-западной части профиля до 7000–10000 Ом·м в северо-восточной. Оптимизация среды выполнялась методом Нелдера-Мида. Итоговая геоэлектрическая модель представлена трехмерным объемным распределением УЭС (рис. 1).

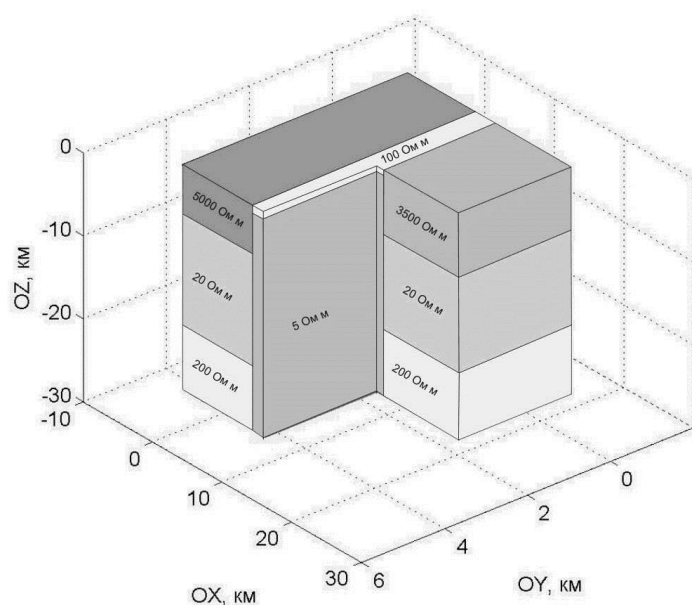


Рис. 1. 3D-модель проводящего разлома

Соответствие наблюдаемых и модельных кривых показано на рис. 2. Можно отметить, что экспериментальные кривые более плавные, чем теоретические, что связано с особенностями используемого метода Треффца. В этом методе применяются лишь приближенные модели среды, в то же время корректно учитывающие индукционные и гальванические искажения МТ-поля.

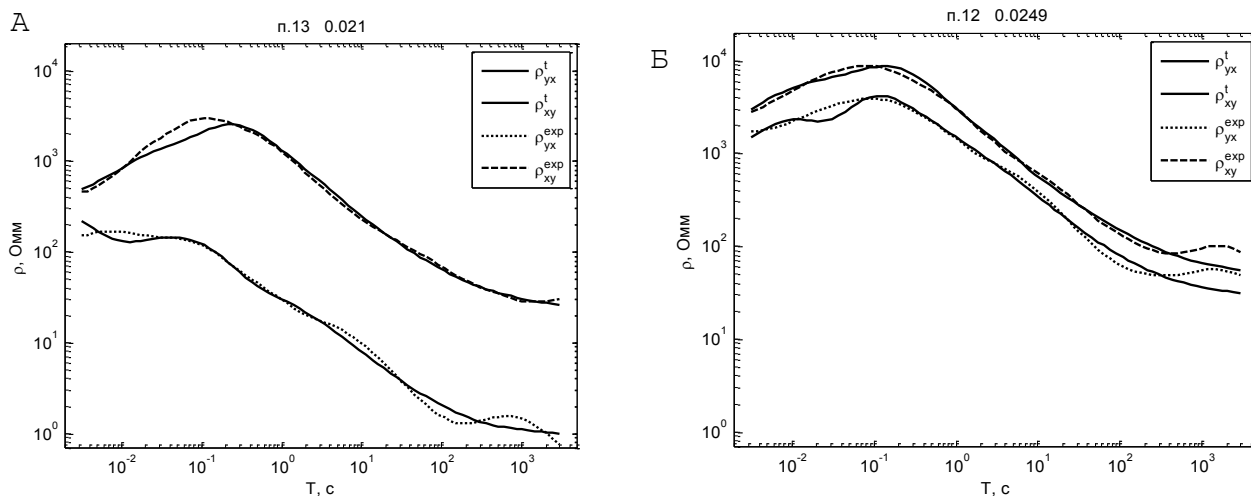


Рис. 2. Модельные и наблюдаемые кривые МТЗ:

А) над зоной разлома; Б) вне зоны разлома

Наличие глубоко проникающих разломов является одной из характерных черт литосферы, которые в период своего активного существования служат флюидопроводниками. По существу, они представляют собой «сквозные» каналы, проникающие в нижнюю кору и верхнюю мантию, и выводят на гигабарсальные глубины глубинные флюиды [3]. Сильнейшие землетрясения практически всегда приурочены к таким разломам. Это подтверждается экспериментальными данными, свидетельствующими, что внезапный подъем флюидов в разломных зонах инициирует землетрясение [1].

В пределах Горного Алтая новейшие разломы используют палеозойские зоны разломов лишь на отдельных участках и обычно секут их под разными углами [6, 7]. Узлы пересечения активизированных разломов отражаются в магнитотеллурическом поле субвертикальными проводящими зонами с явно выраженным наклоном одной из боковых границ, хорошо видимым на глубинном субмеридиональном МТЗ профиле через западную часть Курайской впадины, что можно интерпретировать как сочетание взбросовых и сдвиговых перемещений по отдельным зонам новейших разломов. Вертикальное падение новейшего разлома, выраженного в современном рельефе средней частью долины Башкауса, подтверждает сдвиговый характер по новейшему разлому, предполагавшийся по морфотектоническим данным. Выявление и изучение зон активных разломов помогает решить проблемы современной геодинамики, является важнейшим элементом проведения сейсмического районирования и оценки

сейсмической опасности. Разломам как доминирующим разноранговым геологическим структурам отводится максимальная роль в структурном контроле флюидной проницаемости, а также современных явлений в верхней части литосферы Земли. В сейсмологии давно установлена связь землетрясений с разрывными нарушениями: развитие разломных зон сопровождается сейсмичностью и сопряжено с деформациями коры и литосферы, которые отражаются в неотектонических движениях [8] и выделяются в рельефе земной поверхности. При этом сейсмически активными являются разломы с длительной геологической историей развития, скрытые разломы фундамента, линеаменты и узлы их пересечения [4, 5]. В верхней части консолидированной земной коры проводящие геоэлектрические неоднородности, маркирующие зоны новейших разломов пересекают коровый проводящий слой, глубина которого изменяется от 8–10 км в пределах Чуйской и Курайской впадин до 18–20 км в пределах горного обрамления.

Заключение

Региональные глубинные разломы, разделяющие различные по масштабам блоки земной коры, на геоэлектрическом разрезе отчетливо проявлены субвертикальными зонами с минимально низкими значениями удельного сопротивления. Наклон их боковых границ совпадает с положением плоскостей разломов, определенным по геолого-структурным и морфотектоническим данным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аптикаев С.Ф. Структура микромасштабного сейсмического поля: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1995. – 22 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 677 с.
3. Кадик А.А. Флюиды как отражение окислительно-восстановительного режима в мантии: следствия для геофизических свойств глубинного вещества // Флюиды и геодинамика. – М.: Наука, 2006. – 280 с.
4. Калинина Л.Ю. Роль разломов и глубинной структуры в пространственном контроле землетрясений на Северо-Востоке России: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Магадан, 2005. – 34 с.
5. Калягин А.Н., Абрамов В.А. Основы трансструктурной геологии. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 348 с.
6. Новиков И.С. Кайнозойская сдвиговая структура Алтая // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 9. – С. 1377–1388.
7. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. – Новосибирск: Издательство СО РАН, Филиал «Гео», 2004. – 312 с.
8. Шерман С.И., Семинский К.Ж. Тектонофизические исследования в институте Земной коры СО РАН: принципиальные достижения и актуальные задачи // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 4–15.
9. Bahr K. Interpretation of magneto telluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // J. Geophysics. – 1988. – P. 119–127.
10. Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Dissertation MIT. – Cambridge, 1967.

© Е. В. Поснеева, 2017

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА КАРОТАЖА

Павел Анатольевич Сантаев

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент 2-го курса магистратуры, тел. (913)906-69-94, e-mail: santaevp@gmail.com

Александр Александрович Власов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)221-31-13, e-mail: VlasovAA@ipgg.sbras.ru

Марат Шаукатович Урамаев

ООО «Энергозапас», 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Арбузова, 4/26, тел. (923)177-70-27, e-mail: uramaevmsh@gmail.com

В работе представлено высокопроизводительное программное средство для моделирования сигналов плотностного гамма-гамма каротажа в скважине. Полученные расчеты моделирования классического прибора гамма-гамма каротажа плотности в открытом стволе с учетом эксцентриситета верифицированы путем сравнения с результатами моделирования в Geant4.

Ключевые слова: статистический метод Монте-Карло, моделирование переноса гамма-квантов, ядерная скважинная геофизика.

DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE SOFTWARE TOOLS FOR SIMULATION SIGNAL OF GAMMA-GAMMA DENSITY LOGGING

Pavel A. Santaev

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogov St., master student, tel. (913)906-69-94, e-mail: santaevp@gmail.com

Alexander A. Vlasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (923)221-31-13, e-mail: VlasovAA@ipgg.sbras.ru

Marat Sh. Uramaev

Energozapas Ltd., Russia, 630117, Novosibirsk, 4/26 Arbuzov St., tel. (923)177-70-27, e-mail: uramaevmsh@gmail.com

This paper presents the high performance software tool for simulation of signal of gamma-gamma density logging device in a borehole. The simulation of classical gamma-gamma density logging device in borehole, taking into account the eccentricity verified by comparing with the simulation results of Geant4.

Key words: Monte-Carlo statistic method, simulation of passage of gamma-rays, nuclear borehole geophysics.

В настоящее время MCNP и Geant4 являются наиболее популярными универсальными программными средствами для моделирования переноса излучения. Эти пакеты разработаны для наиболее точного моделирования процесса распространения частиц. С помощью этих программ можно получать максимально возможное соответствие с экспериментальными данными, что важно при анализе свойств конструкций новых приборов. Но для геофизических исследований скважин использование MCNP или Geant4 не будет эффективным из-за большого количества накладных вычислений. Цель работы: повышение скорости моделирования сигналов ядерной геофизической аппаратуры путем упрощения геометрической модели и применения распределенных вычислений.

Разработанное программное средство MTNG способно моделировать прохождение отдельно взятого гамма-кванта через вещество при помощи статистического метода Монте-Карло [1]. Учитывает комптоновское рассеяние и фотоэффект. Виртуальный мир или сцена, в котором моделируется гамма квант, состоит из составных и/или примитивных (простых) геометрических фигур. В данный момент реализованы следующие фигуры: цилиндр, сфера, пересечение фигур, объединение фигур, исключение фигур. Мир, который моделируется, состоит из множества объектов. Каждый объект может состоять из множества других объектов и должен состоять из определенного материала.

Также в программе реализованы вычисление длины свободного пробега гамма-квантов в среде, обработка взаимодействий гамма-квантов со средой, источники излучения. Схема моделирования взаимодействий гамма-кванта описана в [2]. Для расчета длины свободного пробега в среде нужно задать плотность среды и макроскопическое сечение, которые были взяты с сайта национального института стандартов и технологий [3]. Программа считывает макроскопические сечения для каждого материала из файла, который содержит сечения для взаимодействий: комптоновского рассеяния, фотоэффекта, рождения пар, рэлеевского рассеяния.

Для проверки правильности работы созданной программы были проведены эксперименты: вычисление пространственного распределения гамма в однородной среде и неоднородной среде в программных средствах MTNG и Geant4, моделирование разработанных геометрических фигур и сравнение с Geant4.

Кроме разработки программы было проведено моделирование классического прибора гамма-гамма каротажа плотности (ГГКП) с учетом эксцентриситета. В качестве простейшей геометрии «классического» прибора были взяты два детектора диаметром 2 см, расположенные на расстоянии 20 см и 30 см от источника. Пространство между детекторами (а также детектором и источником) заполнено абсолютно поглощающим черным телом (при попадании гамма кванта в эту область траектория прекращалась, что соответствует конечному поглощению частицы). Схема детектора в скважине показана на рис. 1. Во всех экспериментах по моделированию скважина имитировалась водой с плотностью 1 г/см^3 , минеральный состав пласта определялся различным процентным соотношением SiO_2 и H_2O (имитация пористостью), материал детекторов – NaI . Также этот эксперимент был вычислен в Geant4 для плотности пласта $2,65 \text{ г/см}^3$.

Сравнение результатов моделирования с плотностью пласта $2,65 \text{ г/см}^3$ в MTNG и Geant4 представлено на рис. 2. В данной диаграмме показана зависимость от отношения показания ближних и дальних детекторов и счета детектора от эксцентриситета.

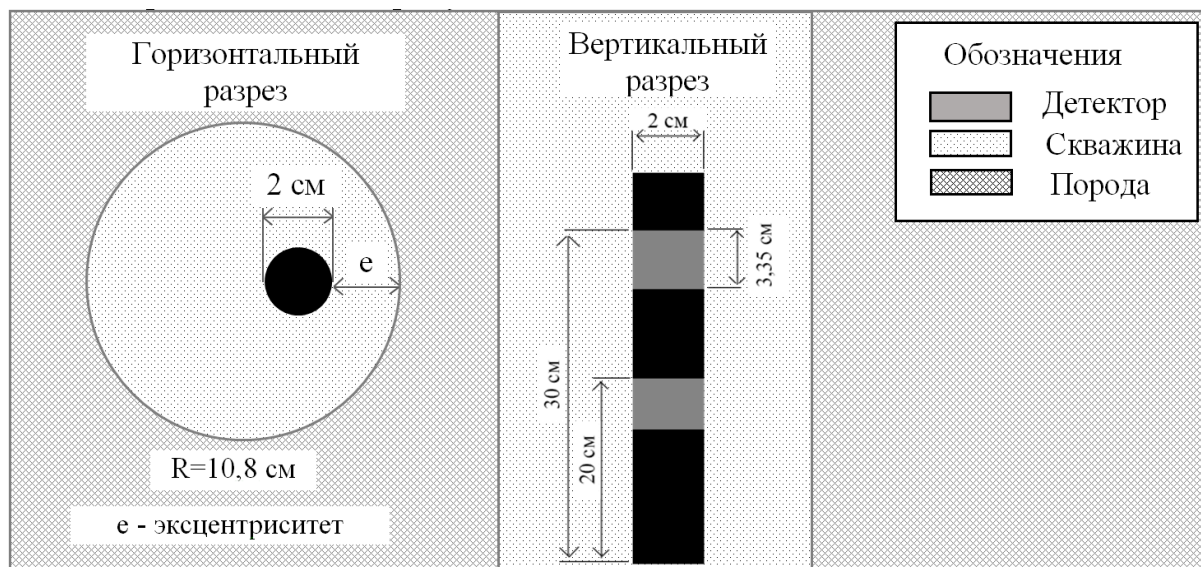


Рис. 1. Схема моделирования классического прибора ГГКП

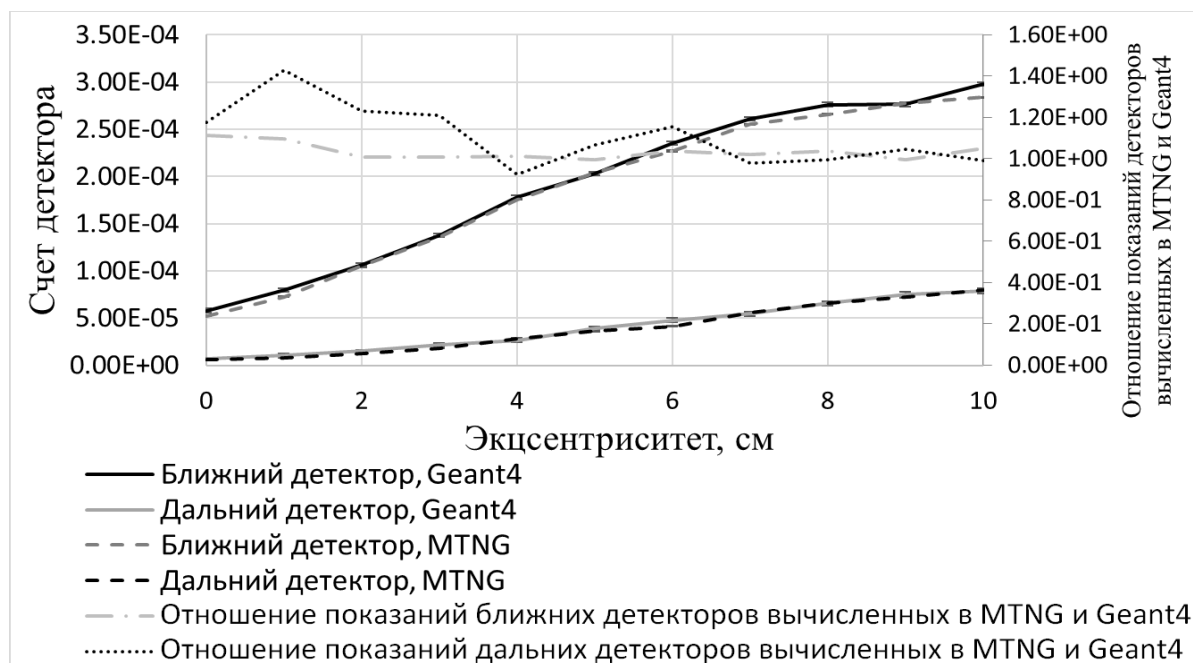


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования ГГКП с MTNG и Geant4

Также этот эксперимент моделировали с изменяемым эксцентриситетом и плотностью (состав) пласта. Эксцентриситет варьируется с 0 до 5 см с шагом 1 см, а состав с 0 % воды (остальное песок) до 30 % воды с шагом 5 %. Резуль-

татом моделирования является палетка для определения пласта и эксцентриситета, которая представлена на рис. 3.

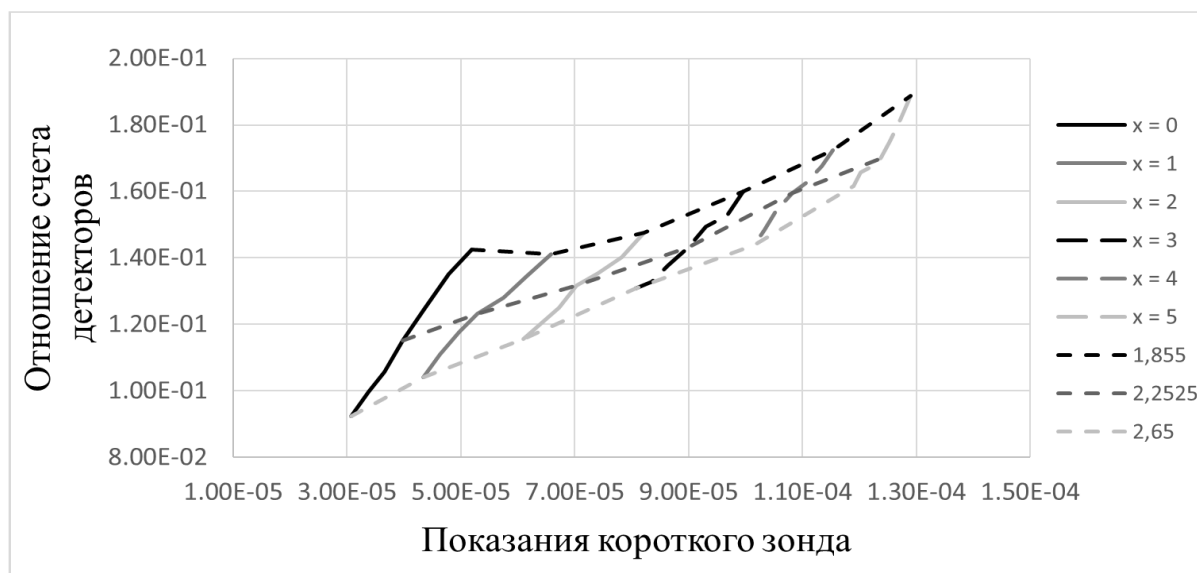


Рис. 3. Палетка для определения плотности пласта и эксцентриситета

Для сравнения скорости в MTNG и Geant4 были вычислены время вычисления количества пересечений концентрических сфер, расположенных вокруг точечного изотропного источника в однородной среде. По результатам моделирования 10 млн траекторий разработанная программа быстрее примерно в 10 раз, чем Geant4. Средняя скорость моделирования одной траектории в MTNG составляет 38,3 мкс. Такая скорость моделирования достигается за счет упрощенной геометрической и физической модели. Моделирование проводилось на компьютере с процессором Intel Xeon X5660 и с 20 Гб оперативной памятью.

Время моделирования можно увеличить за счет переноса вычислений на графические процессоры. Ожидаем, что прирост производительности при переносе составит примерно 2 порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Войтишек А.В. Основы метода Монте-Карло: учеб. пособие. – Новосибирск, 2010. – 108 с.
2. Панин М.П. Моделирование переноса излучения: учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 212 с.
3. XCOM: Photon Cross Sections Database [Электронный ресурс] // Site of The National Institute of Standards and Technology: [сайт]. [2017]. URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database> (дата обращения: 20.02.2017).

© П. А. Сантаев, А. А. Власов, М. Ш. Урамаев, 2017

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Глеб Станиславович Чернышов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: ChernyshovGS@ipgg.sbras.ru

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Александр Сергеевич Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Институт горного дела СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Методы волновой томографии широко применяются в инженерной геофизике для определения скоростной модели сложных неоднородных сред. Преимущество данного метода перед лучевой томографией – в использовании волнового поля вместо времен первых вступлений, что, как считается, дает более надежный результат. Но такой подход требует гораздо больше вычислительных ресурсов. Для решения проблемы в работе предлагается метод, позволяющий вычислять волновые поля в узкой полосе после первых вступлений. Реализованный метод волновой томографии был применен к реальным данным в районе п. Ключи.

Ключевые слова: инженерная сейсморастведка, волновая томография, волновые поля, конечно-разностные схемы.

APPLICATION OF WAVE-EQUATION TRAVELTIME INVERSION FOR NEAR SURFACE GEOPHYSICS STUDIES

Gleb S. Chernyshov

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

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the laboratory, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Aleksander S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Researcher; Institute of Mining SB RAS, 630090, Russia, 54 Krasny Prospect, Junior Researcher, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Methods full-wave inversion is widely used in near surface geotechnical studies. Recently, methods of full-wave tomography is used more often than travelttime inversion. But this approach requires much more computing resources to solve this problem we propose a method that calculates

the wave field in a narrow band after the first arrivals. Computation time and memory required to store the wave field, are significantly reduced. The algorithm was tested on real seismic data. Data were obtained in the village Kluchi.

Key words: engineering seismology, full-wave tomography, mesh scheme.

В работе рассматривается проблема построения скоростных разрезов сейсмических волн по данным малоглубинной сейсморазведки. Исследования проводятся на глубину порядка нескольких десятков метров. Для таких задач обычной ситуацией являются резкие перепады значения сейсмических скоростей с ростом глубины. Так, например, скорость продольных сейсмических волн в водонасыщенных дисперсных грунтах может более чем в два раза превосходить значения в обычном состоянии. Другой типичной ситуацией является контрастная граница между грунтами и скальными породами. В таких условиях наблюдаются преломленные волны. Распространенным является метод t_0' [1], в основе которого лежат предположения о горизонтально-однородном скоростном строении исследуемой среды. Заметим, что даже на равнинных участках местности со слоистой структурой среды могут возникать горизонтально-неоднородные скоростные аномалии. Из-за неравномерных внешних воздействий физико-механические свойства изначально однородного слоя грунта (например, влажность, плотность) могут существенно изменяться. Изменение свойств приводит к горизонтально-неоднородному скоростному строению. Традиционным методом исследования распределения скоростей сейсмических волн является лучевая томография [2]. Однако в последние годы все более популярными становятся методы так называемой сопряженной волновой томографии и волновой томографии [3], основанный на обратном продолжении волнового поля [4, 5]. Считается, что такой подход позволяет получать более надежные результаты, так как используются полные волновые поля, а не только времена их пробега [6]. В работе используется метод волновой томографии для уравнений акустики. Для каждого источника строятся так называемые ядра чувствительности (которые являются уточнением скоростной модели):

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{c^3(\mathbf{x})} \sum_s \int \dot{p}(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s) \dot{p}'(\mathbf{x}, t, \mathbf{x}_s) dt, \quad (1)$$

где $p(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s)$ – давление, вычисленное для априорной скоростной модели $c(\mathbf{x})$, а $p'(\mathbf{x}, t, \mathbf{x}_s)$ – давление для сопряженной задачи, вычисленное путем продолжения в обратном времени «псевдоневязок», которые играют роль импульсов в источниках $\mathbf{x}_r$.

Таким образом, стандартный подход к сопряженной волновой томографии состоит из следующих вычислительных шагов:

– решить прямую задачу, т. е. найти поле $p(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s)$ от источника и сохранить его на каждом временном шаге;

– найти временные «псевдоневязки» путем кросс-корреляции наблюдаемых и синтетических сейсмограмм и решить сопряженную задачу, т. е. построить обратное по времени продолжение данных из точек приемников $p'(x, t, x_s)$;

– уточнить скоростную модель (построить «ядра чувствительности», sensitivity kernels) путем перемножения прямого и сопряженного полей на каждом шаге по времени.

Обычно из-за недостатка памяти для хранения рассчитанного поля на практике используют алгоритм сопряженной волновой томографии, который требует три решения прямой задачи: расчет волнового поля от источника и сохранение граничных условий, расчет в обращенном времени поля приемников и поля источников из граничных условий.

Новый подход к волновой томографии состоит в быстром расчете «прямого» и «обращенного» полей оконным методом. Он был протестирован на синтетических моделях, которые имитируют системы наблюдений, используемые для следующих приложений:

– задачи межштрекового и межскважинного просвечивания (геофизический мониторинг разработки твердых полезных ископаемых и месторождений углеводородов соответственно);

– изучение верхней части разреза по данным рефрагированных волн первых вступлений;

– уточнение скоростной модели по данным пассивного сейсмического мониторинга, куда входят задачи классической томографии очаговой сейсмологии и более новые задачи микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта.

Для обработки реальных данных был выбран объект в районе п. Ключи, Новосибирская область. Наблюдения проводились по профилю протяженностью 252 м, с шагом по пунктам приема – 6 м, по пунктам возбуждения – 18 м. В качестве источника использовалась кувалда массой 5 кг.

Для данного профиля была построена скоростная модель, полученная на основе метода t_0' . После сглаживания слоистая модель использовалась в качестве начальной скоростной модели для волновой томографии. Разрез скоростей продольных волн показан на рис. 1.

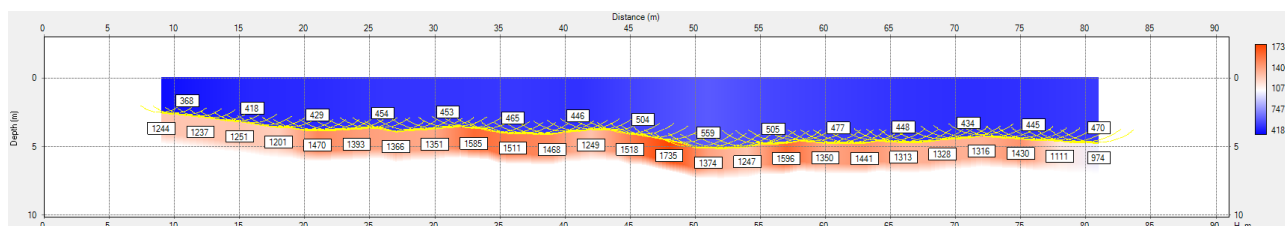


Рис. 1. Разрез скоростей продольных волн по профилю в районе п. Ключи

Предварительная обработка сейсмических данных включала определение времен первых вступлений для всех сейсмограмм общей точки взрыва (применение автоматических алгоритмов определения времен первых вступлений с последующим контролем и редактированием). Далее фиксировалось временное окно волновой формы первых вступлений. Вне временного окна первых вступлений амплитуда трасс полагалась равной нулю (со сглаживанием на краях окна). Для оценки формы импульса для каждой сейсмограммы использовалось усреднение по всем приемникам. Пример сейсмограммы до и после предварительной обработки показан на рис. 2.

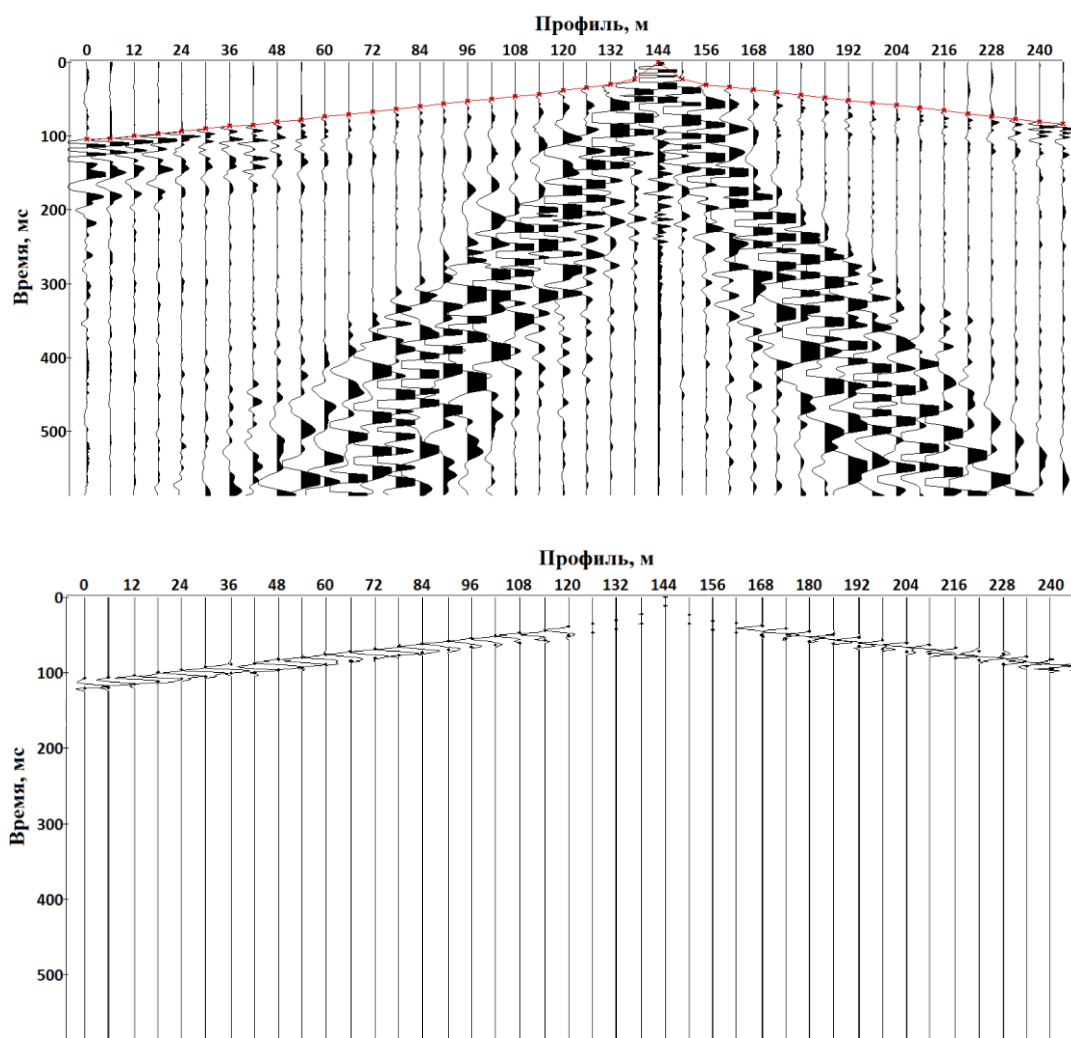


Рис. 2. Пример сейсмограммы до (вверху) и после (внизу) предварительной обработки

Обработка 14 сейсмограмм общей точки взрыва методом волновой томографии позволила построить уточненную модель скоростей продольных волн, на которой хорошо видна высокоскоростная аномалия (до 200 м/с). Окончательная скоростная модель для профиля показана на рис. 3.

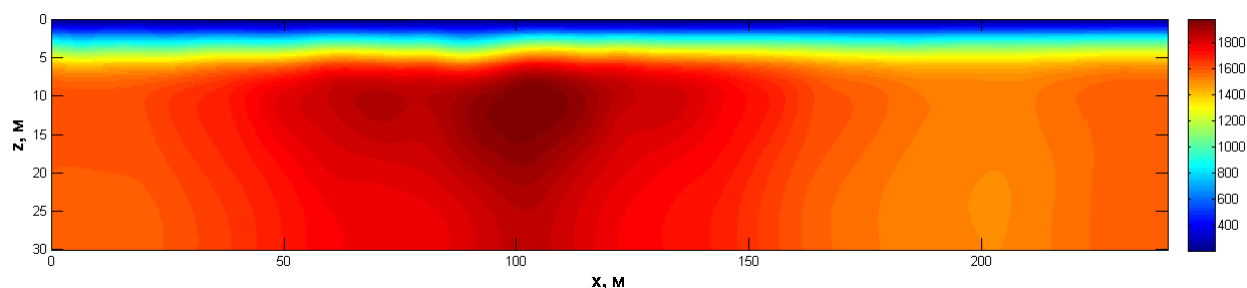


Рис. 3. Скоростная модель для продольных волн по результатам волновой томографии

Работа поддержана грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-7778.2016.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метод преломленных волн / А.М. Епинатьева, Г.М. Голошубин, А.П. Литвин и др. – М.: Недра, 1990. – 297 с.
2. Nolet, Guust, ed. Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics. Vol. 5. – Springer, 1987. – 391 p.
3. Luo Y., Schuster G.T. Wave-equation traveltime inversion // Geophysics. – 1991. – Vol. 56 (5). – P. 645–653.
4. Tromp J., Tape C., Liu Q. Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels // Geophys. J. Int. – 2005. – Vol. 160. – P. 195–216.
5. Liu Q., Tromp J. Finite-Frequency Kernels Based on Adjoint Methods // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96, N 6. – P. 2383–2397.
6. Liu Q., Gu Y.J. Seismic imaging: From classical to adjoint tomography // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 566–567. – P. 31–66.

© Г. С. Чернышов, А. А. Дучков, А. С. Сердюков, 2017

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИГОЛЬЧАТОГО ЗОНДА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Ирина Игоревна Фадеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер; Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, тел. (953)763-95-28, e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

В докладе приводится описание разработанного зондового устройства для оперативного измерения температуропроводности и теплопроводности разного рода сред. С помощью устройства проведены тестовые измерения температуропроводности льда и соли.

Ключевые слова: игольчатый зонд, прибор для измерения температуропроводности и теплопроводности, лабораторный эксперимент.

STRUCTURAL FEATURES OF NEEDLE PROBE, WHICH USED TO DETERMINE THE THERMAL PROPERTIES OF ROCKS

Irina I. Fadeeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer; Chinackal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospect, Research Scientist, tel. (953)763-95-28, e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

The description of the thermal probe construction and performance of a device for measuring thermal properties of different sorts of media is given. The results of measurements of the thermal diffusivity of ice and salt are given.

Key words: needle probe, thermal conductivity, thermal diffusivity.

Большинство горных пород, являясь сложными многокомпонентными системами, характеризуются эффективными теплофизическими свойствами. В методах определения теплофизических свойств горных пород можно выделить два направления: экспериментальный и теоретический. Экспериментальные исследования остаются основными в силу большого разнообразия исследуемых пород. Их можно осуществлять как непосредственно в естественно залегающем массиве пород (полевые исследования), так и в лабораторных условиях. Полевые исследования тепловых свойств играют немаловажную роль как в экспедиционных работах, так и в производственных условиях. Такие исследования могут проводиться на основе анализа данных наблюдений естественного температурного поля массива пород или зондовыми методами. В первом случае недостатком является трудоемкость проведения температурных наблюдений и значительная погрешность в определении коэффициента температуропроводности пород. Зондовые методы более удобны в практической реализации, основаны на искусственном нарушении температурного поля массива породы и измере-

нии скорости его изменения. По форме зонды бывают плоские, сферические и цилиндрические. По тепловому режиму работы различают зонды с постоянной мощностью теплового потока, с импульсным нагревом и другие варианты [1].

Широкое применение получил метод длинного игольчатого зонда (с соотношением диаметра D и длины L зонда $L/D \geq 30$). Теория метода была разработана Блэквеллом [2, 3] и Хупером [4]. Несмотря на то, что теория Блэквелла предполагает определение двух параметров тепло- и температуропроводности среды, реализованные зонды, как правило, с хорошей точностью позволяют измерять один параметр теплопроводности исследуемой породы [5, 6]. Теория метода определения теплопроводности состоит в интерпретации термограмм зонда на больших временах при постоянной мощности линейного источника. Методика определения температуропроводности также была описана в работе Вэйта [7], она опирается на математические выкладки, сделанные Блэквеллом [2], и заключается в описании термограммы как на больших, так и на малых временах (начало прогрева среды зондом постоянной мощности). В работе Вэйта [7] нами были отмечены несоответствия в размерностях уравнений. После корректировки этих несоответствий теория была опробована, но в силу того, что решения оказались неустойчивыми, рассчитанные параметры имели существенную погрешность. Позже выяснилось, что связано это с особенностью конструкции игольчатого зонда. В ходе выполнения очередного эксперимента был выявлен серьезный конструктивный недостаток игольчатых зондов, изготавливаемых с применением трансформаторного масла в качестве наполнителя. Если герметизация зонда оказывалась недостаточно плотной, происходило неконтролируемое вытекание масла, что уменьшало собственную теплопроводность зонда и увеличивало его инерцию. Исследования зонда, заполняемого эпоксидной смолой, также показали его несостоятельность в измерении температуропроводности исследуемой среды описанным методом [2, 7].

Математическая модель метода игольчатого зонда в качестве источника рассматривает тонкую бесконечно длинную нить. Таким образом, используемое для описания экспериментальных термограмм аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с линейным источником тепла постоянной мощности (1) справедливо в случае, когда длина зонда превосходит его диаметр в 25–30 раз [2, 3]. Ранее при изготовлении зондов мы уделяли внимание соблюдению только этого параметра геометрии.

$$T(r_0, t) = T_i + \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \cdot E_1\left(\frac{r_0^2}{4a_2 t}\right), \quad (1)$$

где T_i [K] – температура исследуемой среды в начальный момент времени ($t = 0$), Q [Вт/м] – удельная мощность источника, λ_2 [Вт/м/К] – теплопроводность среды, a_2 [м²/с] – температуропроводность среды, r_0 – радиус зонда [8].

В 2015 году был изготовлен новый измерительный зонд, в котором, помимо соотношения длины нагревателя и диаметра зонда, особое внимание было уделено центровке нагревательной проволоки, расположению температурного датчика, его инертности и инерции зонда в целом, что позволило приблизить зонд к его модельному представлению. Регистрирующая система при этом осталась прежней, ее схема приведена в работе [9].

Основная проблема контактных методов измерения тепловых свойств различных сред состоит в определении теплового контактного сопротивления на границе источник-среда, которое необходимо учитывать при определении теплопроводности исследуемой среды. При создании достаточно хорошего теплового контакта на границе игольчатый зонд-среда, такого, что температура стенки зонда отличается от температуры среды менее чем на величину погрешности измерения температуры, можно выявить конструктивные недостатки зонда в процессе его исследования. Хороший тепловой контакт, как известно, наблюдается при вмораживании игольчатого зонда в лед.

В данной работе проведены измерения тепловых свойств льда, полученные с помощью двух одноигольчатых зондов, замороженных в лед (рис. 1). Зонд 1 был изготовлен по старой технологии, зонд 2 – по новой. Представлены термограммы, полученные при постоянной мощности линейного нагревателя (рис. 1, а) и при заданной зависимости от времени тепловой мощности нагревателя (рис. 1, б).

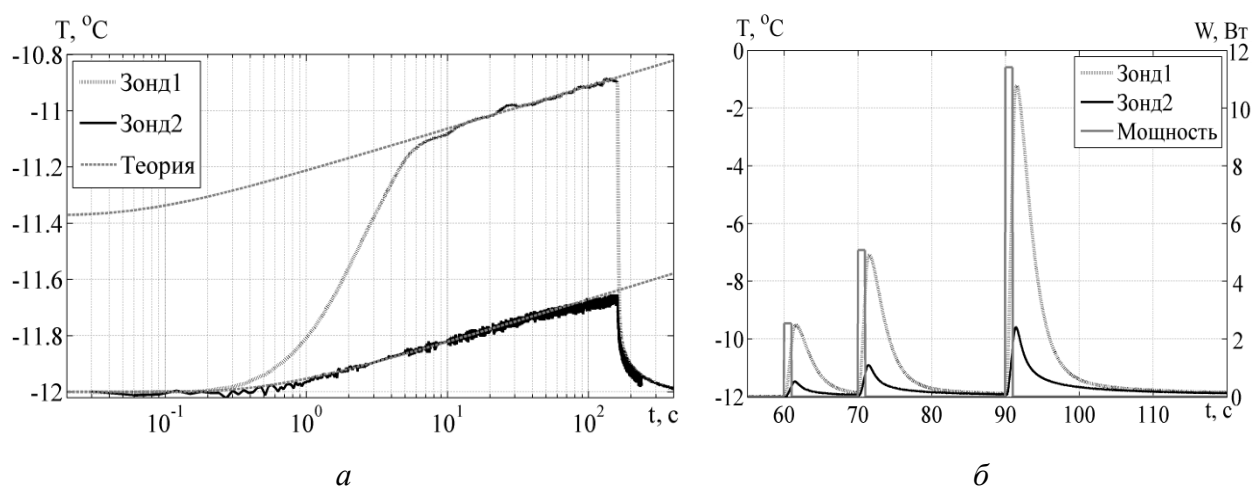


Рис. 1. Экспериментальные термограммы двух игольчатых зондов (зонд 1 и зонд 2), полученные при постоянной мощности нагревателя (а) и заданной зависимости мощности, подаваемой на линейный нагреватель зонда, от времени (б)

На рис. 1, а хорошо виден начальный нелинейный прогрев температурного датчика зонда 1 (температура датчика отличается от температуры среды вблизи зонда на некоторое постоянное в течение всего времени нагрева значение [10]), в то время как для температурного датчика зонда 2 начальная стадия прогрева

практически отсутствует (температура датчика соответствует температуре окружающей среды). Таким образом, температурный скачок может быть следствием конструктивного недочета – плохого контакта температурного датчика со стенкой игольчатого зонда.

Теплопроводность льда определялась при аппроксимации термограмм (рис. 1, *а*) аналитическим решением (1), представленным штриховой пунктирной линией, и составила 2,5 Вт/м/К для термограммы зонда 1 и 2,4 Вт/м/К для термограммы зонда 2.

В силу хорошего теплового контакта зондов и льда (коэффициент теплообмена $H > 10^4$ Вт/м²/К) скачком температуры на границе зонд-лед можно пренебречь, тогда температуропроводность может быть определена при аппроксимации термограммы зонда 2 (рис. 1, *а*) решением (1) [8] и составляет $6,7 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Также температуропроводность можно определить по методу, предложенному в работе [11], используя для этого тепловой сигнал и соответствующие ему термограммы, представленные на рис. 1, *б*. В результате решения обратной задачи было отмечено, что функционал, построенный с использованием экспериментальных данных, полученных зондом 2, имеет единственный минимум, соответствующий температуропроводности $7,0 \cdot 10^{-7}$ м²/с, в то время как функционал, построенный с использованием данных зонда 1, не имеет строго выраженного минимума. Это, по всей видимости, связано с сильным несоответствием экспериментальной термограммы тепловому сигналу.

С использованием нового игольчатого зонда 2 проводились исследования тепловых свойств соли. По методу, предложенному в работе [11], были определены следующие параметры: теплопроводность 0,46 Вт/м/К, коэффициент теплообмена на границе зонд-соль 360 Вт/м²/К, температуропроводность $1,3 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Наши исследования показали, что методики определения тепловых свойств горных пород с использованием игольчатого зонда [2, 3, 7, 8, 11] работают при условии, что одноигольчатый зонд изготовлен по специальной технологии, обеспечивающей необходимое соотношение длина-диаметр, высокую собственную теплопроводность, соответствие температуры датчика зонда температуре его стенки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 280 с.
2. Blackwell J.H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk // J. app. Phys. – 1954. – Vol. 25(2). – P. 137–144.
3. Blackwell J.H. The axial-flow error in the thermal-conductivity probe // Canadian Journal of Physics. – 1956. – Vol. 34. – P. 412–417.
4. Хупер Ф.К. Зонд для измерения теплопроводности // Мерзлотные явления в грунтах. – Л.-М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – С. 81–84.
5. Von Herszen R., Maxwell A.E.. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method // Journal of Geophysical Research. – 1959. – Vol. 64, Issue 10. – P. 1557–1563.

6. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток через дно западной части Черного моря // Геология и геофизика. – 1985. – № 8. – С. 113–123.
7. Simultaneous determination of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat in sI methane hydrate / W.F. Waite, L.A. Stern, S.H. Kirby et al. // Geophys. J. Int. – 2007. – Vol. 169. – P. 767–774.
8. Фадеева И.И., Дучков А.А., Пермяков М.Е. Теплофизический метод количественной оценки гидратосодержания в образцах, имитирующих донные осадки // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 6. – С. 1251–1261.
9. Казанцев С. А., Фадеева И. И. Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 82–85.
10. Методика одновременного измерения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости среды игольчатым зондом / И.И. Фадеева, М.Е. Пермяков, Д.Е. Аюнов, Н.А. Манченко // Трофимуковские чтения – 2013: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 2013. – С. 342–327.
11. Фадеева И. И., Дучков А. А., Карчевский А. Л. Теория метода игольчатого зонда для одновременного определения тепло- и температуропроводности различных сред // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 3. – С. 124–128.

© И. И. Фадеева, 2017

РЕГИОНАЛЬНОЕ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ КОРЫ ЗАБАЙКАЛЬЯ ПО ДАННЫМ КМПВ (ПРОФИЛЬ 1-СБ, ЮЖНЫЙ УЧАСТОК)

Владимир Дмитриевич Суворов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. (383)330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Елена Александровна Мельник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. (383)330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Александр Сергеевич Сальников

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом региональной геофизики, тел. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Рассматриваются результаты структурно-тектонического районирования по сейсмическим данным КМПВ, основанные на уверенно выделяемых региональных разломах (с сопутствующими наложенными впадинами мезокайнозойского возраста), разделяющих тектонические блоки с определенными сейсмическими характеристиками, прослеженными на глубину до 4–5 км.

Ключевые слова: сейсмический метод первых вступлений, скорость продольных волн, тектоника Забайкалья.

REGIONAL TECTONIC STRUCTURE OF THE TRANSBAIKALIA UPPER CRUST FROM REFRACTED WAVES (PROFILE 1-SB)

Vladimir D. Suvorov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Principal Research Scientist, Laboratory of deep Geophysical Investigations and Regional Seismology, tel. (383)330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Elena A. Melnik

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Chief of laboratory of deep geophysical investigations and regional seismology, tel. (383)330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Aleksander S. Salnikov

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, D. Sc., Chief of department of regional geophysics, tel. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

We show seismic tectonic structure extracted from travel times of seismic refracted waves. The confidence allocated regional faults (with accompanying superimposed troughs of Meso-Cenozoic age), which separate tectonic blocks with specific seismic features, traced to a depth of 4-5 km.

Key words: refracted P-waves, travel time, velocity, tectonics, Transbaikalia.

Рассматриваемые данные являются частью большого комплекса геофизических и геологических исследований вдоль профиля, входящего в систему опорных региональных профилей Российской Федерации [2]. Задача исследований состоит в получении детальных геолого-геофизических характеристик земной коры с целью поиска прогнозных критериев для выделения геологических структур, перспективных на обнаружение стратегических, остродефицитных и высоколиквидных видов минерального сырья на основе обобщения и специализированной обработки геофизических материалов.

Профилем пересечен Центрально-Азиатский складчатый пояс (рис. 1), представленный разнообразными и разновозрастными тектоническими структурами, разделенными разломами северо-восточного простирания. Регион характеризуется открытыми месторождениями твердых полезных ископаемых и многочисленными их проявлениями. Существует ряд работ, где проводится геодинамическая интерпретация геологических данных [1, 3, 4, 6]. Принципиальная новизна результатов заключается в применении метода первых вступлений для изучения складчатых структур, тогда как традиционно он применялся в платформенных условиях.

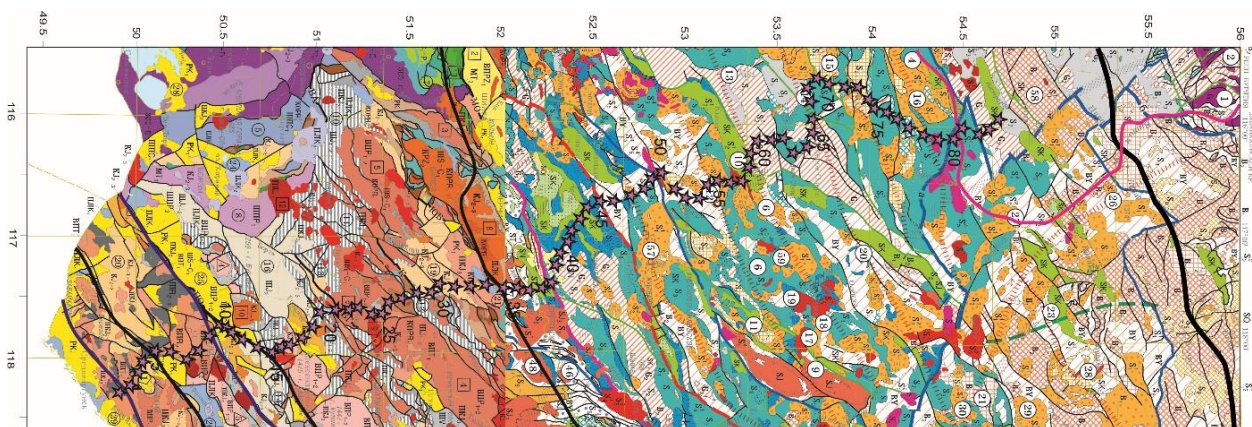


Рис. 1. Положение профиля на фрагменте тектонической карты (М-б 1:2500000, листы N-50, М-50, интернет-ресурс [5]). Звездочками показаны пункты возбуждения с номерами

Возбуждение колебаний осуществлялось вибраторами с шагом по профилю 10 км при длине свипа 30 с в полосе частот 10–36 Гц. Длина линии наблюдений равнялась 40 км при шаге между сейсмоприемниками 50 м. Расстановка пунктов возбуждения (ПВ) и наблюдений осуществлялась вдоль автомобильной трассы,

поэтому фактическое расстояние между ПВ изменялось в интервале 7–9 км и расстояние источник-приемник уменьшалось до 35–38 км в зависимости от кривизны дороги. В данном случае длина профиля определена вдоль ломаной линии, соединяющей ПВ, которая на 100 км меньше линии наблюдений.

Построение сейсмического разреза проводилось прямым лучевым трассированием методом проб и ошибок [7] при невязках между наблюдаемыми и теоретическими временами пробега волн, не превышающих в среднем 0.05–0.07 с.

Сейсмические характеристики верхней коры до глубины 4–5 км отличаются значительными изменениями скорости и мощности выделенных слоев (рис. 2). Наиболее контрастно проявлены зоны разломов, сопряженные с локальными прогибами, заполненными породами мезокайнозойского возраста с пониженной до 2.6–4.5 км/с скоростью. В подстилающих породах скорость скачком увеличивается до 5.0–5.8 км/с и возрастает до 6.0–6.2 км/с на глубине до 3–4 км. Углы падения разломов, прослеженных на глубину 3–4 км, можно оценить по наклону осевых линий, изменяющихся в интервале 15–30°.

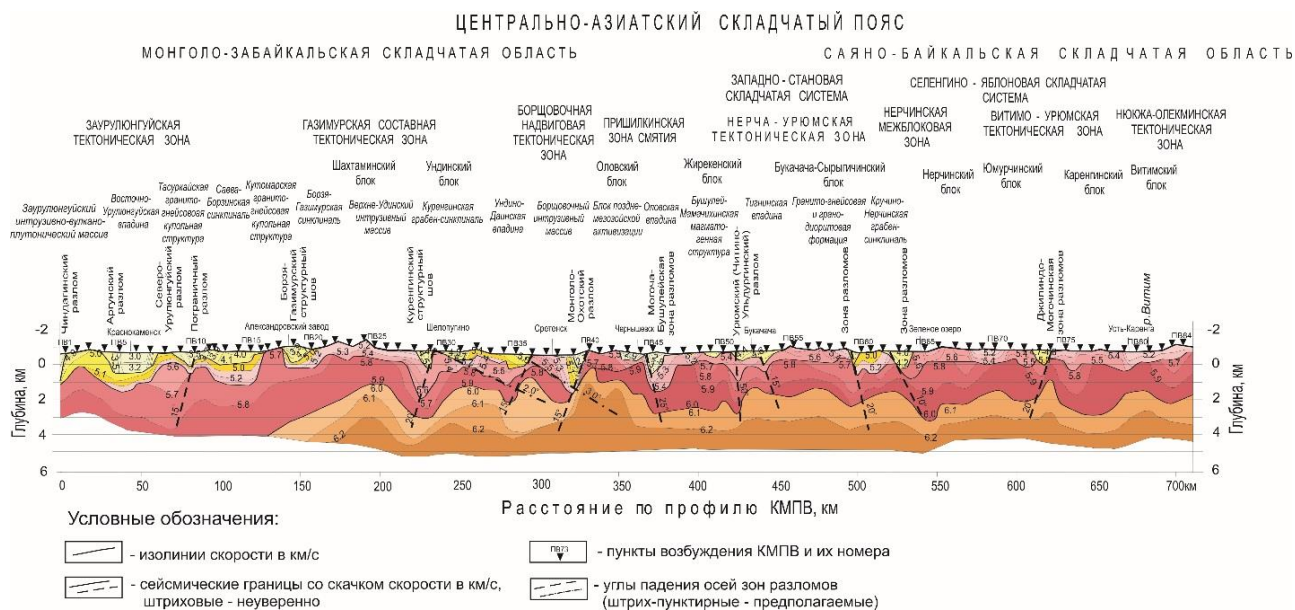


Рис. 2. Сейсмический разрез верхней коры по профилю 1-СБ (южная часть)

Интенсивность складчатости, проявляющаяся в изменениях скорости, мощности слоев и амплитуды складок, значительно изменяется вдоль профиля. С глубиной она затухает, возможно, вследствие уменьшения разрешающей способности метода. По наибольшей контрастности таких изменений можно выделить участок профиля 220–380 км. В северном направлении интенсивность складчатости уменьшается, где более отчетливо выделяются блоки с слабо выраженной складчатостью (выражается в рельефе изолиний скорости), разделенные узкими зонами разломов.

Не вдаваясь в детальное содержание тектонических структур, пересекаемых профилем (рис. 2), содержащихся в условных обозначениях к Тектонической карте (интернет-ресурс ВСЕГЕИ [5]), рассмотрим их корреляцию с свойствами сейсмического разреза на примере только начальной части профиля длиной 0–170 км (рис. 3).

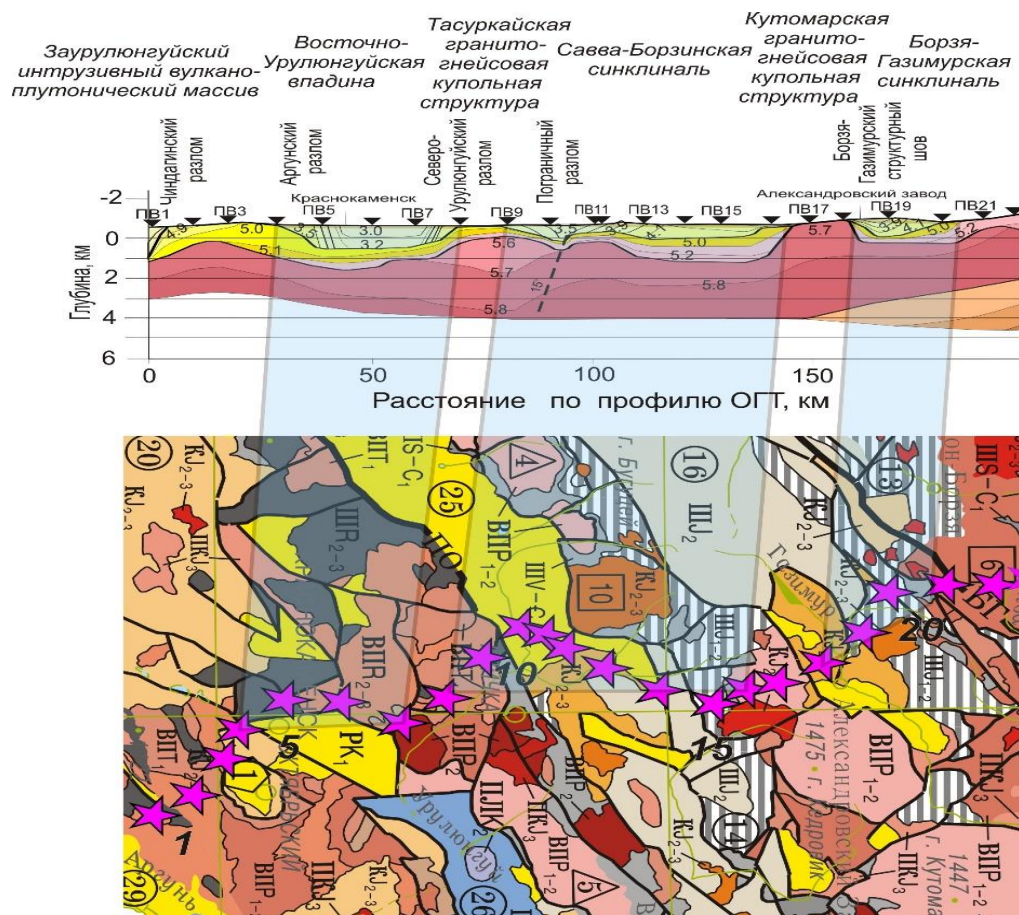


Рис. 3. Пример корреляции сейсмических характеристик разреза с фрагментом тектонической карты (рис. 2) для участка профиля 0–170 км. Звездочками на карте показаны пункты возбуждения с номерами (на разрезе это треугольники), прозрачные трапеции – области соответствия структур в разрезе и на карте. На разрезе штриховыми линиями показаны оси падения зон разломов и углы их падения в градусах

Между ПВ 1 и 5 (рис. 3) наблюдается Заурулюнгу́йский интрузивный вулкано-плутонический массив, где в приповерхностном слое пород скорости повышены до 4.9–5.1 км/с. На подошве этого слоя скорость скачком увеличивается до 5.6–5.7 км/с. По геологическим данным массив ограничен разломами: Чиндагинским на юге и Аргунским на севере. Последний разделяет массив и Урулюнгу́йскую впадину, в центральной части которой на поверхности наблюдаются поздне-плиоценовые отложения мощностью до 1.2 км и со скоростью около 3.0–3.2 км/с. Кровля подстилающего слоя со скоростью 5.0–5.3 км/с

погружена до 1.5 км. Ограничивающий ее на севере выступ пород со скоростью 5.0–5.3 км/с (ПВ 7-9) соответствует Тасуркайской гранитогнейсовой купольной структуре, в которой кровля слоя со скоростью 5.6–5.7 км/с, находящаяся на глубине около 2 км под Урулюнгуйской впадиной, поднята до 0.7 км. Слой пород со скоростью 5.0–5.3 км/с под куполом утоняется за счет уменьшения глубины залегания пород со скоростью 5.6 км/с.

По геологическим данным эти структуры разделяет Северо-Урулюнгуйский разлом. Тасуркайский гранитогнейсовый купол ограничен на севере Пограничным разломом, прослеженным по характерным крутым изменениям рельефа сейсмических границ на глубину примерно до 4 км. Осевая линия разлома, вероятно надвиговой природы, падает на юг под пологим углом около 15°. Он разделяет Восточно-Урулюнгуйскую впадину и Савва-Борзинскую синклинали, в которой скорость в слое юрско-меловых пород мощностью до 0.5–0.7 км значительно выше (3.5–4.1 км/с), чем в Восточно-Урулюнгуйской. В синклинали толщина второго слоя со скоростью 5.0–5.3 км/с увеличена до 1.0 км. Интересно, что в подстилающей толще пород под куполом скорость 5.6 км/с, а под соседним аналогичным поднятием повышена до 5.7 км/с и прослеживается под Савва-Борзинской синклиналью вплоть до ПВ 12 так, что общая ширина кристаллической вершины купола со скоростью 5.6–5.7 км/с на глубине около 0.7 км достигает почти 40 км.

Столь убедительное соответствие сейсмических и приповерхностных геолого-тектонических данных наблюдается вдоль профиля не повсеместно. Имеются и некоторые расхождения, требующие дополнительного изучения.

В целом полученные данные указывают на высокую эффективность сейсмического метода первых вступлений при решении задачи структурно-тектонического районирования складчатых областей, существенно дополняющего свойствами глубинных корней приповерхностных геологических структур и создающего основу для более обоснованного прогнозирования минерагенических зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордиенко И.В. Геодинамическая эволюция поздних байкалид и палеозоид складчатого обрамления юга Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 53–70.
2. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин / Ю.М. Эринчек, А.В. Липилин, Р.Б. Сержантов и др. // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева. – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 282–288.
3. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии / Л.М. Парфенов, Н.А. Берзин, А.И. Ханчук и др. // Тихоокеанская геология. – 2003. – Т. 22, № 6. – С. 7–41.
4. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-азиатского складчатого пояса / А.Н. Диденко, В.Б. Каплун, Ю.Ф. Малышев, Б.Ф. Шевченко // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 5. – С. 629–647.

5. Цифровой каталог государственных геологических карт РФ м-ба 1:1 000 000 (третье поколение) [электронный ресурс]. – СПб.: ВСЕГЕИ. – URL: http://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/.
6. Nokleberg W.J., (Ed.) Metallogensis and Tectonics of northeast Asia // US Geol. Survey Professional Paper 1765. – Reston, Virginia, 2010. – 624 p.
7. Zelt C.A., Smith R. Seismic traveltine inversion for 2D crustal velocity structure // Geophys. J. Int. – 1992. – Vol. 108. – P. 183–204.

© В. Д. Суворов, Е. А. Мельник, А. С. Сальников, 2017

ГЛУБИННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА БАЙКАЛО-ПАТОМСКОМ ФРАГМЕНТЕ ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ОПОРНОГО ПРОФИЛЯ 1-СБ

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Александр Сергеевич Сальников

АО «Сибирский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом сейсморазведки, тел. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383) 333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Илья Евгеньевич Романенко

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383) 333-25-35, e-mail: romanenko@gs.nsc.ru

Наталья Александровна Галёва

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Представлены материалы глубинных сейсмических исследований на Байкало-Патомском фрагменте опорного геофизического профиля 1-СБ в Забайкалье. Построен глубинный сейсмический разрез с распределением скоростей продольных волн в коре и по границе Мохоровичича. Граница М расположена на глубинах 40–48 км, граничная скорость P -волн вдоль нее сильно меняется и составляет 7.9–8.4 км/с. Эффективная скорость продольных волн в коре в целом составляет 6.4–6.5 км/с. Установлено неоднородное скоростное строение верхней и средней частей коры до глубин 10–15 км.

Ключевые слова: профиль ГСЗ, скорость продольных волн, глубинный сейсмический разрез, земная кора, граница Мохоровичича.

DEEP SEISMIC SOUNDING AT BAIKAL-PATOM FRAGMENT OF EASTERN SECTION 1-SB PROFILE

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Deputy director, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Alexander S. Salnikov

AO «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, D. Sc., Head of seismic prospecting department, tel. (383)222-62-13, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Viktor S. Seleznev

Seismological Branch of the Federal Research Center unified geophysical service of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, D. Sc., director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Ilya E. Romanenko

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: romanenko.ilyuha@gs.nsc.ru

Natalya A. Galyova

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Paper present results of deep sounding at Baikal-Patom fragment of 1-SB profile. A deep seismic section with the distribution of velocities of longitudinal waves in the crust and the Moho boundary was build. The boundary of M is located at a depth of 40–48 km, the boundary *P*-wave velocity along it vary greatly and constitute 7.9–8.4 km/s. Effective velocity of longitudinal waves in the cortex as a whole make up 6.4–6.5 km / s. Established a non-uniform velocity structure of the upper and middle parts of the crust to a depth of 10–15 km.

Key words: deep sounding profile, the velocity of longitudinal waves, a deep seismic section, the Earth's crust, Moho boundary.

Введение

В 2014–2015 гг. АСФ ГС СО РАН совместно с ООО «Геотех» и АО «СНИИГГиМС» по заданию Роснедра отработан региональный профиль 1-СБ п. Среднеаргунск – п. Усть-Каренга – г. Таксимо – п. Витим, протяженностью свыше 1200 км, пересекающий крупные тектонические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса: Аргунский срединный массив, Селенга-Становую и Забайкальскую складчатые области, Бодайбино-Патомскую складчатую систему с выходом в Ангаро-Ленскую моноклизу Сибирской платформы (рис. 1). Ниже представлены материалы глубинных сейсмических исследований

на северо-западном Байкало-Патомском фрагменте опорного профиля 1-СБ (Восточный участок).

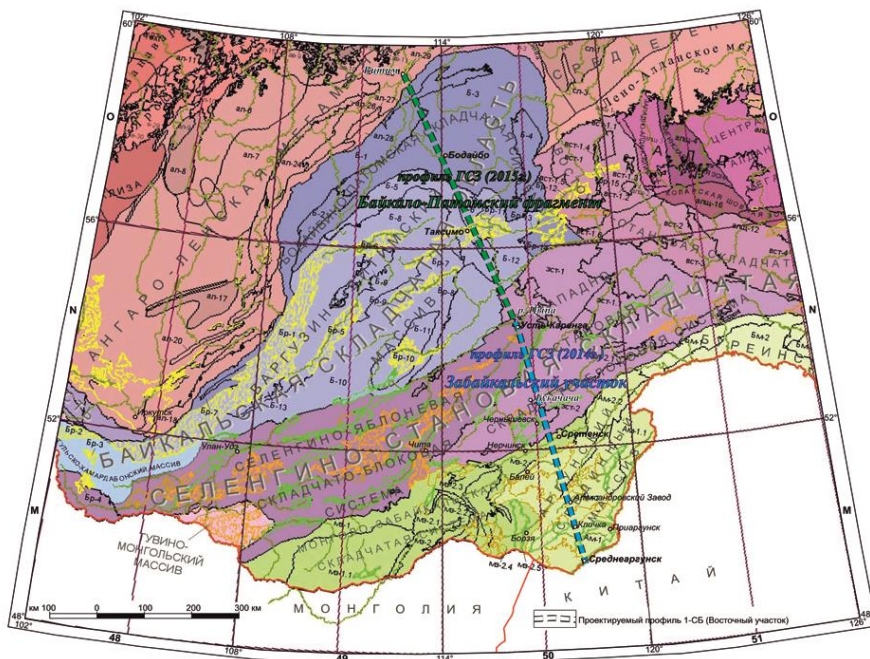


Рис. 1. Схема тектонического районирования полосы профиля 1-СБ, Восточный участок [5]

Полевой эксперимент и волновое поле на профиле ГСЗ Усть-Каренга – г. Таксимо – п. Витим

Была реализована плотная система наблюдений сейсмических волн. Расстояния между источниками возбуждения составляли в среднем 15–30 км, между приемниками – 4–6 км, диапазон удалений от источников – от 0 до 400 км.

В качестве источников возбуждения использовались взрывы тротила весом 3–5 тонн в озерах и мощные 40-тонные дебалансные вибраторы. Регистрация упругих колебаний осуществлялась 24-разрядными станциями «Роса-А» и «Байкал-АС» с группами вертикальных и трехкомпонентных приборов. Координаты установки сейсмоприемников и источников возбуждения определялись с использованием GPS-приемников.

Анализ волнового поля показывает, что на записях в первых вступлениях уверенно выделяются рефрагированные волны из верхней, средней (и эпизодически нижней) части земной коры и от поверхности Мохоровичича. На рис. 2 в качестве примера показаны сейсмические записи от взрывного (ПВ 6) и вибрационного (Вибр.13) источников в шкале реального времени прихода волн (А) и записи взрывов с ПВ 4 и ПВ 17 в редуцированном времени, в редукции 8 км/с (Б).

В пределах профиля скорость P -волн в первых вступлениях на удалениях 0–10÷15 км в целом изменяется от 3.5–4.2 до 5.5–5.8 км/с. Наиболее высокими значениями скорости продольных волн характеризуются высокогорные участки

в южной и центральной части профиля (Селенга-Становой и Баргузинский массивы) и в северной части профиля в пределах Патомского нагорья. Пониженные значения скорости P -волн установлены на участках межгорных впадин в южной и центральной частях профиля и на участке Ангаро-Ленской моноклизы в северной части профиля.

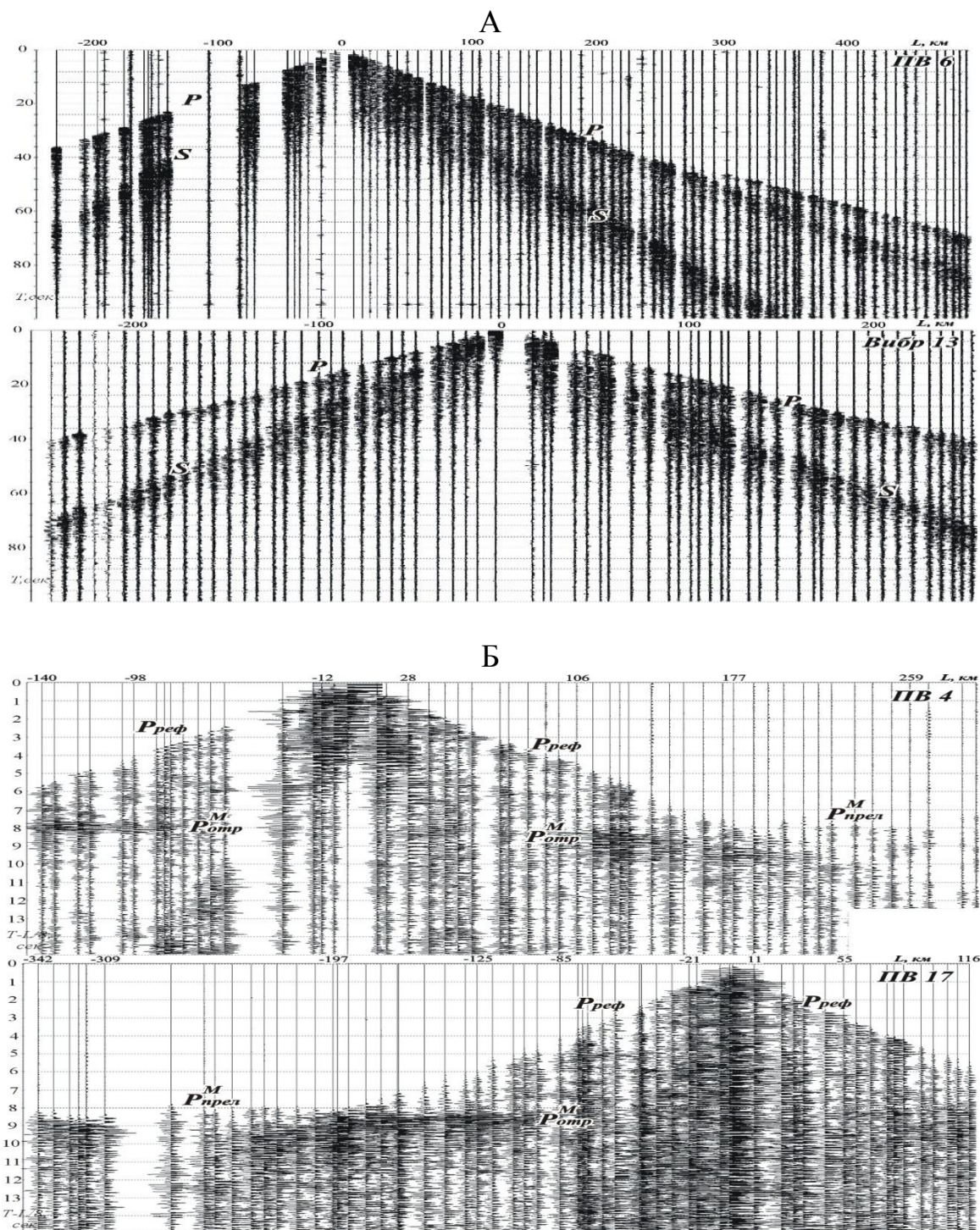


Рис. 2. Примеры волнового поля на Байкало-Патомском фрагменте профиля 1-СБ (Восточный участок). Рреф – рефрагированные волны в земной коре, $P_{пр}^M$ и $P_{отр}^M$ – преломленные и отраженные волны от границы Мохоровичича

На удалениях от источников свыше 10–15 км и до удалений 150–170 км скорость продольных волн на большинстве годографов возрастает незначительно, примерно до 6.0–6.2 км/с и редко до 6.3–6.5 км/с.

На удалениях свыше 170–180 км в первых вступлениях начинают регистрироваться преломленные волны от поверхности Мохоровичича ($P_{пр}^M$) с высокими значениями кажущейся скорости в 7.7–8.7 км/с. В последующей части записи на удалениях 100–200 км выделяются интенсивные отраженные волны от поверхности Мохоровичича ($P_{отр}^M$) (рис. 2, Б) и в дальней части сейсмограмм – поперечные аналоги продольных волн (рис. 2, А).

Особенности глубинного строения на Байкало-Патомском фрагменте профиля 1-СБ

По данным опорных продольных волн (рефрагированных из земной коры, преломленных и отраженных от границы М) была выполнена интерпретация и БЫЛ построен глубинный сейсмический разрез (рис. 3).

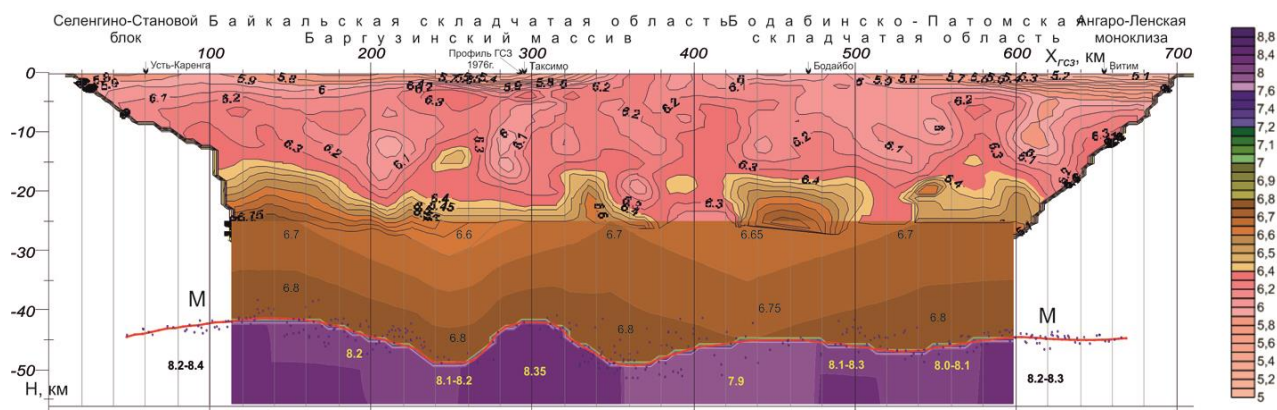


Рис. 3. Сводный глубинный сейсмический разрез по Байкало-Патомскому фрагменту опорного профиля 1-СБ (Восточный участок)

Реализован комбинированный способ восстановления результирующего разреза, включающий томографические построения верхней части разреза по данным рефрагированных волн [1], восстановления границы М по данным преломленных и отраженных волн [1–4], восстановления скоростей в нижней части коры по данным закритических отраженных волн от границы М на удалениях в 200–300 км, восстановления скоростей в средней части разреза путем просчета прямых кинематических задач в рамках многослойной модели среды и согласованием с эффективными скоростями во всей толще земной коры [3]. Ниже описаны главные особенности строения (рельеф границы М и граничная скорость, эффективная скорость в коре...). Профиль 1-СБ (Байкало-Патомский фрагмент) пересекает в крест простирания крупные разнородные геоморфологические и геологические структуры. Основанием разреза является поверхность

Мохововича, которая прослежена на глубинах 40–48 км. Под крупными хребтами (Южно-Муйским, $X=220\text{--}280$ км и Северо-Муйским, $X=330\text{--}360$ км) мощность земной коры повышена до 45–48 км. Порядка 45 км мощность земной коры составляет в пределах Селенгино-Станового блока и Бодайбинско-Патомской складчатой области. В центральной части профиля на участке Муйской глыбы ($X=270\text{--}330$ км) и в юго-восточной части профиля ($X=100\text{--}200$ км) мощность земной коры понижена до 40–43 км (рис. 3). Эффективная скорость распространения сейсмических волн до границы М составляет 6.4–6.5 км/с. Повышенные значения скорости в 6.5 км/с отмечаются на участках высокогорных хребтов (Каларского, Южно- и Северо-Муйского) в юго-восточной и центральной части профиля ($X=50\text{--}125$ км, 220–280 км, 330–360 км) и в пределах Бодайбинско-Патомской складчатой области ($X=530\text{--}650$ км) (рис. 3).

Пониженные значения эффективной скорости P -волн в земной коре в 6.4–6.45 км/с приурочены к зонам межгорных впадин: ($X=150\text{--}210$ км), Муйско-Кондинской впадине ($X=280\text{--}330$ км) и в Ангаро-Ленской моноклизе ($X>675$ км). Граничная скорость продольных волн по поверхности Мохововича в целом по всему профилю изменяется от 7.9–8.1 до 8.2–8.4 км/с. Более высокие значения скорости P -волн (до 8.3–8.40 км/с) отмечаются для юго-восточного участка профиля (в Селенга-Становом блоке и Баргузинском массиве), в северо-западной части профиля (в северо-западной части Бодайбинско-Патомской складчатой области, $X=570\text{--}670$ км) и в центральной части профиля ($X=270\text{--}330$ км) в пределах так называемой Муйской глыбы; пониженные значения граничной скорости P -волн от границы М в 7.8–8.0 км/с отмечены в центральной части профиля ($X=350\text{--}460$ км) в области сочленения Байкальской и Бодайбинско-Патомской складчатых областей. Локальные зоны пониженной скорости P -волн по границе М до 8.0–8.1 км/с отмечены также на участках $X=90\text{--}120$ км, $X=230\text{--}260$ км и $X=520\text{--}560$ км. В целом полученное выше распределение граничной скорости коррелирует с результатами работ ГСЗ 70–80-х годов прошлого столетия [1, 2, 4,] и существенно дополняет их. Так, по данным прошлых лет и настоящих результатов, в рифтовой зоне, где по детальным сейсмическим исследованиям [1] граница М характеризуется пониженными значениями скорости, выделяется Муйская глыба с повышенными значениями скорости: до 8.1–8.2 км/с (на профиле ГСЗ 1976 года, проходящем через Муйско-Кондинскую впадину) и до 8.3–8.4 км/с (в результатах настоящих исследований). По данным анализа рефрагированных волн отмечается неоднородное строение верхней и средней частей коры до глубин 10–15 км. Значения пластовой скорости в нижней коре по профилю составляют в целом 6.7–6.8 км/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Детальные сейсмические исследования литосферы на P - и S - волнах / С.В. Крылов, Б.П. Мишенькин, З.Р. Мишенькина и др. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. – 199 с.

2. Изучение земной коры и верхней мантии в Байкальской рифтовой зоне методом глубинного сейсмического зондирования / Б.П. Мишенькин, З.Р. Мишенькина, Г.В. Петрик и др. // Физика Земли. – 1999. – №7–8. – С. 74–93.

3. Использование эффективных сейсмических моделей сред при работах ГСЗ на опорных профилях в Восточной части России / В.М. Соловьев, В.С. Селезнев, А.С. Сальников и др. // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири: матер. конф. Т. 4. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. – С. 74–86.

4. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / С.В. Крылов, М.М. Мандельбаум, Б.П. Мишенькин и др. – Новосибирск: Наука, 1981. – 105 с.

5. Фрагмент цифровой тектонической (геолого-структурной) карты России м-ба 1:2500000 / Гл. ред. О.В. Петров, А.Ф. Морозов, отв. ред. С.И. Стрельников. – СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003.

© В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев,
С. А. Елагин, И. Е. Романенко, Н. А. Галева, 2017

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ЗОЛОТОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА: ЦЕННЫЕ И ТОКСИЧНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Наталья Викторовна Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доцент кафедры геофизических систем, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Светлана Борисовна Бортникова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, тел. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Ирина Викторовна Проворная

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат экономических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-95-36, e-mail: ProvornayaIV@ipgg.sbras.ru

Ольга Петровна Саева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

Приводятся данные о составе и объемах хвостов в хранилище отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода по результатам электротомографии и химических анализов. Сделана оценка ресурсов ценных и токсичных компонентов (Ag, Zn, Cd, Pb, As, Hg) и рассчитан экологический ущерб.

Ключевые слова: хвостохранилище, сульфидные отходы, электротомография, металлы, экологический ущерб, переработка.

THE CURRENT STATE OF GOLD MINING TAILINGS: VALUABLE AND TOXIC COMPONENTS

Nataliya V. Yurkevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Prospect, Assistant professor of Department of Geophysical Systems, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Svetlana B. Bortnikova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Professor, tel. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Irina V. Provornaya

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-95-36, e-mail: ProvornayaIV@ipgg.sbras.ru

Olga P. Saeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Researcher, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

Provides data structure and the volume of tailings waste storage Komsomolsk gold recovery plant according to the results of electrical tomography and chemical analysis. Done resource estimation of the valuable and toxic components (Ag, Zn, Cd, Pb, As, Hg) and calculated environmental damage.

Key words: sulfide-bearing mine tailings, electrical resistivity tomography, metals, environmental damage, recycling.

Сульфидсодержащие отходы обогащения руд вызывают интерес исследователей в связи с тем, что они являются источником загрязнения окружающей среды и в то же время представляют собой техногенные месторождения. Актуальной задачей стала оценка не только токсичных, но и ценных компонентов хранилищ, с применением комплекса геохимических методов, частотного и вертикального электрического зондирования [1–3]. Цель работы – определение объемов и состава вещества отходов в Комсомольском хвостохранилище (Кемеровская область) с использованием электротомографии и геохимических методов, расчет экологического ущерба. Комсомольский золотоизвлекательный завод (КЗЗ, пос. Комсомольск, Кемеровская область) был введен в эксплуатацию в 1937–1940 гг. Золото-арсенопирит-кварцевые руды перерабатывались цианированием, производилось извлечение золота из сурьмяных кеков (продукт переработки антимонитовых концентратов выщелачиванием). Твердое вещество отходов состоит из кварца, полевого шпата, кальцита и сульфидных минералов (пирит, сфалерит, галенит, пирротин и арсенопирит). В результате складирования отходов над поверхностью твердой части образовалось техногенное озеро площадью порядка 100 тыс. м², со средней глубиной около 2 м [4].

В 2014–2016 гг. было проведено подробное опробование твердого вещества хвостохранилища и различных поверхностных вод. Микроэлементный состав твердого вещества анализировался при помощи метода РФА-СИ на ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, поверхностных вод – методом ИСП-МС. С помощью метода электротомографии (ЭТ) было установлено геоэлектрическое строение участка

исследований до глубины 30 м. В пределах хвостохранилища была разбита сеть наблюдений из 9 профилей №№ 1–9 длиной по 355 м. Измерения методом ЭТ выполнялись аппаратурой «Скала-48» [5], последовательность подключения электродов соответствует установке Шлюмберже, шаг измерений по профилю – 5 м, обработка данных – с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv [6].

Экономическая оценка экологического ущерба от загрязнения водохозяйственного участка (Y_B) определялась по формуле [7, 8]: $Y_B = \gamma_B \cdot \sigma_B \cdot M_B$, где γ_B – показатель удельного ущерба водным ресурсам, руб./усл. тонну; σ_B – коэффициент экологической значимости для водных объектов по бассейнам основных рек; M_B – приведенная масса загрязняющих веществ, усл. тонн: $M_B = \sum_{i=0}^N A_i \cdot m_i$, где N – общее количество загрязняющих веществ. Показатель относительной опасности i -го вещества $A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_i}$, где ПДК_i – предельно-допустимая концентрация [9].

По результатам химических анализов содержания Cu, Zn, As, Sb, Ag, In в веществе отходов КЗЗ сопоставимы с концентрациями этих элементов в перерабатываемых рудах или по усредненным литературным данным (таблица). Среднее содержание накопленного золота – 0.38 г/т, что ниже среднего в перерабатываемых на КЗЗ рудах (1.57 г/т в 1980 г.), но максимальные концентрации в хвостах (0.9 г/т) сопоставимы с рудными.

Таблица

Некоторые элементы в составе хвостов Комсомольского хранилища
и сравнение с содержаниями в руде, г/т

n=30	Cu	Zn	As	Sb	Cd	Au	Ag	In	Sn
Вещество Комсомольского хвостохранилища, г/т									
средн	1400	630	3000	2500	6.6	0.38	3.2	16	14
мин	1100	207	910	270	0.11	0.21	1.1	7.1	0.49
макс	1800	1200	7200	5000	14	0.92	9.2	33	64
руда	100-1000*	140**	100-1000**	1000-10000***	100-5000***	1.57**	2.5**	2-23***	100-1000**

Примечание: * – по данным [4]; ** – из отчета «Показатели работы Комсомольского завода в 1969–1981 годах» по состоянию на 1980 год; *** – по данным [10].

Состав воды гидроотвала характеризуется окислительными условиями (E_h 400 мВ) и сравнительно невысокой минерализацией – 0.4 г/л. В анионном составе преобладает сульфат-анион (290 мг/л), в катионном – Ca^{2+} (86 мг/л) и Mg^{2+} (17 мг/л). Слабощелочная реакция среды (рН от 7 до 8 единиц) в поверхностных водах хранилища обусловлена составом твердого вещества, контактирующего с водой: 3.2 % карбонатного углерода и 2 % сульфидной серы. То есть кислота, формирующаяся при окислении сульфидной компоненты, нейтрализуется достаточным количеством карбонатных минералов. Концентра-

ции металлов в исследуемых водах невысоки (в сумме около 0.6 мг/л). Напротив, средние содержания мышьяка и сурьмы составляют 0.21 (As) и 0.85 мг/л (Sb), что выше ПДК_в [9] в 21 и 170 раз соответственно.

По данным электротомографии были построены геоэлектрические разрезы Комсомольского хранилища. Хвосты на разрезах выделяются как зоны пониженного сопротивления (25–30 Ом·м), мощность отложений варьирует от 4.5 до 7.5 м. Основание хвостохранилища представлено диоритами, имеющими высокое (1000–3000 и более Ом·м) УЭС (рис. 1). По характеру распределения УЭС на глубине 20 м прослеживается путь фильтрации дренажа от места складирования в область разгрузки под дамбой и далее, по разлому, в область разгрузки в р. Воскресенка.

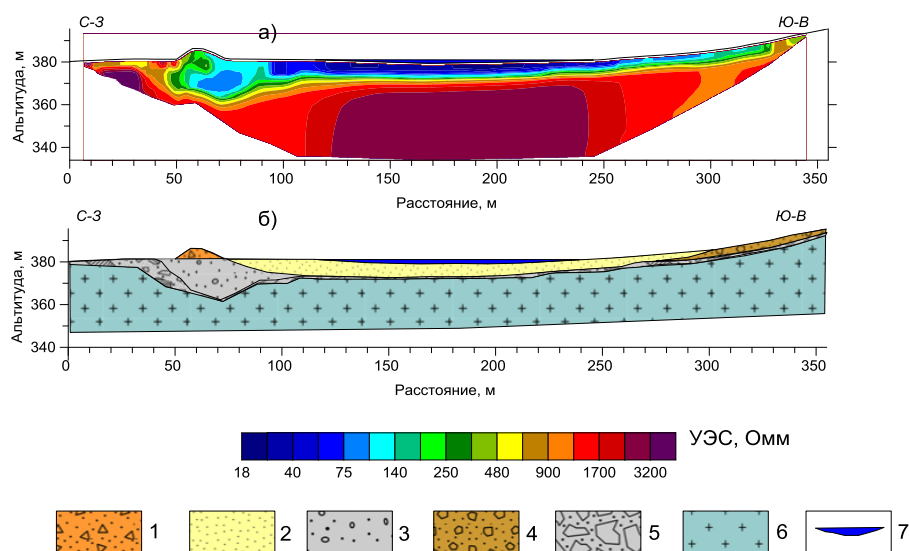


Рис. 1. Геоэлектрический разрез (а); его интерпретация (б):
1 – насыпные грунты дамбы; 2 – хвосты обогащения; 3 – рыхлые отложения; 4 – рыхлые склоновые отложения; 5 – кора выветривания диоритов; 6 – коренные диориты; 7 – гидроотвал

В результате интерпретации данных была установлена мощность хвостов на всех профилях ЭТ и построена карта мощности техногенных отложений. Мощность хвостов неравномерна по площади, изменяется от первых метров по периферии хвостохранилища до 26 м на участке локального понижения кровли коренных пород. Медианное значение мощности хвостов составляет 7.6 м.

С помощью инструмента Volume программы Surfer (Golden Software) был рассчитан объем хвостов 958 тыс.м³, что сопоставимо с данными [4] (810 тыс. м³). По нашим оценкам, масса накопленных хвостов составляет около 3 млн. тонн. Зная концентрации металлов, мышьяка и сурьмы (см. таблицу), мы рассчитали ресурсы ценных и потенциально токсичных элементов в хвостах (средние значения, тонн): 9100 As, 7600 Sb, 4300 Cu, 1900 Zn, 48 In, 42 Sn, 20 Cd, 10 Ag, 1.2 Au. При рыночной цене золота 2300 рублей за 1 гр. (курс Центробан-

ка на 18.02.2017) стоимость складированного в хвостах металла составит около 2.7 млрд. рублей. Аналогичным образом оценивается стоимость других металлов в составе отходов. Присутствие же 9100 тонн мышьяка, элемента 1-го класса опасности, обуславливают экологические риски от размещения хвостохранилища на территории поселка в непосредственной близости от жилой зоны.

Результаты расчетов экономической оценки экологического ущерба от загрязнения р. Воскресенка в результате стока загрязненных вод с Комсомольского хвостохранилища показали ежегодный ущерб в размере 53.682 млн руб.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что полезные компоненты (Zn, Cu, Ag, Au, In, Sn) находятся в высоких концентрациях, сопоставимых с рудными. Их добыча могла бы существенно минимизировать стоимость работы по устранению экологического ущерба территории в зоне влияния отстойника. Целесообразна разработка рекомендаций по извлечению металлов и рекультивации нарушенных территорий.

Работа была выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН VIII.80.1.4 и при финансовой поддержке гранта фонда Президента РФ № МК-6654.2016.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The combination of Geoelectrical Measurements and Hydro-Geochemical Studies for the Evaluation of Groundwater Pollution in Mining Tailings Areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich, E. Bessonova et al. // The Handbook of Environmental Chemistry. – Springer Berlin Heidelberg. ISSN: 1867-979X (Print) 1616-864X (Online). DOI: 10.1007/698_2013_234. 2013
2. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В.В. Оленченко, Д.О. Кучер, С.Б. Бортникова и др. // Геология и геофизика. – 2016. – № 4. – С. 782–795.
3. Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow. Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2015. – Vol. 97, Issue 1. – P. 1–14.
4. Бортникова. С.Б., О.Л. Гаськова, Е.П. Бессонова. Геохимия техногенных систем. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. – 169 с.
5. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн и др. // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
6. Loke M.H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies // A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. – 2009.
7. Письмо Минприроды РФ п 04-25, Роскомзема № 61-5678 от 27.12.1993 «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами».
8. Методика определения предотвращенного экологического ущерба, утвержденная Приказом Госкомэкологии России от 30.11. 1999.
9. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
10. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник в 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. – Кн. 3: Редкие р – элементы. – М.: Недра, 1996. – 352 с.

© Н. В. Юркевич, С. Б. Бортникова, В. В. Оленченко,
И. В. Проворная, О. П. Саева, 2017

ДВУХМАСШТАБНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ КЕРНА

Татьяна Станиславовна Хачкова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

Ярослав Владимирович Базайкин

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

Дмитрий Романович Колюхин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

Виктор Иванович Костин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: KostinVI@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Галина Витальевна Решетова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: kgv@nmsf.sccc.ru

Оценка упругих свойств образца горной породы по КТ-изображениям керна чрезвычайно чувствительна к разрешению сканов, поскольку при грубом разрешении невозможно точно разделить зерна и оценить их шероховатость, наличие и состав цемента, а размер сканов высокого разрешения часто меньше репрезентативного. В работе представлен двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств образца по КТ-сканам и SEM-изображениям фрагментов на основе топологического анализа и геостатистического моделирования.

Ключевые слова: цифровые керны, упругие свойства, репрезентативный объем, разрешение изображения, шероховатость зерна, топологический анализ, геостатистическое моделирование.

NUMERICAL TWO-SCALE METHOD FOR ESTIMATION OF ELASTIC PROPERTIES FROM DIGITAL ROCK IMAGES

Tatyana S. Khachkova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Unior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

Yaroslav V. Bazaikin

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Koptyug Prospect, D. Sc., Head of the Laboratory, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

Dmitriy R. Kolyukhin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

Viktor I. Kostin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KostinVI@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Galina V. Reshetova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 6 Koptyug Prospect, D. Sc., Senior Researcher, e-mail: kgv@nmsf.sccc.ru

Estimations of the elastic properties of a core sample are sensitive to the CT-scan image resolution. On the one hand, coarse image resolution does not allow separating the grains, estimating their roughness. On the other hand, size of the images with fine resolution is typically below representative volume. We present the two-scale method combining geostatistics and topology for numerical estimation of sample elastic properties from joint use of the CT-scans and SEM-images.

Key words: elastic properties, representative volume, CT-scan resolution, grain roughness, digital rock physics, topological analysis, geostatistical modeling.

В последние годы активно развивается вычислительная физика горных пород, именуемая в англоязычной литературе digital rock physics. Цифровые изображения зерна используются наряду с физическими образцами горной породы для изучения и получения более точных и полных знаний об их свойствах. С помощью математических методов и современного программного обеспечения вычисляются такие параметры образца, как пористость, проницаемость, упругие модули, скорости продольных и поперечных волн, геометрические, топологические характеристики порового пространства и т. д. Однако численная оценка указанных параметров зависит от разрешения изображения [1, 2]. Это связано с тем, что понижение разрешения (при увеличении размера вокселя)

приводит к потере детальности изображения: исчезают малые поры, узкие поровые каналы, при этом невозможно точно разделить зерна друг от друга, оценить их шероховатость. А с увеличением разрешения (при более детальной съемке) отображается все меньшая часть образца, которая, начиная с какого-то момента, становится нерепрезентативной. В настоящей работе представлен двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств образца горной породы, в котором используются как изображения компьютерной томографии с разрешением, подходящим для численного моделирования, так и изображения фрагментов, полученные с помощью электронного микроскопа, позволяющие оценить статистические характеристики границ между зернами, наличие и состав цемента.

Метод состоит из нескольких этапов (выделены на рис. 1–2 красным цветом). Первый шаг – это выделение в цифровой модели образца (состоящей из двух фаз – скелет и поровое пространство) отдельных зерен и контактных прослоек между ними (рис. 1). Для этого используется метод персистентных гомологий, в котором последовательным процессом эрозии скелета строится его фильтрация множествами экскурсии. При этом зерна отделяются друг от друга как различные компоненты связности множеств экскурсии относительно рассмотренной фильтрации. Динамика отделения зерен друг от друга в процессе эрозии отражается на диаграмме баркода (рис. 1, б), длины отрезков баркода пропорциональны линейным размерам зерен. По результатам анализа диаграммы баркода находятся центры и средние радиусы зерен. Затем используется взвешенная диаграмма Вороного набора найденных центров зерен с весами, равными их радиусам, чтобы разделить скелет на ячейки, содержащие зерна. В результате (рис. 1, в) получается цифровая модель с отдельными зернами и прослойками между ними заданной толщины (как минимум 2 вокселя). Второй этап – использование SEM-изображений фрагментов (рис. 2, а) для оценки кривизны и шероховатости поверхности зерен и их статистических параметров (длина корреляции – l , стандартное отклонение – σ). Третий этап – численная оценка эффективных упругих параметров модели, содержащей шероховатую прослойку (рис. 2, б), с параметрами шероховатости, определяемыми статистическими характеристиками, оцененными ранее по SEM-изображениям. После этого оцениваются плотности распределения компонент тензора упругих модулей для эффективной осредненной модели среды, заполняющей пространство между зернами, – эффективный цемент (рис. 2, в). Четвертый этап – применение геостатистического моделирования, чтобы сконструировать модель с разломами, заполненными материалом с должным образом распределенными компонентами упругости. Пятый этап – решение задач статического нагружения образца для оценки его упругих параметров.

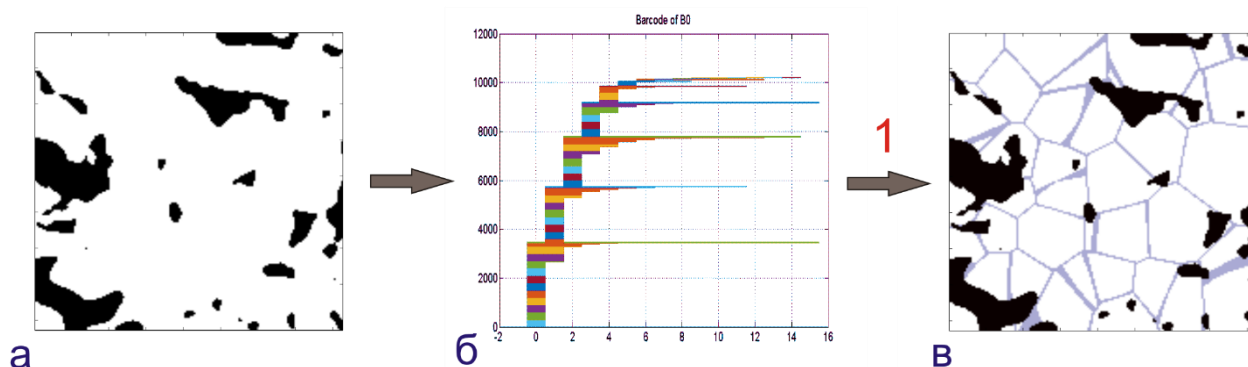


Рис. 1. Выделение отдельных зерен образца горной породы:
а) сегментированное КТ-изображение; б) диаграмма баркодов;
в) изображение после топологического разделения на зерна

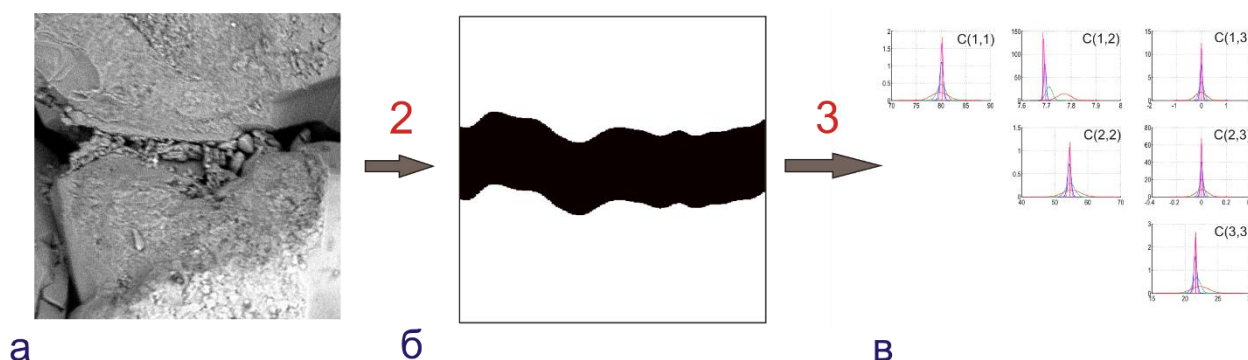


Рис. 2. Численная оценка эффективных упругих параметров модели, содержащей шероховатую прослойку:
а) микроскопическое SEM-изображение контакта зерен; б) статистическая модель шероховатого контакта зерен; в) плотность распределения компонент тензора упругости для модели б

При исследовании предложенным методом рассматриваются КТ-сканы образца песчаника с обнажения Берсимер (Австралия) с разрешением 3–5 мкм (рис. 1, а) и микроскопические изображения его фрагментов – контактов зерен (рис. 2, а). В качестве входных параметров для зерен кварца используются значения $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$, $v_p = 6000 \text{ м/с}$, $v_s = 4075 \text{ м/с}$. Для глины: $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$, $v_p = 2770 \text{ м/с}$, $v_s = 1520 \text{ м/с}$. Для каждой пары $\langle \sigma, I \rangle$ генерируется по 100 реализаций разломов, полученные тензоры упругости используются как входные параметры для геостатистического моделирования эффективного цемента, заполняющего границы. Проводятся три серии численных экспериментов. Первая – расчет упругих параметров для исходной модели цифрового ядра без топологического разбиения на отдельные зерна (рис. 3, а). Вторая серия – расчет упругих параметров для образца, в котором свойства цемента определяются геостатистически, но он всюду одинаковый (рис. 3, б). Третья серия – геостатистиче-

ское заполнение пространства между зернами – разные реализации цемента для разных границ (рис. 3, в). Для всех трех серий по полученным тензорам жесткости рассчитываются скорости продольных и поперечных волн, оцениваются их средние значения и стандартные отклонения (рис. 3). Видно, что в первом случае скорости завышены, поскольку скелет рассматривается как единое целое и является достаточно жестким. При введении в модель мягкого цемента между зернами скорости снижаются до величин, характерных для песчаников. При этом средние значения скоростей совпадают, а стандартное отклонение в третьей серии экспериментов ниже, что объясняется меньшим отношением характерного размера статистических неоднородностей к размеру модели.

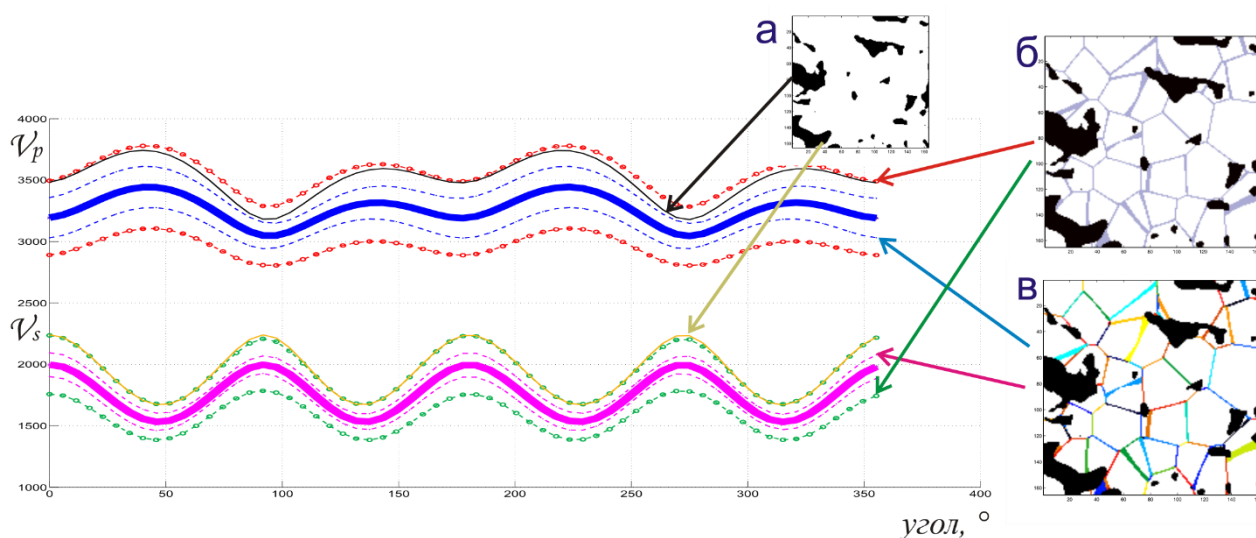


Рис. 3. Скорости продольных и поперечных волн, их средние значения (толстые линии) и стандартные отклонения (пунктирные линии):

- а) модель без прослоек цемента (скорости сплошными линиями);
- б) модель с одинаковым цементом во всех прослойках; в) модель с разными реализациями цемента для разных границ

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-55-20004, 16-05-00800, 17-05-00579, 17-05-00250.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние масштаба микротомографических изображений на оценку макромасштабных свойств породы / Я. В. Базайкин [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 38–47.
2. Analysis of high-resolution X-ray computed tomography images of Bentheim sandstone under elevated confining pressures / E.H. Saenger [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64, Issue 4. – P. 848–859.

© Т. С. Хачкова, Я. В. Базайкин, Д. Р. Колюхин, В. И. Костин,
В. В. Лисица, Г. В. Решетова, 2017

ТЕПЛОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ В РАЙОНЕ «БОЕВОЙ» СКВАЖИНЫ 104 СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Виталий Владимирович Романенко

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, 071100, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, начальник группы полевых исследований, тел. (72251)23413, e-mail: Romanenko@nnc.kz

Дмитрий Евгеньевич Аюнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Альберт Дмитриевич Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Сергей Алексеевич Казанцев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

Приводятся результаты температурных наблюдений в районе эпицентра «боевой» скважины 104. На участке фиксируется изменение температурного режима за период 2010–2017 гг. Наблюдения показывают сложное пространственное распределение температуры подземных вод, выделяются более прогретые зоны, отмечается тенденция увеличения температуры в разрезе при приближении к «боевой» скважине.

Ключевые слова: температурный мониторинг, температурный градиент, подземные воды, Семипалатинский полигон, подземный ядерный взрыв, температурные аномалии.

HEAT FEATURES AT THE SPOT OF «WARFARE» BOREHOLE 104 OF SEMIPALATINSK TEST SITE

Vitaliy V. Romanenko

«Institute of Radiation Safety and Ecology», branch of the Republican State Enterprise «National Nuclear center of the republic of Kazakhstan», 071100, Kazakhstan, Kurchatov, 2 Krasno-armeyskaya St., Team leader of field research group, tel. (72251)23413, e-mail: Romanenko@nnc.kz

Dmitry E. Ayunov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-25-91, e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Albert D. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Chief Researcher, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

Sergey A. Kazantsev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-25-91, e-mail: KazantsevSA@ipgg.sbras.ru

The results of temperature observations in the spot of «warfare» borehole 104. Recorded changes in temperature at the spot for the period 2010-2017. Observations show complicated temperature distribution of underground water. More warmed zones are distinguished. There was a trend of increasing temperature when approaching to the «warfare» borehole.

Key words: temperature monitoring, gradient, groundwater, Semipalatinsk test site, an underground nuclear explosion, temperature anomalies.

В результате многолетней деятельности Семипалатинского испытательного полигона (СИП) унаследована значительная экологическая проблема, связанная с последствиями проведения подземных ядерных испытаний (ПЯВ). Участки эпицентральных зон могут быть в полной мере отнесены к зонам экологического бедствия, поскольку являются хранилищами радиоактивных материалов с разрушенной геологической средой. Кроме неконтролируемого распространения радионуклидного загрязнения из очаговых зон, потенциальную опасность для окружающей среды представляют также выходы токсичных и горючих газов в атмосферу, являющиеся следствием современных геодинамических и природно-техногенных процессов (разуплотнение в разломных зонах, обрушение полостей, оседание территории, провалы).

Для выявления особенностей геоэкологической обстановки на приустьевых площадках «боевых» скважин организованы комплексные исследования на территории бывших испытательных площадок, где проводились ПЯВ – площадки «Балапан» и «Сары-Узень», расположенных на территории СИП. Работы направлены как на оценку текущей, так и на возможный прогноз геоэкологических процессов [1].

Одним из направлений по исследованиям долговременных поствзрывных процессов являются наблюдения за термальной активностью подземных вод в местах расположения эпицентров ПЯВ. Аномалии температуры и ее динамика в районах ПЯВ могут отражать остаточную активность процессов, инициированных подземными ядерными испытаниями. В данной работе приводятся результаты таких исследований на территории приустьевой площадки «боевой» скважины 104 испытательной площадки «Сары-Узень». Участок скважины 104 характеризуется струйной газопроницаемостью горных пород по имеющимся ослабленным структурам, которые в результате способствуют вертикальной миграции газов и образованию на дневной поверхности газовых аномалий в почвенном воздухе, а также изменению температурного режима участка.

«Боевая» скважина 104 расположена в центральной части площадки «Сары-Узень». ПЯВ в скважине произведен 21.07.1970 года. Заряд мощностью до 20 кт был заложен на глубине 225 м в песчаниках осадочно-вулканогенной толщи [2–4]. Согласно данным [5], в радиусе 200–250 м от расположения устья

скважины выявлена обширная зона техногенной трещиноватости в фундаменте, которая просматривается в интервале от кровли фундамента до отметки порядка 550 м. При этом ослабленные зоны имеют ограниченное распространение в радиусе не более 200–300 м. Результатами подтверждается, что наличие данных зон обусловлено деструктивным действием ПЯВ. Пространство, прилегающее к эпицентру ПЯВ, является зоной, сложенной трещиноватыми породами. По результатам поверхностной тепловой и атмохимической съемок фиксируются выходы газовых и нагретых флюидов.

Для исследования активности долговременных поствзрывных процессов исследовались температурные вариации в гидрогеологической скважине 104/4 (рис. 1), расположенной на краю воронки от взрыва «боевой» скважины 104. В скважине была установлена автономная станция температурного мониторинга [6] с расстановкой 9-и датчиков до глубины 43.1 м в период с 05.06.13 по 23.09.15. В этот период наблюдается стабильный температурный режим (рис. 2).



Рис. 1. Схема расположения исследовательских скважин возле «боевой» скважины № 104 на площадке «Сары-Узень»

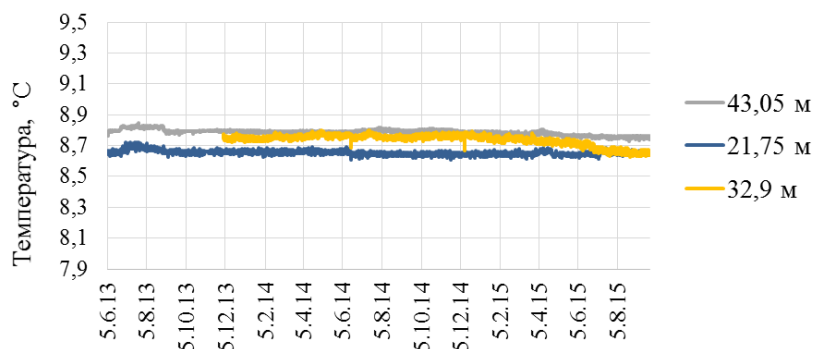


Рис. 2. Температуры нижних датчиков в скв. 104/4 на площадке «Сары-Узень» за период 5.06.2013–23.09.2015

С 23.09.15 косу удалось заглубить до 60.8 м. В период наблюдений с сентября 2015 по апрель 2016 г. данные показали стационарную температуру на глубинах 60.8 м, составившую 8.95 °С. Однако, если сравнивать с данными температурного каротажа 2010 года, температура на глубине 60 м тогда составляла 9.52 °С.

На рис. 3 обобщены каротажные и мониторинговые данные по температуре на глубине 43 м (ниже глубины годового теплообмена). Здесь мы наблюдаем относительно резкое понижение температуры с 9.16 °С до 8.83 °С в 2010–2012 гг. В дальнейшем понижение происходит с меньшей интенсивностью, к 2015 году температура составляет 8.76 °С. Таким образом, можно предположить, что за период с 2010 по 2015 г. на участке произошло изменение температурного режима, при этом новый режим вышел на относительную стабильность.

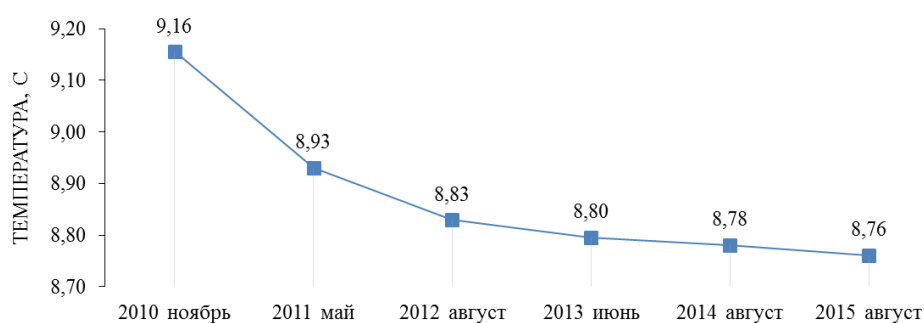


Рис. 3. Динамика температуры в скважине 104/4 на глубине 43 м за 2010-2017 гг.

В исследовательских скважинах 104/б, 104/с, 104/2, 104/4 (рис. 1) проводились температурный каротаж (рис. 4) в 2013–2014 гг. и повторные измерения в 2015 году, подтвердившие предыдущий результат.

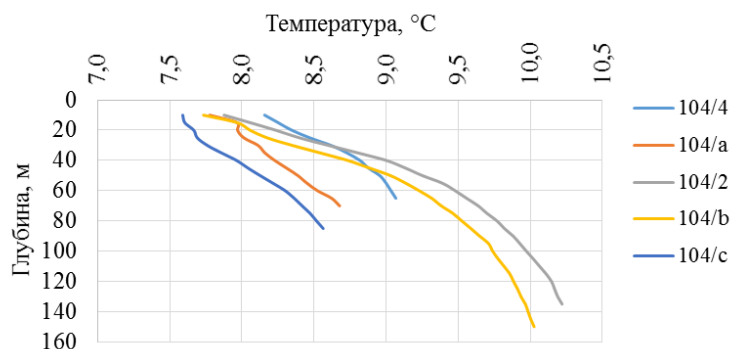


Рис. 4. Температура в исследовательских скважинах в районе «боевой» скважины № 104 на площадке «Сары-Узень» в 2015 году

Исследованный юго-восточный сектор от «боевой» скважины характеризуется большей прогреетостью (рис. 5) и выделяется относительно большими температурными градиентами в интервале 40–60 (таблица). Область наиболее высоких температур подземных вод наблюдается в районе скважины 104/2, расположенной в 140 м к юго-востоку от воронки. В ней температура на 40 м (глубина годового теплообмена) составила 9.0 °С (для 104/с и 104/а она составляет 7.78 и 8.24 °С), а температура на глубине 60 м на 1.25 °С выше температуры относительно наиболее холодного участка, характеризуемого скважиной 104/а. В скважинах северного сектора в интервале глубин 40–70 м градиенты в скважинах 104/2 и 104/б выделяются значениями в 14 мК/м на фоне 8–10 мК/м (см. таблицу). Также в секторе наблюдается понижение температуры в разрезе по мере удаления от «боевой» скважины (см. скважины 104/4, 104/а и 104/с на рис. 1). В обоих секторах можно говорить о наличии горизонтальной составляющей температурного градиента.

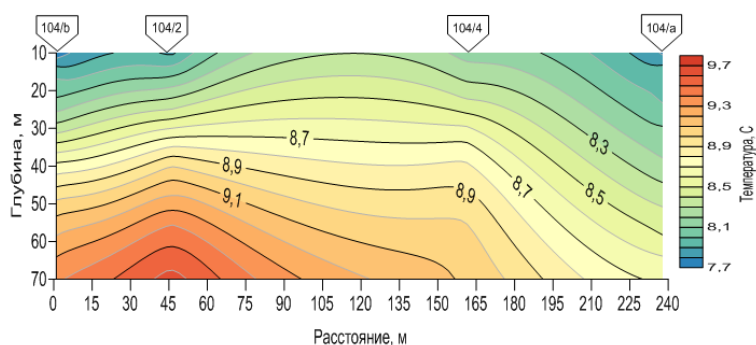


Рис. 5. Распределение температур в профиле скважин 104/б–104/а

Таблица

Температурный градиент в исследовательских скважинах

Градиент (диапазон глубин)	Скважина				
	104/4	104/а	104/2	104/б	104/с
G_1 , мК/м (40–60 м)	11	15	24	26	17
G_2 , мК/м (ниже 60 м)	8 (60–65 м)	10 (60–70 м)	14 (60–85 м)	14 (60–85 м)	10 (60–85 м)
G_3 , мК/м (100–135 м)	-	-	7	7	-

Таким образом, на участке вокруг «боевой» скважины 104 СИП имеет место весьма неравномерное распределение температурного поля, выделяются более прогретые участки, отмечается тенденция увеличения температуры в разрезе при приближении к «боевой» скважине. Температурные наблюдения позволяют утверждать, что пространство, прилегающее к эпицентру ПЯВ, является зоной активных тепловых процессов, которые обусловлены пространственным

распределением области разрушения горной породы в результате ПЯВ и передвижением по ним теплых флюидов. Фиксируемые тепловые аномалии мы склонны относить к долговременным поствзрывным процессам, природа которых может объясняться или остаточным теплом от ПЯВ, или изменением гидрологического режима, например, вследствие притока более теплых вод из более глубоких горизонтов по разуплотненному межблочному веществу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шайторов В.Н. Геоэкологическое районирование территории СИП по геолого-геофизическим данным (на примере участков “Балапан” и “Сары-узен”) // Вестник НЯЦ. – 2013. – Вып. 54. – 178 с.
2. Ядерные испытания СССР / Под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ИздАТ, 1997. – 304 с.
3. Семипалатинский полигон: хронология подземных ядерных взрывов и их первичные радиационные эффекты (1961–1989 гг.) / В.В. Горин, Г.А. Красилов и др. // Бюлл. Центра общественной информации по атомной энергии. Спецвыпуск. № 9. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1993.
4. Бочаров В.С., Зеленцов С.А., Михайлов В.Н. Характеристики 96 подземных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67.
5. Шайторов В.Н., Беяшов А.В. Геоэкологическое моделирование очаговых зон ПЯВ // Вестник НЯЦ. – 2013. – Вып. № 54. – 178 с.
6. Дучков А.Д., Казанцев С.А., Соколова Л.С. Автономный мониторинг температуры геологических объектов: аппаратура и результаты // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: тез. докл. 5 Междунар. симпозиума (г. Бишкек, 19–24 июня 2011 г.). В 2 т. – 2011. – Т. 2. – С. 23–30.

© В. В. Романенко, Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев, 2017

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ

Максим Витальевич Чубаров

Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, студент, тел. (913)944-94-55, e-mail: mynemih@gmail.com

Александр Александрович Власов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: vlasovaa@ipgg.sbras.ru

Александр Евгеньевич Шалагинов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (913)788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

В статье затронута проблема создания трехмерных геоэлектрических моделей с целью расчета синтетических сигналов, а также предложен алгоритм автоматизации построения этих моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне на основе результатов одномерной инверсии для программного средства Modem3D.

Ключевые слова: GMSH, Modem3D, построение трехмерных моделей, трехмерные модели, геоэлектрические модели, зондирование становлением поля в ближней зоне.

CONSTRUCTING THREE-DIMENSIONAL GEOELECTRIC MODEL FOR METHODS SENSING FORMATION NEAR FIELD BASED ON THE RESULTS OF ONE-DIMENSIONAL INVERSION

Maxim V. Chubarov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, tel. (913)944-94-55, e-mail: mynemih@gmail.com

Alexander A. Vlasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Researcher, e-mail: vlasovaa@ipgg.sbras.ru

Alexander E. Shalaginov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Researcher, tel. (913)788-91-31, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

The article touches upon the problem of creating three-dimensional geoelectric models to calculate the synthetic signals, as well as the automation of the algorithm proposed construction of these models for the method of sensing the emergence of near field on the basis of a one-dimensional inversion results Modem3D software tools.

Key words: GMSH, Modem3D, building three-dimensional models, three-dimensional models, geoelectric model, transient electromagnetic sounding.

Сегодня объекты исследования наземной геоэлектрики усложняются, и для решения прикладных задач часто недостаточно применения только одномерного моделирования. Возрастает число необъяснимых и неверно истолкованных сигналов, поэтому возникает необходимость в трехмерном моделировании. Тем не менее уже существуют мощные средства имитации сигналов в трехмерных средах, но остается достаточно сложная задача построения достоверной трехмерной модели. Построение трехмерной модели – сложный итеративный процесс, для начала которого требуется хорошее стартовое приближение. В качестве начальной модели может выступать трехмерная модель по одномерным инверсиям. Процесс построения занимает у интерпретатора достаточно много сил и времени. В статье предложен алгоритм автоматизации построения трехмерной геоэлектрической модели.

Алгоритм построения трехмерной модели описан на основе результатов, полученных методом ЗСБ, с полигона в Чуйской степи, на юго-востоке села Мухор-Тархата (рис. 1).

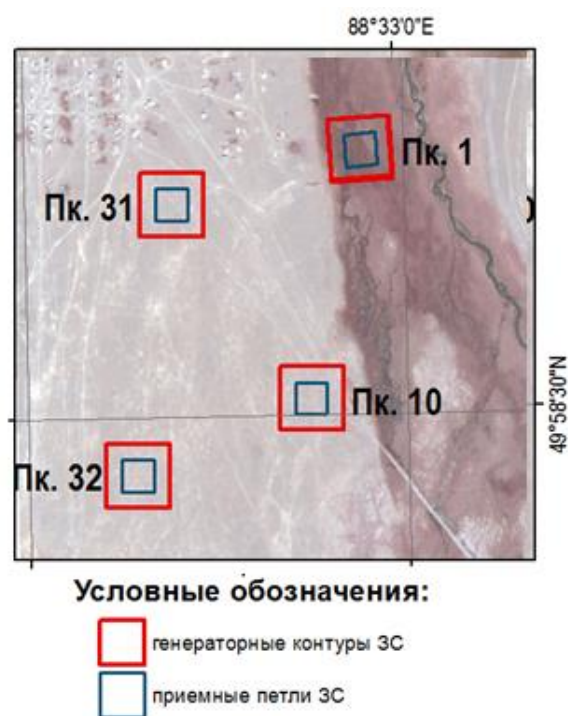


Рис. 1. Полигон Мухор-Тархата

Предложенный алгоритм (рис. 2) позволяет решить три основных задачи – построение трехмерной модели, составление для построенной модели расчетной сети и оценка полученных результатов. Экспериментальные данные согласуются с синтетическим сигналом одномерных моделей, поэтому далее результаты трехмерного моделирования (трехмерная модель) сравниваются с синтетическим сигналом одномерного моделирования, что позволяет сравнивать данные на более широком временном диапазоне и для трехмерного моделирования оценивать

времени, на которых начинают влиять граничные условия. Также важна оценка качества полученной расчетной сети. В случае малого количества узлов в финальных расчетах получится большая погрешность. В случае большого количества узлов увеличивается точность, а также время расчетов.

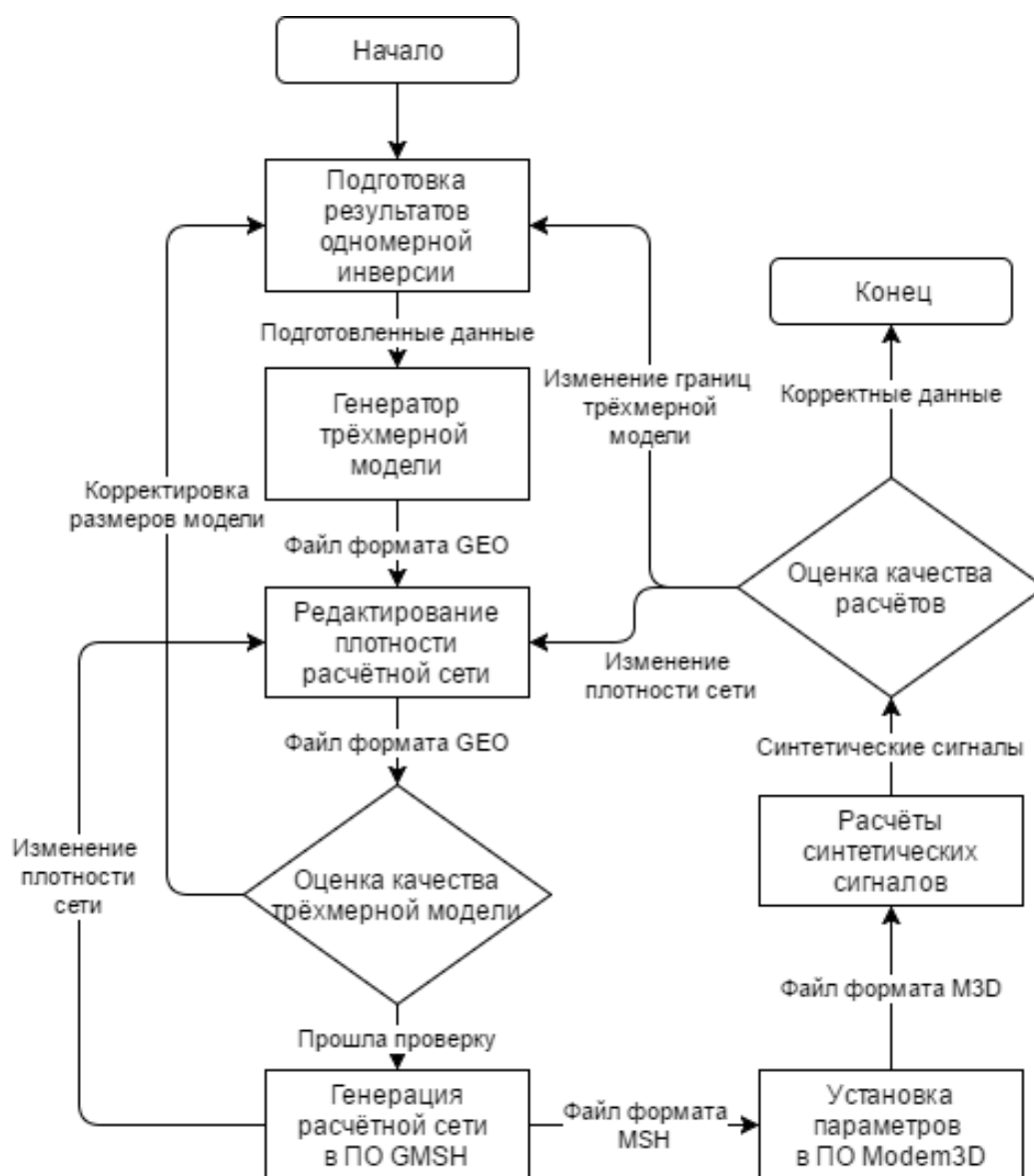


Рис. 2. Алгоритм построения трехмерных геоэлектрических моделей

Важной особенностью алгоритма является то, что он позволяет на определенных шагах использовать обратную связь – возвращаться на ранние шаги с целью корректировки данных, используемых в работе алгоритма.

Для получения результатов моделирования необходимо выполнить следующие действия.

- Автоматически создать файл формата GEO (файл, содержащий параметры моделей, координаты точек пикетов, границ моделей, а также связи между

ними) с трехмерной геометрией. Для каждого пикета сгенерировать трехмерную модель, соответствующую одномерной модели, для оценки качества расчетной сети. При помощи алгоритма Вороного, на вход которому подаются результаты одномерной инверсии [1], разделить исследуемую область на связанные участки. Центром каждого участка должны быть координаты центров исследуемых петель. На каждой итерации возможно возвращение к ранним шагам с целью корректировки данных.

- На основе полученной модели сгенерировать трехмерную расчетную сеть при помощи ПО GMSH [2]. В качестве алгоритма генерации сети используется алгоритм триангуляции Делоне. В случае если в построенной сети оказалось слишком много элементов либо качество элементов такое, что дальнейшие расчеты приводят к заикливанию, интерпретатор может вернуться к исходному файлу формата GEO и поправить его вручную. Варианты правки – расширение границ либо уплотнение расчетной сети в узлах.

- Расчетную сеть загрузить в ПО Modem3D [3] для установления сопротивления каждому объему трехмерной геометрии. Кроме сопротивления необходимо задать магнитную проницаемость среды. В случае несвязности компонентов интерпретатор может корректировать исходный файл либо провести эксперимент с новыми данными.

- Для полученной трехмерной модели среды выполнить расчеты синтетических сигналов ЗСБ при помощи Modem3D. Кроме того, расчеты также выполнить для трехмерных моделей [4], соответствующих одномерным моделям, с целью оценки качества моделирования. При достаточно спорных результатах интерпретатор может перейти к первому пункту и скорректировать входные данные на свое усмотрение с целью получить более точные расчеты.

Итогом выполнения алгоритма является трехмерная геоэлектрическая модель (рис. 3) и рассчитанные синтетические сигналы.

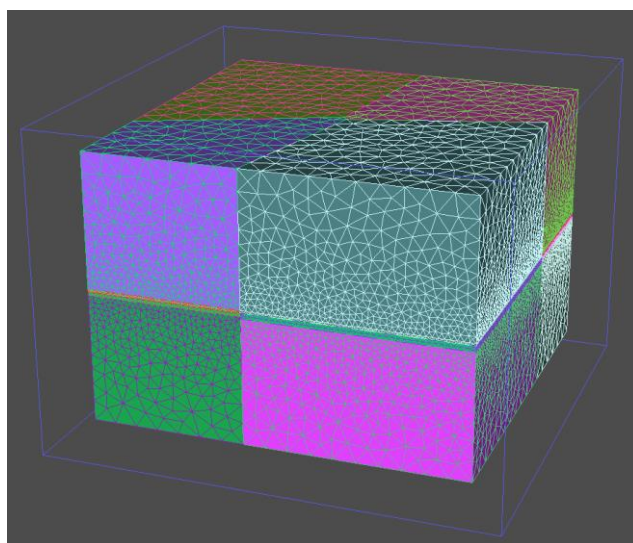


Рис. 3. Трехмерная геоэлектрическая модель

В результате работы алгоритма (рис. 4) на тестовых данных были получены результаты, соответствующие погрешности в 5 % на ранних временах, и расхождение результатов на поздних, что обусловлено эффектами трехмерности. Исходя из полученных результатов, интерпретатор может делать выводы по качеству эксперимента.

Для дальнейшей автоматизации процесса построения трехмерной модели необходимо совместно с разработчиками Modem3D реализовать возможность задания сопротивления объемов в автоматическом консольном режиме. В настоящее время эта задача решается только вручную с помощью пользовательского интерфейса.

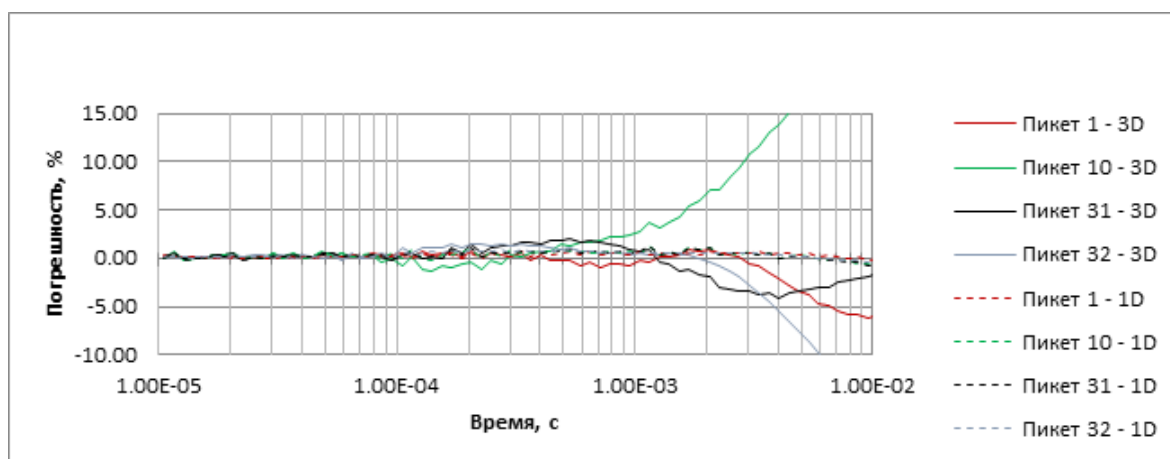


Рис. 4. Результаты моделирования

Кроме того, для построения более реалистичных моделей предполагается реализовать возможность в автоматическом режиме добавлять искусственные промежуточные модели с плавным изменением параметров между точками измерения.

Также для быстрого схождения к решению в Modem3D обязательно должен применяться встроенный в GMSH алгоритм оптимизации расчетной сети NETGEN [5], который позволяет исключить из расчетной сети вырожденные тетраэдры. Однако сегодня реализация этого алгоритма работает нестабильно и необходимо совместно с разработчиками (или своими силами), используя открытые исходные коды, исправить имеющиеся в ней ошибки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафиуллина А. А., Власов А. А. Автоматическое построение трёхмерных геоэлектрических моделей по результатам одномерной интерпретации с помощью диаграмм Вороного // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 18–22.

2. GMSH. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. – URL: <http://gmsh.info/> (дата обращения: 21.09.16).
3. Программное обеспечение модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации / М.И. Иванов, В.А. Катешов, И.А. Кремер, М.И. Эпов // Журнал Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 242–245.
4. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Суродина И.В. Трехмерное моделирование сложных геологических структур (на примере Тункинской впадины Байкальской рифтовой зоны) // Геофизика. – № 1. – 2007. – С. 36–41.
5. Netgen Mesh Generator. – URL: <https://sourceforge.net/p/netgen-mesher/git/ci/master/tree/> (дата обращения: 27.09.16).

© М. В. Чубаров, А. А. Власов, А. Е. Шалагинов, 2017

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН
СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО ЗДАНИЯ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТАЙВАНИ, КОРПУС ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА, г. ТАЙБЭЙ)**

Алексей Владимирович Лисейкин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер-геофизик, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.sbras.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

Методом стоячих волн исследовано здание Гражданского строительства Национального университета Тайвани в г. Тайбэй, оснащенное системой сейсмоизоляции на резинометаллических опорах. Предложен способ оценки эффективности сейсмоизоляции, основанный на сравнении зарегистрированных колебаний от землетрясений различной интенсивности с теоретическими сейсмограммами, построенными с учетом результатов обследования здания методом стоячих волн.

Ключевые слова: сейсмоизоляция, сейсмоустойчивость, метод стоячих волн, теоретические акселерограммы.

**RESULTS OF INVESTIGATION OF SEISMIC ISOLATED BUILDING
BY THE STANDING WAVES METHOD (NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY
CIVIL ENGINEERING BUILDING, TAIPEI)**

Alexey V. Liseikin

Seismological Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (SB GS RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Leading Geophysicist, tel. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

Victor S. Seleznev

Seismological Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (SB GS RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Alexey A. Briksin

Seismological Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (SB GS RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Deputy director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

We studied the Civil Engineering Building at National Taiwan University in Taipei that equipped with seismic isolation system on rubber-metal bearings by method of standing waves. We proposed a method for evaluating the effectiveness of seismic isolation, based on a comparison of the registered vibrations from earthquakes of various intensities with the theoretical seismograms that calculated based on the results of the survey of the building by standing waves.

Key words: seismic isolation, seismic resistance, a method of standing waves, theoretical accelerograms.

Для защиты зданий и сооружений от разрушений во время землетрясений применяются различные виды сейсмоизоляций. Из них широко распространены в России и за рубежом сейсмозащиты на основе резинометаллических опор. Как показывает анализ опубликованной литературы, подавляющее большинство исследователей дает оценку сейсмостойкости зданий на основе теоретических расчетов. Вместе с тем имеющаяся у специалистов ФИЦ ЕГС РАН практика экспериментального исследования собственных колебаний различных объектов (обследовано более 100 сооружений) показывает, что без привлечения данных о реальных колебаниях практически невозможно построить адекватную математическую модель здания или сооружения. А значит, расчеты сейсмостойкости таких объектов будут недостаточно точными. В работе [1] на примере исследования двух зданий с разными типами сейсмозащиты («гибкий» этаж и резинометаллические опоры) показано, что метод стоячих волн можно применять для изучения собственных колебаний сейсмоизолированных зданий и делать качественные выводы об эффективности выполненной сейсмозащиты. Недостатком данных исследований является то, что нет анализа реакции здания на реальное сейсмическое воздействие. Настоящая работа продолжает эти исследования на примере другого сейсмоизолированного здания, оснащенного сейсмометрической системой, фиксирующей сейсмические воздействия.

В 2015 году специалистами ФИЦ ЕГС РАН выполнено детальное обследование здания гражданского строительства национального университета Тайвани (NTU Civil Engineering Building, далее – NTU СЕВ (рис.1а). Между первым и вторым этажами расположен сейсмоизоляционный уровень, включающий набор резинометаллических опор и вязкостных демпферов. На здании установлена сейсмометрическая система, регистрирующая крупные сейсмические воздействия акселерометрами, установленными в ряде точек на сооружении. Исследование здания выполнялось по методике, описанной в работах [2–5]. Регистрация микросейсмических колебаний выполнялась при помощи автономных трехкомпонентных регистраторов «Байкал-АСН», разработанных в ФИЦ ЕГС РАН, всего было выполнено измерений в 244 различных точках (рис. 1, б). После проведения регистрации была выполнена цифровая обработка данных для пересчета разновременных колебаний в одновременные согласно методике [5]. На рис. 1, в и г представлены карты амплитуд колебаний, распределенные по вертикальной плоскости, для каждой из форм собственных колебаний в поперечном и продольном направлении соответственно.

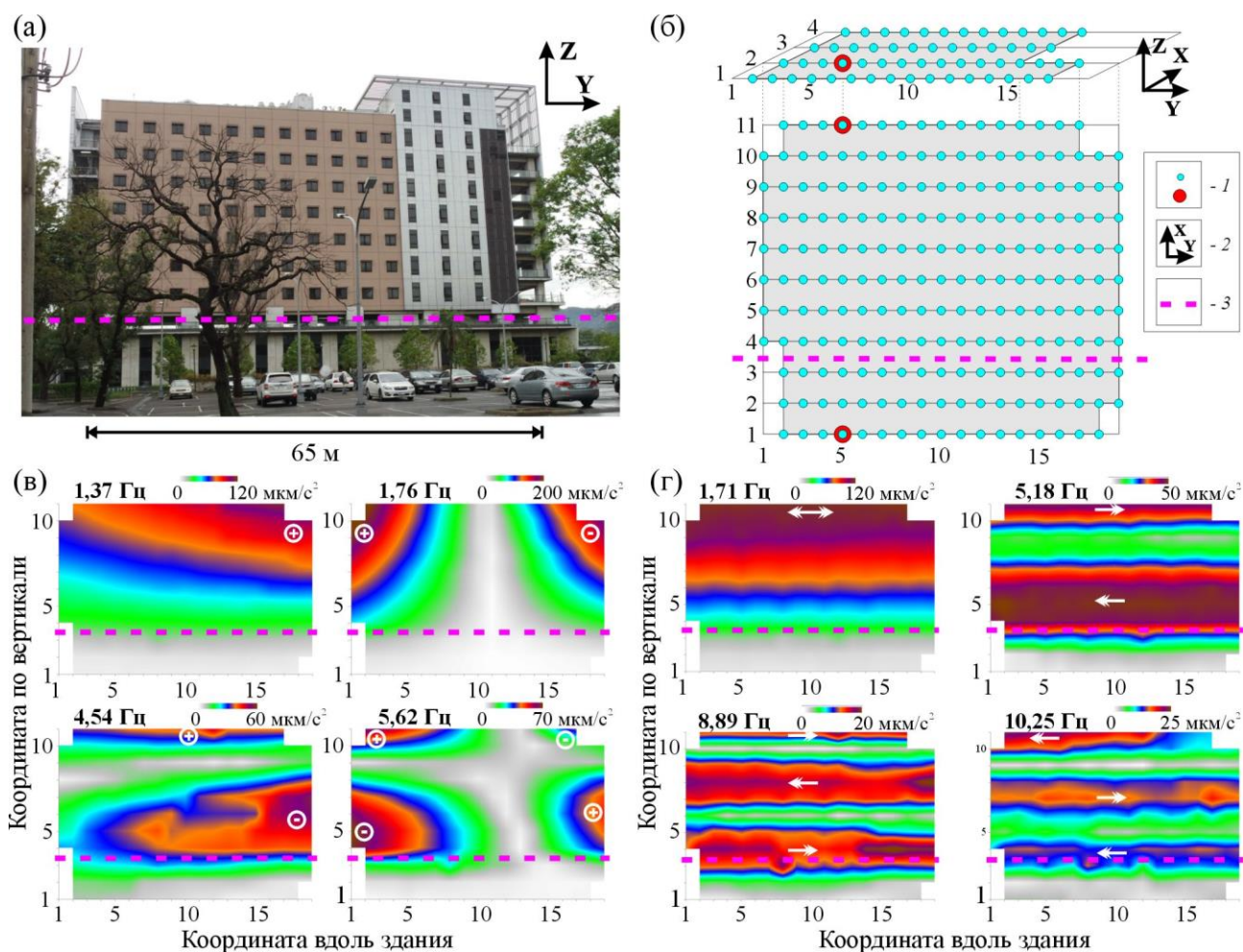


Рис. 1. Здание NTU СЕВ (а), схема регистрации (б) и карты колебаний первых четырех форм в поперечном (в) и продольном (г) направлениях.

1 – положение пунктов регистрации и опорных точек соответственно;

2 – направления осей сейсмоприемников;

3 – место сейсмоизоляционного уровня

Из рис. 1, в видно, что для первых четырех форм собственных поперечных колебаний здания амплитуды на уровне сейсмоизоляции отличны от нуля и увеличиваются с высотой сооружения. Из рис. 1, г, где показаны карты амплитуд собственных продольных колебаний, видно, что только для первой формы, с частотой 1,71 Гц, амплитуды колебаний на уровнях ниже сейсмоизоляции близки к нулю и монотонно увеличиваются с высотой здания. Судя по остальным формам собственных продольных колебаний здания, этаж под сейсмоизоляцией колеблется в фазе с колебаниями вышестоящих этажей. Таким образом, в представленных результатах не отмечается скачкообразного изменения амплитуд колебаний при переходе через сейсмоизоляцию снизу вверх.

Для того чтобы проверить экспериментально, как ведет себя здание при воздействии от землетрясений различной интенсивности, мы проанализировали

записи с имеющейся системы сейсмического мониторинга. Были выбраны два землетрясения, с магнитудой 6,0 на расстоянии 140 км от здания и 6,4 на расстоянии 120 км соответственно (рис. 2, а). Первое из них мы условно назвали «слабым», а второе – «сильным». По шкале МСК-64 величины этих воздействий на уровне основания здания составляли 3 и 4 балла соответственно.

В первую очередь мы рассчитали, как колебалось бы здание в линейном режиме. Для этого, в соответствии с методикой [2], мы рассчитали частотные характеристики фильтров Винера h_1 и h_2 , обеспечивающих пересчет колебаний из точки 2 в точку 3 и из точки 3 в точку 4 (рис. 2, б) по следующей формуле:

$$h(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_1(\omega) \bar{F}_0^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_0(\omega)|^2}, \quad (1)$$

где $h(\omega)$ – частотная характеристика фильтра Винера для пересчета колебаний между двумя точками; $\bar{F}_1(\omega)$ and $\bar{F}_0(\omega)$ – преобразования Фурье фрагментов одновременных записей в каждой из двух точек; n – количество таких фрагментов.

Следующим шагом мы рассчитали последовательно две свертки между записью землетрясения и функциями h_1 и h_2 . В качестве входного сигнала использовали запись землетрясения, полученную в точке 1 сейсмометрической системы, предполагая, что записи в точках 1 и 2 идентичны. К получившейся записи прибавили исходную запись землетрясения, моделируя таким образом «бегущие» волны в здании. В результате мы получили теоретическую акселерограмму в точке 4, описывающую колебания верхней части здания в результате воздействия от указанного землетрясения. На заключительном этапе мы сравнили теоретическую акселерограмму с реальной записью землетрясения в верхней части здания (рис. 2, в).

Из рис. 2, в видно, что в случае «слабого» воздействия теоретическая и реальная акселерограммы практически идентичны. Однако при «сильном» воздействии реальная акселерограмма примерно в 3–4 раза меньше по амплитуде, чем теоретическая. Это объясняется следующим образом. Теоретическая акселерограмма от землетрясения в верхней части здания была получена при использовании фильтров Винера, которые были рассчитаны по данным микросейсмических колебаний. Амплитуды этих колебаний крайне малы, и мы можем полагать, что в этом случае зависимость между колебаниями в основании здания и в верхней его части практически линейная. Когда было зафиксировано «слабое» землетрясение, сейсмоизоляция не проявила себя и зависимость между колебаниями осталась практически линейная. И только начиная с некоторой амплитуды (в нашем случае это землетрясение с амплитудой у основания здания около 12 см/с^2 , что соответствует 4-м баллам) зависимость становится нелинейной и наблюдается ослабление колебаний относительно предсказанных моделью.

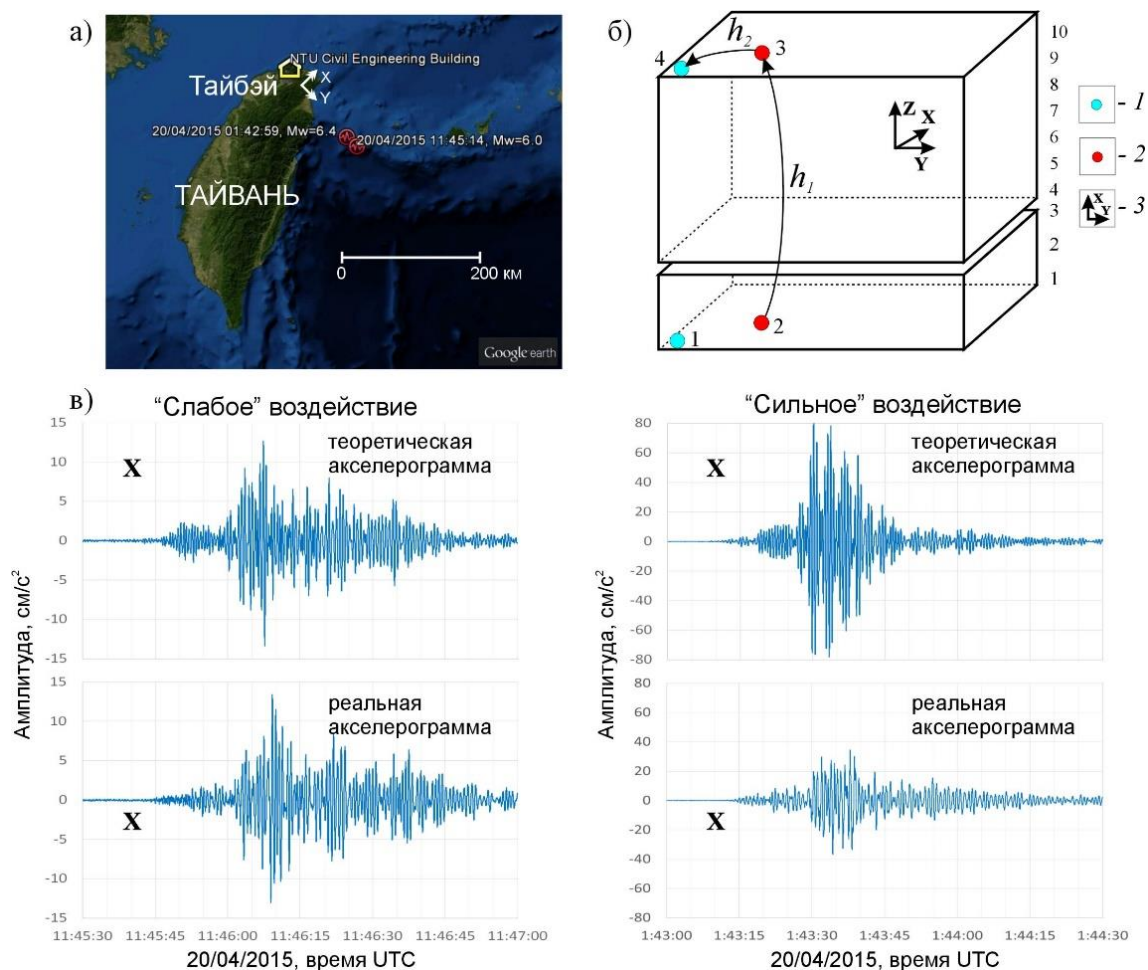


Рис. 2. Результаты оценки сейсмического воздействия на здание от землетрясений:

(а) – схема положения здания и эпицентров землетрясений; (б) – схема теоретического расчета акселерограмм; (в) – сравнение расчетных и реальных акселерограмм от землетрясений. 1 – точки сейсмометрической системы здания; 2 – опорные точки; 3 – направления осей сейсмоприемника

В заключение подведем итоги.

1. Предложен способ оценки эффективности сейсмоизоляции зданий на основе сравнения сейсмограмм от реальных землетрясений и теоретических сейсмограмм, рассчитанных на основе результатов обследования здания методом стоячих волн.

2. Экспериментально установлено, что при малых амплитудах колебаний (до 3-х баллов по шкале МСК-64) система сейсмоизоляции здания гражданского строительства национального университета Тайвани практически не проявляет себя. При более интенсивном воздействии (4 балла) амплитуды колебаний верхней части здания в 3–4 раза ниже предсказанных линейной моделью. Предполагается, что в этом случае начинают проявляться эффекты, связанные с нелинейной реакцией резинометаллических опор на сейсмические воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2015. – Т.42, № 4. – С. 37–64.
2. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах и др. // Геология и геофизика. – 2002. – № 2. – С. 192–206.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20–24.
4. Способ определения физического состояния зданий и сооружений: пат. РФ № 2140625 / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, В.Г. Барышев, А.П. Кузьменко. – МПК: G01M7/00, 17.02.1998.
5. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений: пат. на изобретение РФ №2150684 / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.П. Кузьменко, В.Г. Барышев, В.С. Сабуров. – МПК: G01M7/00; G01V1/00 Бюл. №16, 10.06.2000.

© А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, А. А. Брыксин, 2017

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СОВМЕСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПЛОЩАДНЫХ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Михаил Александрович Корсаков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)333-28-16, e-mail: KorsakovMA@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, зав. лабораторией, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, главный научный сотрудник, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

В статье описана доработанная научно-исследовательская версия программно-алгоритмической системы для совместной инверсии данных импульсных индукционных зондирований геологических сред с учетом низкочастотной дисперсии электрической проводимости. В новой версии представлена возможность работы с площадными и многокомпонентными данными измерений.

Ключевые слова: инверсия, импульсные зондирования, индукционно-вызванная поляризация, совместная инверсия, площадные данные, многокомпонентные измерения.

GEOPHYSICAL MODELLING AND JOINT INTERPRETATION SYSTEM FOR TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS IN CONDUCTIVE POLARIZABLE MEDIUM

Mikhail A. Korsakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)333-28-16, e-mail: KorsakovMA@ipgg.sbras.ru

Evgeny Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

Nikolai O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, General Researcher, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

The paper discusses upgraded version of the computer system for joint inversion transient electromagnetic data in conductive and polarizable geological medium for squared and multi-components TEM soundings.

Key words: inverse problem, transient electromagnetics, inductively induced polarization, joint inversion, multicomponent measurements.

Первая версия интерпретационной системы <ТЕМ-IP> была представлена в работах [1, 2, 6] и предназначалась, для инверсии данных нестационарных индукционных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации (ВП) путем последовательной (попикетной) обработки. Программа показала высокую эффективность при обработке данных, полученных при поисках таликовых зон в районе Пяяхинского нефтегазового месторождения [7, 8].

В работах [3, 4] показано, что совместная инверсия результатов индукционных зондирований (для установок разной геометрии и/или размера) с учетом частотной дисперсии электропроводности позволяет оценивать параметры быстрой ВП даже в условиях сильного проявления индукционных эффектов. В связи с этим система была доработана и использовалась для совместной инверсии переходных характеристик, измеренных многоразносными установками при нефтепоисковых работах в Восточной Сибири и Западной Якутии [5].

В последние годы в практике индукционных импульсных зондирований используются плотные сети площадных наблюдений, когда от одного источника выполняются измерения в десятках пикетов. При этом точки измерения равномерно расположены как внутри генераторной петли, так и в ближайшей окрестности. Подобные схемы наблюдения эффективны при решении разных задач: инженерных, рудопоисковых или структурных (при небольших, относительно размеров источника, глубинах до целевых объектов). Основная идея такой методики измерений состоит в том, что внутри генераторного контура и его ближайшей окрестности в условиях однородно-слоистой среды прямое поле источника также должно быть однородно. Соответственно густая сеть приемных датчиков позволяет детально картировать именно особенности и неоднородность геоэлектрического строения среды.

Характерной чертой современных электроразведочных работ, особенно при решении инженерных и рудопоисковых задач, является то, что местность, на которой производятся измерения, урбанизирована либо имеет сложный рельеф. Это затрудняет раскладку генераторных петель. Вместо квадратных или прямоугольных получаются контуры, которые представляют собой замкнутые ломаные линии (рис. 1).

В первой версии системы <ТЕМ-IP> процедура прямой задачи (ПЗ) была реализована именно для примитивных форм генераторных контуров (квадрат, прямоугольник). В случае несоответствия формы источника данным примитивам приходилось вводить поправки в момент установки. Во входных данных ПЗ измерительные установки задавались указанием размеров сторон генераторной и приемной петель и расстоянием между их центрами. Очевидно, что для описанной выше методики измерений, предполагающей близкое расположение приемных рамок (датчиков) к сторонам генераторной петли, нужна более детальная параметризация измерительной установки. Исходя из этого требования, была спроектирована и реализована новая версия прямой задачи программы <ТЕМ-IP>.

Изменения были внесены в организацию проектов. Добавлена структурная единица «Источник», позволяющая группировать пикеты по принадлежности к конкретной генераторной петле. Координаты источника и приемников могут

быть описаны с помощью файлов GPS-трекера. Расчет параметров измерительной установки для произвольного генераторного контура полностью автоматизирован за счет использования процедур для:

- вычисления площади генераторной петли;
- определения центра тяжести области контура источника;
- расчета расстояний и азимутальных углов в системах координат, связанных с элементами замкнутой ломаной линии, описывающей источник.

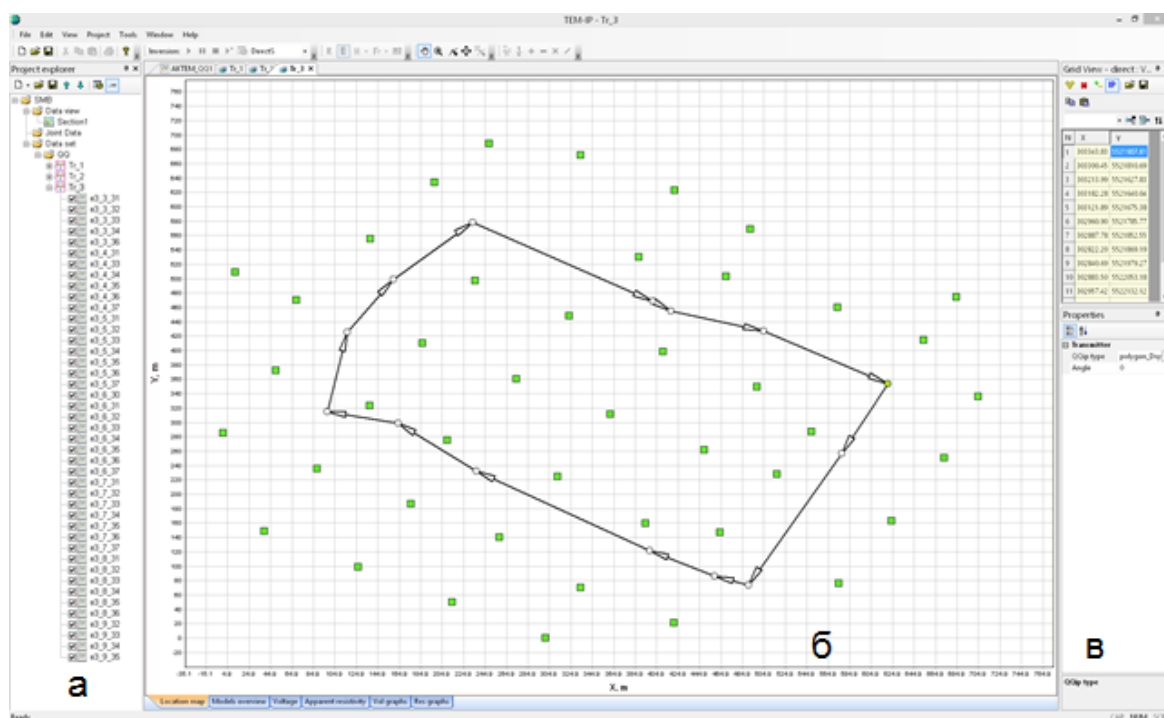


Рис. 1. Графический интерфейс системы <ТЕМ-IP>:

а – панель структуры проекта; б – панель визуализации генераторного контура и ассоциированных с ним пикетов; в – панель для ввода координатного трека генераторного контура

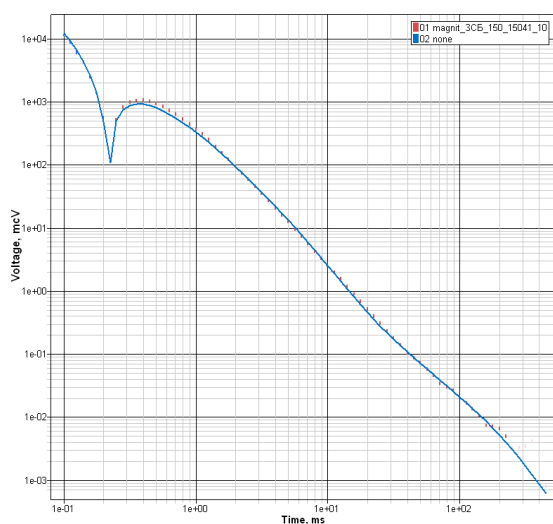
Вместе с тем в программе сохранилась возможность использования традиционных форматов данных, поставляемых известными видами аппаратуры (TEM-Fast, FastSnap, SGS-TEM, Цикл и др.).

Система дополнена возможностью осуществлять автоматизированный подбор произвольного множества экспериментальных кривых. Стартовая модель может быть назначена по выбору пользователя индивидуально для каждой точки измерения либо наследоваться при переходе от точки к точке. Последовательность перехода от пикета к пикету формируется при выборе группы инвертируемых данных. Автоматический подбор осуществляется в рамках избранного профиля или на множестве пикетов, ассоциированных с конкретным генераторным контуром. Данная опция сделала систему до определенной степени автономной, не требующей присутствия интерпретатора, при подборе большого количества данных.

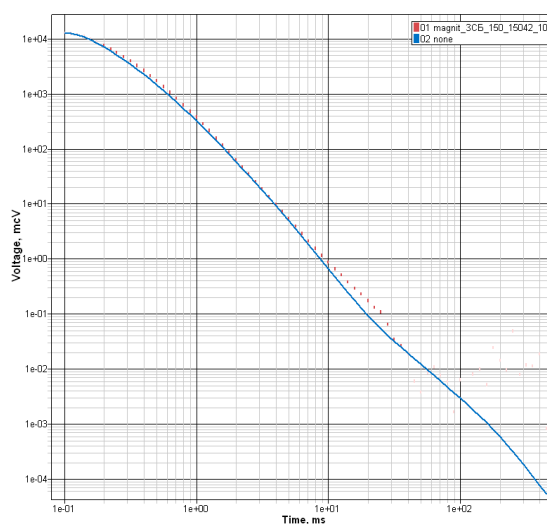
В последние годы многоразносные и площадные зондирования осуществляются с использованием компактных индукционных датчиков, имеющих такую же эффективную площадь, как одновитковые квадратные петли с размерами сторон от десятков до сотен метров. Малый размер датчиков позволяет использовать их для приема как вертикальной, так и горизонтальных компонент поля. В соответствии с этими возможностями измерения различных компонент поля доработаны процедуры прямой и обратной задач. На рис. 2 показан куб из измерительных датчиков ПДИ-50 (эквивалент одновитковой петли $50 \times 50 \text{ м}^2$) и результаты совместной инверсии экспериментальных данных, измеренных вертикальной и радиальной компонент э.д.с. Совместный подбор в рамках одной модели уменьшает количество эквивалентных моделей.



а



б



в

Рис. 2. Трехкомпонентный приемный датчик ПДИ-50 (а).
Результаты совместной инверсии э.д.с., индуцируемой в горизонтальной (б)
и вертикальной (в) рамках

Выводы

Новая структура проектов системы <ТЕМ-IP> позволяет группировать данные, ассоциируя генераторные петли и соответствующие им приемные пикеты для визуализации и совместной инверсии. Разработана процедура прямой задачи для расчета полного набора компонент магнитного поля и э.д.с. от источника в виде замкнутого контура произвольной формы. Кроме этого, в системе предусмотрены процедуры ввода параметров измерительной установки, использующих координатные файлы GPS-трекера для описания генераторного контура и множества приемных пикетов. Новая версия системы испытана при обработке результатов многокомпонентных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» – Система для интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред [Электронный ресурс] // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «ГЕОБАЙКАЛ-2010». – Иркутск, 2010. – 2 с.
2. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55(8). – С. 1282–1293.
3. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. – 2009а. – Т. 50, № 2. – С. 181–190.
4. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. – 2009б. – Т. 31, № 4. – С. 104–118.
5. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учёт индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. – 2013. – № 1. – С. 35–40.
6. Корсаков М. А., Антонов Е. Ю., Кожевников Н. О. Программно-алгоритмическая система для моделирования и совместной интерпретации данных импульсных индукционных зондирований с учётом вызванной поляризации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 182–186.
7. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, А.К. Захаркин, М.А. Корсаков // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55(12). – С. 1815–1827.
8. Проявления и учёт индукционно-вызванной поляризации при поисках таликовых зон в районе Пякхинского нефтегазового месторождения / Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, М. А. Корсаков, А. К. Захаркин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 168–173.

© М. А. Корсаков, Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников, 2017

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА
КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ САЛАИРА
ПО ДАННЫМ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

Артем Викторович Китаев

ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех», 630087, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 30/1, Бизнес-центр «На Горской», главный геофизик, тел. (383)230-15-29, e-mail: kitaev@sibgeotech.ru

Георгий Михайлович Тригубович

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, научный руководитель геофизических исследований; ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», доктор технических наук, профессор, директор, тел. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Олег Владимирович Мурзин

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, заместитель директора по науке, тел. (383)222-57-40, e-mail: o_murzin@mail.ru

Приводится краткое описание технологии комплексного анализа данных гамма-спектрометрии, магнито- и электроразведки, полученных при аэрогеофизической съемке вертолетной платформой «Импульс-А7» в рамках работ по составлению карт закономерностей размещения и прогноза колчеданно-полиметаллического оруденения основных рудных районов Салаира.

Ключевые слова: перспективные зоны, аномалии, геофизические признаки, рудная минерализация, геофизические поля, аэрогеофизические данные.

**REGULARITIES OF PLACEMENT AND CRITERION OF THE FORECAST
OF PYRITE-POLYMETALLIC MINERALIZATION OF SALAIR ACCORDING
TO AEROGEOPHYSICAL SURVEYS**

Artem V. Kitaev

Geophysical company «Sibgeotekh», 630087, Russia, Novosibirsk, 30/1 Karl Marx Prospect, Business Center «Na Gorskoy», Chief Geophysicist, tel. (383)230-15-29, e-mail: kitaev@sibgeotech.ru

George M. Trigubovich

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Scientific Adviser of Geophysical Research; Aerogeophysical Surveys Corporation, D. Sc., Professor, Director, tel. (383)222-53-24, e-mail: tgm@sniiggims.ru

Oleg V. Murzin

«Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources» JSC, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny Prospect, Deputy Director for Science, tel. (383)222-57-40, e-mail: o_murzin@mail.ru

The short description of technology of the complex analysis of data of gamma spectrometry, magnetic prospecting and the electroinvestigations received at aerogeophysical surveys by the helicopter platform «Impuls-A7» within works on drawing up cards of regularities of placement and the forecast of pyrite-polymetallic mineralization Salair's of the main ore areas.

Key words: perspective zones, anomalies, geophysical signs, ore mineralization, geophysical fields, aero geophysical data.

Исходным материалом при подготовке геофизических основ масштаба 1:50 000 прогнозирования месторождений колчеданно-полиметаллического и сопряженного с ним залотрудного типов для отдельных рудных узлов Салаирской золото-полиметаллической минерагенической зоны послужили результаты комплексной аэрогеофизической съемки (КАГС), проведенной ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех» (ООО ГП «Сибгеотех») с использованием вертолетной разведочной платформы «Импульс-А7» [5].

Основной задачей являлось выявление характера отражения в наблюдаемых геофизических полях известных рудоносных структур Урского и Каменушенского рудных полей и выделение новых перспективных площадей по выявленным закономерностям. Прделанная работа по сути своей является экспресс-анализом закономерностей изменения геофизических параметров, связанных с процессом рудообразования [1].

На первом этапе была построена геолого-геофизическая модель структур, вмещающих Каменушенское месторождение, оценена информативность геофизических полей и их трансформант, определены основные черты закономерностей их изменения над рудовмещающими структурами.

Плотностные и магнитные модели были построены с помощью модулей программного комплекса COSCAD-3D [6]. Априорной информацией послужили материалы Салаирской геолого-поисковой партии и данные о плотностных и магнитных свойствах горных пород из обобщенных материалов по центральной части Салаира.

Построение геоэлектрических разрезов проводилось в программной среде EM DataProcessor. Подбор параметров одномерной горизонтально-слоистой геоэлектрической модели для каждой полученной точки зондирования проводился на основе базовой модели, полученной в результате 1D-инверсии и осредненных данных КС каротажа в близлежащих скважинах [4, 7].

Отмечено, что границы рудной зоны довольно отчетливо выражаются в физических полях. Рудные тела Вершинного рудопроявления и Каменушинского медного месторождения в поле силы тяжести привязаны к локальным высоко градиентным зонам, в поле сопротивлений располагаются в зоне высоких значений $\rho_k > 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В магнитном поле тела тяготеют к положительным локальным аномалиям третьего порядка внутри локальных отрицательных аномалий. В поле комплексного показателя $K_{Th/U}$ отмечается приближенность рудных зон к локальным минимумам. Над всей структурой отмечаются повышенные ($\eta_k > 2\%$) значения вызванной поляризации (рис. 1, Г).

На втором этапе на основе модели определен сценарий локализации и визуального усиления выявленных закономерностей. Проведено построение площадных распределений компонент геофизических полей, эмпирически связанных с зонами возможной рудной минерализации, на площадях известных структур Урского и Каменушенского рудных полей и оценена возможность их комплексного использования для выделения перспективных на поиски полиметаллического оруденения участков.

Для площадной оценки анизотропии геофизических полей по каждому геофизическому признаку были рассчитаны значения двумерной автокорреляционной функции (ДАКФ) [3] (рис. 1, А–В). Максимальный корреляционный эффект достигнут: для поля сопротивлений в Северо-Западном направлении; для локального магнитного поля в двух направлениях (СЗ и СВ), при этом энергия и протяженность локальных составляющих СЗ направления значительно выше аномалий СВ направления; для поля комплексных аномалий ГСМ КTh/U в двух направлениях (СЗ и СВ) при равных энергетических составляющих локальных аномалий. Результаты произведенных построений распределения значений ДАКФ полностью подтверждаются геологическим представлением о строении участка Салаирский-2. СЗ направленность значений ДАКФ соответствует простиранию основных тектонических структур центрального Салаира, СВ простирания ДАКФ отражают более молодые тектонические структуры, опережающие Аламбайский разлом.

Соответствие результатов обработки геологическим данным позволило обоснованно применять линейные фильтры с целью локализации и визуального усиления выявленных закономерностей отражения рудных зон в полях геофизических признаков.

Для выделения локальных линейных аномалий заданного направления использовался программно-математический аппарат ГИС ИНТЕГРО. В качестве показателя наличия аномалии использовалась эквивалентная (для задачи обнаружения) статистика – корреляционная сумма [8]. Размер окна и его наклон выбирались по рассчитанным для каждого геофизического признака значениям ДАКФ.

На основе геолого-геофизической модели Каменушинского рудного поля сформирован поисковый образ комплексной аномалии по данным аэрогеофизики, и для эталонного участка Салаирский-2 он представляется следующим образом.

1. Положительные локальные линейно вытянутые в СЗ направлении магнитные аномалии третьего (или выше) порядка.
2. Положительные локальные линейно вытянутые в СЗ направлении аномалии кажущегося электрического сопротивления.
3. Локальные линейно вытянутые в СЗ направлении отрицательные аномалии комплексных мультипликативных аномалий КTh/U.

В результате сопоставления полученных карт локальных линейных аномалий определены площади, соответствующие искомому образу комплексной аномалии. Нахождение известных месторождений и рудопроявлений участка

Салаирский-2 в контурах комплексных аномалий (рис. 1, Д) подтвердило гипотезу о возможной эмпирической связи характера поведения геофизических полей с местами локализации полиметаллического оруденения.

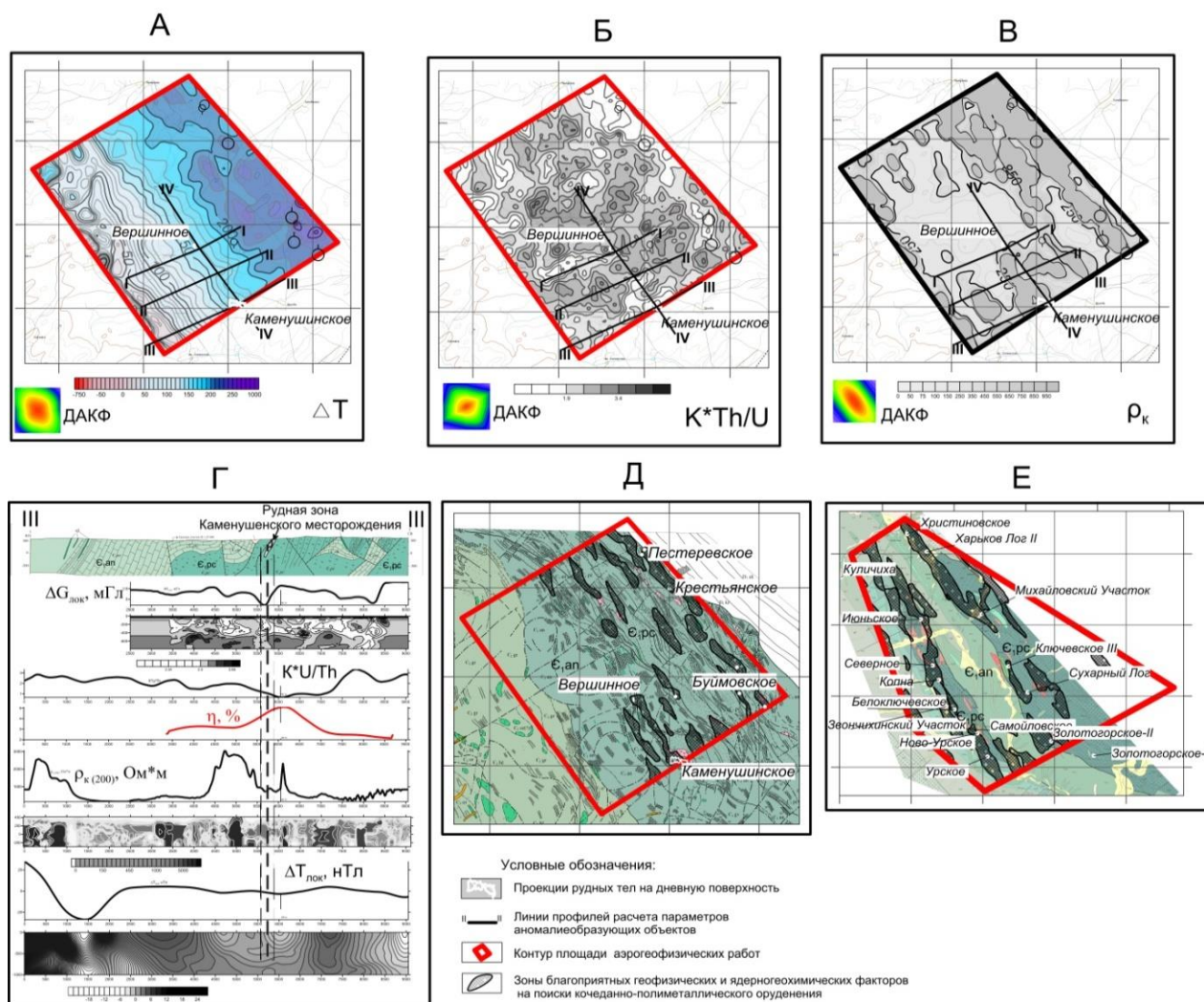


Рис. 1. Выделение перспективных зон по данным КАГС:

А, Б, В – исходные данные аэрогеофизической съемки на участке Салаирский-2: А – магниторазведки, Б – гамма-спектрометрии, В – электроразведки; Г – геолого-геофизическая модель структур Каменушинского месторождения; Д, Е – результаты комплексной обработки аэрогеофизических данных: Д – участок Салаирский-2, Е – участок Салаирский-1

Апробация методики выделения перспективных зон по аэрогеофизическим данным была проведена на втором эталонном участке – Урском рудном поле (уч. Салаирский-1). По полной аналогии был проведен расчет локальных характеристик аэрогеофизических данных и составлена карта перспективных площадей. Коррекции подвергся только выбор параметров окна расчета корреляционной суммы, согласно рассчитанным значениям ДАКФ был изменен наклон окна. Все без исключения известные месторождения и проявления полиметалли-

ческой группы оказались в контурах выделенных перспективных зон (рис. 1, Д). Кроме Урского рудного поля в геофизических полях на участке четко отразилась отдельно стоящая группа месторождений и рудопроявлений Сухарноложского рудного поля.

Изменения в подходе к обработке аэрогеофизических данных могут и должны вноситься, основываясь на известной геологической информации о направлении основных геологических структур, мощности рыхлых отложений, проявлениях магматизма [2].

Опираясь на материалы, полученные при производстве аэрогеофизических работ на уч. Салаирский-1 и Салаирский-2 по комплексу геолого-геофизических признаков, выделены перспективные геофизические зоны и участки на всех прогнозно-поисковых площадях Салаирской минерагенической зоны и составлены карты перспективных геофизических зон с предполагаемыми местами локализации полиметаллического оруденения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альшин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей применяемых в разведочной геофизике. – М.: Недра, 1985. – 407 с.
2. Кузнецов О.Л., Никитин А.А. Геоинформатика. – М.: Недра, 1992. – 302 с.
3. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации: учеб. пособие – М.: РГГУ, 2008. – 112 с.
4. Тригубович Г.М. Импульсная индуктивная электроразведка при исследовании сложнопостроенных сред: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 256 с.
5. Тригубович Г.М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования // Разведка и охрана недр. – 2007 – № 8 – С. 80–87.
6. Хоу Сюели. Технология пакетной обработки геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода в программном комплексе "Коскад 3D": дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 133 с.
7. Чернышев А.В. Вычислительные схемы и программное обеспечение решения прямых и обратных задач электромагнитного зондирования земли становлением поля: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 172 с.
8. <http://public.wiki.integro.geosys.ru>

© А. В. Китаев, Г. М. Тригубович, О. В. Мурзин, 2017

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ МАГНИТОВЯЗКОГО ОСНОВАНИЯ И РАЗНОСА УСТАНОВКИ НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

При изучении горизонтально-слоистой среды, образованной магнитовязким основанием и перекрывающим его немагнитным слоем, ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет релаксации намагниченности, зависит от мощности h слоя и разноса r установки. При небольших h эта зависимость особенно сильно проявлена вблизи генераторной петли. Поэтому измерения в этой области открывают возможности для определения h в том случае, когда h намного меньше длины стороны петли.

Ключевые слова: метод переходных процессов, магнитная вязкость, интерпретация.

THE EFFECT OF THE DEPTH TO MAGNETICALLY VISCOUS BASE AND OF THE RECEIVER POSITION ON THE TEM RESPONSE

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the TEM response to a magnetically viscous basement overlain by a non-magnetic layer. It is shown that EMF induced in the receiving loop due to the magnetic relaxation depends on the thickness h of the layer and the receiver position. This dependence is particularly strong near the wire of the transmitter loop. Measurements in this area make possible estimating h even when h is much smaller than the length of the loop side.

Key words: TEM sounding method, magnetic viscosity, interpretation.

Магнитная вязкость – одно из фундаментальных свойств ферромагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков по отношению к изменениям

напряженности внешнего магнитного поля. В горных породах проявления магнитной вязкости связаны преимущественно с установлением и релаксацией намагниченности ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов – явлением суперпарамагнетизма.

Времена релаксации намагниченности суперпарамагнитных (СПМ) частиц ферромагнитных минералов составляют от 10^{-9} до 10^2 и более секунд. В указанный временной интервал попадает диапазон времен регистрации, устанавливаемой ЭДС в геофизических методах зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и переходных процессов (МПП), поэтому релаксация намагниченности суперпарамагнитных частиц оказывает влияние на индукционные переходные характеристики.

Результирующий сигнал в приемной петле представляет сумму ЭДС e_1 и e_2 , индуцируемых релаксацией намагниченности и вихревых токов соответственно. ЭДС e_1 спадает обратно пропорционально первой степени времени t : $e_1(t)=bt^{-1}$, где b – коэффициент, который не зависит от времени. ЭДС e_2 убывает намного быстрее. Так, для однородного проводящего полупространства $e_2(t)\propto t^{-5/2}$. Поэтому с течением времени относительный вклад $e_1(t)$ в суммарный сигнал неуклонно возрастает. Начиная с некоторого момента влияние релаксации намагниченности становится преобладающим. Этот момент зависит от пространственного распределения удельной электропроводности и концентрации СПМ частиц, а также от геометрии генераторно-приемной установки.

Учет влияния магнитной вязкости геологических сред на индукционные переходные характеристики представляет собой актуальную задачу импульсной индуктивной электроразведки, при решении которой ведущую роль играет математическое моделирование. Ранее проявления магнитной вязкости были изучены преимущественно применительно к симметричным установкам – петля в петле (соосной) и однопетлевой [1, 2]. Применительно к разнесенным установкам моделирование было выполнено в ограниченном объеме для случая, когда петли расположены на поверхности однородного магнитовязкого полупространства. В этом случае ЭДС, создаваемая релаксацией намагниченности, имеет противоположный знак по отношению к наблюдаемой при расположении приемной петли в центре генераторной [1].

В настоящей статье рассматривается, как изменяются переходные процессы, измеряемые на поверхности немагнитного слоя, подстилаемого магнитовязким основанием, в зависимости от мощности h слоя и расстояния r (разноса) между центрами генераторной петли и приемной рамки.

Для расчетов использовался способ, основанный на решении уравнения Гельмгольца в частотной области с учетом зависимости магнитной восприимчивости от частоты и с последующей трансформацией во временную область. Магнитная восприимчивость рассчитывалась по формуле [1]:

$$\kappa^*(\omega) = \Delta\kappa \left[1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{1 + j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_1} \right],$$

где ω – круговая частота; $j=(-1)^{1/2}$; τ_1, τ_2 – нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации; Δk – декремент магнитной восприимчивости, т. е. разница между ее значениями на низкой ($\omega \ll 1/\tau_2$) и высокой ($\omega \gg 1/\tau_1$) частотах. При выполнении расчетов использовались следующие значения: $\tau_1=10^{-6}$ с, $\tau_2=10^6$ с.

На первом этапе численного эксперимента было принято, что удельное электрическое сопротивление слоя (ρ_1) и основания (ρ_2) составляет 10^6 Ом·м. При таком сопротивлении вихревые токи затухают очень быстро, что позволяет изучать эффекты магнитной вязкости в «чистом виде». Значения Δk для немагнитного слоя и основания были равны нулю и 10^{-2} ед. СИ соответственно.

Рис. 1 иллюстрирует, как в зависимости от расстояния r от центра квадратной генераторной петли с длиной стороны $a=25$ м и мощности h верхнего немагнитного слоя (0.1 – 25 м) изменяется приведенная к току ЭДС, индуцируемая на времени $t=1$ мс в приемной рамке размером 1м x 1м. Длина профиля составляет 100 м, шаг наблюдений – 1 м.

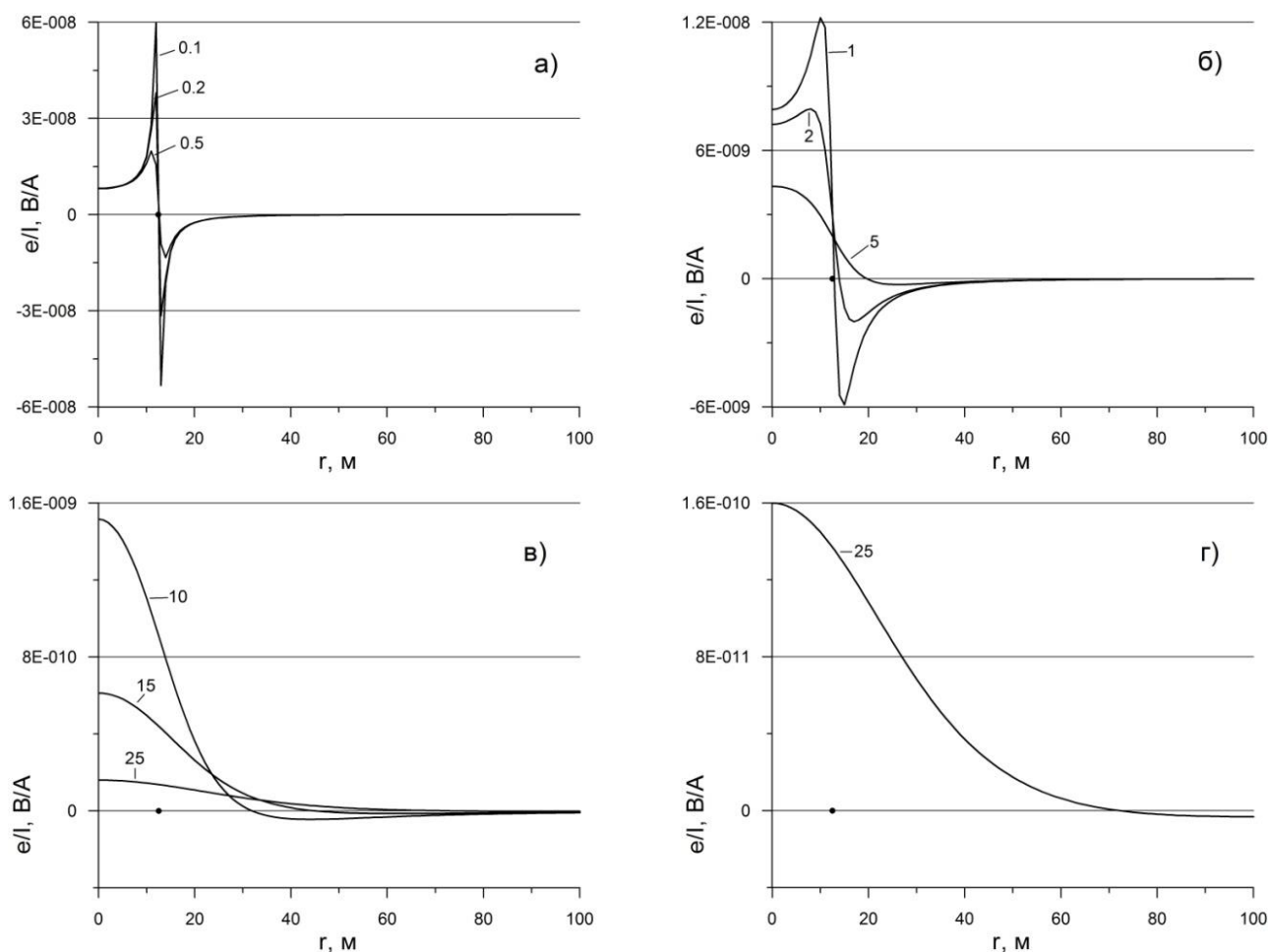


Рис. 1. Графики приведенной к току ЭДС (на времени 1 мс) в зависимости от разноса. Шифр графиков – мощность верхнего слоя h в метрах. Черный кружок на расстоянии $r=12.5$ м показывает положение провода петли на профиле наблюдений

При неглубоком залегании магнитовязкого основания, т. е. когда $h \ll a$ (рис. 1, а), по мере приближения к проводу наблюдается все более быстрое возрастание ЭДС. Как только приемная рамка оказывается снаружи петли, ЭДС изменяет полярность. При дальнейшем увеличении r ЭДС, оставаясь отрицательной, убывает по абсолютной величине. Скорость убывания максимальна вблизи провода, уменьшаясь по мере удаления от него. Увеличение h (рис. 1, б, в) приводит к тому, что графики становятся более плавными, максимум внутри петли перемещается к ее центру, а смена полярности ЭДС происходит при все больших r . На рис. 1, г график профилирования для $h=25\text{м}$ показан в более крупном масштабе, благодаря чему видно, что в этом случае смена полярности ЭДС наблюдается при $r=70\text{м}$.

Ранее было показано [2], что при использовании симметричных установок параметром, контролирующим глубину исследований, является размер (длина стороны) генераторной петли. Это означает, что для исследования малых глубин необходимо использовать генераторные петли небольшого ($a \approx h$) размера. Однако, как показывает рис. 1, а, б, при малой мощности слоя наблюдается сильная зависимость от нее формы и уровня графиков, особенно вблизи провода петли. Это дает основания предположить, что, выполнив измерения при нескольких положениях приемника вблизи стороны большой ($a \gg h$) петли, можно определить глубину до магнитного основания.

С другой стороны, поскольку при малых h ЭДС реагирует на небольшие изменения r , незначительные погрешности в определении положения приемника будут трансформироваться в ошибки измерения ЭДС и, соответственно, погрешности определения параметров модели.

Напомним, что в рассмотренном примере удельное сопротивление верхнего слоя и основания составляло $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При значениях удельного сопротивления среды, характерных для большинства горных пород, необходимо учитывать вклад, который в суммарный сигнал вносят устанавливающиеся в земле вихревые токи.

Как известно, в поздней стадии полярность ЭДС e_2 , индуцируемой в приемнике вихревыми токами, положительна и не зависит от r . ЭДС e_1 , вызванная релаксацией намагниченности, положительна внутри петли и на некотором участке профиля вне ее. Снаружи петли при удалении от провода, начиная с некоторого разнеса, e_1 изменяет полярность. Поэтому, если приемник расположен снаружи петли на небольшом расстоянии от провода, результирующая ЭДС монотонно убывает во времени, оставаясь положительной. Однако при удалении приемника от петли наблюдается знакопеременный переходный процесс. В результате при небольших изменениях положения петли или толщины верхнего слоя суммарная переходная характеристика изменяется кардинальным образом.

Сказанное иллюстрируют результаты расчетов, представленные на рис. 2. В отличие от рассмотренного выше случая (рис. 1), было принято, что удельное сопротивление верхнего слоя и основания составляет $10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

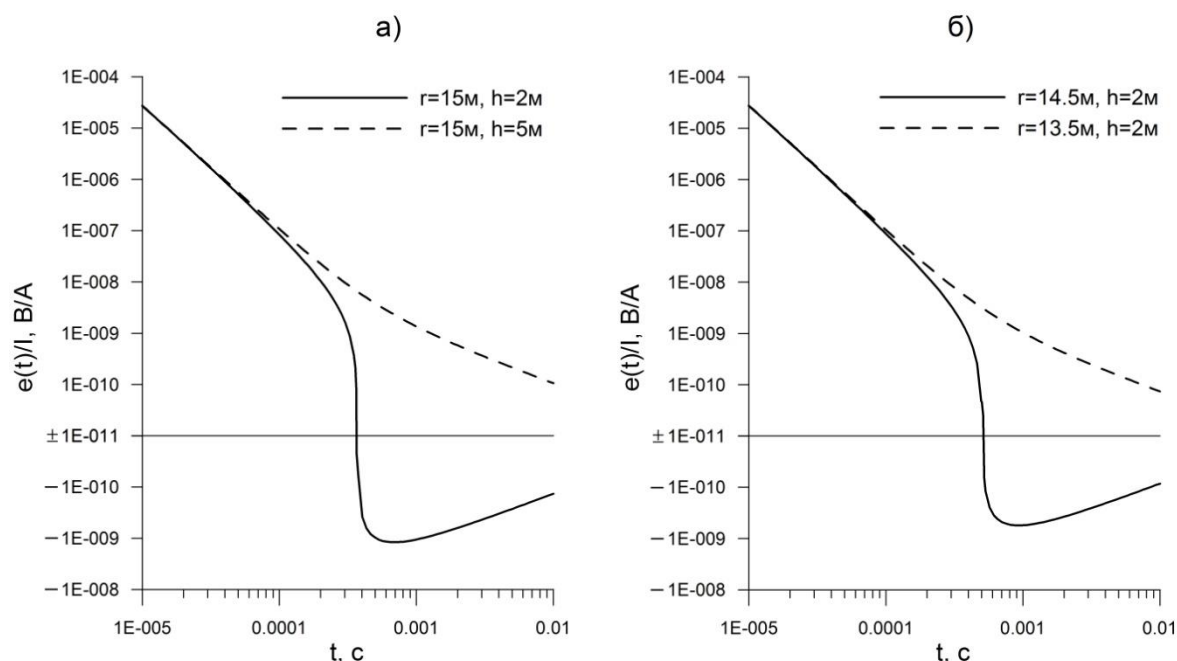


Рис. 2. Иллюстрация того, как небольшие изменения глубины залегания кровли магнитного основания (а) и разноса (б) оказывают значительное влияние на переходные характеристики

Выводы

При изучении горизонтально-слоистой среды, образованной магнитовязким основанием и перекрывающим его немагнитным слоем, ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет релаксации намагниченности, зависит от мощности h слоя и разноса r . При небольших h эта зависимость особенно сильно проявлена вблизи генераторной петли. Поэтому измерения в этой области открывают возможности для определения h в том случае, когда h намного меньше длины стороны петли. Вместе с тем суммарный эффект релаксации намагниченности и становления вихревых токов проявляется в том, что даже при небольших изменениях h и r переходная характеристика изменяется кардинальным образом. Это необходимо учитывать при проектировании работ и интерпретации результатов съемок методами импульсной индуктивной электроразведки в районах, где распространены породы с проявлениями магнитной вязкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 262–276.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 10. – С. 1157–1170.

© Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, 2017

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В традиционном методе вызванной электрической поляризации (ВП) воздействие на среду осуществляется посредством прямоугольных импульсов тока, а измеряемой величиной является напряжение. В статье на примере лабораторных измерений рассматривается альтернативный способ возбуждения с помощью прямоугольных импульсов напряжения. В этом случае откликом является переходный процесс тока, который зависит от свойств образца. Это позволяет определить поляризационные параметры образца, измерив магнитное поле тока.

Ключевые слова: вызванная поляризация, источник напряжения, источник тока.

TRANSIENT INDUCED POLARIZATION RESPONSE TO A RECTANGULAR VOLTAGE PULSE

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

In the IP method, one usually excites the earth using rectangular current pulses and records the transient voltage response. By the example of laboratory studies, we discuss energizing a geologic material with a rectangular voltage pulse. In this case, a measured quantity is the transient IP current. We show that the IP current response and the associated magnetic field depend on the sample electrical properties. This allows IP studies to be done by recording the transmitter line current or the associated magnetic field.

Key words: induced polarization, voltage source, current source.

При изучении и описании переходных процессов ВП и характеризующих их параметров обычно предполагают, что среда возбуждается прямоугольными

импульсами тока [1, 2]. Отклик среды представляет собой устанавливающееся напряжение и называется «фундаментальной» переходной характеристикой (basic transient response) [3].

Рассмотренный способ изучения поляризующихся сред не является единственным. Можно воздействовать на среду прямоугольными импульсами напряжения, а в качестве отклика регистрировать переходный процесс тока. По поводу вызванной поляризации геологических сред опубликовано множество работ, в которых обсуждаются природа этого явления и возможности его использования при решении разнообразных геологических задач. Вместе с тем в литературе, посвященной методу ВП, способ возбуждения с помощью источника напряжения обычно не рассматривается. В этой связи целесообразно рассмотреть этот способ и сравнить его с традиционным. В данной статье такое рассмотрение выполнено применительно к лабораторным измерениям ВП на образцах с использованием идеального источника напряжения $U_s(t)$. По определению внутреннее сопротивление такого источника равно нулю, поэтому выходное напряжение не зависит от параметров нагрузки.

Предположим, что к образцу (длина l , сечение S , удельная электропроводность σ) подключен идеальный источник, который в момент $t=0$ мгновенно создает и затем поддерживает напряжение U_0 (рис. 1). Такой импульс можно представить как $U(t)=U_0\mathbf{1}(t)$, где $\mathbf{1}(t)$ – единичная функция Хевисайда.

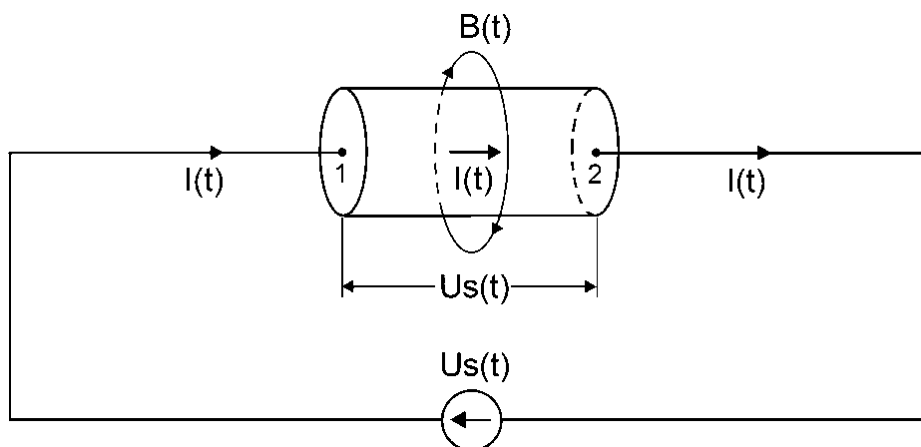


Рис. 1. Образец с подключенным к нему источником напряжения $U_s(t)$

Если образец поляризующийся, его удельная электропроводность является комплексной и зависит от частоты:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \left[1 + \frac{\eta(j\omega\tau)^c}{1 + (j\omega\tau)^c(1-\eta)} \right], \quad (1)$$

где ω – круговая частота; $j=(-1)^{1/2}$; σ_0 – удельная электропроводность на нулевой частоте; η – поляризуемость; τ – постоянная времени; c – показатель степени. Диапазон значений параметра η – от нуля до единицы, τ – от нуля

до бесконечности. Параметр c может принимать значения в пределах от 1 (одно время релаксации) до 0 (бесконечно широкое равномерное распределение времен релаксации).

Найдем переходную характеристику «по току» при $c=1$ (дебаевская релаксация). Это позволит без потери общности выводов обойтись простой математикой. Очевидно, при $c=1$

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left[1 + \frac{j\omega\tau\eta}{1 + j\omega\tau(1-\eta)} \right]. \quad (2)$$

В частотной области удельная электропроводность образца, ток I и напряжение U связаны соотношением (закон Ома):

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{R(j\omega)} = U(j\omega) \frac{S}{l} \cdot \sigma_0 \left[1 + \frac{j\omega\tau\eta}{1 + j\omega\tau(1-\eta)} \right]. \quad (3)$$

Заменим в (3) $j\omega$ на комплексную переменную s . С учетом того, что изображение ступени напряжения равно U_0/s ,

$$I(s) = \frac{U_0}{s} \frac{S}{l} \cdot \sigma_0 \left[1 + \frac{s\eta\tau}{1 + s\tau(1-\eta)} \right]. \quad (4)$$

Обратное преобразование Лапласа дает:

$$I(t) = \frac{U_0 S}{l} \sigma_0 \left[1 + \frac{\eta}{1-\eta} e^{-\frac{t}{\tau(1-\eta)}} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, при $U_0=1\text{В}$ это выражение определяет переходную характеристику тока $I_U(t)$ при воздействии на образец единичной ступени напряжения. Прямоугольный импульс напряжения амплитудой U_0 (напряжение включается в момент $t=t_1$, выключается в момент $t=t_2$) можно записать в виде:
 $U_s(t) = U_0[1(t_1) - 1(t - t_2)]$.

На рис. 2 показан прямоугольный импульс напряжения длительностью 1 с и переходный процесс тока ВП.

Первое слагаемое в (5) соответствует току проводимости, второе – экспоненциально убывающему току поляризации. С течением времени ток поляризации спадает до пренебрежимо малой величины и остается лишь ток проводимости. Во время действия импульса напряжения (рис. 2, а) ток в цепи равен сумме токов проводимости и поляризации (рис. 2, б). При снятии напряжения в момент $t=t_2$ ток проводимости становится равным нулю, а направление тока поляризации изменяется на противоположное по отношению к тому, которое наблюдалось во время действия импульса напряжения.

Рассматривая поляризацию образца импульсом напряжения, необходимо отметить некоторые особенности такого способа возбуждения. Согласно (5), посто-

янная времени, характеризующая скорость спада тока (τ_I), определяется выражением:

$$\tau_I = \tau(1-\eta). \quad (6)$$

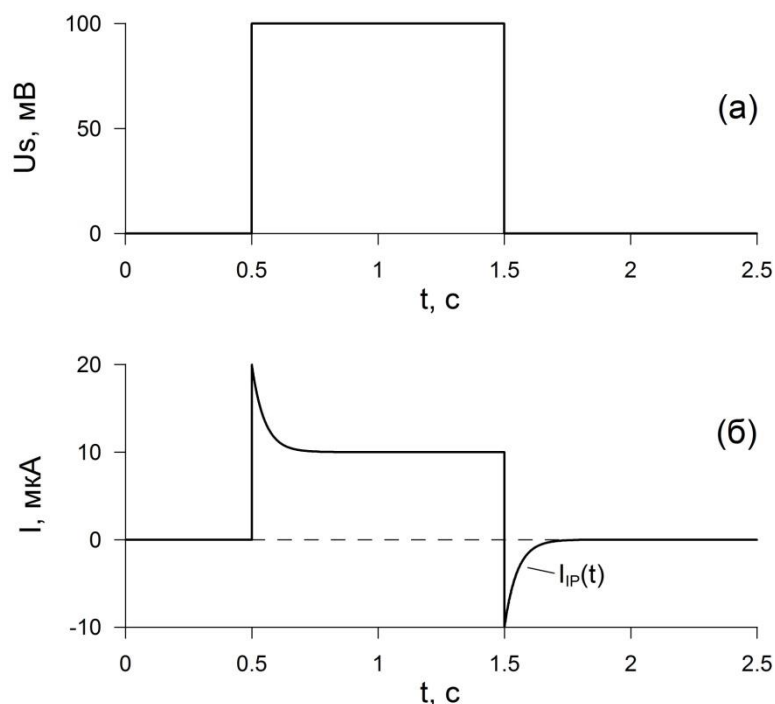


Рис. 2. Импульс напряжения (а) и реакция поляризующегося образца (б).

Параметры образца: $\sigma_0 = 0.01$ См/м, $\tau = 0.1$ с, $\eta = 0.5$, $S = 10$ см², $l = 10$ см

Таким образом, $\tau_I < \tau$. Когда $\eta \rightarrow 1$, $\tau_I \rightarrow 0$. На различие между τ и τ_I впервые обратил внимание Б.С. Светов с соавторами [4], сравнивая формулы Коул-Коул для удельного электрического сопротивления и удельной электропроводности. В приведенном примере (рис. 2) $\tau = 0.1$ с, $\eta = 0.5$, $\tau_I = 0.05$ с. Кроме этого, при $\eta \rightarrow 1$ начальное значение тока поляризации неограниченно возрастает.

При воздействии на образец прямоугольным импульсом тока откликом на него является переходный процесс напряжения ВП. При этом ток и создаваемое им магнитное поле $\mathbf{B}(t)$ не зависят от свойств образца, поскольку полностью контролируются источником. Однако при использовании источника напряжения ток, протекающий по цепи и, соответственно, через образец, зависит от σ_0 , τ и η . Таким образом, эти параметры можно определить, измерив ток в цепи либо его магнитное поле.

Практическая реализация этого способа осложнена тем, что в переходный процесс тока вносит вклад вызванная поляризация не только среды, но и питающих электродов. Очевидно, погрешность определения поляризационных параметров среды должна быть тем меньше, чем меньше – в относительном вы-

ражении – поляризация электродов по сравнению с поляризацией среды. В работе [5] показано, что эту погрешность можно снизить путем повышения плотности тока, протекающего через электрод во время действия импульса напряжения. Однако это не решает проблему, поскольку поляризация электродов является неконтролируемым процессом и ее вклад в суммарную переходную характеристику ВП трудно оценить, особенно в полевых исследованиях. При изучении ранних стадий вызванной поляризации дополнительным источником погрешности, особенно при высоких сопротивлениях заземлений, является емкость линии [5]. Такая же проблема возникает в лаборатории, хотя в этом случае имеется больше возможностей для контроля и снижения влияния поляризации электродов.

В этой связи представляет интерес индуктивный способ возбуждения. В этом случае на среду воздействует электрическое поле, что в терминах теории электрических цепей эквивалентно возбуждению с помощью источника напряжения [3]. Откликом на воздействие является электрический ток. При этом проблема, связанная с поляризацией питающих электродов, не возникает. Заземленная линия является источником смешанного типа [6], поэтому для индуктивного возбуждения лучше использовать незаземленную петлю, связанную с подстилающей средой исключительно посредством электромагнитной индукции. При использовании незаземленной петли или рамки в качестве приемника снимается и проблема поляризации приемных электродов. Дополнительными преимуществами индуктивного источника является нечувствительность к трансверсальной анизотропии и возможность изучать объекты, перекрытые непроводящими экранами.

Общий подход к интерпретации данных импульсной индуктивной электроразведки с учетом индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) заключается в расширении модельной базы путем использования при расчетах комплексной, частотно-зависимой удельной электропроводности. В настоящее время инверсия индукционных переходных характеристик в рамках модели горизонтально-слоистой среды с комплексной, частотно-зависимой электропроводностью представляет рутинную процедуру [7]. Уже появились публикации, в которых представлены результаты инверсии с учетом ВПИ на основе трехмерных моделей распределения поляризуемости и удельной электропроводности [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
2. Sumner J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. – Amsterdam: Elsevier, 1976 – 227 p.
3. Wait J.R. A simple view of the I.P. influence in an inductive E.M. prospecting system // IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens. – 1983. – Vol. 21 (24). – P. 505–506.
4. Светов Б.С., Агеев В.В., Лебедева Н.А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки // Геофизика. – 1996. – №4. – С. 42–52.
5. Шестернев Д.М., Карасев А.П., Оленченко В.А. Исследование криолитозоны методом РСВП. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 238 с.

6. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. – М.: Недра, 1978. – 157 с.
7. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 8. – С. 1282–1293.
8. Marchant D., Haber E., Oldenburg D.W. Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data // Geophysics. – 2014. – E303–E314.

© Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, 2017

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ТЕНЗОРОМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Георгий Николаевич Логинов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, e-mail: LoginovGN@ipgg.sbras.ru

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Юрий Павлович Стефанов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: yu_st@mail.ru

Артём Вениаминович Мясников

Сколковский институт науки и технологий, Инновационный центр Сколково, 143005, Россия, г. Москва, ул. Нобеля, 3, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: A.Myasnikov@skoltech.ru

Приводятся результаты численного геомеханического моделирования различных сценариев роста трещин ГРП с учетом сейсмической эмиссии. Упругие волны регистрируются на круговом профиле, и для них делается инверсия тензора моментов. Показано влияние различных сценариев роста трещин на наблюдаемое волновое поле и диаграммы направленности излучения источника. Показана возможность приемлемого описания волнового поля от роста трещины ГРП эффективным точечным источником, который описывается тензором моментов.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, геомеханика, тензор моментов, диаграмма направленности, ГРП.

STUDY OF CONNECTION BETWEEN ROCK FAILURE MECHANISMS AND SEISMIC MOMENT TENSOR OF POINT SOURCE BY NUMERICAL GEOMECHANICAL MODELING

Georgy N. Loginov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Researcher, Department of Dynamic Problems of Seismic, e-mail: LoginovGN@ipgg.sbras.ru

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

Yuri P. Stefanov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Leading Researcher, e-mail: yu_st@mail.ru

The results of numerical geomechanical modeling for different scenarios of fracture growth (the presence of plasticity, preexisting fractures, shear stresses) are given. The possibility to describe the recorded fracture growth wave field by an effective moment tensor point source is estimated. The influence of various parameters of a crack growth scenarios on the observed wave field and source radiation pattern is shown.

Key words: microseismic monitoring, geomechanics, moment tensor, radiation pattern, hydraulic fracturing.

Работа посвящена изучению связи между геомеханическими моделями сценариев роста трещины ГРП и механизмами сейсмических источников, описываемыми тензорами моментов, которые могут быть получены по данным микросейсмического мониторинга.

Целью данной работы являлся расчет различных сценариев роста трещины ГРП путем численного геомеханического моделирования и оценка возможности описания возникающего при росте трещины волнового поля эффективным тензором моментов точечного источника.

В работе рассматривается численный эксперимент, состоящий из этапов: геомеханическое моделирование элементарного роста трещины с учетом акустической эмиссии, регистрация волновых полей, инверсия тензора моментов, сопоставление механизмов со сценариями разрушения.

Мы выполнили численное моделирование развития трещины (лагранжев подход) с учетом акустической эмиссии (генерации упругих волн). Рост трещины был описан явно путем образования новых свободных поверхностей посредством разделения узлов расчетной сетки [1, 3, 4]. При моделировании мы решали уравнения непрерывности и движения:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,i} = 0, \quad \sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt},$$

где ρ – плотность, u_i – компоненты вектора скорости смещений, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, F_i – массовые силы.

Упругие напряжения определяются по гипотезе Гука:

$$\hat{s}_{ij} = 2\mu \left(d_{ij} - \frac{1}{3} d_{kk} \delta_{ij} \right), \quad \dot{\sigma} = -K \dot{V} / V,$$

где $\hat{s}_{ij} = \dot{s}_{ij} - s_{ik} \dot{\omega}_{jk} - s_{jk} \dot{\omega}_{ik}$ – производная Яумана, K и μ – модули сжатия и сдвига; точка над переменной обозначает производную по времени; V – объем; здесь используется разложение тензора напряжения на сферическую и девиаторную

части: $\sigma_{ij} = -\sigma \delta_{ij} + s_{ij}$, где $\sigma = -\sigma_{kk} / 3$ – давление; s_{ij} – девиатор; δ_{ij} – символ Кронекера. Тензор скорости деформации d_{ij} и тензор скорости вращения ω_{ij} определяются как

$$d_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2, \quad \omega_{ij} = (u_{i,j} - u_{j,i}) / 2.$$

Описание состояния среды за пределом упругости описывалось с использованием условия пластичности Друккера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения [3], т. е. $f(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \sigma - Y$, где α и $Y = Y(\gamma^p, \sigma)$ – параметры, которые могут быть выражены через коэффициент внутреннего трения и когезию модели Кулона-Мора, τ – интенсивность касательных напряжений, γ^p – интенсивность сдвиговой пластической деформации. Приращение пластической деформации определяется из уравнения $d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \partial g / \partial \sigma_{ij}$, где пластический потенциал $g = \tau - \beta \sigma$, β – коэффициент дилатансии; параметр $d\lambda$ определяется из условий пластичности в ходе процесса деформирования; $d\epsilon_{ij}^p$ – компоненты приращений пластической деформации. В качестве условия роста трещин использовалось уравнение $\sigma_1 = \sigma_t$, где σ_1 и σ_t – соответственно 1-е главное и предельное растягивающее напряжение (прочность на отрыв). Данное условие равносильно часто используемому в механике трещин критерию: $K_I = K_{IC}$, K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Снятие напряжений на поверхностях приращения трещины осуществляется постепенно, в течение нескольких шагов по времени (от 3 до 30), что позволяет избежать появления высокочастотных осцилляций и сгладить излучаемый импульс. Количество шагов подбиралось так, чтобы данная процедура не оказывала существенного влияния на скорость распространения трещины, которая определялась по серии последовательных приращений. После полного раскрытия на разделившихся гранях задавались краевые условия свободной поверхности (таким образом, считалось, что на рассматриваемом интервале времени внутреннее давление на участке приращения трещины не возникало, что соответствует скорости приращения, существенно превосходящей скорость течения флюида).

В двумерном случае тензор моментов $\mathbf{M}$ (матрица 2 на 2), которую можно представить вектором $\mathbf{m} = [M_{11}, M_{12}, M_{22}]$. Таким образом, волновое поле точечного источника с механизмом $\mathbf{m}$ может быть получено следующей линейной системой уравнений [2]:

$$\mathbf{d} = \mathbf{A} \mathbf{m},$$

где $\mathbf{d}$ – вектор амплитуд P - и S -волн для всех приемников, $\mathbf{A}$ – прямоугольная матрица, содержащая диаграмму направленности излучения. Эта переопределенная система решалась стандартным методом наименьших квадратов.

Схема моделирования представлена на рис. 1 слева. Первоначальная форма трещины показана черной сплошной линией; трещина продвигается вперед на длину δ . Горизонтальные (40 МПа) и вертикальные (60 МПа) напряжения приложены к краям вычислительной области (в некоторых экспериментах также были приложены касательные напряжения). Волновое поле записано на синей линии на рис. 1 слева. На рис. 1 показаны сейсмограммы: радиальная (вверху) и поперечная (внизу) компоненты, горизонтальная ось показывает направление на источник. Цветные линии показывают окна для анализа поляризации и снятия амплитуд (синие линии для P -волны, красные – для S -волны).

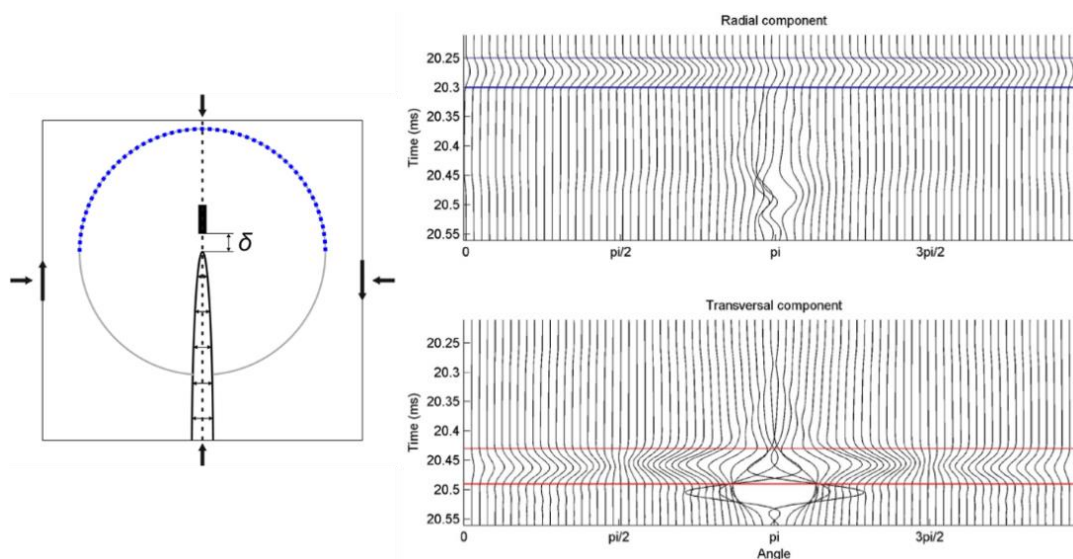


Рис. 1. Волновое поле при росте трещины.

Слева схема моделирования; волновое поле регистрируется на синем круге.

Справа регистрируемое волновое поле, радиальная (вверху) и поперечная (внизу) компоненты; цветные линии показывают окна для анализа поляризации и амплитуды

В данной работе мы рассматриваем три сценария развития трещины: А) рост трещины под действием внутреннего давления в однородной предварительно напряженной среде; В) рост трещины при аналогичных условиях, но в среде, содержащей опережающую соосную трещину; С) рост трещины в однородной предварительно напряженной среде при наличии касательных напряжений (нормальные и касательные напряжения на границах). Последний случай фактически означает, что начальная ориентация трещины не совпадает с направлением главных осей напряжений. Для разных сценариев было выполнено численное геомеханическое моделирование и инверсия тензора моментов. На рис. 2 приведены диаграммы направленности для P - и S -волн; пунктиром показана диаграмма направленности для эффективного источника по результатам инверсии. Из рис. 2 видно, что эффективный точечный источник приемлемо описывает диаграмму направленности (амплитуды зарегистрированных

волн) и близок к дипольному типу механизма источника, что соответствует механизму разрушения при раскрытии трещины. Активация опережающей соосной трещины порождает более интенсивное излучение.

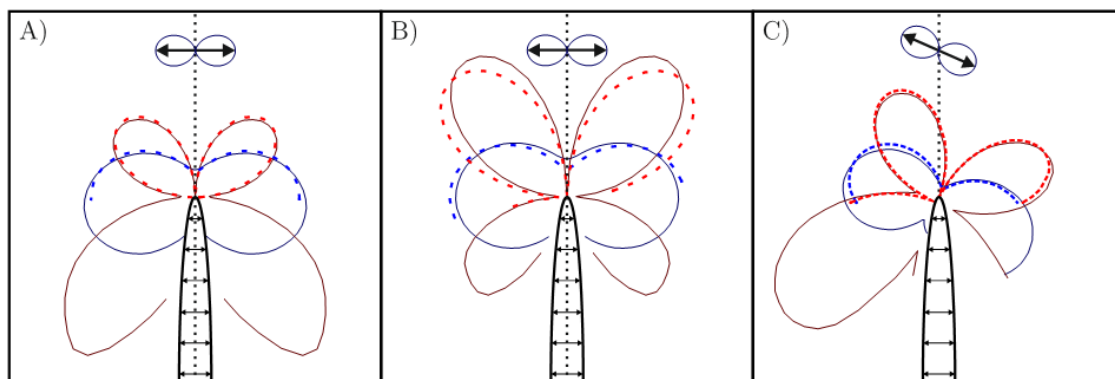


Рис. 2. Диаграммы направленности излучения:

синим – P -волна; красным – S -волна; сплошная линия – наблюдаемые амплитуды, пунктир – результаты инверсии. А) рост трещины в однородной среде; В) рост трещины с активацией опережающей соосной трещины; С) рост трещины в однородной среде с касательными напряжениями на границах

В работе представлен подход к изучению разрешимости механизмов разрушения пород при росте трещин. Подход включает в себя численное геомеханическое моделирование разрушения горных пород и инверсию тензора моментов генерируемых волновых полей. Было показано влияние пластичности, наличия опережающих трещин и касательных напряжений в среде на тип регистрируемой диаграммы направленности.

Результаты позволяют утверждать, что эффективный точечный источник может быть использован для описания волнового поля для различных сценариев элементарного приращения трещины, что позволит использовать микросейсмические данные для определения типов роста трещины и калибровки геомеханических моделей ГРП.

Работа поддержана Сколтехом (Соглашение # 711-MRA от 11.11.14).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немирович-Данченко М.М. Модель гипопругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 107–114.
2. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. – University Science Books, 2002. – 700 p.
3. Stefanov Y.P. Numerical modeling of deformation and failure of sandstone specimens // Journal of Mining Science. – 2008. Vol. 44. – P. 64–72.
4. Wilkins M. Computer simulation of dynamic phenomena. – Springer-Verlag, 1999. – 246 p.

© Г. Н. Логинов, А. А. Дучков, Ю. П. Стефанов, А. В. Мясников, 2017

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЙ СВЯЗНОСТИ ТРЕЩИН В СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Михаил Александрович Новиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

При прохождении сейсмических волн через трещиновато-пористую среду при наличии в ней флюида возникают потоки, индуцированные этими волнами. Для численного моделирования волновых процессов в пороупругой флюидонасыщенной среде предложена конечно-разностная схема, аппроксимирующая динамическую систему уравнений Био, проведен ряд численных экспериментов, по результатам которых построены зависимости фазовой скорости и затухания волны от частоты.

Ключевые слова: пороупругость, динамические уравнения Био, трещиноватость.

ANALYSIS OF FRACTURE CONNECTIVITY EFFECTS IN SEISMIC WAVEFIELDS ON THE BASE OF NUMERICAL SIMULATION

Mikhail A. Novikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Seismic wave propagation in fractured-porous media causes the wave-induced fluid flows between fractures and background aalso between interconnected fractures. This leads to the seismic energy dissipation and thus, the dispersion of waves which depend on the geometry of the fractured space, permeability of fracture filling material, and fluid content. In this paper, we present numerical experiments, confirming the effect of energy dissipation due to the wave-induced fluid flows.

Key words: poroelasticity, dynamic Biot equations, fracturing.

В настоящее время одним из бурноразвивающихся направлений вычислительной физики горных пород является анализ диффузионных эффектов при распространении сейсмических и акустических волн в трещиновато-пористых средах [5, 7]. Такие диффузионные процессы связаны с наличием резких кон-

трастов проницаемости между материалом трещин и вмещающей среды. При этом наличие диффузионных перетоков флюида с необходимостью приводит к высоким значениям поглощения сейсмической энергии и, как следствие, к дисперсии. Эффекты, оказываемые диффузионными процессами на волновые поля, существенно зависят от частотного диапазона сигнала, масштабов неоднородностей, их геометрии и физических свойств – в первую очередь проницаемости. Однако современные подходы к численному исследованию таких процессов ограничены анализом решений в квазистатической постановке, т. е. динамические эффекты, такие как рассеяние, в этом случае не учитываются. Основным сдерживающим фактором развития исследований в полной динамической постановке является вычислительная сложность и ресурсоемкость алгоритмов расчета волновых полей для уравнения Био.

В работе приводится численное исследование проявлений связности трещин и их проницаемости в сейсмоакустических волновых полях на основе численного моделирования процессов распространения волн в трещиноватопористой среде. Расчет проводится для широкого диапазона частот (от 500 Гц до 10 кГц), после чего оцениваются скорость распространения волн в среде и поглощение сейсмической энергии в зависимости от частоты. Результаты динамического моделирования сравниваются с оценками, основанными на решении задачи в квазистатической постановке [4, 6], иллюстрируя достаточно высокое совпадение оценок добротности двумя указанными методами. В частности, показано наличие локального повышения затухания сейсмических волн из-за перетока флюида в пересекающихся трещинах.

Для анализа эффектов, оказываемых флюидопотоками на сейсмоакустические волновые поля, проводились серии расчетов для различных геометрий трещиноватого пространства, свойств заполняющего материала и частот зондирующего сигнала. Для всех экспериментов расчеты проводились в ограниченной полосе (рис. 1) с периодическими условиями при $z = 0$ м и $z = 1$ м. Размер расчетной области в горизонтальном направлении менялся в зависимости от частоты зондирующего сигнала. Вмещающая порода – однородная с параметрами: модуль объемного расширения $K = 26$ ГПа, модуль сдвига $\mu = 31$ ГПа, пористость 0.1 и проницаемость $k = 10^{-13}$ м². В модель вводился трещиноватый слой, размер трещин – 30 мм на 4 мм, заполненными материалом с параметрами: модуль объемного расширения $K = 0.02$ ГПа, модуль сдвига $\mu = 0.01$ ГПа, пористость 0.5. Проницаемость трещин изменялась в диапазоне от $k = 10^{-17}$ м² до $k = 10^{-8}$ м². Расчеты проводились с использованием импульса Риккера в качестве зондирующего сигнала, для набора 12 центральных частот от 500 Гц до 10 кГц. В зависимости от частоты выбирались размеры расчетной области – 20 длин волн, толщины трещиноватого слоя – 5 длин волн, расстояния между линиями приема – 10 длин волн (рис. 1).

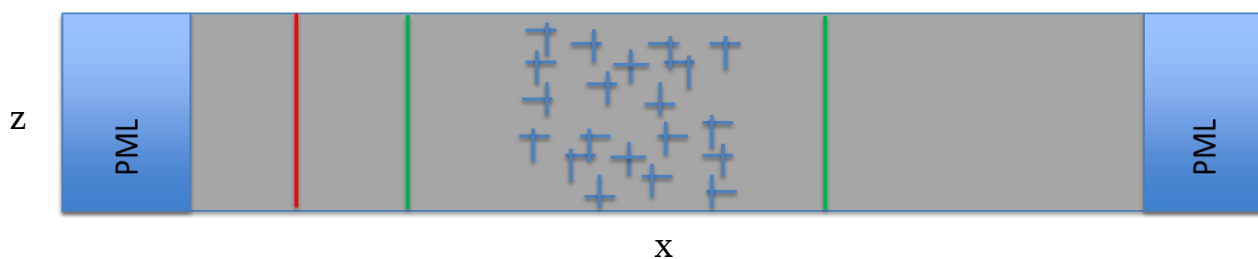


Рис. 1. Схематическое представление расчетной области

Красная линия – положения источников, зеленые – положения приемников

В трещиноватом слое рассматривались четыре типа геометрии трещиноватости: параллельные направлению распространения волны (рис. 2, а), перпендикулярные (рис. 2, б), непересекающиеся трещины с вероятностью 50 % параллельные, 50 % перпендикулярные (рис. 2, в) и пересекающиеся трещины (рис. 2, г). В последнем случае 50 % трещин были параллельны направлению распространения волны, 50 % – перпендикулярны, но каждая трещина имела хотя бы одно пересечение с ортогональной ей трещиной. Общая объемная для трещин в слое – 6.25 %.

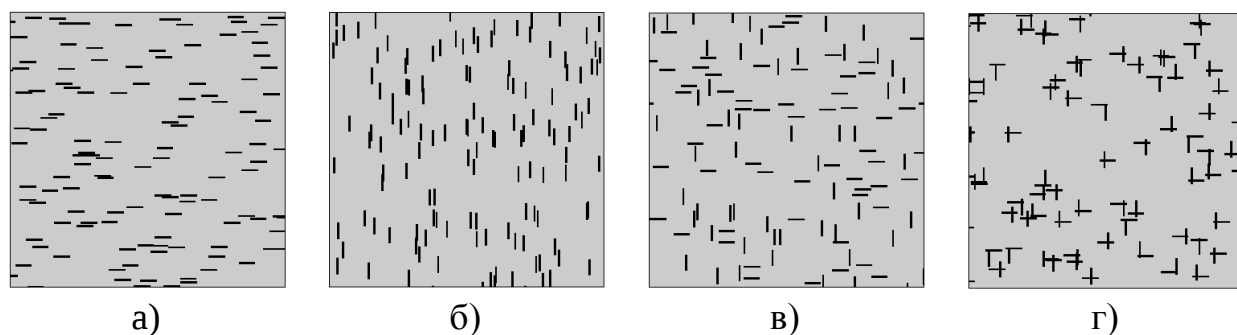


Рис. 2. Геометрия трещин:

- а) параллельные, б) перпендикулярные, в) непересекающиеся,
г) пересекающиеся

Для описания процессов распространения волновых полей в пороупругой среде использовалась модель Био [2], где для аппроксимации динамической проницаемости вводится параметр извилистости порового пространства [3]. Численное моделирование проводилось с использованием стандартной схемы на сдвинутых сетках со вторым порядком аппроксимации по пространству и по времени [3]. На рис. 3 приводятся примеры зарегистрированных трасс на ближней и дальней линиях приема для фиксированной частоты сигнала для разной геометрии трещин и для всех рассматриваемых проницаемостей.

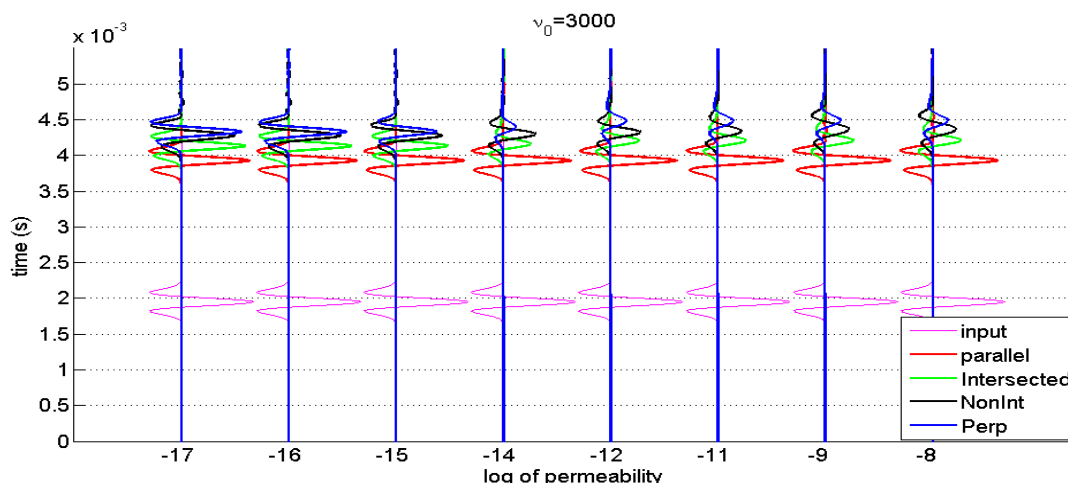


Рис. 3. Сигналы, зарегистрированные на линиях наблюдения для разной геометрии трещин

Розовые линии – сигнал на ближней линии приема, красные – сигнал на дальней линии для системы трещин, параллельной направлению распространения волны, зеленые – пересекающиеся трещины, черные – непересекающиеся трещины, синие – перпендикулярные. По оси X отложены значения проницаемости материала в трещинах

Для оценки скорости распространения волн (в работе рассматривалось только распространение быстрой продольной волны) и поглощения сейсмической энергии применялась сигнальная обработка, основанная на деконволюции зарегистрированных импульсов на линиях наблюдения. Полученные значения поглощения и скорости распространения приведены на рис. 4. В дополнение на рис. 4. приводятся оценки этих параметров, полученные на основе решения задачи нагружения в квазистатической постановке.

Из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что при частотах зондирующего сигнала ниже 3 кГц оценки поглощения сейсмической энергии, полученные на основе полного динамического моделирования волновых полей в пороупругих средах и с использованием квазистатического приближения, совпадают с высокой точностью. При этом отчетливо прослеживается локальное повышение поглощения, связанное с перетоком флюида в трещинах. Однако при дальнейшем повышении частоты зондирующего сигнала основным механизмом, контролирующим затухание энергии волны, становится рассеяние, что подтверждается приведенными графиками, основанными на теории однократного рассеяния волн в случайно-неоднородных средах [1]. Важно отметить, что интенсивность рассеяния на пересекающихся и непересекающихся трещинах существенно различается, что также может быть использовано в качестве косвенного признака связности трещин.

Анализ оценок скорости распространения волн в трещиноватых слоях показывает, что квазистатическое моделирование завышает значения эффективной скорости. При этом с уменьшением частоты различие в оценках сокращает-

ся, что может свидетельствовать о снижении ошибки аппроксимации полной модели Био ее квазистатической аппроксимацией.

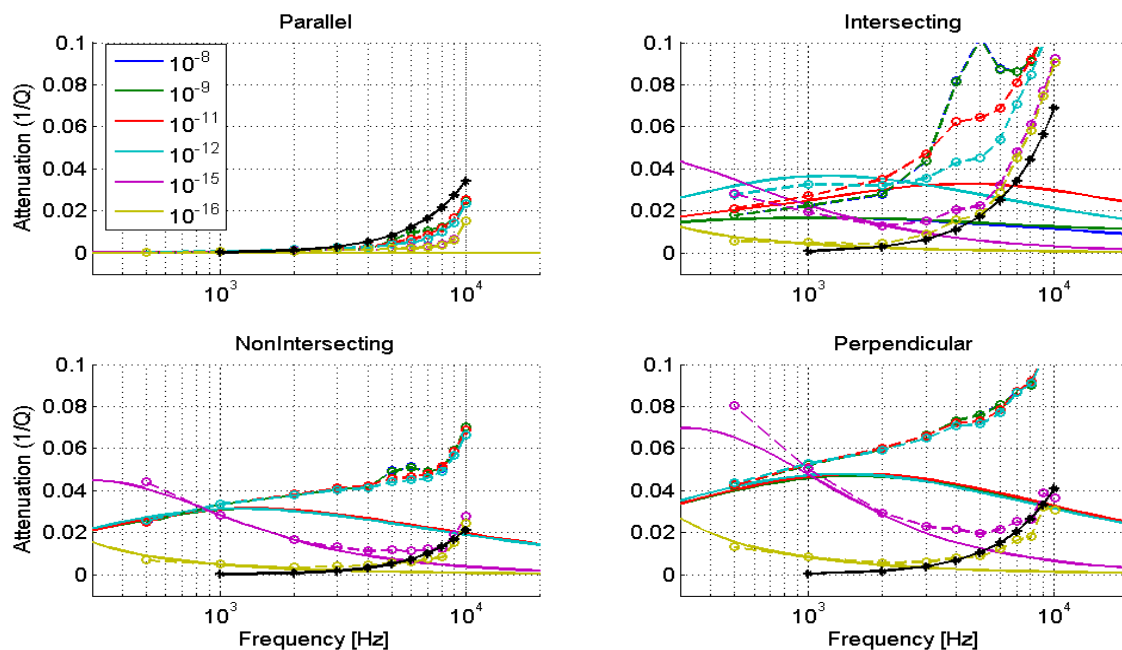


Рис. 4. Зависимость поглощения от частоты для различных значений проницаемости материала трещин

Сплошные линии – результаты квазистатического моделирования, пунктирные линии – динамическое моделирование. Черные линии на графиках поглощения – теоретическая оценка поглощения, связанного с рассеянием

На основе численного моделирования волновых полей в трещиновато-пористых средах показано, что при распространении сейсмических волн в таких средах наличие флюида в высокопроницаемых трещинах приводит к возникновению флюидопотоков, что в свою очередь является причиной поглощения сейсмической энергии. При этом интенсивность затухания и его зависимость от частоты связаны с геометрией трещин, особенно с их связностью. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве косвенного признака для определения степени связности трещиноватого пространства, его проницаемости и определения состава заполняющего его флюида.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-05-00800, 17-05-00579, 17-05-00250. Расчеты проводились на кластере НВС-30К Сибирского суперкомпьютерного центра и на кластере «Ломоносов» МГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.

2. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // Journal of the Acoustical Society of America. – 1956. – Vol. 28. – P. 168–178.
3. Masson Y.J., Pride S.R. Finite-difference modeling of Biot's poroelastic equations across all frequencies // Geophysics. – 2010. – Vol. 75, N 2. – P. N33–N41.
4. Milani M. et al. Velocity and attenuation characteristics of P-waves in periodically fractured media as inferred from numerical creep and relaxation tests // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, edited. – 2014. – P. 2882–2887.
5. Quintal B. et al. Sensitivity of S-wave attenuation to the connectivity of fractures in fluid-saturated rocks // Geophysics. – 2014. – Vol. 79, N 5. – P. WB15–WB24.
6. Rubino J.G., Qi Q., Müller T.M. Incorporating capillarity into models for P-wave attenuation and dispersion in partially saturated rocks // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, edited. – 2014. – P. 2936–2940.
7. Rubino J.G. et al. Seismoacoustic signatures of fracture connectivity // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2014. – Vol. 119, N 3. – P. 2252–2271.

© *М. А. Новиков, В. В. Лисица, 2017*

СОВРЕМЕННАЯ АКТИВИЗАЦИЯ ВЕРХНЕЮРСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО КОМПЛЕКСА В ПРЕДЕЛАХ КАЙМЫСОВСКОЙ НГО

Павел Степанович Лапин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории математического моделирования нефтегазовых систем, тел. (383)330-85-73, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

Рассмотрен один из вариантов оценки современной активизации мезо-кайнозойского чехла Западно-Сибирского нефтегазового бассейна на примере анализа Верхнеюрского нефтегазового комплекса (НГК) в пределах Каймысовской нефтегазовой области (НГО). Совместный анализ распределения продуктивных скважин и неравномерность проявления неотектонических движений позволил в пределах наиболее перспективной территории Верхнеюрского НГК выявить области его устойчивого развития.

Ключевые слова: неотектонические и современные процессы, верхнеюрский нефтегазовый комплекс, устойчивое развитие.

MODERN ACTIVATION UPPER JURASSIC OIL AND GAS COMPLEX IN THE AREA OF OIL AND GAS KAYMYSOVSKOY

Pavel S. Lapin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., tel. (383)330-85-73, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

Considered one of the options assessment contemporary revitalization Meso-Cenozoic cover of the West Siberian oil and gas basin in the example of the analysis of Upper Jurassic oil and gas complex (OGC) within Kaymysovskoy oil and gas field (NGO). Joint analysis of the distribution of productive wells and the uneven manifestation of neotectonic movements allowed within the territory of the most promising Upper NGK identify areas of its sustainable development.

Key words: neotectonic and modern processes, Upper Jurassic oil and gas complex, sustainable development.

В пределах Западной Сибири на протяжении последних 60-и лет изучение современной активизации мезо-кайнозойского чехла связано с оценкой ее возможного влияния на нефтегазовость территорий. Один из методов нефтегеологической направленности в описании истории развития складчатой структуры мезо-кайнозойского чехла опирался на классификацию поднятий по режиму их развития [1]. Ими были выделены поднятия трех типов: сквозные, затухающие в меловое время и затухающие в олигоцене. Для решения вновь возникающих задач при изучении влияния тектонических движений на развитие мезо-кайнозойского чехла была предложена методика, основанная на анализе поэтапного эволюционирующего складкообразования [2].

Для завершающего этапа развития осадочного чехла Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции оценка тектонических движений осуществляется с привлечением неотектонического анализа, который характеризует развитие объектов исследования за неоген-четвертичный этап. В 50-90-е годы прошлого века проводились интенсивные неотектонические исследования, которые с разной степенью детальности характеризовали особенности развития Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [3–6]. Установлена приуроченность крупных месторождений к средним значениям амплитуд неотектонических движений, которая позволила использовать полученную закономерность как один из критериев при прогнозе перспективных в нефтегазоносном отношении областей.

Для более детального изучения влияния неотектонических движений на развитие мезо-кайнозойского чехла возникла необходимость в разработке методов оценки их неравномерного проявления. Одним из методов, позволяющих оценить неравномерность проявления неотектонических движений, является метод, основанный на введении безразмерного коэффициента контрастности или нормированного коэффициента, характеризующего кайнозойский период развития мезо-кайнозойского чехла [7]. Оценить неравномерность проявления неотектонических движений можно и на основе анализа рельефа земной поверхности, поскольку в Западной Сибири он создан при участии неотектонических движений. В работе [8] приведены результаты изучения корреляционных связей современного рельефа и рельефа некоторых структурных горизонтов, которые не позволили установить унаследованный характер их развития. Отрицательный результат объяснили незначительным объемом фактического материала, участвующего в анализе, и неравномерностью его распределения по площади.

В настоящей работе на современном этапе развития мезо-кайнозойского чехла для задания целостности его функционирования был осуществлен анализ результирующей взаимодействия эндогенных, экзогенных процессов и морфологии, что позволило оценить его развитие не только на основе изучения морфологических, но и морфогенетических свойств.

На первом этапе мы на большем фактическом материале о рельефах земной поверхности и фундамента установили унаследованный характер в развитии отложений мезо-кайнозойского чехла. Анализ взаимозависимости данных осуществлен с привлечением известного коэффициента корреляции Пирсона [9]. Установлено, что высокая степень взаимозависимости между двумя рельефами характерна только для 17.8 % территории Каймысовской НГО (табл. 1). Если перейти от анализа морфологических закономерностей к изучению морфогенетических особенностей развития рельефа, которые отражают вероятные тенденции в изменении его морфологии, то появляется возможность в корректировке перспективных в нефтегазоносном отношении территорий. Методика морфогенетического анализа, разработанная автором ранее [10, 11], неоднократно применялась для решения ряда геологических задач и в данной работе

не рассматривалась. Проведя соответствующие исследования, получены данные (табл. 1), свидетельствующие об увеличении (почти в два раза) площадей с высокой степенью взаимозависимости значений показателя, характеризующего морфогенетические особенности в развитии двух сравниваемых рельефов, что по аналогии с интерпретацией неотектонических движений, отмеченных выше, позволяет уменьшить перспективные в нефтегазоносном отношении площади.

Таблица 1

Распределение площадей по степени взаимозависимости рельефов земной поверхности и фундамента и их морфогенетическим особенностям развития

Интервал значений коэффициента корреляции	Площади, соответствующие определенному интервалу значений показателя (%)	
	вычисленные по рельефу	полученные по данным о современном морфогенезе
1.0 – 0.8	8.2	15.9
0.8 – 0.6	9.6	21.7
0.6 – 0.4	34.1	21.6
0.4 – 0.2	24.3	20.1
0.2 – 0.0	23.8	20.7

Оценив взаимозависимость рельефов земной поверхности и фундамента на основе анализа их морфологических и морфогенетических особенностей развития, предположили, что кровля верхнеюрских отложений должна реагировать на проявления неотектонических движений, которые фиксируются и в морфогенетических особенностях развития современных отложений мезо-кайнозойского чехла. Причем эта реакция должна быть различной как со стороны рельефа земной поверхности, так и фундамента и отражать неоднородность верхнеюрских отложений. Реализация вышеописанного алгоритма позволила выявить реакцию верхнеюрских отложений на неотектонические движения и зафиксировать их в морфогенетических особенностях развития современного разреза чехла (рис. 1, в).

Современные движения, влияющие на современное состояние отложений мезо-кайнозойского чехла, оценивались на фоне проявления неотектонических движений (рис. 1, а), что дало возможность выявить неравномерность их проявления. С этой целью сопоставили полученные данные с пространственным распределением продуктивных скважин, вскрывших верхнеюрские отложения (табл. 2).

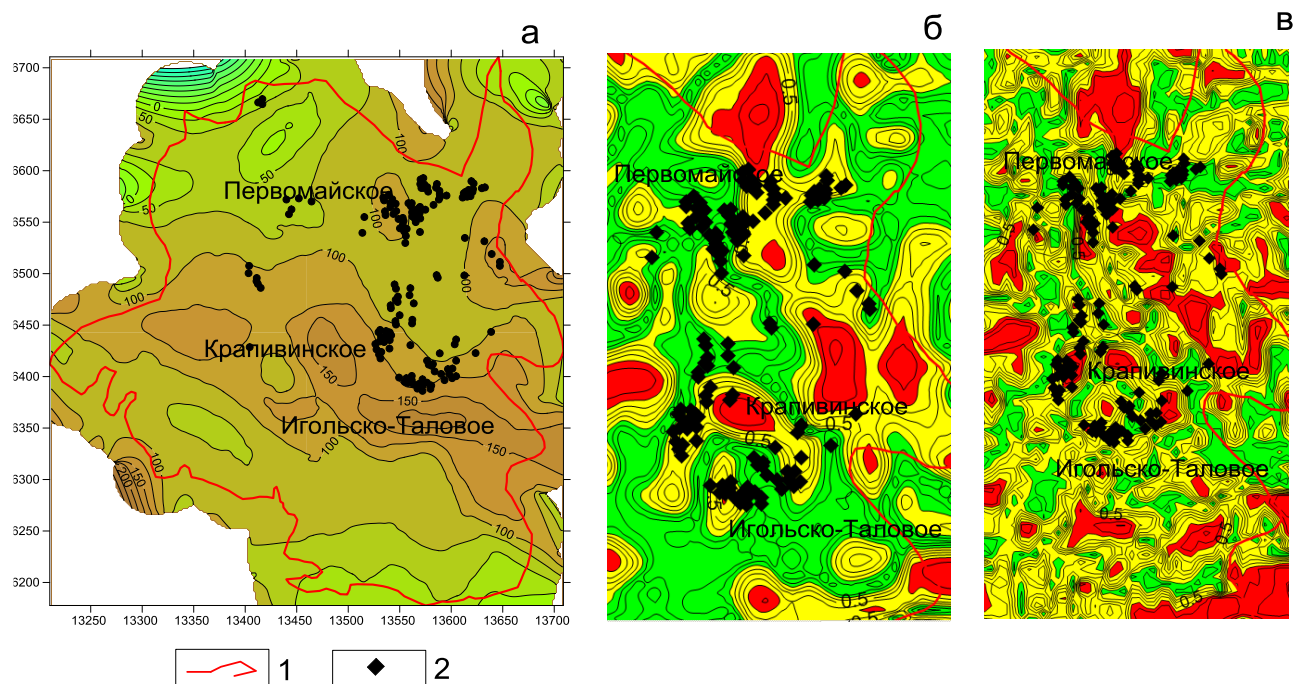


Рис. 1. Неравномерный характер проявления неотектонических движений в пределах Каймысовской НГО.

Условные обозначения: 1 – граница Каймысовской НГО, 2 – продуктивные скважины в верхнеюрском НГК (пояснения в тексте)

Таблица 2

Распределение продуктивных скважин по их принадлежности к определенному интервалу новейших и современных процессов

Интервал амплитуд неотектонических движений	Встречаемость продуктивных скважин %	Интервал значений интенсивности современных процессов	Встречаемость продуктивных скважин %
40–80	7	0–0.2	20
80–120	75	0.2–0.4 0.4–0.6	32 27
120–140	18	0.6–0.8 0.8–1.0	16 5

При сопоставлении числа встречаемости продуктивных скважин выявлено несколько закономерностей. Во-первых, отмечается увеличение числа скважин в области незначительного влияния современных процессов, происходящих за счет их уменьшения в типичной области. При этом число скважин, приуроченных к областям с максимальными значениями показателя, как за весь неотекто-

нический этап в целом, так и на современной стадии развития, остается почти постоянным (18 и 21 %). Во-вторых, отмечается резкое, почти в три раза, увеличение числа встречаемости продуктивных скважин в области незначительного проявления современных процессов по сравнению с таковой за весь неоген-четвертичный этап в целом.

В пространственном отношении полученные закономерности прослеживаются на ряде схем (рис. 1). На рис. 1, а подтверждается ранее высказанное предположение о приуроченности продуктивных скважин и крупных месторождений к типичным значениям амплитуд неотектонических движений [5]. На рис. 1, б для наиболее перспективной части Каймысовской НГО показана взаимозависимость морфологических особенностей рельефов земной поверхности и фундамента с продуктивными скважинами.

Отмечено почти полное отсутствие приуроченности продуктивных скважин к максимальным значениям (красный цвет) изучаемого показателя. Эти значения, скорее всего, контролируют реликтовые области, по которым происходит энерго-массоперенос в пределах мезо-кайнозойского чехла. Существенно большие площади, характеризующие реликты (красный цвет), отмечены для кровли верхнеюрских отложений (рис. 1, в). На рис. 1, в показан результат комплексного морфогенетического анализа рельефов земной поверхности, фундамента и верхнеюрских отложений, характеризующий тенденции в изменении кровли верхнеюрских отложений под действием современных процессов.

Таким образом, в пределах Каймысовской НГО для перспективных в нефтегазоносном отношении районов на завершающей стадии неоген-четвертичного этапа развития мезо-кайнозойского чехла установлена неравномерность в проявлении неотектонических движений, свидетельствующая, с одной стороны, об уменьшении их интенсивности, а с другой – увеличении дифференциации их проявления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвиненко И.В., Ростовцев Н.Н. Краткая характеристика локальных структур низменности // Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской низменности: сб. науч. тр. / Под ред. И.В. Литвиненко, Н.Н. Ростовцева. – М.: Недра, 1958. – С. 157–175.
2. Глухманчук Е.Д., Леонтьевский А.В. Анализ дисгармонии структурных планов на месторождениях Западной Сибири // Вестник Югорского государственного университета. – 2006. – № 3 (4). – С. 24–30.
3. Николаев Н.И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 270 с.
4. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. – М.: Недра, 1988. – 491 с.
5. Новейшая тектоника нефтегазоносных областей Сибири / Под ред. Н. А. Флоренсова. – М.: Недра, 1981. – 239 с.
6. Новейшая тектоника Северной Евразии [Текст]: объяснительная записка к карте новейшей тектоники Северной Евразии масштаба 1:5000000 / Под ред. А.Ф. Грачева. – М.: Геос, 1998. – 147 с.

7. Хилько А.П. Прогноз нефтегазоносности северо-востока Западно-Сибирской плиты на основе неотектонических и геохимических методов: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Новосибирск: ИНГГ СОРАН, 2004. – 23 с.
8. Варламов И.П., Якименко Э.Л. Результаты изучения корреляционных связей современного рельефа и рельефа некоторых структурных горизонтов Западно-Сибирской равнины // Структурно-геоморфологические исследования в Сибири и на Дальнем Востоке: сб. науч. тр. / под ред. В.А. Николаева. – Новосибирск, 1975. – С. 14–18.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. метод. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
10. Лапин П.С., Кркасавчиков В.А. Морфометрические показатели при анализе направленности эрозионного расчленения рельефа // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 105–114.
11. Лапин П.С. Изменение элементов морфогенеза земной поверхности как инструмент эстетических преобразований рельефа // Рельеф и человек: монография / Под ред. Г.Ф. Уфимцева. – М: Научный Мир, 2007. – С. 65–71.

© П. С. Лапин, 2017

ОЦЕНКА ПОЛНОТЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ МЕТОДА СТОЯЧИХ ВОЛН

Артем Александрович Красников

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: akrasn1983@gmail.com

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)330-12-61, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Александр Александрович Бах

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: bakh@gs.nsc.ru

В работе приведены результаты оценки полноты конечно-элементных моделей инженерных сооружений, выполненной на основе сопоставления теоретических характеристик собственных колебаний и экспериментальных данных, полученных методом стоячих волн.

Ключевые слова: стоячие волны, конечно-элементное моделирование, обследование.

FINITE ELEMENT MODEL OF ENGINEERING STRUCTURES COMPLETENESS ASSESSMENT BY STANDING WAVES METHOD EXPERIMENTAL DATA

Artem A. Krasnikov

Altay-Sayan branch of Federal Research Center «Geophysical Survey Russian Academy of Science», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Research Scientist, tel. (383)333-25-35, e-mail: akrasn1983@gmail.com

Alexandr F. Emanov

Altay-Sayan branch of Federal Research Center «Geophysical Survey Russian Academy of Science», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., director, tel. (383)330-12-61, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Alexandr A. Bakh

Altay-Sayan branch of Federal Research Center «Geophysical Survey Russian Academy of Science», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Senior Research Scientist, tel. (383)333-25-35, e-mail: bakh@gs.nsc.ru

In the paper the results of completeness evaluation of finite element models of engineering structures, formed on the basis of a comparison between the theoretical characteristics of the natural oscillation and the experimental data obtained by the method of standing waves, are presented.

Key words: standing waves, finite element modeling, inspection.

В настоящее время расчеты собственных колебаний зданий и инженерных сооружений, как правило, выполняют в специализированных программах конечно-элементного моделирования (ANSYS, NASTRAN, SCAD, SALOME-MECA), позволяющих учитывать геометрические особенности объектов, физические свойства строительных материалов. При этом конечно-элементные модели, являясь приближением реальных сооружений, требуют обоснования, которому не уделяют должного внимания, что приводит к ошибкам в расчетах их сейсмической устойчивости.

Наиболее оптимальными параметрами для верификации конечно-элементных моделей являются характеристики собственных колебаний инженерных сооружений. Для их экспериментального определения по плотной сети наблюдений используют метод восстановления когерентных составляющих волновых полей [1], или метод стоячих волн, который включает современные алгоритмы цифровой обработки записей микросейсмических колебаний и прошел апробацию на большом числе объектов.

Для оценки полноты конечно-элементной модели покрытия арьерсцены Большого театра России (г. Москва) (рис. 1) регистрация микросейсмических колебаний выполнена по нижним поясам ферм в 91 точке. Такая плотность сети точек измерений позволяет выделять моды колебаний в широком диапазоне частот (как низкочастотные, так и высокочастотные), а также строить детальные карты амплитуд колебаний.

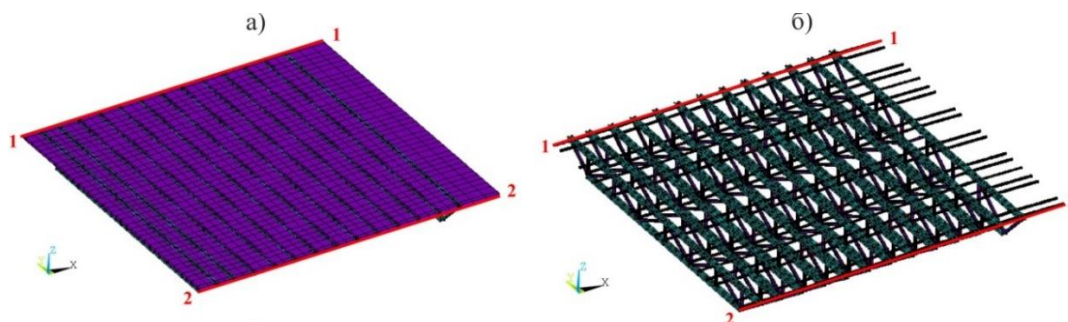


Рис. 1. Конечно-элементная модель покрытия арьерсцены Большого театра России: общий вид (а) и схема ферм (б)

В результате сопоставления расчетов и экспериментальных данных установлено, что собственные вертикальные моды конечно-элементной модели и реальной конструкции имеют схожие формы колебаний (табл. 1, рис. 2, 3). Наблюдаемые отличия в расположении пучностей и форме изолиний амплитуд колебаний указывают на неравномерное распределение жесткости реальной конструкций, в отличие от модели.

Для определения характеристик резонансных колебаний главного корпуса Адлерской ТЭС регистрация микросейсм выполнена по кровле сооружения в 289 точках. Расчеты собственных колебаний главного корпуса Адлерской ТЭС выполнены по трем конечно-элементным моделям (рис. 4) в программе SALOME-MECA [2].

Собственные частоты колебаний покрытия арьерсцены
Большого театра России по данным метода стоячих волн и расчетам

	Значение частот, Гц		Описание мод
	Метод стоячих волн	Метод конечных элементов	
1	4.74	4.53	Вертикальная мода (1,1)
2	6.93	5.74	Вертикальная мода (1,2)
3	10.11	7.92	Вертикальная мода (1,3)
4	10.50	11.34	Вертикальная мода (2,1)
5	13.38	11.43	Вертикальная мода (1,4)

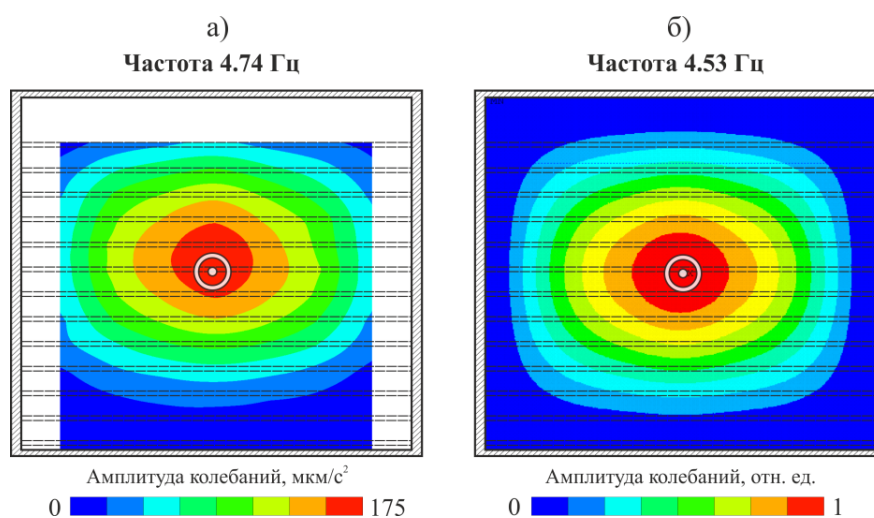


Рис. 2. Карты амплитуд колебаний вертикальной моды (1,1) покрытия арьерсцены по данным метода стоячих волн (а) и расчетам (б)

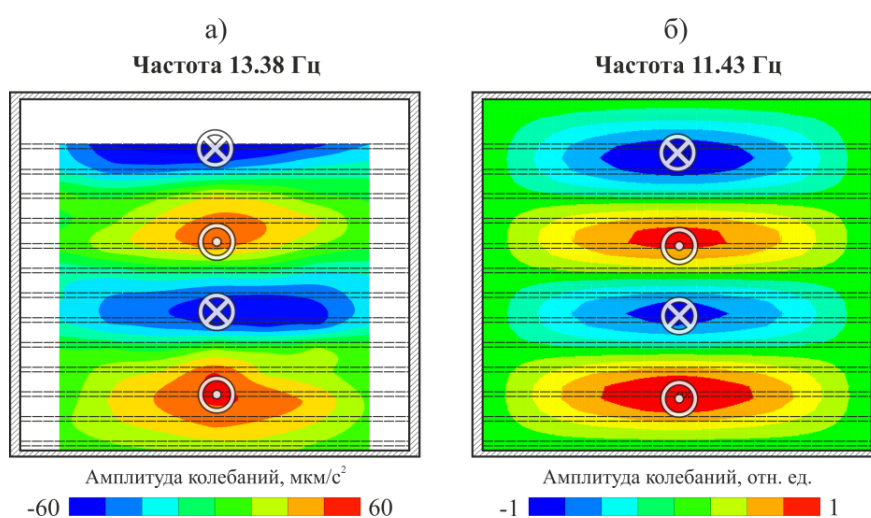


Рис. 3. Карты амплитуд колебаний вертикальной моды (1,4) покрытия арьерсцены по данным метода стоячих волн (а) и расчетам (б)

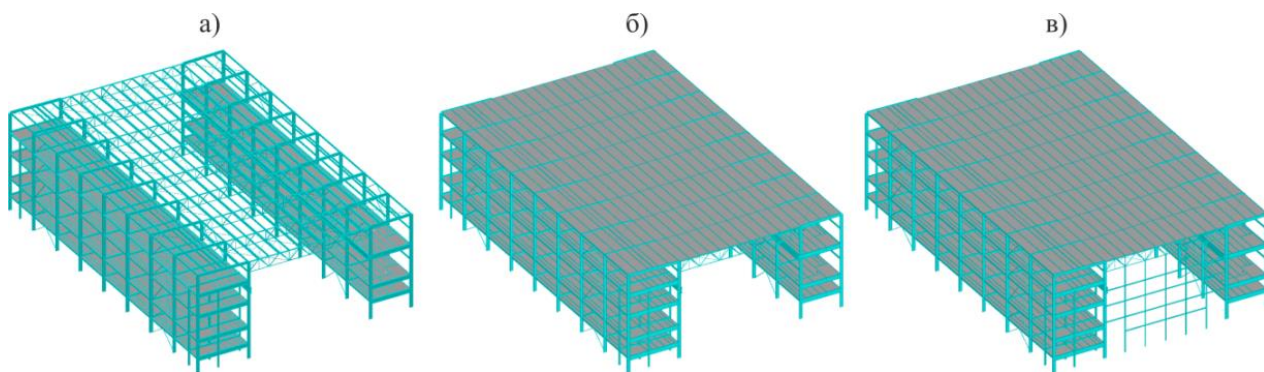


Рис. 4. Конечно-элементные модели
главного корпуса Адлерской ТЭС

Создание конечно-элементных сеток для расчета выполнялось на основе геометрической модели, предоставленной специалистами ЗАО «Инжиниринговый центр ГОЧС «БАЗИС». Совместный анализ результатов расчетов модели, не учитывающей кровлю и торцевые конструкции (рис. 4, а), и экспериментальных данных показывает несоответствие теоретических и экспериментальных мод колебаний по частотам и формам (рис. 5), а также отсутствие в расчетах ряда мод, выделенных экспериментально (табл. 2). По результатам сопоставления расчетов собственных колебаний и результатов измерения микросейсмических колебаний исходная геометрическая модель (рис. 4, а) доработана путем добавления кровли (рис. 4, б) и боковых металлических конструкций (рис. 4, в), в результате чего достигнуто качественное соответствие расчетов и экспериментальных данных (рис. 6, 7).

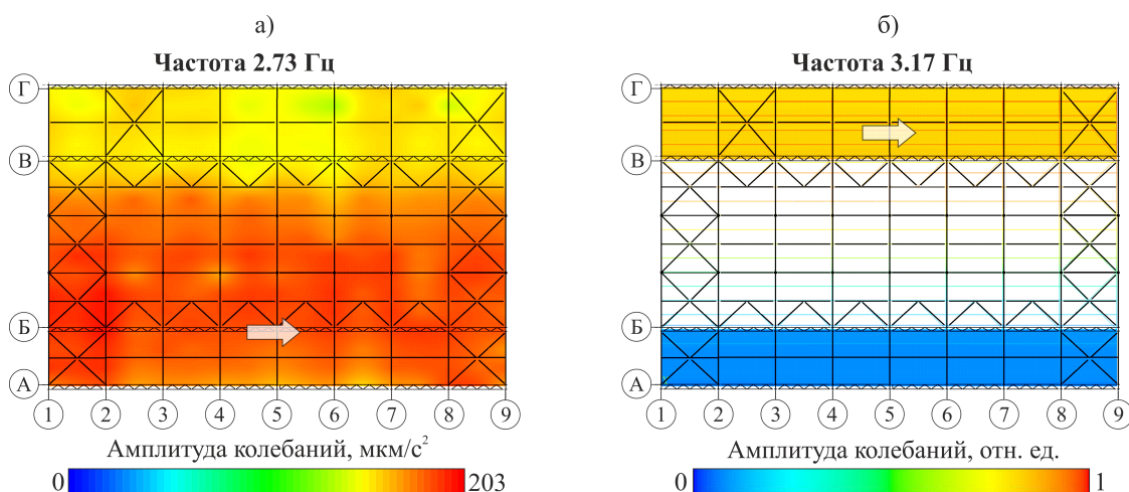


Рис. 5. Карты амплитуд колебаний продольной моды (1,1)
главного корпуса Адлерской ТЭС по данным метода
стоячих волн (а) и расчетам (б)

Собственные частоты колебаний Адлерской ТЭС
по данным метода стоячих волн и расчетам

	Значение частот, Гц				Описание
	Метод стоячих волн	Метод конечных элементов			
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	
1	1.81	1.82	1.48	1.74	Поперечная мода (1,1)
2	2.44	2.32	2.30	2.58	Поперечная мода (2,1)
3	2.73	3.17	2.75	2.80	Продольная мода (1,1)
4	3.08	—	3.02	3.14	Вертикальная мода (1,1)
5	3.42	—	3.26	3.47	Вертикальная мода (2,1)

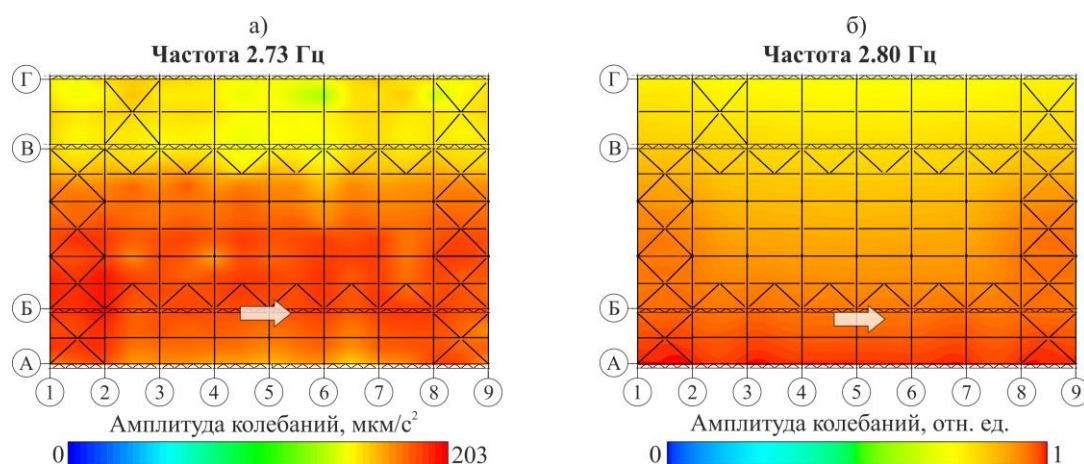


Рис. 6. Карты амплитуд колебаний продольной моды (1,1) главного корпуса Адлерской ТЭС по данным метода стоячих волн (а) и расчетам (б)

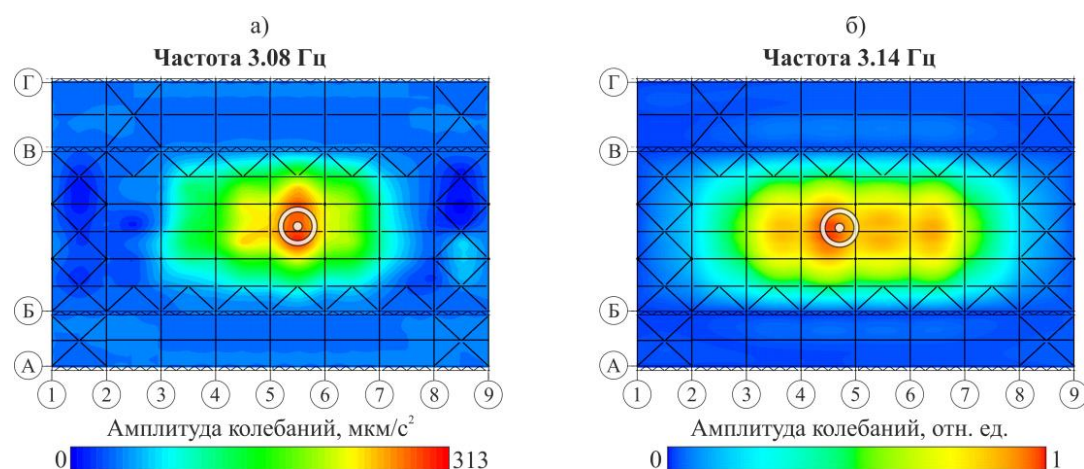


Рис. 7. Карты амплитуд колебаний вертикальной моды (1,1) главного корпуса Адлерской ТЭС по данным метода стоячих волн (а) и расчетам (б)

Очевидно, что даже после сделанных корректировок колебания конечно-элементной модели не полностью соответствуют колебаниям реального здания. Однако показано, как путем уточнения модели можно добиться большей схожести теоретических собственных колебаний и экспериментальных данных по стоячим волнам. При этом большое значение в сопоставлении теоретических и реальных колебаний играет сравнительный анализ форм колебаний, тогда как анализ только частот является малоинформативным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах и др. // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 192–207.
2. Structures and Thermomechanics Analysis for Studies and Research [Электронный ресурс]. URL: <http://www.code-aster.org>

© А. А. Красников, А. Ф. Еманов, А. А. Бах, 2017

ПРИМЕНИМОСТЬ 1D-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В 2D-МОДЕЛЯХ: ИЗГИБ ГРАНИЦ ПЛАСТА И ВПАДИНА

Дмитрий Юрьевич Кушнир

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Михаил Владимирович Свиридов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 152), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Глеб Владимирович Дятлов

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

Юлий Александрович Дашевский

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, директор, тел. (383)332-94-43 (доб. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

В работе анализируется применимость интерпретации синтетических данных электромагнитного каротажа в рамках инверсии на основе одномерной слоистой модели пласта с плоскопараллельными границами. Синтетические данные получены с помощью 2D-моделирования. Рассмотрены две модельные задачи: пласт с изгибом границ и впадина. Показано, что интервал, на котором в результате 1D-инверсии получается несогласованная модель, может достигать 10–20 м в зависимости от параметров моделей. На этом интервале предполагается использование интерпретации в рамках 2D-модели.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, геонавигация, интерпретация данных каротажа, двумерная геоэлектрической модели среды.

APPLICABILITY OF 1D-INVERSION OF RESISTIVITY DATA IN 2D-FORMATION MODELS: BOUNDARY FOLDING AND TROUGH

Dmitry Yu. Kushnir

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

Mikhail V. Sviridov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 147), e-mail: Mikhail.Sviridov@bakerhughes.com

Gleb V. Dyatlov

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., PhD, Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

Yuliy A. Dashevsky

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., D. Sc., Deputy Director, tel. (383)332-94-43 (ext. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

In this paper two synthetic 2D-formation models are considered. The first model is a reservoir with an abrupt boundary folding and the second is a reservoir with a little trough. The 1D-inversion is applied to the synthetic data generated for these models. The goal is to identify an interval near the 2D-feature over which the model that reconstructed through the 1D-inversion is different from the original. The results demonstrate that, depending on the scenario, the model mismatch interval may reach 10–20 meters.

Key words: resistivity logging, geosteering, data interpretation, 2D-geolectrical formation model.

Современные приборы электромагнитного каротажа позволяют делать достаточно большое количество измерений за счет увеличения количества пар источник-приемник и рабочих частот. В данной работе моделирование проводится для двух приборов. Первый работает на частотах 400 кГц и 2 МГц и включает несколько трехкатушечных зондов для дифференциальных измерений (затухание и разность фаз) с наибольшим разносом 1 м, а также двухкатушечные зонды с Z-источником и X-приемником, которые дают азимутально-чувствительные измерения. Второй прибор работает на частотах 20 кГц и 50 кГц и включает один трехкатушечный зонд с разносом 17 м и один двухкатушечный зонд с X-источником и Z-приемником с разносом 5.75 м.

Измерения с обоих приборов используются для определения геоэлектрической модели среды вблизи скважины во время и после бурения. Один из ключевых моментов интерпретации данных – получение согласованной модели среды. Традиционным способом подбора модели является поинтервальная инверсия в рамках слоистой 1D-модели среды с плоскопараллельными границами [1]. Производительность такой инверсии позволяет делать интерпретацию данных каротажа во время бурения. Применимость 1D-инверсии подтверждается огромным количеством полевых примеров [2, 3].

В более сложных геологических условиях слоистая одномерная модель среды недостаточна для описания 2D- и 3D-структур, например, в случае выклинивания пласта, сброса пласта, субвертикального разлома, стратиграфического несогласия и др. Подробный обзор по данной проблеме можно найти в работах [4–6]. В сложных ситуациях традиционная 1D-инверсия не обеспечивает приемлемого согласования измеренных и модельных измерений и согласованности моделей на соседних интервалах скважины. Интерпретация данных, основанная на более сложных моделях среды, требует значительных вычислительных ресурсов и не может быть напрямую применима к данным всей траектории скважины. Поэтому важно определить, в каких случаях достаточна 1D-инверсия, а в каких необходимо применять более сложную модель для интерпретации.

В данной работе рассматриваются две синтетических 2D-модели, построенные на основе реальных полевых данных. Говоря о 2D-модели, мы предпо-

лагаем, что сопротивление не зависит от координаты y , а в проекции x, z все разбивается на области с постоянным сопротивлением прямыми или ломаными. Синтетические сигналы для этих моделей получены с помощью алгоритма, изложенного в работе [7]. Заметим, что алгоритм дает возможности для 2.5D-моделирования, т. е. прибор может принимать любое положение в 3D-пространстве, но здесь мы этой возможностью не пользуемся.

Для обеих моделей применяется следующий алгоритм 1D-инверсии. Веса всех измерений при вычислении невязки равны. Траектория скважины разбивается на подынтервалы по 2 м. На крайнем левом интервале задается стартовая модель из трех слоев с одинаковым удельным электрическим сопротивлением (далее УЭС) 5 Ом·м. Подбирается 6 параметров: 3 УЭС, 2 положения границ слоев, угол наклона слоев относительно траектории. Далее подобранная модель берется в качестве стартовой на следующем интервале и т. д. Таким способом вдали от 2D-неоднородности восстанавливается близкая к истинной модель. В области 2D-неоднородности подынтервалы для 1D-инверсии уменьшаются до 0.5 м, при необходимости добавляются новые слои.

Первая 2D-модель – это низкопроводящий пласт с резким изгибом границ без нарушения непрерывности пласта. Угол изгиба границ является параметром и изменяется от 5 до 30 градусов. Рассмотрены две ситуации: 1) в точке изгиба пласта траектория скважины полностью проходит в продуктивном пласте; 2) траектория скважины дважды пересекает границу пласта.

В случае прохождения траектории скважины внутри пласта 1D-инверсия в рамках трехслойной модели работает достаточно хорошо и дает согласованную модель даже при максимальном значении угла, равном 30 градусов.

Если траектория скважины пересекает границу пласта, то 1D-инверсия не обеспечивает согласованную модель пласта в области изгиба. Более того, 1D-инверсия может привести к неоднозначным результатам. На рис. 1 (сверху) приведены две модели, полученные для одних и тех же синтетических сигналов в случае пласта с изгибом 10 градусов, истинная модель показана пунктиром. На этом же рисунке снизу приведены затухание и разность фаз, пересчитанные в значения кажущегося сопротивления (далее КС), для некоторых частот и разносов. Если для каждой из двух моделей посчитать невязку сигналов с сигналами, полученными при 2D-моделировании, то значения будут сопоставимы. С точки зрения невязки эти две модели эквивалентны. Интервал несогласованности моделей 1D-инверсии с истинной моделью находится в пределах 14–24 м по оси X . При увеличении угла изгиба до 30 градусов длина этого интервала возрастает до 20 м.

Второй пример 2D-модели – низкопроводящий пласт с небольшой впадиной (10 м в ширину). Амплитуда сброса пласта изменяется от 0.5 до 1.5 м. Траектория скважины проходит на расстоянии 1 м от верхней границы пласта. На рис. 2 (слева) показан результат 1D-инверсии в рамках трехслойной модели среды, когда траектория скважины проходит внутри границ пласта (сброс пласта 0.5 м). Модель в целом согласована, если судить по соседним полуметровым интервалам. Положение нижней границы пласта в области впадины определяется с некоторой ошибкой.

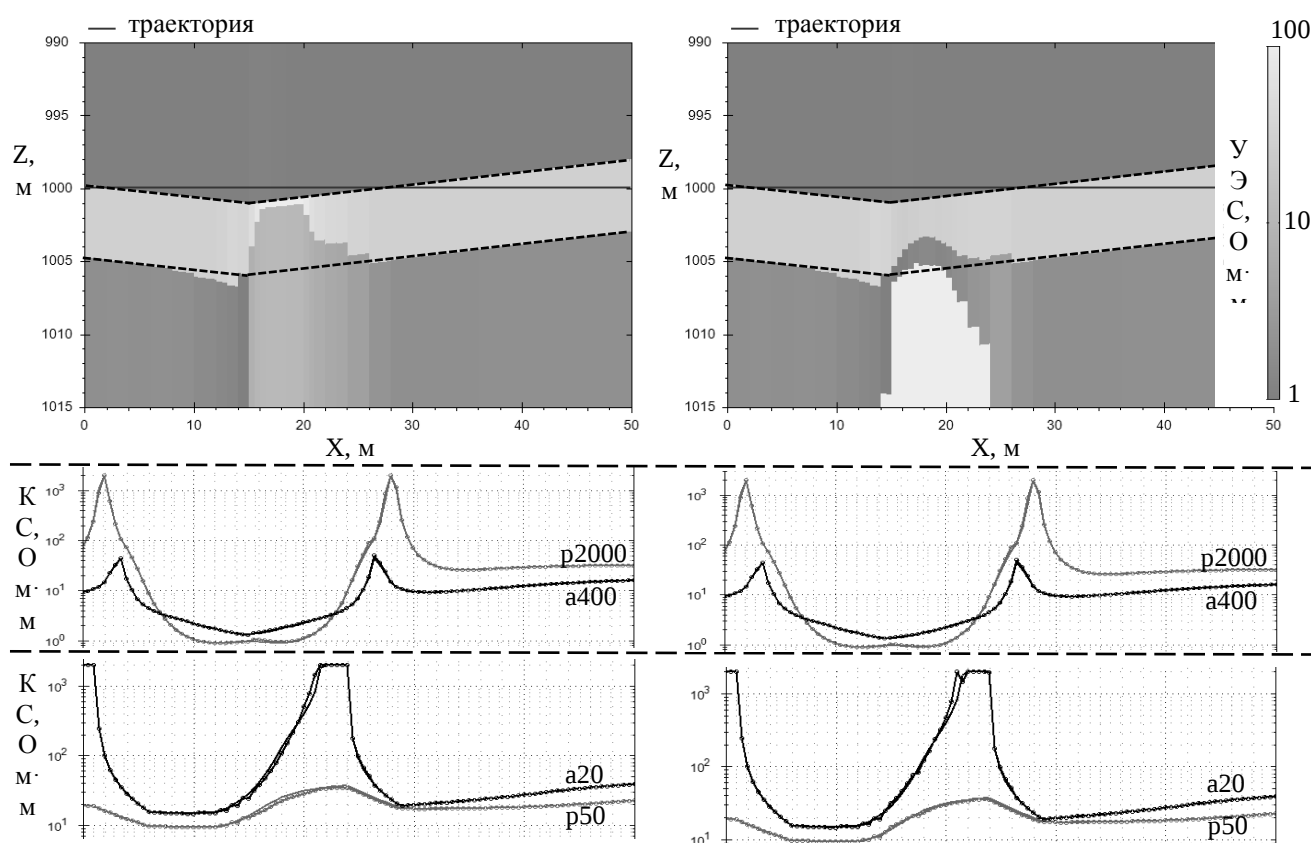


Рис. 1. Результаты интерпретации (сверху), полученные в результате 1D-инверсии данных для модели пласта с изгибом 10 градусов в рамках трехслойной модели среды в области изгиба (слева) и четырехслойной модели (справа). Пунктиром показана истинная модель (толщина пласта – 5 м, УЭС сверху вниз: 1, 30, 2 Ом·м). Снизу приведены значения КС для истинной модели (сплошная линия) и полученные в результате инверсии (линия с маркерами -o-): p2000 – разность фаз, 2 МГц; a400 – затухание, 400 кГц; a20 – затухание, 20 кГц; p50 – разность фаз, 50 кГц

На рис. 2 (справа) показан один из результатов 1D-инверсии, когда траектория скважины пересекает границу пласта (сброс пласта 1.5 м). Видно, что в области впадины на интервале 14–32 м по оси X полученная 1D-модель не согласуется с истинной (показана пунктиром). Более того, 1D-модель внутренне не согласована на соседних полуметровых интервалах, так как изменяется количество слоев в модели и значительно меняется толщина пласта.

В приведенных синтетических примерах моделей пластов с изгибом границ и впадиной мы применили 1D-инверсию для синтетических сигналов, полученных с помощью 2D-моделирования. Во всех случаях определен интервал вблизи 2D-особенности, на котором истинная модель отличается от полученной в результате 1D-инверсии. В зависимости от параметров 2D-модели этот интервал может достигать 20 м. Показано, что 2D-неоднородности начинают суще-

ственно влиять на измерения при пересечении траекторией скважины границ пласта, при этом пересекаемая и ближайшие границы определяются достаточно точно в результате 1D-инверсии. Для определения положения дальних границ модели предлагается использовать инверсию в рамках 2D-модели.

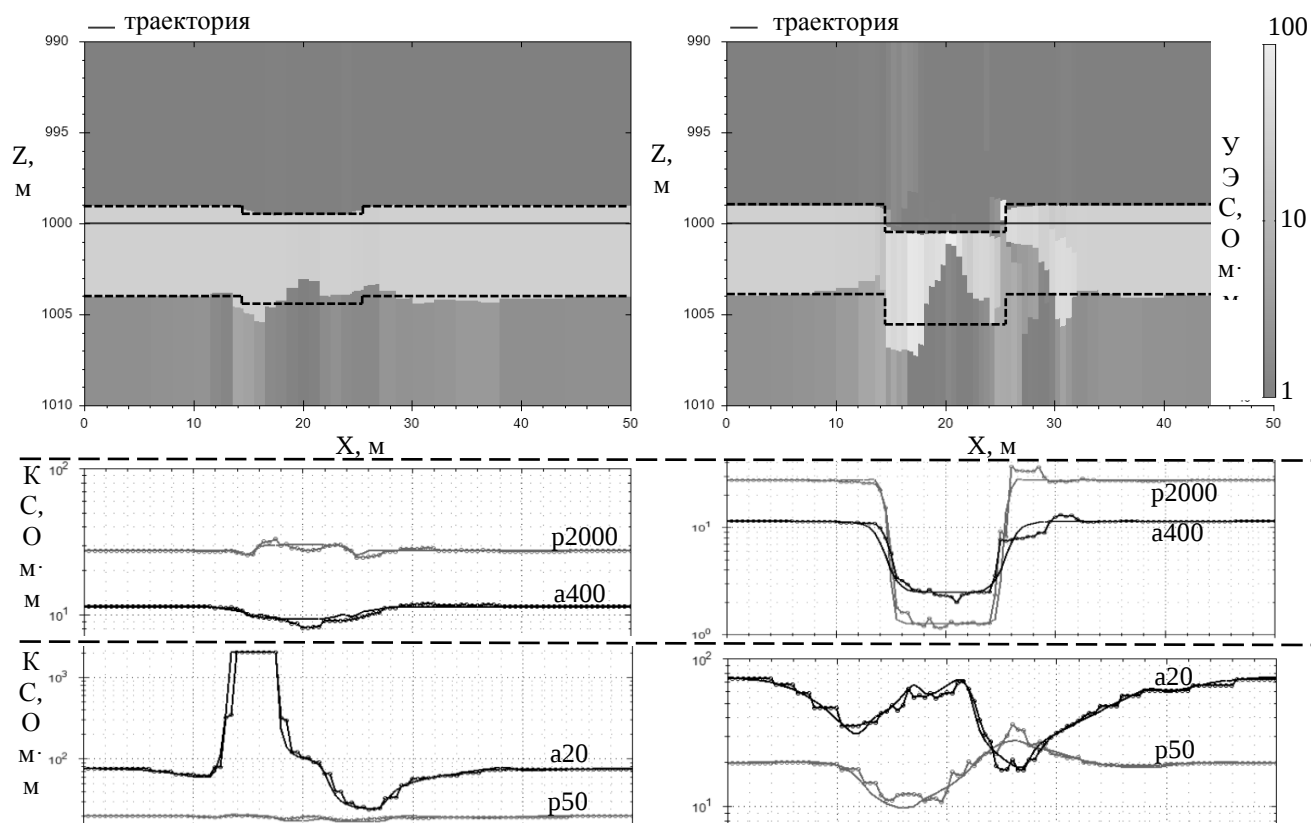


Рис. 2. Результаты интерпретации, полученные в результате 1D-инверсии данных модели пласта с впадиной в случае сброс 0.5 м (слева) и 1.5 м (справа). Пунктиром показана истинная модель (толщина пласта – 5 м, УЭС сверху вниз: 1, 30, 2 Ом·м).
Остальные обозначения такие же, как и на рис. 1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. New Software for Processing of LWD Extradeep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data / M. Sviridov, A. Mosin, Yu. Antonov et al. // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2014. – Vol. 17. – P. 109–127.
2. Navigating and Imaging in Complex Geology with Azimuthal Propagation Resistivity While Drilling / C. Bell, J. Hampson, P. Eadsforth et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 24-27, 2006. – SPE-102637.
3. Improving Well Placement and Reservoir Characterization with Deep Directional Resistivity Measurements / M.V. Constable, F. Antonsen, P.A. Olsen et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 8-10, 2012 – SPE-159621-MS.

4. Avdeev D.B. Three-dimensional electromagnetic modeling and inversion from theory to application // Surveys in Geophysics. – 2005. – Vol. 26. – P. 767–799.
5. Inversion-based workflow to image faults crossed by the wellbore using deep directional resistivity provides new way of understanding complex formations / C. Dupuis, D. Omeragic, Y.-H. Chen, T. Habashy // SPWLA 55th Annual Logging Symposium, Abu Dhabi, UAE, May 18-22, 2014. – SPWLA-2014-WWW.
6. Workflow to Image Unconformities with Deep Electromagnetic LWD Measurements Enables Well Placement in Complex Scenarios / C. Dupuis, D. Omeragic, Y.-H. Chen, T. Habashy // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, 30 September–2 October, 2013. – SPE 166117.
7. Dyatlov G.V., Onegova E.V., Dashevsky Yu.A. Efficient 2.5D electromagnetic modeling using boundary integral equations // Geophysics. – 2015. – Vol. 80 (3). – P. 163–173.

© Д. Ю. Кушнир, М. В. Свиридов, Г. В. Дятлов, Ю. А. Дашевский, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «КЛЮЧИ» ПО ЗАПИСЯМ МИКРОСЕЙСМ

Юрий Иванович Колесников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Сейсмологический филиал федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий геофизик

Константин Владимирович Федин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики

Описаны методика и результаты определения по микросейсам резонансных свойств приповерхностного грунтового слоя на территории геофизической обсерватории «Ключи». С помощью накопления амплитудных спектров большого числа шумовых записей выделены три низших моды стоячих волн сжатия-растяжения в слое, построены карты распределения частот этих мод и коэффициентов усиления колебаний на участке наблюдений относительно эталонной точки на скальной породе.

Ключевые слова: верхняя часть разреза, резонансные свойства, упругие стоячие волны, микросейсмы.

DETERMINATION OF NEAR SURFACE RESONANT PROPERTIES IN THE TERRITORY OF GEOPHYSICAL OBSERVATORY «KLUCHI» USING MICROTREMOR RECORDS

Yury I. Kolesnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Principal Research Scientist, Associate Professor, tel. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Seismological Branch of the Federal Research Center of Unified Geophysical Service RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Lead Geophysicist

Konstantin V. Fedin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Senior Teacher of Geophysics Department

We describe the methodology and results of determining resonant properties of the surface soil layer in the territory of geophysical observatory "Kluchi" using microtremor records. Accumulation of a large number of microtremor amplitude spectra enabled to detect three lower modes of compressional standing waves in the layer and to build the maps of mode frequencies and amplification factors in the area of observation relative to the reference point on the hard rock.

Key words: near surface, resonant properties, elastic standing waves, microtremor.

Известно, что реакция земной поверхности на землетрясения зависит от локальных геологических условий, которые могут существенно меняться в пределах относительно небольших территорий. Колебания на поверхности мягких осадков могут усиливаться по отношению к скальным породам в десятки и даже сотни раз, как это было, например, во время разрушительного Мексиканского землетрясения 1985-го года ($M_s = 8.1$) [1]. Один из подходов к оценке реакции земной поверхности на возможные сейсмические воздействия основан на анализе микросейсм [2, 3]. Методы, основанные на регистрации микросейсм, относительно дешевы и не требуют больших временных затрат, но, как правило, характеризуются не очень высокой точностью. Кроме того, в большинстве случаев такие методы не предполагают детального анализа частотной зависимости отклика земной поверхности на возможные землетрясения.

В работе [4] на результатах физического моделирования показано, что определять резонансные свойства верхней части разреза (ВЧР) можно простым накоплением амплитудных спектров шумовых записей. При осреднении достаточно большого числа амплитудных спектров относительно коротких интервалов микросейсмических записей на суммарном спектре появляются резкие пики на собственных частотах приповерхностного низкоскоростного слоя, соответствующие семейству стоячих волн, формирующихся в нем под действием микросейсм. Характерной чертой этих пиков является их регулярность, так как собственные частоты низкоскоростного слоя на жестком фундаменте определяются формулой [5]

$$f_n = \frac{(2n-1)V}{4h}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где V – скорость упругих волн (продольных для вертикальных и поперечных для горизонтальных колебаний в слое), h – мощность слоя.

Для оценки возможностей определения резонансных свойств ВЧР по микросейсмам была проведена регистрация шумовых записей на территории геофизической обсерватории «Ключи», расположенной в 7 км восточнее Академгородка (Новосибирск, Россия). Запись велась одноканальными цифровыми регистраторами Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц. Так как использовались вертикальные геофоны GS-20DX, то целевыми волнами в данном эксперименте были стоячие волны вертикального сжатия-растяжения. Система наблюдений показана на рис. 1. Кроме восемнадцати геофонов, установленных на рыхлых грунтах, одна точка наблюдений (эталонная), относительно которой определялось резонансное усиление колебаний во всех других точках, располагалась на коренных породах в подземном бункере.

На рис. 2 показан пример накопления амплитудных спектров участков шумовых сигналов длительностью примерно по 8.2 с (8192 отсчета) для точки номер 5. Как видно из рисунка, если накопление в течение одних суток еще не приводит к появлению на осредненном спектре каких-либо резких регулярных пиков, то при обработке более длительных записей такие пики появляются, причем их амплитуда с увеличением числа накоплений постепенно растет. При дальнейшем увеличении длительности обрабатываемой записи (более 10 суток)

возрастание амплитуд этих пиков резко замедляется. Закономерность распределения пиков на оси частот для всех точек наблюдения, расположенных на рыхлом грунте, с высокой точностью согласуется с формулой (1), что говорит о резонансной природе этих пиков. В то же время накопление амплитудных спектров микросейсм, записанных на коренных породах в бункере, не приводит к появлению на осредненном спектре каких-либо регулярных пиков.



Рис. 1. Схема системы наблюдений на территории обсерватории; треугольниками показаны места установки сейсмоприемников

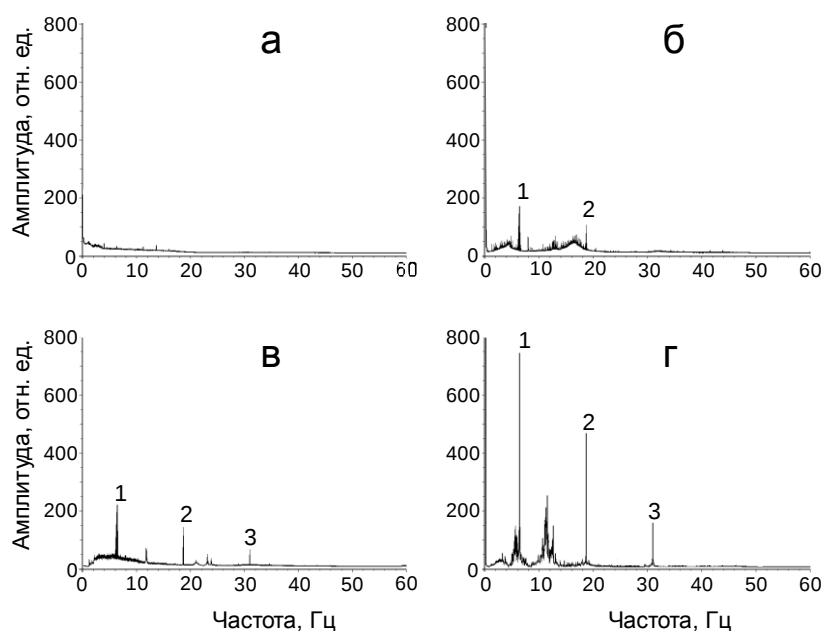


Рис. 2. Результаты накопления амплитудных спектров микросейсм, записанных в точке 5 в течение одних (а), трех (б), пяти (в) и десяти (г) суток; цифрами отмечены номера мод стоячих волн

На рис. 3 приведены карты распределения на площади наблюдений частот первых трех мод стоячих волн сжатия-растяжения в приповерхностном грунтовом слое и соответствующие коэффициенты усиления скоростей вертикальных колебаний на этих частотах, рассчитанные как отношения амплитуд резонансных пиков к амплитудам соответствующих частотных составляющих осредненного спектра микросейсм, записанных на коренных породах в бункере. Карты построены по шумовым данным, записанным в течение 14 суток. Как можно видеть, для всех трех мод карты частот визуально практически идентичны, различаются только шкалы частот. Этого и следовало ожидать, учитывая то, что частоты всех мод стоячих волн, согласно формуле (1), отличаются лишь масштабным коэффициентом $(2n - 1)$.

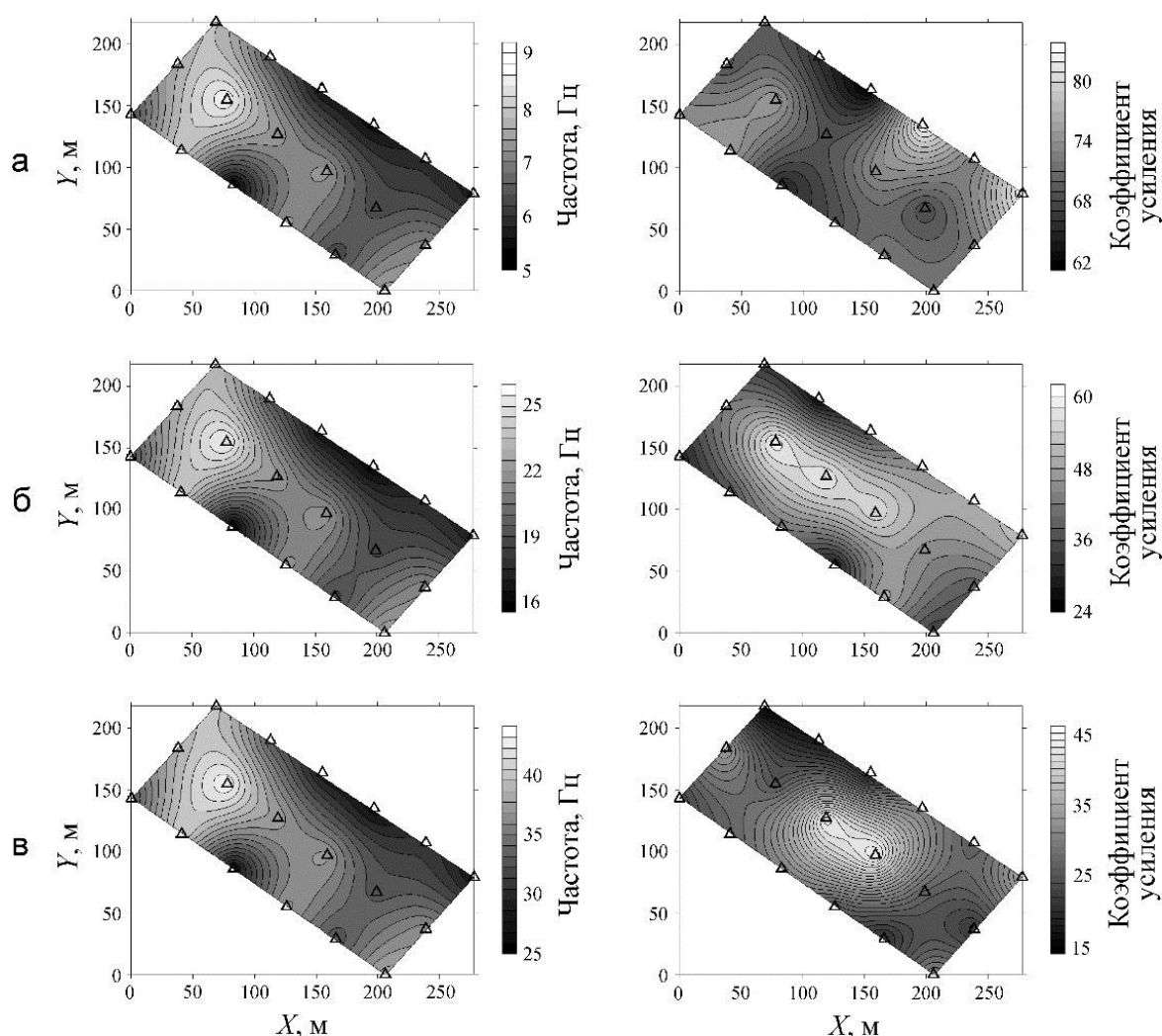


Рис. 3. Карты распределения на площади наблюдений частот первой (а), второй (б) и третьей (в) мод стоячих волн сжатия-растяжения в приповерхностном слое и соответствующие коэффициенты усиления скоростей вертикальных колебаний на этих частотах; треугольниками показаны точки наблюдений

Карты же распределения коэффициентов усиления скоростей вертикальных колебаний для трех низших мод существенно отличаются, причем в среднем при понижении номера моды наблюдается рост этих коэффициентов. Коэффициенты на всей площади имеют достаточно высокие значения, но нужно заметить, что это коэффициенты для вертикальных колебаний земной поверхности, которые, в отличие от горизонтальных колебаний, не являются определяющим фактором в оценке сейсмической опасности территорий. Данные о сдвиговых резонансах в ВЧР в данной работе не рассматриваются, но предварительные оценки говорят о том, что коэффициенты усиления скоростей горизонтальных колебаний для данной площадки в среднем на порядок ниже, чем вертикальных.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности предложенного метода определения резонансных свойств ВЧР по микросейсам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Flores-Estrella H., Yussim S., Lomnitz C. Seismic response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research // *Natural Hazards*. – 2007. – Vol. 40, Issue 2. – P. 357–372.
2. Сейсмическое микрорайонирование / под ред. Павлова О.В., Рогожина В.А. – М.: Наука, 1984. – 236 с.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
4. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // *Технологии сейсморазведки*. – 2015. – № 4. – С. 89–96.
5. Kramer S.L. *Geotechnical earthquake engineering*. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. – 1996. – 653 p.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, 2017

**ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
СЕВЕРО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ КЕРНА СКВАЖИН)**

Зинаида Никитична Гнибиденко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-49-66, e-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Александра Викторовна Левичева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Владимир Аркадьевич Маринов

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», 655002, Россия, г. Тюмень, ул. Осипенко, 79/1, кандидат геолого-минералогических наук, эксперт департамента ГРП Север Западной Сибири, тел. (913)913-49-60, e-mail: Marinovva@mail.ru

Представлены результаты комплексного палеомагнитного, палеонтологического и геолого-стратиграфического изучения верхнемеловых отложений северо-востока Западной Сибири, вскрытых восемью скважинами на севере Красноярского края. На основании полученных данных разработаны магнитостратиграфические разрезы верхнемеловых отложений (долганской, дорожковской и насоновской свит) всех исследованных скважин. Породы долганской, дорожковской и насоновской свит характеризуются прямой полярностью с маломощными горизонтами обратной намагниченности.

Ключевые слова: палеомагнетизм, магнитостратиграфия, магнитозона, верхнемеловые отложения, северо-восток Западной Сибири.

**PALEOMAGNETISM OF THE UPPER CRETACEOUS
SEDIMENTS ON THE NORTH-EAST OF WESTERN SIBERIA
(ON RESULTS OF STUDY WELLS)**

Zinaida N. Gnibidenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Leading Research Scientist, tel. (383)330-49-66, e-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Alexandra V. Levicheva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Research Scientist, tel. (383)330-49-66, e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Vladimir A. Marinov

ООО «Tyumen oil scientific centre», 655002, Russia, Tyumen', 79/1 Osipenko St., Ph. D., Expert of Department GRR North of Western Siberia, tel. (913)913-49-60, e-mail: Marinovva@mail.ru

Presents results of complex paleomagnetic, paleontological and geological investigations of the Upper Cretaceous deposits of wells stripped in the North-East of Western Siberia (Krasnoyarsk

region). The Upper Cretaceous magnetostratigraphic sections of the eight wells (Dolgan, Doroschkovskaya and Nasonovskaya Suites) are developed Dolgan, Doroschkovskaya and Nasonovskaya suites are characterized by normal polarity with low power horizons of reversal magnetization.

Key words: paleomagnetism, magnetostratigraphy, magnetozone; Upper Cretaceous sediments, North-East of Western Siberia.

В статье представлены результаты комплексных палеомагнитных, палеонтологических и геолого-стратиграфических исследований керна 8-и скважин, пробуренных в Красноярском крае на северо-востоке Западной Сибири в пределах Енисей-Хатангского мегапрогиба. В этих скважинах изучены верхнемеловые отложения долганской, дорожковской и насоновской свит. Целью этого исследования является получение палеомагнитной характеристики верхнемеловых отложений левобережья нижнего течения р. Енисей, сопоставление палеомагнитной характеристики исследуемых отложений с палеонтологическими данными и разработка магнитостратиграфических разрезов исследуемых скважин. Непрерывность геологической летописи, а, следовательно, и полнота палеомагнитной записи при весьма и весьма слабой палеомагнитной изученности верхнего мела в Западной Сибири являются важными предпосылками для продолжения на его севере начатых нами на юге Западно-Сибирской плиты палеомагнитных исследований верхнего мела.

Отбор образцов и обработка полученных результатов в целом не отличались от общепринятой и стандартной методики палеомагнитных исследований [1, 3, 4]. Из керна, ориентированного «верх-низ» и представляющего собой один стратиграфический уровень (штуф), вручную или с помощью пробоотборника конструкции А.А. Бишаева отбирались образцы-кубики с ребром грани 2 см. Образцы-кубики вырезались из центральной части керна так, чтобы ось Z была направлена по оси керна вниз; направления горизонтальных осей X и Y произвольны. Каждый стратиграфический уровень представлен двумя-тремя образцами-кубиками. Для обеспечения комплексных исследований отбор ориентированных образцов для палеомагнитного изучения производился в месте отбора проб для палеонтологического изучения.

В процессе обработки собранных коллекций исследуемых скважин определялись магнитные характеристики пород, проводились специальные лабораторные магнитные исследования, направленные на выделение характеристической (первичной) компоненты естественной остаточной намагниченности, образовавшейся в процессе формирования породы. Сохранность естественной остаточной намагниченности и ее магнитоустойчивость устанавливались на первом этапе с применением временной магнитной чистки. На втором этапе исследований определялся компонентный состав естественной остаточной намагниченности (ЕОН) с целью выделения характеристической (первичной в нашем случае) компоненты ЕОН, для чего использовалось ступенчатое терморазмагничивание и размагничивание переменными магнитными полями.

При лабораторных палеомагнитных исследованиях использовались зарубежные приборы и установки: каппаметр KLY-2 (Chezh Republic – измерение магнитной восприимчивости), спиннер-магнитометр JR-6A (Chezh Republic – измерение направления и величины естественной остаточной намагниченности), установка для терморазмагничивания TD48, криогенный магнитометр 2G Enterprises с встроенной установкой для размагничивания образцов переменным магнитным полем.

Геологический разрез и биостратиграфия изученных скважин

Нижняя часть разреза верхнего мела в Усть-Енисейском структурно-фациальном районе представлена долганской, дорожковской и насоновской свитами. Долганская свита (верхи среднего альба–сеноман) представлена преимущественно песками зеленого, зеленовато- и желтовато-серого цвета с многочисленными прослоями зеленоватых песчаников, зеленовато-серых алевролитов и темно-серых тонкослоистых глин. Для пород обычны намывы обугленного растительного детрита. В песках и песчаниках встречаются обломки лигнитизированной древесины, оолиты и линзы сидерита, зерна янтаря. Мощность изученных отложений долганской свиты в 8-и скважинах изменяется от 10.5 до 60 м.

Дорожковская свита (верхний сеноман–низы среднего турона) сложена глинами и глинистыми алевролитами зеленовато- и буровато-серыми, нередко с глауконитом, с подчиненными прослоями песков и песчаников мощностью до 1.5 м. Мощность свиты в изученных скважинах составляет от 17.5 до 60.5 м. Насоновская свита (верхи среднего турона–сантон) представлена серыми и зеленовато-серыми, часто глауконитовыми, алевролитами с прослоями глин, песков, фосфоритов. Мощность свиты в изученных скважинах колеблется от 7 до 20 м. Всего из 8-и исследуемых скважин отобрано 262 штуфа, из которых изготовлено 685 образцов-кубиков с размером грани 20 мм. Плотность отбора кернов составляла в среднем 1 м. В верхах долганской и низах дорожковской свит в скважине Ванкорская 10 (интервалы глубин 1018.5–991.3 м) обнаружены фораминиферы, позволяющие датировать эти отложения нижнетуронским подъярусом верхнего мела (K2t1) (зона *Inoceramus labiatus*). По всему разрезу дорожковской свиты в скважине Восточно-Лодочная 1р обнаружены фораминиферы и иноцерамиды, характерные для среднетуронского и верхнетуронского подъярусов верхнего мела (K2t2-3) (зона *Inoceramus lamarcki*) [2].

Магнитные свойства пород

Породы исследуемых свит по магнитным свойствам весьма неоднородны. Высокие значения магнитной восприимчивости (χ) и естественной остаточной намагниченности (ЕОН) имеют глины, алевролиты и песчаники дорожковской и насоновской свит.

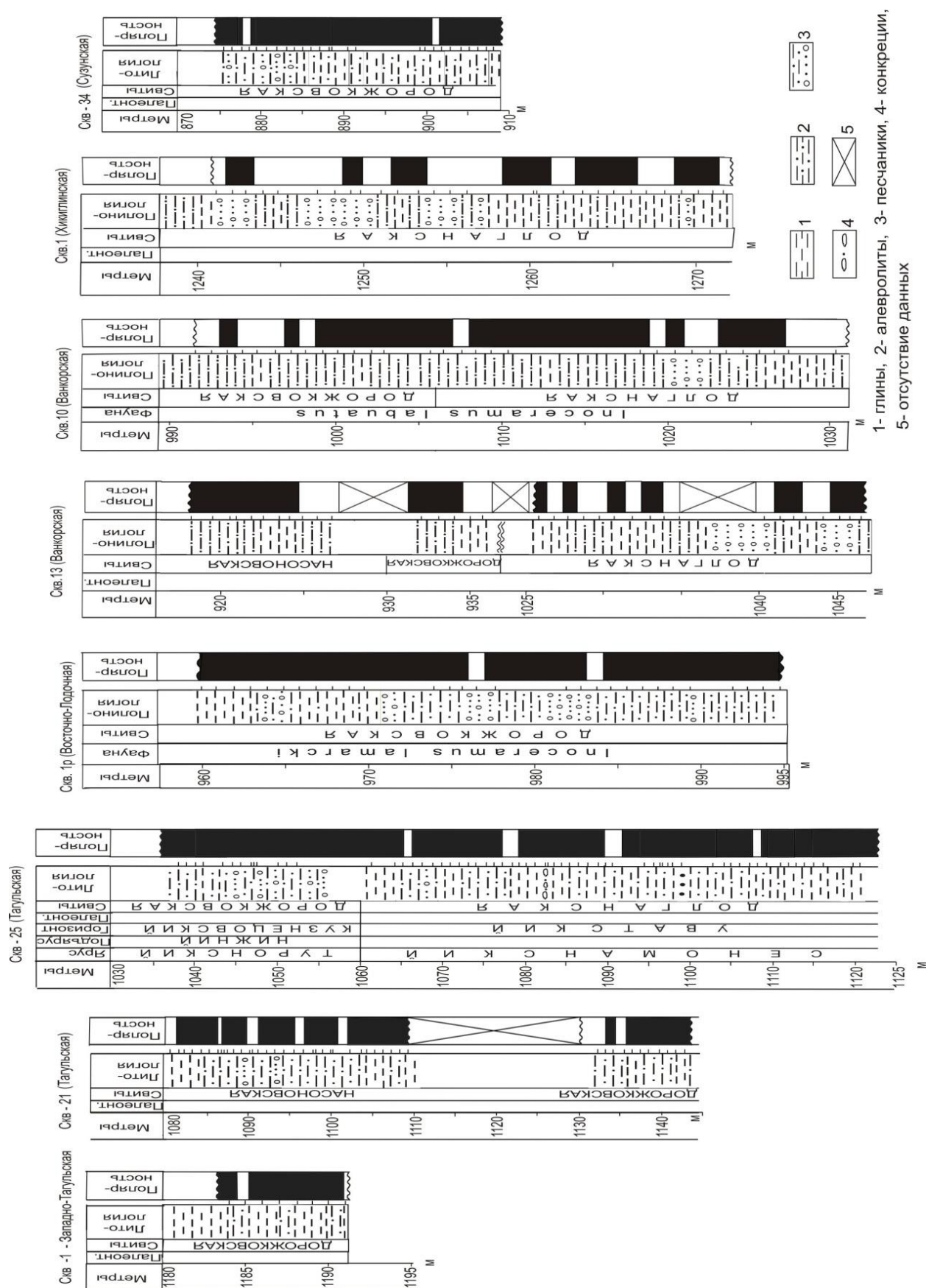


Рис. Магнитостратиграфические разрезы изученных скважин, пробуренных на северо-востоке Красноярского края

Магнитная восприимчивость пород этих свит изменяется от 31.6 до 220.5×10^{-5} ед. СИ, при средних значениях 120.4×10^{-5} ед. СИ, а естественная остаточная намагниченность варьирует в пределах 10.5 – 36.8 мА/м, при средних значениях 13.7 мА/м. Фактор Кенигсбергера (Q_n) у всех исследуемых пород меньше 1. Для получения магнитополярной характеристики разрезов исследуемых скважин были выполнены эксперименты по ступенчатому терморазмагничиванию и размагничиванию переменным магнитным полем образцов горных пород. Эти эксперименты выполнены для 30 % всех исследованных образцов (лидирующей коллекции) и распределены равномерно по разрезам всех 8-и скважин.

Для всех остальных образцов палеомагнитной коллекции был применен один акт размагничивания (переменным полем или температурой), установленный при работе с лидирующей коллекцией. Вероятными минералами-носителями намагниченности, скорее всего, являются гематит, магнетит и гидроокислы железа. При дальнейших исследованиях предполагается выполнить термомагнитный анализ (ТМА) и подтвердить или поправить наши предположения. В процессе температурной магнитной чистки естественная остаточная намагниченность большей части образцов пород демонстрирует двухкомпонентный состав ЕОН. Низкотемпературная неустойчивая компонента разрушается преимущественно в интервале температур 100 – 200 – 300 °С. Вероятнее всего, это вязкая компонента. Характеристическая компонента намагниченности прямой и обратной полярности выделяется начиная с 200 – 300 – 400 °С и разрушается вблизи температур 500 – 600 – 700 °С.

Магнитобиостратиграфический разрез

По характеристической компоненте естественной остаточной намагниченности были построены палеомагнитные разрезы 8-и исследуемых скважин (рисунок). Палеомагнитные разрезы долганской, дорожковской и насоновской свит характеризуются преобладающей прямой полярностью с единичными горизонтами обратной намагниченности. Сопоставление полярности выделенных палеомагнитных направлений и данных фаунистического изучения с магнитохронологической шкалой Ф.М. Градштейна [5] показаны на рисунке. Прямая полярность геомагнитного поля исследуемых скважин и палеонтологические данные позволяют заключить, что время формирования отложений долганской (верхняя часть), дорожковской и насоновской свит в исследуемых скважинах укладывается во временной диапазон позднего мела – сеномантуронский век, отвечающий части интервала прямой намагниченности магнитополярного хрона С34 общей магнитохронологической шкалы Ф. М. Градштейна (~ 100 – 85.5 млн лет).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. – Саратов: Изд-во СГУ, 1997. – 179 с.

2. Отчет по договору № ТННЦ-6484/13 (025/13) «Выполнение работ по стратиграфическому, палеобиогеографическому, седиментологическому и литофациальному анализу верхнемеловых отложений Большехетского проекта и прилегающих территорий». – Новосибирск, 2014. – 112 с.
3. Палеомагнитология / А.Н. Храмов, Г.И. Гончаров, Р.А. Комиссарова и др. – Л.: Недра, 1982. – 312 с.
4. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм. – Л.: Недра, 1967. – 252 с.
5. The Geological Time Scale 2012 / F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg // The Geologic Time Scale 2012. – Elsevier, 2012. – P. 793–853.

© *З. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева, В. А. Маринов, 2017*

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ. НЕЛОКАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

Виталий Николаевич Доровский

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, технический советник, тел. (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

Егор Владимирович Вторушин

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43, e-mail: egor.vtorushin@bakerhughes.com

Евгений Игоревич Роменский

Институт математики им. С. Л. Соболева, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)329-76-57, e-mail: evrom@math.nsc.ru

Рассматривается разрушение слоя горной породы в рамках нелокальной теории упругости при пластическом течении. «Нелокальность» обусловлена зависимостью энергии деформируемой среды от производных метрического тензора деформаций. Показано: при продольном нагружении выделенного слоя пространственное распределение «поперечного» напряжения испытывает периодическое изменение. Максимальные значения напряжения достигаются в нестационарном режиме. Последующие разрушения горной породы ассоциируются с зонами максимального поперечного нагружения.

Ключевые слова: пластическое течение, разрушение горной породы, нелокальная теория упругости.

ROCK FAILURE AND NONLOCAL ELASTICITY THEORY

Vitaly N. Dorovsky

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., D. Sc., Technical Advisor, tel. (383)332-94-43, e-mail: Vitaly.Dorovsky@BakerHughes.com

Egor V. Vtorushin

Novosibirsk Technology Center «Baker Hughes», 630090, Russia, Novosibirsk, 4a Kutateladze St., Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43, e-mail: egor.vtorushin@bakerhughes.com

Evgeniy I. Romenski

Sobolev Institute of Mathematics, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Koptug Prospect, D. Sc., Chief Researcher, tel. (383)329-76-57, e-mail: evrom@math.nsc.ru

The paper considers failure of a stratum within the framework of a nonlocal elasticity theory for a plastic flow. Here, the nonlocality is determined by dependence between deformation energy and metric deformation tensor derivatives. Our study has demonstrated that in case of a stratum under lateral stress, the spatial distribution of shear stress changes periodically. The maximum stress values are obtained in nonsteady regime. The following rock failures are associated with the zones of maximum shear loading.

Key words: plastic flow, rock fracture, nonlocal elastic theory.

In the classical elasticity theory, deformations are characterized by a metric tensor of elastic deformations g^{ik} . Plastic deformations also require considering a curvature tensor. IN their turn, nonelastic deformations take the deformation field out from Euclidean space. In [1] curvature is considered as a parameter of state having effect on deformation energy that makes the theory nonlocal. Unfortunately, the authors have provided no solid arguments for the introduction of additional degrees of freedom into the first law of thermodynamics, but still there is a whole class of problems in the failure theory, where the considered approach can be regarded as a reasonable one.

Let's consider a thin rod bended in a way its curvature radius at the local bend point is equal to $1/R$. If one draws a line along the rod, the rod's upper part will be extended by δl_1 , while the lower part will be compressed by δl_2 relative to the rod. The first law of thermodynamics that unambiguously determines the process's dynamics, for a one-dimensional rod can be written as $dE_0 = TdS + f_1 dl_1 + f_2 dl_2$, where E_0 denotes the inner energy, T , S – temperature and entropy, $f_1 dl_1$, $f_2 dl_2$ – the forces affecting the rod while extension and compression. The parameters δl_1 , δl_2 can be altered by the length of 'average' line and the curvature according to $2\delta l = \delta l_1 + \delta l_2$, $2\pi \cdot (-\delta R / R^2) = \delta l_1 - \delta l_2$, so the first law will be expressed as: $dE_0 = TdS + (f_1 + f_2)dl + \pi(f_1 - f_2)dR / R^2$.

Hence, the assumption that the rod is bended requires a degree of freedom related to the curvature to be introduced. At the same time, there are indications that the classical elasticity theory is not complete in case rock failures in the vicinity of mines are interpreted [2]. Solving a problem of stress distribution around a radial plane under a given radial centripetal stress gives us the monotonic reduction of the stress tensor's angular component. The periodic zone of rock failure observed in mines may be the evidence of periodic stress distribution before the moment when a failure occurs. The classic solution does not describe such failures.

In [1] the authors suggest the equations describing nonelastic deformations with account for inner- energy dependence on curvature. In the paper, the curvature has been considered as a destruction parameter in a steady-state problem of medium deformation around a plane. It has been shown that the stress state is periodical in the radial direction, in other words, the spatial pattern observed around cylindrical mines has been described [2]. However, the authors have not studied the properties of the nonsteady solutions. In the current paper demonstrates that it is the nonsteady process that determines failure zone evolution in time.

Equations of motion for small infinitesimal strains with a destruction parameter are expressed as [1]:

$$\begin{aligned} \rho_0 \dot{v}_i &= \partial_k \sigma_{ik}, \quad \dot{\varepsilon}_{ik} = (\partial_k v_i + \partial_i v_k) / 2 - \bar{\varphi}_{ik} - \varphi_{\nu\nu} \delta_{ik} / 3, \quad -\frac{R}{2} = \Delta \varepsilon_{\nu\nu} - \partial_i \partial_k \varepsilon_{ik}, \\ \sigma_{ik} &= \lambda \varepsilon_{\nu\nu} \delta_{ik} + 2\mu \varepsilon_{ik} + \beta R \cdot \delta_{ik}, \\ \varphi_{\nu\nu} &= \zeta \cdot (\sigma_{\nu\nu} - 4\Delta\gamma), \quad \bar{\varphi}_{ik} = \xi \cdot \left[(\sigma_{ik} - \sigma_{\nu\nu} \delta_{ik} / 3) + 2(\partial_i \partial_k \gamma - \Delta\gamma \delta_{ik} / 3) \right], \quad \gamma = \beta \varepsilon + \alpha R. \end{aligned} \quad (1)$$

Here μ, λ, ζ, ξ denote the elastic and plastic moduli, $R = g^{ik} R_{ik}$ – the curvature determined by the Ricci tensor, and α, β – the parameters of the state equation

$$E_0 / \rho = \text{const} + T_0(s - s_0) + \lambda \varepsilon_{\nu\nu}^2 / 2\rho_0 + \mu \varepsilon_{ik} \varepsilon_{ik} / \rho_0 + \beta R \cdot \varepsilon_{\nu\nu} / \rho_0 + \alpha R^2 / 2\rho_0.$$

Alternative equations of destruction with plasticity are written as:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\zeta + \xi} \cdot \frac{\dot{R}}{2} = & -\frac{4}{3} \left(\alpha - \frac{\beta^2}{\lambda + 2\mu} \right) \cdot \Delta^2 R + \frac{8}{3} \beta \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \cdot \Delta R - \\ & - \mu \frac{\lambda + 2\mu/3}{\lambda + 2\mu} \cdot R + \left(-\frac{\xi}{2\zeta + \xi} + \frac{\lambda + 2\mu/3}{\lambda + 2\mu} \right) \dot{\Omega} - \frac{4}{3} \frac{\beta}{\lambda + 2\mu} \Delta \dot{\Omega}, \\ \ddot{\Omega} - \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0} \cdot \Delta \Omega + \frac{3 \cdot \xi \zeta}{2\zeta + \xi} (\lambda + 2\mu) \cdot \dot{\Omega} = & \left[\mu - (\lambda + 2\mu) \cdot \frac{3\zeta/2}{2\zeta + \xi} \right] \cdot \dot{R} \end{aligned} \quad (2)$$

Changing of the density $\Omega = -\dot{\rho}$ under plastic conditions causes the failure R that satisfies the parabolic equation. As for the failure rate, it becomes a source in a wave equation determining the density change. The equations model density wave propagation and failure parameter diffusion as well as their mutual effect. The correctness of the parabolic equation is determined by the sign of the coefficient $\alpha - \beta^2 / (\lambda + 2\mu) > 0$.

The character of the nonsteady stress-strain state under external strength loading has been analyzed using a 1-D problem. A plate with the thickness $z \in [Z_1, Z_2]$ was considered. Its left boundary was under the compressive stress σ_{zz} , while its right boundary remained steady ($v_z = 0$). It was assumed that at the both boundaries $\gamma = \partial\gamma / \partial z = 0$. The system (1) had additional boundary conditions $\sigma_{zz} = -P_0$, $\gamma = \partial\gamma / \partial z = 0$ at $z = Z_1$ and $v_z = 0$, $\gamma = \partial\gamma / \partial z = 0$ at $z = Z_2$. The considered medium had the following material constants: $\rho = 2.2 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 12.63 \text{ GPa}$, $\mu = 4.95 \text{ GPa}$, $\alpha = 3.11 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $\beta = -5.7 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $\xi = 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}/\text{kg}$, $\zeta = 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}/\text{kg}$. The thickness of the plate was 5 cm. The behavior of R can be seen in Fig. 1. In the process of reaching a steady state, the heterogeneities of maximum-amplitude destruction have been concentrated next to the boundary. In the figure its spatial distribution is given for three moments of time.

The maximum rate of amplitude growth has been achieved at the first maximum value. Given the considered boundary conditions, an external force application point formally corresponds to the first destruction boundary. However, it is the value of the second of destruction extremum that was of our immediate interest (Fig. 2). This domain corresponded to the maximum shear stress value associated with the deformation part of strain $\sigma^* = \lambda \varepsilon_{\nu\nu} + 2\mu \varepsilon_{11} = \sigma_{11} + |\beta| R$ (Fig. 2).

When an external force affects a rock at $z=0$, the stress σ^* determined by increasing destruction rate R , starts growing until the failure criterion is met (the Ishlinsky criterion $-\max|2\sigma^*|$) in the zone where R reaches its maximum.

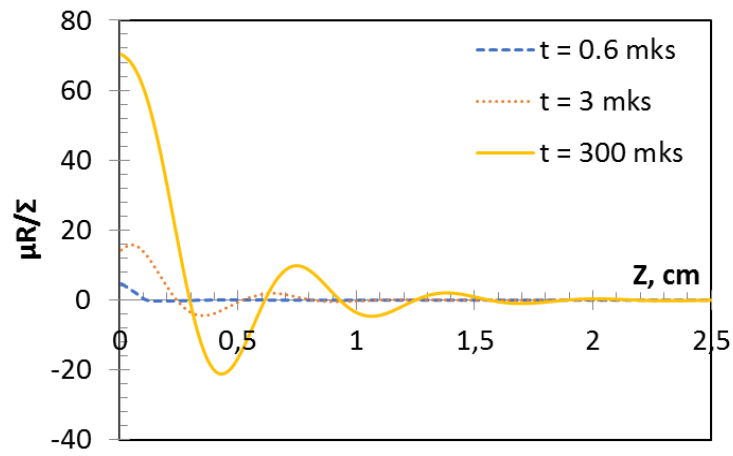


Fig. 1. Destruction process at the time moments of 0.6, 3 and 300 μs

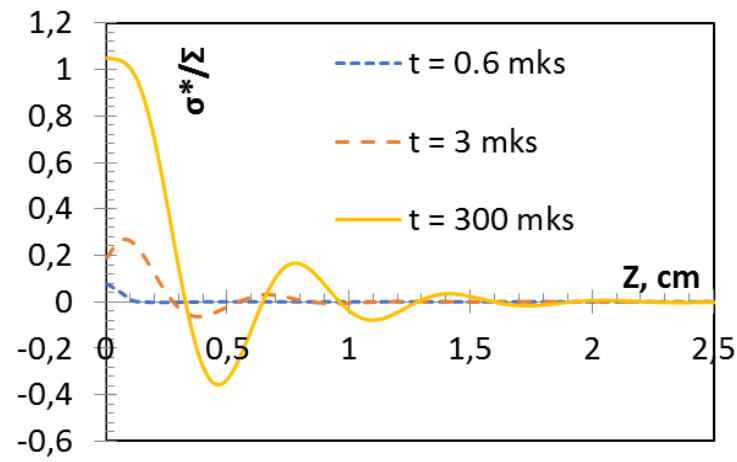


Fig. 2. The stress σ^* the time moments of 0.6, 3 and 300 μs

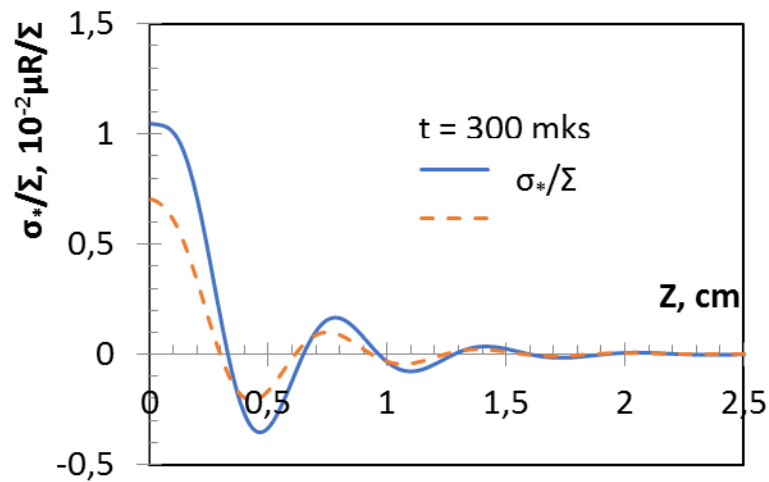


Fig. 3. The destruction R and the stress σ^* the time moments of 0.6, 3 and 300 μs

In the presented theory, rock failure is preceded by formation of periodic destruction zones in a medium. The maximum destruction value corresponds to the maximum destructing stress related to the deforming part of elastic stresses. The theory enables one to determine the characteristic scale of failure as a domain between two extreme values of destruction. The said failure scale can be achieved at the non-steady state of external strength loading put on a system.

REFERENCES

1. Guzev M.A., Paroshin A.A. Non-Euclidean Model of Zonal Rock Failure around Mines // Applied Mechanics and Technical Physics. – 2001. – Vol. 1. – P. 147–156.
2. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. Zonal Rock Failure around Mines. Part 1. Field Study Data // Physical and Technical Problems of Mining. – 1986. – Vol. 3. – P. 3–15.

© *В. Н. Доровский, Е. В. Вторушин, Е. И. Роменский, 2017*

АППАРАТУРНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сергей Михайлович Бабушкин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора филиала, тел. (383)333-32-28, e-mail: bab@gs.sbras.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, тел. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В работе представлены результаты опытно-методических исследований, направленных на поиски полиметаллов с применением технологии площадных электромагнитных зондирований с контролируемым источником [1]. Измерения методом зондирования становлением поля (ЗС) с использованием аппаратуры Байкал МЭРС-Т выполнены на участках Рудного Алтая, Иркутской области. По данным ЗС получено геоэлектрическое строение и выявлены перспективные в рудообразующем отношении зоны с аномально низкими значениями удельного электрического сопротивления.

Ключевые слова: полиметаллы, рудные зоны Алтая и Восточной Сибири, электромагнитное зондирование становлением поля.

APPLICATION OF THE AREAL EM SOUNDINGS TECHNOLOGY WITHIN LIMITS OF THE YERGOZHU ORE FIELD IN THE IRKUTSK REGION

Sergey M. Babushkin

Seismological Branch of Federal Research Center Geophysical of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)333-32-28, e-mail: bab@gs.sbras.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher. tel. (383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Results of experimental-methodical studies aimed at polymetals search with application of technology of the areal electromagnetic soundings with controlled source are presented in the paper [1]. TEM measurements using Baikal MERS-T equipment were conducted within the Irkutsk region, South-West of Altai region. Geoelectrical parameters are specified for host rocks and ore zones which are emphasized by abnormal minimal ER values.

Key words: polymetals, ore basins of Altai and east Siberia, transient electromagnetic soundings (TEM).

Развитие метода нестационарных зондирований определяется в первую очередь современными аппаратными разработками, методикой измерений и интерпретации, программно-алгоритмическими средствами. Весь объем полевых данных при исследованиях в разных регионах получен с помощью новых аппаратных разработок метода ЗС.

Участки исследования расположены в зонах полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Восточной Сибири, где имеются промышленные залежи, по результатам предшествующих геологоразведочных работ. В частности,

в последние годы в районе Рудного Алтая выявлены рудные пересечения со значимыми содержаниями меди, свинца, цинка, а также золота, на которое ранее обращалось недостаточно внимания.

Аппаратурные разработки и методика измерений

Для проведения исследований методом ЗС была разработана новая электро-разведочная аппаратура «Байкал МЭРС-Т», в которую входят регистраторы и коммутатор тока ГТИ-200. Аппаратура предназначена для многокомпонентной регистрации переходных процессов в автономном и телеметрическом режимах. Телеметрическая система является наиболее удобной для организации как профильной, так и площадной систем съемки высокой плотности. Измерительная часть аппаратуры имеет модульную структуру, включающую несколько отдельных регистраторов с устройством управления, АЦП, усилителем и встроенным источником питания. Прибор герметичен, защищен от воздействия факторов окружающей среды. Каждый регистратор – это четырехканальный прибор для сбора данных, имеющий три низкочастотных канала (до 4кГц), в которых используется сигма-дельта АЦП с разрядностью 31 бита, и один высокочастотный канал (до 100 кГц), также на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бита. В состав регистратора входят GPS-модуль, с помощью которого выполняется привязка измеряемых данных к всемирному времени (UTM) не хуже 1 мкс, и съемная флеш-карта. Регистратор имеет два интерфейса: Ethernet и RS-232. При выполнении полевых работ регистрирующие модули размещаются непосредственно у приемных конструкций, которых может быть несколько и любых типов: петли, линии, многовитковые датчики. Переносные многовитковые датчики (модульные рамки) являются наиболее перспективной разработкой метода ЗС в качестве приемной установки. Они заменяют приемную петлю больших размеров, что значительно повышает производительность работ.

Система возбуждения токовых импульсов (ГТИ 200) позволяет получить максимальный рабочий ток до 200 А, что способствует увеличению глубинности исследования. Для возбуждения импульсного тока в генераторном контуре используется коммутатор тока, собранный на IGBT транзисторах. Источниками напряжения на входе генератора являются аккумуляторная батарея необходимой емкости с напряжением от 12 до 600 В или генератор переменного тока мощностью до 100 кВт. В генераторе реализована цифровая запись формы токовых им-

пульсов. Синхронизация генератора и приемника осуществлялась по каналу GPS. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала составляет 0,2–0,5 мкВ. Уверенное выделение сигналов, обусловленных глубинными объектами, при интерпретации данных ЗС позволяет существенно уточнить параметры этих объектов.

Для поисков рудных месторождений на участках исследования выполнялись площадные работы методом ЗС. При этом была выбрана следующая методика измерений. Измерения производились по параллельным профилям с детальным шагом в первые десятки метров, расстояние между профилями в среднем составляло около 100 м. Зондирования от закрепленного источника ЭМ поля выполнялись как внутри генераторного контура (внутриконтурные наблюдения), так и вне этого контура (законтурные наблюдения). В качестве генераторной конструкции использовался незаземленный контур квадратной формы, размер стороны контура выбирался в соответствие с необходимой глубиной. Измерения проводились с использованием переносного компактного многовиткового датчика.

Для примера рассмотрим перспективное на полиметаллы рудное поле Ергожу в Иркутской области. Площадь участка составляет 5.6 км². (рис. 1).

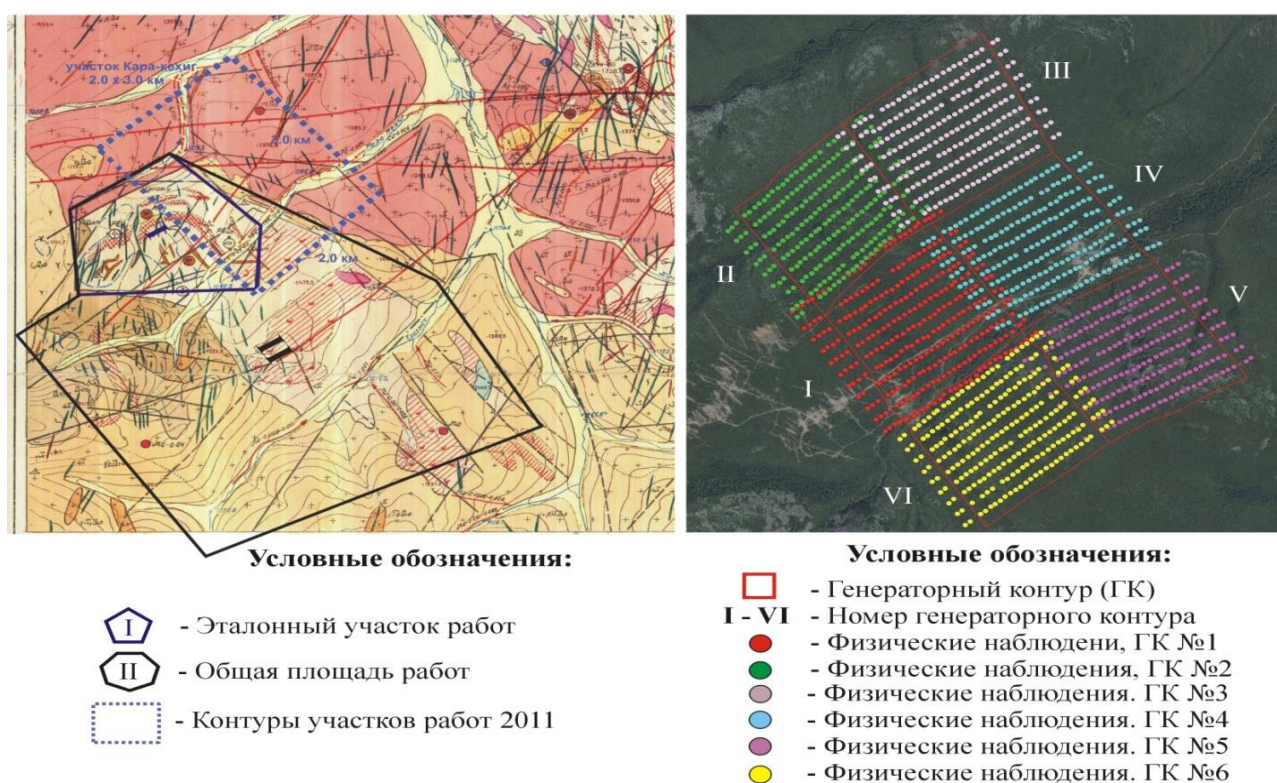


Рис. 1. Сеть наблюдений методом ЗС на участке Ергожу Иркутской области

Была выбрана следующая система наблюдений. Шаг по профилю выдерживался в 40 м, расстояние между профилями составляло 100 м. Было разложе-

но шесть генераторных контуров со стороной 1000 м, ток достигал 15 А. При измерениях аппаратурой «Байкал МЭРС-Т» была обеспечена необходимая глубинность исследования в 800–1000 м. В целом сеть наблюдений – это система профилей субширотного простирания, включающая пикеты всех генераторных контуров, увязанные между собой (рис. 1). В результате интерпретации с помощью программных комплексов ЕРА, EMS (ИНГГ СО РАН) были выявлены перспективные рудные зоны, которые картируются низкоомными объектами со значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) от 10 Ом·м в центре аномалии и до 100–150 Ом·м в периферийной области. Вне аномальной зоны разрез полностью высокоомный. В построенной трехмерной модели месторождения (по вертикальной шкале от дневной поверхности до абсолютной отметки в 450 м) хорошо прослеживаются все аномальные объекты (рис. 2). Трехмерные модели характеризуют сложное строение аномалеобразующих тел. Выделение аномальных рудных зон в плане проведено с большой детальностью. Расчленение самой аномальной зоны на собственно рудные тела и их конкретные линейные размеры по латерали и мощности возможно только при постановке специальных детализационных работ по методике 3D в пределах каждой выделенной аномальной рудной зоны.

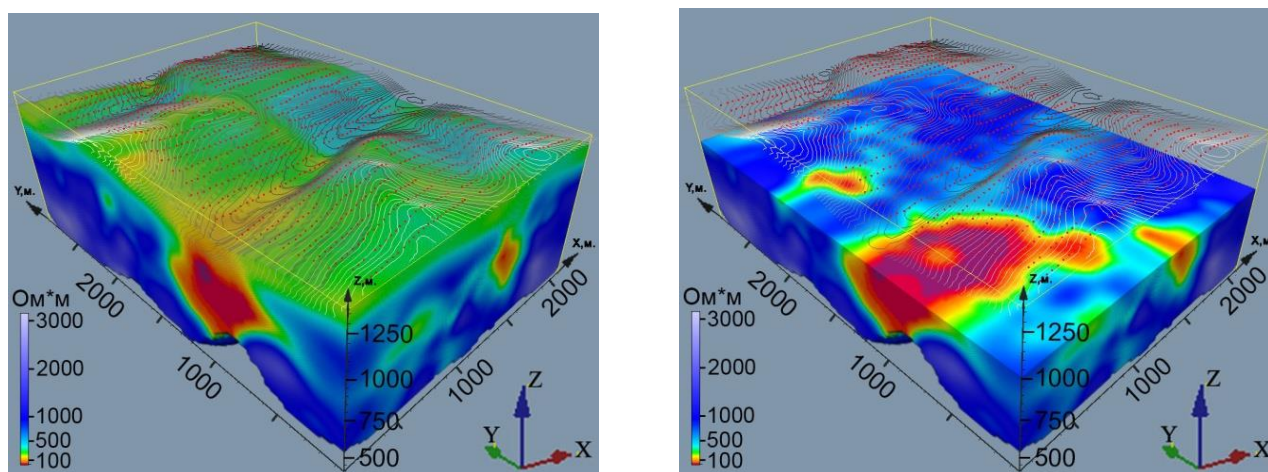


Рис. 2. Объемная геоэлектрическая модель участка Ергожу

Для Убинского участка Рудного Алтая было разложено 11 генераторных контуров – 10 равномерно по площади, а 11-й – для уточнения строения возможной перспективной зоны. Сеть наблюдений – система профилей субмеридианального простирания, включающая 2224 пикета, шаг по профилю – 40 м, расстояние между профилями – 100 м (рис 3). Основные результаты интерпретации представлены в виде геоэлектрических разрезов, карт, трехмерных моделей. В трехмерной модели, построенной для всей площади

участка до абсолютной отметки по глубине в 350 м, хорошо выделяются аномальные объекты (рис. 4).

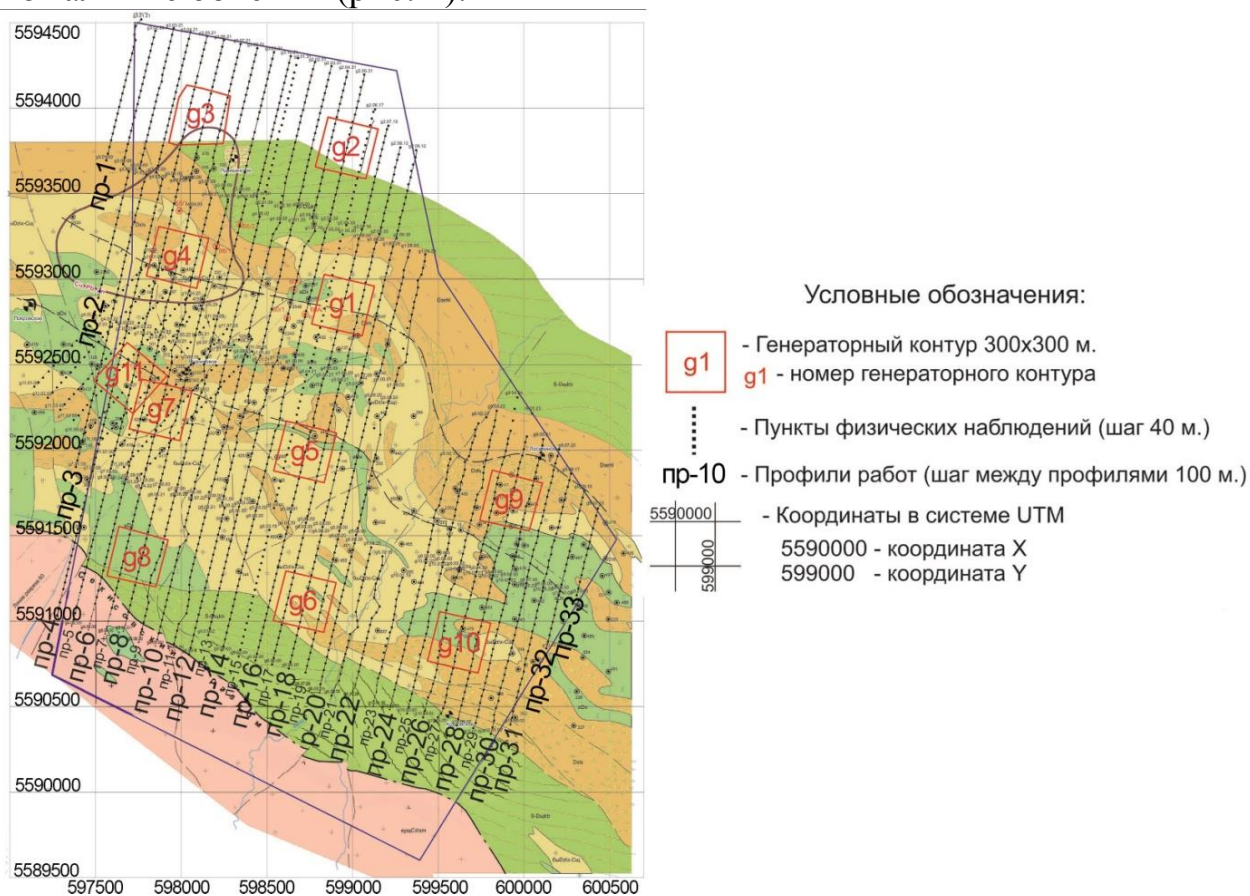


Рис. 3. Сеть наблюдений на участке Убинский Рудного Алтая

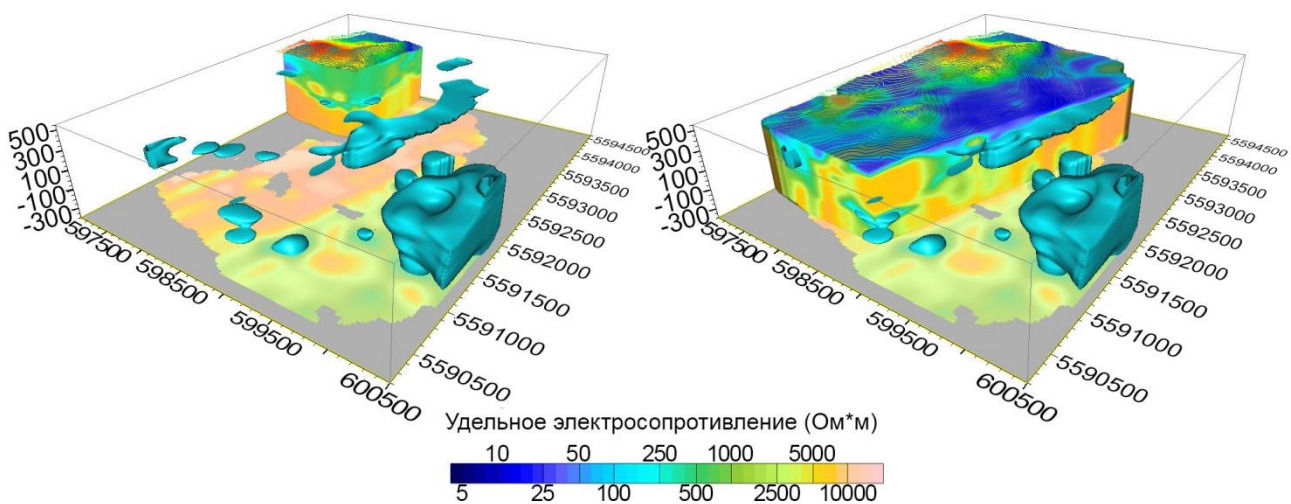


Рис. 4. Рудные объекты участка Убинский

Выводы

1. Новые аппаратные разработки и методика измерений обеспечили необходимую глубинность и разрешающую способность метода ЗС при поисках рудных месторождений.

2. По данным ЗС получено геоэлектрическое строение участков исследования и выявлены перспективные в рудообразующем отношении зоны. Установлено, что вмещающие породы являются достаточно однородными и высокоомными, а зоны оруденения имеют аномально низкие значения УЭС.

3. В первом приближении определена форма и размеры рудных тел.

4. В результате исследования получены данные для обоснованной прогнозной оценки, выявленных перспективных объектов. Определено направление и целесообразность детальных геологоразведочных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по электромагнитной разведке повышенной разрешенности методом становления поля с использованием многократных перекрытий / В.В. Тикшаев, В.А. Глечиков и др. – Саратов: НВНИИГГ, 1989. – 102 с.

© С. М. Бабушкин, Н. Н. Неведрова, 2017

СПОСОБ ПРОГНОЗА ШУМА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

Петр Александрович Дергач

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Вячеслав Иванович Юшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: YushinVI@ipgg.sbras.ru

При помощи метода низкочастотной деконволюции цифровая запись сигнала электродинамического сейсмоприемника может быть преобразована в запись датчика с нижней граничной частотой значительно ниже исходной. Одной из причин ограничений данного метода является аддитивный аппаратный шум. В работе описан способ прогноза шума деконволюции, а также результаты его использования на примере трех типов исходного аппаратного шума: аналитически заданного «белого» шума, синтетической модели шума с возрастающей в низкочастотную область спектральной плотностью мощности и экспериментальной записи аппаратного шума регистратора РОСА-А.

Ключевые слова: геофон, низкочастотная деконволюция, частотная коррекция записи, снижение собственной частоты, собственная частота, аппаратный шум.

LOW FREQUENCY DECONVOLUTION NOISE PREDICTION METHOD

Petr A. Dergach

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Junior Researcher, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Vyacheslav I. Yushin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Chief Research Scientist, e-mail: YushinVI@ipgg.sbras.ru

By using low-frequency deconvolution method, digital record of electrodynamic geophone may be transformed in a similar sensor record but with lower natural frequency. The reason for the limitations of low-frequency deconvolution method is additive instrumental noise. This paper describes a method of deconvolution noise prediction and the results of its usage on the example of the three types of instrumental noise: analytically specified "white" noise, synthetic noise model with increasing the low-frequency range of power spectral density and experimental recording of seismic recorder «ROSA-A» instrumental noise.

Key words: geophone, low-frequency deconvolution, frequency correction of seismic record, reduction of natural frequency, natural frequency, instrumental noise.

Введение

В настоящее время происходит значительное расширение сферы сейсмических измерений. Помимо традиционных областей – сейсмологии и сейсморазведки – сейсмические измерения внедряются в системы технического мониторинга промышленных объектов, в охранные системы и множество других приложений. При этом наблюдается тенденция к расширению полосы частот анализируемых вибрационных колебаний в низкочастотную область. Данное направление развивается с прошлого века, начиная с работ Б.Б. Голицына. Новое дыхание проблема получила после внедрения прецизионной цифровой аппаратуры с динамическим диапазоном 120 и более дБ. К этим исследованиям относятся работы В.И. Юшина [6], А.Н. Бесединой, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочаряна [1, 4].

Электродинамический сейсмоприемник с одной сигнальной катушкой (геофон) на данный момент является самым массовым датчиком для измерения сейсмических колебаний. Основное препятствие для его применения в вышеупомянутых новых областях – относительно высокая собственная (нижняя граничная) частота, порядка 10–15 Гц. Цифровая запись сигнала, полученного таким датчиком, с помощью математической вычислительной процедуры, называемой низкочастотной деконволюцией, может быть преобразована в запись аналогичного датчика с нижней граничной частотой на порядки ниже исходной. Основным ограничителем кратности снижения собственной частоты служит аппаратный шум измерительного канала.

В работе предложен способ прогноза роста амплитуды аппаратного шума после применения низкочастотной деконволюции для трех типов исходных шумов: аналитически заданного «белого» шума, синтетической модели шума с возрастающей в низкочастотную область спектральной плотностью мощности и экспериментальной записи шума реального регистратора.

Теоретическая оценка роста шума деконволюции

С точностью до коэффициента комплексная частотная характеристика геофона по скорости, выраженная в относительных частотах $\nu = \omega/\omega_0$, где ω_0 – собственная угловая частота датчика при отсутствии затухания, d – коэффициент демпфирования, имеет вид [2, 7]:

$$H(j\nu) = \frac{(j\nu)^2}{(j\nu)^2 + 2(j\nu)d + 1}. \quad (1)$$

Процедура низкочастотной деконволюции (восстановления истинной скорости движения корпуса датчика) состоит в пропускании сигнала датчика через систему с характеристикой, обратной (1):

$$H^{-1}(j\nu) = 1 + \frac{2d}{(j\nu)} + \frac{1}{(j\nu)^2}. \quad (2)$$

Восстановленный сигнал формально выражается как

$$\Psi(j\nu) = V(j\nu) + N(j\nu)H^{-1}(j\nu), \quad (3)$$

где $V(j\nu)$ и $N(j\nu)$ – комплексные спектры колебательной скорости корпуса датчика и аппаратурного шума соответственно. При этом аппаратурный шум резко возрастает в области низких частот ниже собственной частоты датчика, это прежде всего связано с характером фильтра деконволюции (2). Однако практически реализовать процедуру (3) можно только в ограниченной снизу частотной полосе, другими словами, пропустив дополнительно сигнал (3) через фильтр верхних частот, хотя и значительно более низкочастотный, нежели исходный датчик. Следовательно, нельзя полностью удалить из записи характеристику датчика, но вполне допустимо заменить ее на более подходящую к условиям задачи.

Назначим главным параметром деконволюции кратность $q = \omega_0/\omega_d = 1/\nu_d$ снижения собственной частоты датчика, а основным показателем допустимости такой деконволюции – отношение стандартных отклонений шума деконволюции σ_{Nd} и исходного аппаратурного шума σ_N . Для случая исходного аппаратурного шума в виде «белого» шума в полосе частот от частоты деконволюции ν_d до верхней частоты регистратора ν_R авторами получена теоретическая закономерность [3]:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{1}{3\nu_d^3} + \frac{2}{3}}. \quad (4)$$

Создание синтетической модели аппаратурного шума регистратора

Однако шум реального сейсмического регистратора состоит из нескольких типов внутреннего шума и несколько отличается от «белого» шума. В частности, с уменьшением частоты спектральная плотность мощности (СПМ) его аппаратурного шума начинает возрастать. Эта низкочастотная шумовая характеристика называется фликкер-шумом, или шумом $1/f$, поскольку спектральная плотность мощности шума имеет зависимость, обратную частоте [5].

С целью изучения влияния низкочастотной составляющей в исходном аппаратурном шуме на кратность роста шума деконволюции по мере снижения нижней граничной частоты (4) была создана синтетическая модель аппаратурного шума. Исходные параметры модели (рост СПМ с уменьшением частоты и частота излома характеристики $1/f$) были подобраны таким образом, чтобы ее СПМ (рис. 1, черная линия) была идентична СПМ аппаратурного шума измерительного канала реального сейсмического регистратора РОСА-А (рис. 1, серая линия).

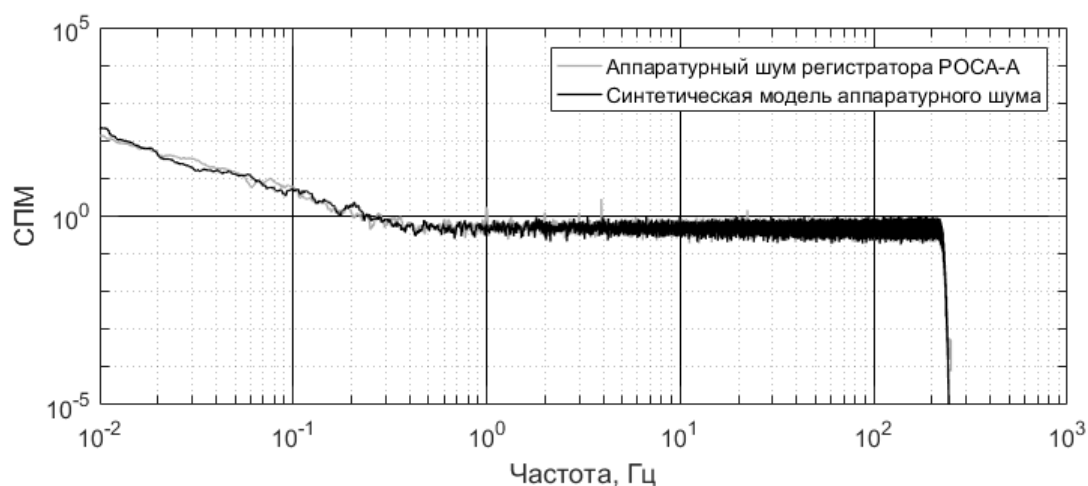


Рис. 1. Сравнение СПМ аппаратного шума регистратора РОСА-А и синтетической модели аппаратного шума

Способ оценки кратности роста шума деконволюции

Для оценки кратности роста шума деконволюции в зависимости от снижения ее относительной частоты был программно реализован алгоритм расчета отношения стандартного отклонения шума после процедуры деконволюции к стандартному отклонению исходного шума в ограниченной полосе частот (по аналогии с предложенной ранее теоретической закономерностью).

Результаты расчета для синтетической модели шума (рис. 2, серая линия) и аппаратного шума регистратора РОСА-А, полученного в результате лабораторного эксперимента (рис. 2, черная пунктирная линия), с высокой точностью совпали. Кроме того, на рис. 2 черной линией также показана теоретическая закономерность (4), полученная аналитически для случая исходного шума в виде «белого» шума.

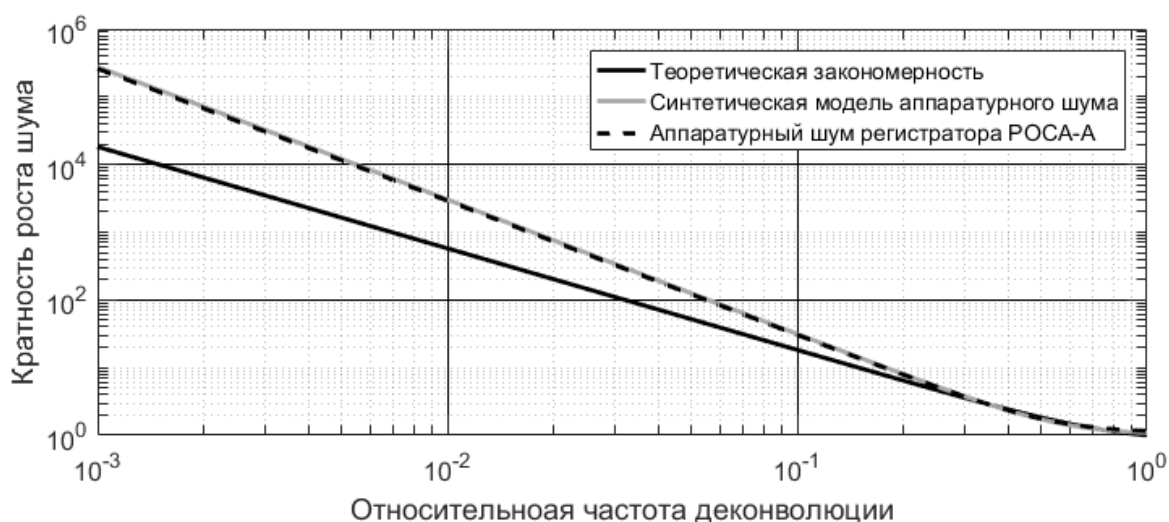


Рис. 2. Результаты расчета для синтетических и реальных записей аппаратного шума, а также полученная аналитически зависимость кратности роста шума деконволюции по мере снижения ее относительной частоты

Сравнительный анализ кривых наглядно иллюстрирует, что при снижении относительной частоты деконволюции на один порядок отличие оценок кратности роста шума деконволюции в зависимости от вида исходного аппаратурного шума различается приблизительно в 1.7 раза, на два порядка – в 5 раз, а на 3 порядка – в 15 раз.

Выводы

В работе предложен способ оценки кратности роста шума деконволюции в зависимости от снижения относительной частоты деконволюции и результат его применения для исходного аддитивного аппаратурного шума трех типов: аналитически заданного «белого» шума, синтетической модели шума с возрастающей в низкочастотную область СПМ и экспериментальной записи аппаратурного шума регистратора РОСА-А. Показано, что в случае использования экспериментальной записи аппаратурного шума или его синтетической модели появляется возможность более точного расчета предельного значения расширения частотного диапазона сейсмических записей методом низкочастотной деконволюции. Допустимый предел виртуального снижения собственной частоты геофона предлагается оценивать с использованием трех заданных параметров: входного уровня аппаратурного шума, ожидаемого уровня сейсмического сигнала в полосе низкочастотного расширения и допустимого, с точки зрения пользователя, выходного отношения полезного (сейсмического) сигнала к собственному (аппаратурному) шуму.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беседина А.Н., Кабыченко Н.В. Исследование сейсмических колебаний в длиннопериодной части спектра // Труды МФТИ. – 2011. – Т. 3, № 3. – С. 51–55.
2. Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 253 с.
3. Дергач П.А., Юшин В.И. О "запредельных" возможностях электродинамических сейсмоприемников // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 33–42.
4. Коррекция частотных характеристик сейсмических датчиков и шумов соответствующих измерительных каналов / А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Д.В. Павлов // Сейсмические приборы. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 11–20.
5. Ли П. Руководство по выбору малошумящего усилителя // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 46–51.
6. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 852–863.
7. Юшин В.И. Теория и цифровая модель сейсмоприемника с точки зрения геофизика-инженера и программиста // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2002. – № 2. – С. 5–10.

© П. А. Дергач, В. И. Юшин, 2017

МОДЕЛИ РЕЛАКСАЦИИ ДЛЯ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ ГОРНОГО АЛТАЯ

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383) 335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Релаксацию постсейсмических смещений земной коры можно интерпретировать в рамках линейной реологии. В работе рассматриваются результаты измерений скоростей постсейсмических смещений (2004–2012 гг.) в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27.09.2003, $M = 7.3$). Интерпретация проводится в рамках двуслойных моделей, используя значения скоростей в эпицентральной зоне. Полученные оценки эффективной вязкости нижней коры Горного Алтая лежат в интервале $1 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^{20}$ Па·с.

Ключевые слова: постсейсмические смещения, космическая геодезия, линейная реология, земная кора Горного Алтая.

RELAXATION MODELS FOR POSTSEISMIC DISPLACEMENT OF GORNII ALTAY

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Researcher, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Principal Research Scientist, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Post-seismic relaxation of crust displacement may be interpreted in frames of linear rheology. The article describes measurements of post-seismic rates (2004-2012 yy.) into epicenter zone of Chuya earthquake (29.09.2003, $M = 7.3$). The interpretation was developed in frames of two-layer models by used of rate's values into epicenter zone. Estimations of effective viscosity of lower crust were $1 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^{20}$ Pa·s.

Key words: postseismic displacement, space geodesy, models of linear rheology, crust of Gornii Altay.

Известно, что вследствие асейсмического характера процесса постсейсмической релаксации ее прямое наблюдение представляется возможным только с помощью геодезических методов [1]. Эти эффекты были обнаружены после многих внутриплитных землетрясений [2]. Экспериментальные данные позволяют анализировать процессы затухания постсейсмических смещений и рассмотреть их в рамках вязкой модели среды. Цель работы: получить значения скоростей современных движений, определить количественную связь смещений и реологических параметров земной коры Горного Алтая.

Применение методов космической геодезии дает возможность определять величину смещений земной поверхности с высокой точностью. В ежегодных измерениях (июль–август) использованы двухчастотные GPS-приемники с продолжительностью серии на отдельном пункте от 2 до 4 суток. В результате многолетних измерений GPS-методом для эпохи 2004–2012 гг. после обработки данных получена картина распределения скоростей постсейсмических смещений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 27.09.2003 года ($M = 7.3$) [3, 4]. Из смещений на пунктах Горного Алтая, полученных в геоцентрической системе координат, вычитались модельные движения Евроазиатской плиты. Постсейсмические движения повторяют правостороннее смещение в эпицентральной зоне. В таблице представлены значения скоростей на различных расстояниях от сейсмического разрыва (среднее значение вектора – 2.3 мм в год, среднее для вектора в направлении параллельном ориентации сейсмического разрыва – 2.1 мм в год).

В эпицентральной области по данным сейсмологов глубина распределения афтершоков – до 30 км, линейная протяженность зоны – до 130 км. Положение границы Мохо по геофизическим данным здесь 50–55 км, а в работе [5] для Монголии принята мощность упругой коры 20 км и вязко-упругой нижней ее части 25 км. Для процесса постсейсмической деформации обычно рассматриваются несколько механизмов: асейсмическое скольжение в плоскости разрыва с учетом нижней коры [6], эффект нарушения равновесия порового давления [7] и вязкая релаксация в нижней коре [8]. Можно считать, что через год после главного события в зоне Чуйского землетрясения первые два механизма уже реализованы, остановимся на вязкой релаксации.

Скорости постсейсмических горизонтальных смещений
на различных расстояниях от сейсмического разрыва

Код марки	Долгота (градус)	Широта (градус)	V_E с ошибкой (мм/год)	V_N с ошибкой (мм/год)	Расстояние до разрыва в км	Вектор $\parallel$ (мм/год)
YAZU	88.851	50.586	$+2.15 \pm 0.58$	$+0.50 \pm 0.62$	84	1.1
BALY	88.002	50.703	$+1.60 \pm 0.30$	-1.41 ± 0.30	61	2.1
ULAG	87.654	50.500	$+2.04 \pm 0.48$	-1.43 ± 0.51	28	2.3
CHAG	88.417	50.068	$+4.23 \pm 0.36$	-0.75 ± 0.31	19	3.4
KURA	87.890	50.245	$+1.92 \pm 0.29$	-2.23 ± 0.27	14	2.8
CHIB	87.503	50.313	$+0.53 \pm 0.35$	-1.04 ± 0.38	5	1.1
Среднее			$+2.07 \pm 0.49$	-1.06 ± 0.37		2.13 ± 0.38

Проанализируем существующие модели явления и проведем оценки эффективных параметров, используя скорости и характер затухания горизонтальных смещений. Исходя из известной геометрии сейсморазрыва, остановимся на двумерных моделях явления релаксации. Модель 1 предложена в работе Эльзассера [9]. Эта двухслойная модель содержит упругий слой (мощность H), вязкий слой (мощность h), смещение блока по вертикальному разлому (Δ), скольжение в зоне разлома охватывает границу по глубине H . Используем среднее значение скорости (таблица). В решении исходят из представлений о хрупко-упругом поведении верхней коры (мощностью H) и локализации вязких деформаций в нижней коре (мощностью h). Касательное напряжение на границе упругого верхнего слоя и вязкого нижнего слоя равно:

$$\sigma_E = \eta \cdot \omega' / h \quad (1)$$

где h – толщина нижней коры, ω' – скорость и η – вязкость нижней коры.

Соотношение для касательного напряжения на границе слоев и сброшенного напряжения на вертикальном разрыве (его значение – 4 МПа – получено из анализа величины косейсмических смещений [3, 4]) изменяется от 0.1 до 0.01, скорость смещений $\omega' = 2.1 \div 2.3$ мм в год (среднее для эпохи 2004–2012 гг.), что приводит к величине эффективной вязкости нижнего слоя $1 \cdot 10^{19} \div 1 \cdot 10^{20}$ Па·с.

Модель 2 (рис. 1) включает упругий слой толщиной H , лежащий на вязко-упругом полупространстве [10], при этом субвертикальный сейсмический разрыв простирается по оси Z до глубины $z = D$.

Для получения значения эффективной вязкости используем величину времени релаксации Максвелла (τ_R). Время релаксации входит в выражении для горизонтальной скорости.

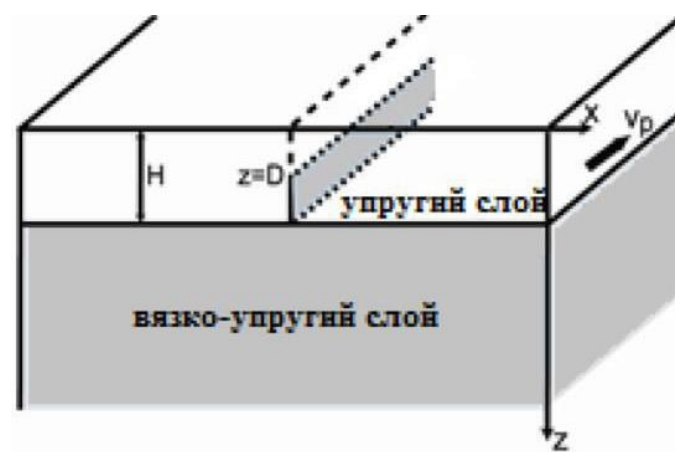


Рис. 1. Модель 2 [9] включает упругий слой (мощность H), вязко-упругое полупространство, субвертикальный сейсмический разрыв – простирается по оси Z до $z = D$; косейсмическое смещение по разрыву Δu

В этой модели учитываем пространственное распределение скорости (таблица, последний столбец). В момент времени $t = 0$ сдвиг происходит на разрыве от поверхности до глубины $D \leq H$.

Скорость на земной поверхности как функция положения по линии перпендикулярной разрыву (по оси x) и времени t записывается как:

$$v(x, t) = \left(\frac{\Delta u}{\pi} \cdot \tau_R \right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \cdot F_1(x, D, H) \quad (2)$$

В соотношении для скорости (2) временная зависимость связана с безразмерным параметром t/τ_M и временем релаксации τ_M (рис. 2). Тело Максвелла имеет время релаксации $\tau_M = \frac{2\eta}{\mu}$, где η – вязкость и μ – модуль сдвига.

$$F_1(x, D, H) = \tan\{2x \cdot D / [x^2 + (2H)^2 - D^2]\}^{-1}, \quad (3)$$

Пространственная зависимость $F_1(x, D, H)$ является функцией (3): расстояния по линии перпендикулярной разрыву (по оси x), глубины разлома D и толщины упругого слоя H (рис. 2). По Модели 2 при времени Максвелла $\tau_M \geq 100$ (при τ_M от 100 до 300 лет и модуле сдвига нижней коры μ от 41 ГПа до 73 ГПа) мы получаем оценку для вязкости нижнего слоя от $6 \cdot 10^{19}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Па·с.

Известные оценки на основе постсейсмических эффектов в Тибете (08.11.1997, $M = 7.6$) для вертикально стратифицированной нижней коры лежат в интервале $1.2 \cdot 10^{21} \div 1.6 \cdot 10^{18}$ Па·с, первое значение относится к верху вязко-упругого слоя (глубина 10 км), второе – к границе Мохо (глубина 60 км) [11]. Аналогичное распределение получено [12] при анализе процессов, связанных с землетрясением на Аляске (03.11.2002, $M = 7.9$). В построенной авторами модели вязкость экспоненциально изменяется в коре от 10^{21} Па·с (20 км)

до 10^{19} Па·с (50 км) и в мантии от $2 \cdot 10^{20}$ Па·с (50 км) до $2 \cdot 10^{18}$ Па·с (120 км). При моделировании постсейсмических смещений для землетрясения в Монголии 1905 года ($M = 8.4$) в работе [5] авторами использованы значения вязкости для нижней коры от $3 \cdot 10^{18}$ Па·с до $3 \cdot 10^{20}$ Па·с. Полученные нами оценки лежат в пределах величин, полученных в сейсмоактивных районах мира, расположенных внутри континентов.

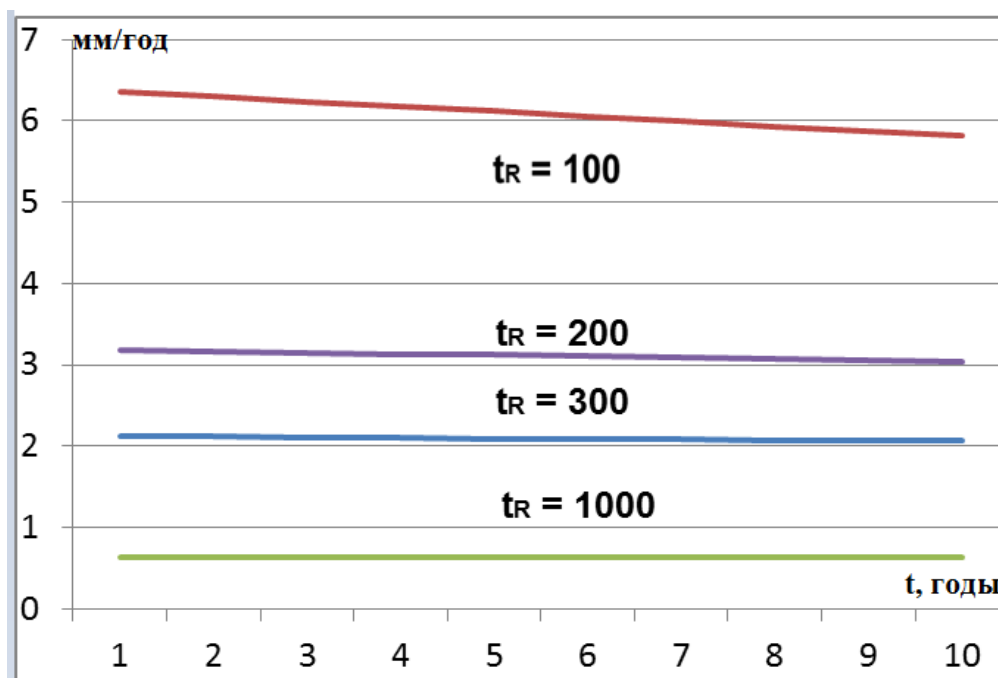


Рис. 2. Затухание скорости смещения в мм/год за 10 лет (время релаксации – 100, 200, 300 и 1000 лет).
Для скоростей смещений 2 мм/год, при $F_1 = 0.5$ получаем оценку времени релаксации τ_M от 100 до 300 лет

В результате исследований, исходя из экспериментальных данных в рамках двухслойных моделей, полученные оценки эффективной вязкости нижней коры Алтае-Саянского региона лежат в интервале $1 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^{20}$ Па·с. Разброс оценок определяется ошибками определения параметров земной коры, снятых напряжений и скоростей смещений. Оценки мощности верхней упругой части коры лежат в интервале от 20 до 33 км (рис. 3), при среднем значении 25 км. Эти результаты можно использовать для построения и проверки моделей современного деформирования земной коры и моделирования геодинамических процессов. Постсейсмический процесс в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения будет продолжаться более 100 лет, скорости смещений изменяться от $1 \div 3$ мм/год до $0.5 \div 1$ мм/год.

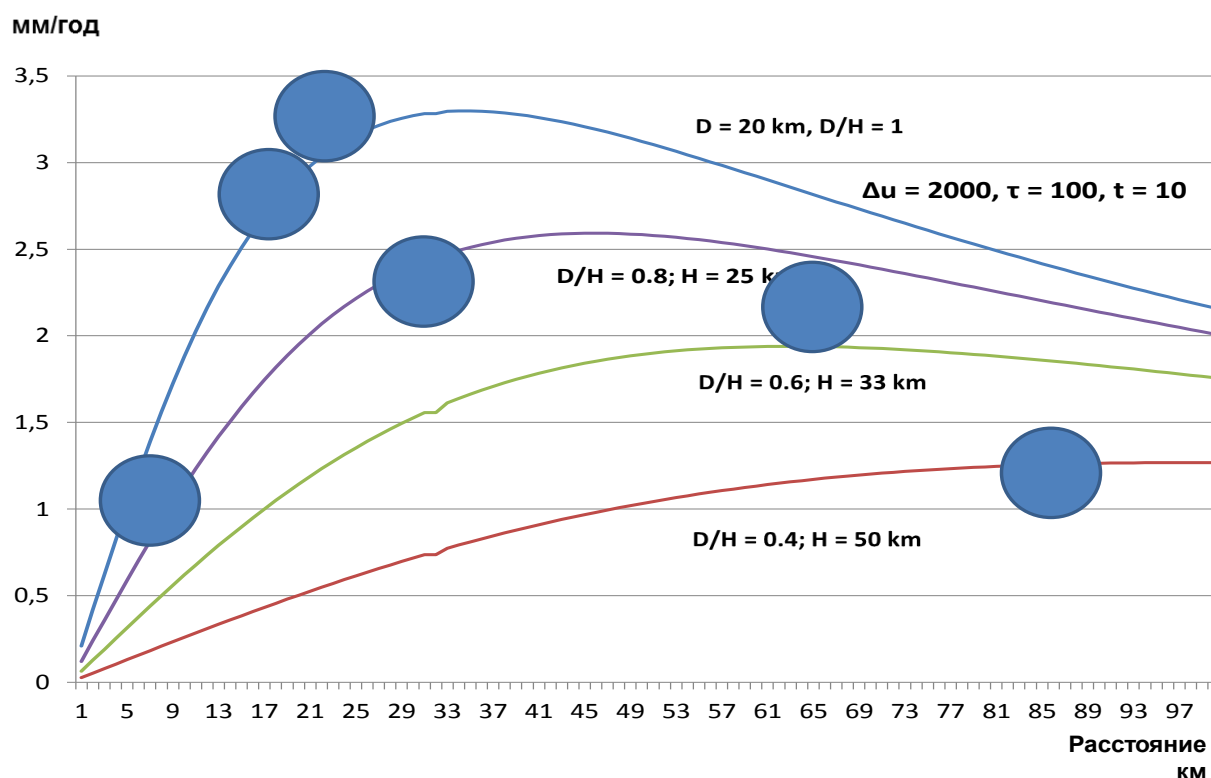


Рис. 3. Пространственное распределения скорости горизонтальных смещений по направлению ортогональному разрыву (по оси X до 100 км). Теоретические кривые, рассчитаны при разной мощности упругого слоя (H от 20 км до 50 км), при времени после события $t = 10$ лет; при времени релаксации $\tau_R = 100$ лет, относительном смещении на разрыве $\Delta u = 2$ м, при глубине разрыва $D = 20$ км. Экспериментальные результаты показаны кружками по пунктам слева направо: СНІВ, КУРА, СНАГ, УЛАГ, БАЛЫ, ЯЗУ. Ошибка определения – от 0.3 до 0.6 мм в год. Для верхней коры (упругий слой) оценка мощности близка значению $H = 25$ км

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимирова И.С., Стеблов Г.М., Фролов Д.И. Исследование вязкоупругих деформаций после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 75–80.
2. Pollitz F.F., Peltzer G., Burgmann R. Mobility of continental mantle: Evidence from post-seismic geodetic observations following the 1992 Landers earthquake // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – P. 8035–8054.
3. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // ДАН. – 2005. – Т. 405, № 6. – С. 804–809.
4. Поля смещений Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, А.В. Тимофеев и др. // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 481–497.
5. Are post-seismic effects of the $M = 8.4$ Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area / E. Calais, M. Vergnolle, J. Deverchere et al. // Geophys. J. Int. – 2002. – Vol. 149. – P. 157–168.

6. Brown L.D. Postseismic crustal uplift near Anchorage, Alaska // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. – P. 3369–3378.
7. Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture / G. Peltzer, P. Rosen, F. Roges, K. Hudnut // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103, N B12. – P. 30131–30145.
8. Pollitz F.F. Post-seismic relaxation theory on a laterally heterogeneous viscoelastic model // Geophys. J. Int. – 2003. – Vol. 155, N 1. – P. 57–78.
9. Elsasser W.M. Two-Layer Model of Upper-Mantle Circulation // J. Geophys. Res. – 1971. – Vol. 76, N 20. – P. 4744–4753.
10. Segall P. Integrating Geologic and Geodetic Estimates of Slip Rate on the San Andreas Fault System // Intern. Geology Review. – 2002. – Vol. 44. – P. 62–82.
11. Yamasaki Tadashi, Gregory Houseman. The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: A case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake // Earth and Planetary Science Letters. – 2012. – Vol. 351–352. – P. 105–114.
12. Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology / A.M. Freed, R. Burgmann, E. Calais et al. // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111, N B01401. – doi: 10.1029/2005JB003894.

© А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, В. Ю. Тимофеев, 2017

**ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ
ОБРАЗЦОВ КЕРНА НА ПРИМЕРЕ ОПОРНОЙ СКВАЖИНЫ
ЗАПАДНО-ТЫМСКАЯ 1 ЛАБОРАТОРНЫМ МЕТОДОМ
ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ**

Мария Ионовна Шумская

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики, тел. (383)330-07-81, e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Вячеслав Николаевич Глинских

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией скважинной геофизики; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа, тел. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Петр Александрович Ян

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией седиментологии, тел. (383)363-67-21, e-mail: YanPA@ipgg.sbras.ru

Сергей Владимирович Родякин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории седиментологии, тел. (383)333-23-03, e-mail: RodyakinSV@ipgg.sbras.ru

Показаны возможности оперативного определения основных фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород коллекторов методом ЯМР-релаксометрии на примере юрско-меловых отложений, вскрытых опорной скважиной Западно-Тымская №1. Проводится сопоставление полученных данных с результатами литолого-стратиграфического анализа.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, релаксометрия, образцы керна, фильтрационно-емкостные свойства, свита, глубина отбора керна.

**EXPRESS CHARACTERIZATION OF RESERVOIR PROPERTIES
OF CORE SAMPLES IN TERMS OF KEY-WELL WEST-TYM 1 BY
LABORATORY NMR METHOD**

Mariya Y. Shumskayte

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Junior Researcher of the Laboratory of Borehole Geophysics, tel. (383)330-07-81, e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Vyacheslav N. Glinskikh

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, D. Sc., Head of the Laboratory of Borehole Geophysics; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Associate Professor, tel. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Petr A. Yan

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Ph. D., Head of the laboratory of sedimentology, tel. (383)363-67-21, e-mail: YanPA@ipgg.sbras.ru

Sergey V. Rodyakin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptug Prospect, Junior Researcher of the laboratory of sedimentology, tel. (383)333-23-03, e-mail: RodyakinSV@ipgg.sbras.ru

Potential of the operating determination of the reservoir properties of terrigenous reservoir rock by NMR-relaxometry method are shown in terms of Jurassic-Cretaceous deposits tapped by key-well West-Tym 1. It carried out a comparison of obtained data with the results of lithologic and stratigraphic analysis.

Key words: nuclear magnetic resonance, relaxometry, core samples, reservoir properties, suite, core depth.

Одна из первостепенных задач всех лабораторных петрофизических исследований керна заключается в определении фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов. Стандартные методы исследования нередко приводят к частичному или полному разрушению образцов керна, что делает их непригодными для дальнейших исследований. К тому же этот процесс очень трудоемкий и занимает достаточно много времени. Именно поэтому возникает необходимость поиска альтернативных методов исследования керна. К таким относится импульсная ЯМР-релаксометрия. Она позволяет экспрессно и без механического воздействия получать качественную и количественную информацию о структуре порового пространства изучаемой геологической среды и типе насыщающего ее флюида. Измерения выполняются на ЯМР-релаксометре «МСТ-05». К настоящему времени накоплен огромный опыт получения петрофизической информации по ЯМР-данным [1-4].

Объектом данного исследования послужили мезозойские отложения, представленные в разрезе параметрической скважины Западно-Тымская 1, расположенной в зоне сочленения Усть-Тымской мегавпадины и Александровского свода (северо-западная часть Томской области). Скважина вскрыла полный разрез меловых и юрских нефтегазоносных комплексов и кровлю доюрского основания. Керном в разной степени охарактеризованы алмская (нижний апт, интервал отбора керна 1591–1608,3 м), тарская (нижний валанжин, интервал 2220–2268,6 м), куломзинская (берриас-нижний валанжин, интервал 2299–2309 м), васюганская (келловей-оксфорд, интервал 2644–2673 м), тюменская (байос-бат, интервалы 2700–2717,7; 2760–2778,2; 2838–2872,7; 2970–3006 м), салатская (нижний тоар-аален, интервал 3050–3134 м), тогурская (нижний тоар, интервал 3136,5–3174,6 м) и урманская свиты (геттанг-плинсбах, интервал 3174,6–3210,7 м). Исследовано 107 водонасыщенных образцов преимущественно алевроито-песчаных пород, прошедших предварительную экстракцию хлороформом.

Петрофизические свойства образцов керна характеризуются следующими параметрами. Коэффициенты пористости (K_p) и проницаемости ($K_{пр}$) определяются как классическими методами по гелию на установке AP-608 (CORE-TEST SYSTEM, INC.), так и методом ЯМР на релаксметре «МСТ-05». ЯМР-пористость определяется как начальная амплитуда ЯМР-сигнала, проницаемость в методе ЯМР определяется по уравнению Коатеса [5]:

$$K_{пр} = CK_p^4 \left(\frac{K_{п\text{эфф.}}}{K_{п\text{связ.}}} \right)^2,$$

где C – калибровочный коэффициент, $K_{п\text{эфф.}}$ – эффективная ЯМР-пористость, $K_{п\text{связ.}}$ – ЯМР-пористость, характеризующая долю связанного флюида.

Значения K_p и $K_{пр}$ меняются в диапазоне 3–25 % со средним значением 12 % и 10^{-2} – 10^3 мД со средним значением 70 мД. Среднее время поперечной релаксации (T_{2cp}) меняется в диапазоне 2–150 мс со средним значением 30 мс, доля свободного флюида составляет 1–85 % со средним значением 44 %. При этом большинство образцов характеризуются коэффициентами пористости 10–15 %, проницаемости 1–10 мД, средним временем поперечной релаксации 10–30 мс и долей свободного флюида 30–50 % (рис. 1).

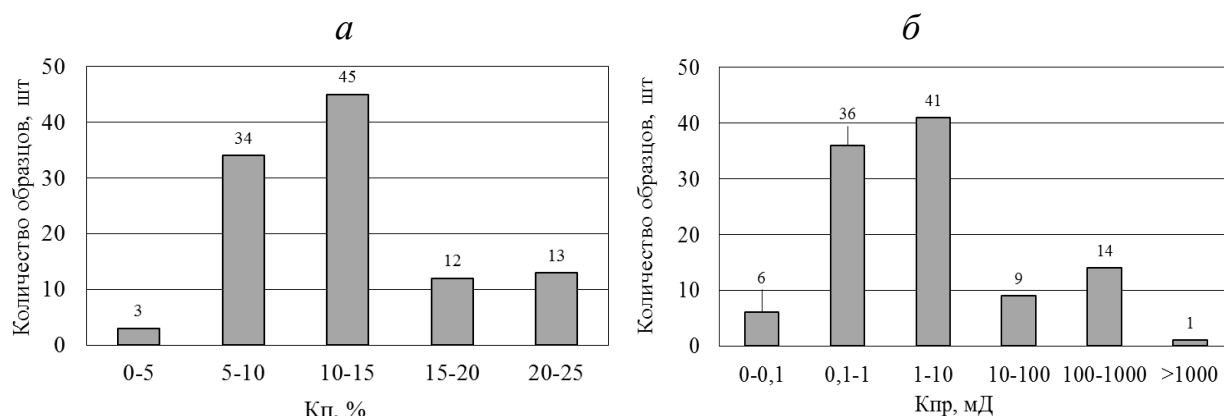


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов пористости (а) и проницаемости (б) по ЯМР-данным

Полученные данные позволяют получить надежные корреляционные связи петрофизических параметров с ЯМР-характеристиками (рис. 2, 3). Видно, что значения коэффициентов пористости и проницаемости тесно связаны как между собой, так и с основным ЯМР-параметром – временем поперечной релаксации.

Как известно [5, 6], время поперечной релаксации зависит от размера пор, что объясняет разброс значений на рис. 2, а. Размеры пор зависят, прежде всего, от состава обломочной части пород, от типа и количества цемента. А также, при существенных количествах глинистой составляющей, от мине-

ралогического состава последней [7]. Для установления более надежной корреляционной связи коэффициента пористости и времени поперечной релаксации необходимо использовать данные гранулометрического и минералогическо-петрографического анализов.

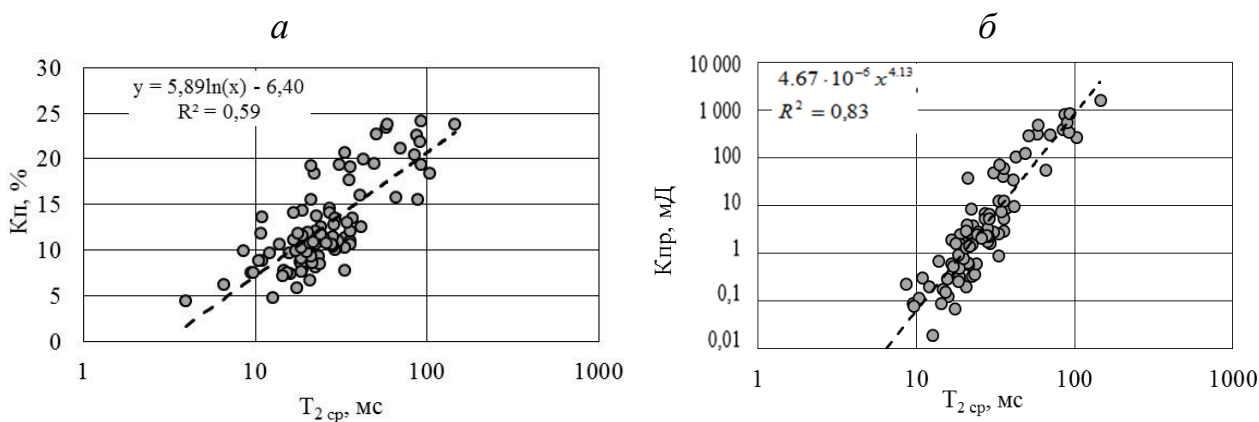


Рис. 2. Корреляционные связи коэффициентов пористости (а) и проницаемости (б) с временем поперечной релаксации

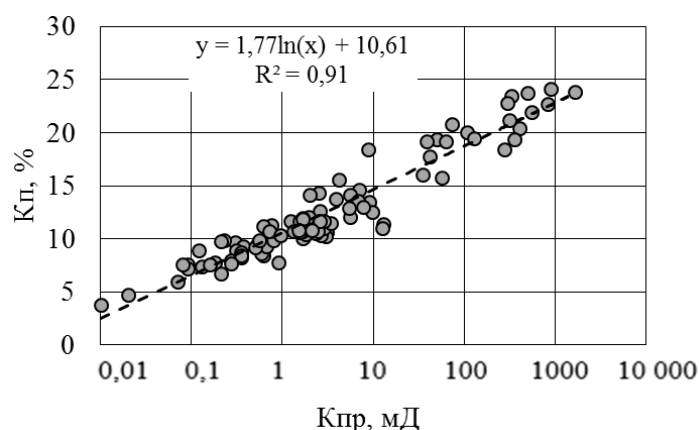


Рис. 3. Корреляционная связь коэффициентов пористости и проницаемости

Также наблюдается корреляция ФЕС с распределением исследуемых образцов керна по свитам (рис. 4), которая отражает уменьшение коэффициента пористости песчано-алевритовых пород с глубиной вследствие уплотнения и катагенетических преобразований. Это позволяет проводить оперативное сопоставление петрофизических данных, полученных методом ЯМР, с результатами литолого-стратиграфического анализа и с определенной долей условности прогнозировать информацию о фильтрационно-емкостных свойствах керна. Отметим, что в этом примере не рассматриваются свиты, представленные ме-

нее чем 3 образцами (алымская – 1 образец, колумзинская – 1 образец, урманская – 1 образец и тогурская – 2 образца).

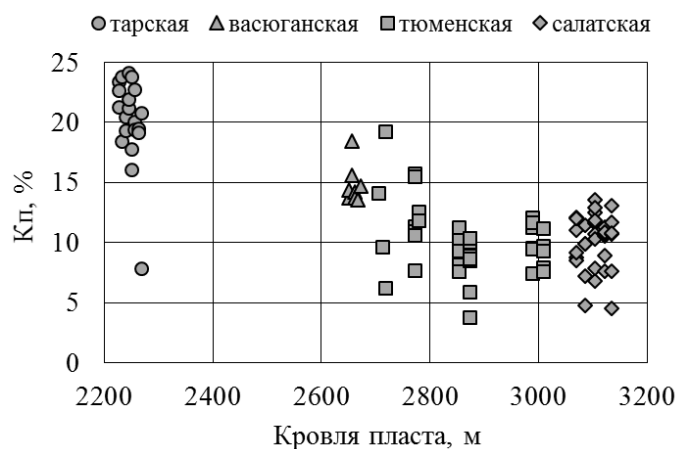


Рис. 4. Распределение коэффициента пористости по свитам в зависимости от кровли пласта

С целью более рационального и оптимального доступа к данным все они хранятся в одном файле, содержащем подробную информацию о каждом образце: измеренные коэффициенты пористости и проницаемости, время поперечной релаксации, доли свободного и связанного флюида, а также фото керна, исходный файл зарегистрированного ЯМР-сигнала, а также краткий отчет, содержащий основные ЯМР-характеристики в текстовом виде. Подобный способ хранения информации позволяет легко получать доступ к ней для дальнейшей работы.

Таким образом, на примере параметрической скважины Западно-Тымская 1 показано, что ЯМР-релаксометрия позволяет получить информацию о распределении фильтрационно-емкостных свойств образцов керна как по разрезу в целом, так и по каждой свите отдельно. Основное преимущество метода ЯМР заключается в возможности его вовлечения в комплекс стандартных лабораторных исследований керна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурцовкин В.А., Топорков В.Г. Новая ЯМР-технология петрофизических исследований керна, шлама и флюидов // Каротажник. – 2000. – № 69. – С. 84–97.
2. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритно-глинистых образцов // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 10. – С. 1911–1918.
3. Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии / М.Й. Шумскайте, В.Н. Глинских, С.Б. Бортникова, А.Н. Харитонов, В.С. Пермяков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 59–66.
4. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Изучение удельной поверхности водонасыщенных песчано-алевролитовых пород по данным ЯМР-релаксометрии // Тюмень-2015: Глубокие горизонты науки и недр:

Материалы 4-ой международной научно-практической конференции. – Тюмень. – 2015. – CD-ROM. – PP02. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=79691>.

5. Коатес Дж., Хиао Л., Праммер М. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. – Хьюстон: Халлибуртон Энерджи Сервисез, 2001. – 439 с.

6. Джафаров И.С, Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики свойства и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002. – 439 с.

7. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керн // Каротажник. – 2015. – № 253. – С. 56–62.

© М. Й. Шумскайте, В. Н. Глинских, П. А. Ян, С. В. Родякин, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Е. А. Мельник, В. Д. Суворов, Е. В. Павлов.</i> Латеральные сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским Кратоном	3
2. <i>В. С. Пермяков, А. Н. Харитонов, Д. В. Манзырев, А. В. Еделев, И. Н. Ельцов.</i> Перспективы использования электрохимических методов анализа для диагностики происхождения попутных вод газоконденсатных скважин	8
3. <i>В. С. Селезнев, А. А. Брыксин, А. А. Еманов, А. Ф. Еманов, Е. В. Лескова, А. В. Фатеев.</i> Триггерные эффекты в развитии наведенной сейсмичности и влияние человека на природную сейсмичность Байкала и Кузбасса	13
4. <i>А. В. Чернышев, Г. М. Тригубович, Я. Ф. Ковальский, А. В. Куклин, А. С. Сверкунов.</i> Результаты экспериментальных исследований по повышению разрешающей способности электроразведки поляризующихся сред	18
5. <i>О. А. Кучай, П. Г. Дядьков, Ю. М. Романенко, З. Джумагалиева.</i> Особенности распределения типов подвижек в очагах в областях подготовки и реализации сильнейших землетрясений	23
6. <i>П. О. Полянский, А. Ф. Еманов, А. С. Сальников.</i> Особенности методики динамического пересчета головных волн на опорном геофизическом профиле 3-ДВ	28
7. <i>В. М. Соловьев, В. Н. Каиун, С. А. Елагин, Н. А. Серезжников, Н. А. Галёва, И. А. Антонов.</i> О влиянии сезонных изменений среды под вибратором ЦВ-40 на характеристики его излучения (при вибросейсмическом мониторинге Алтае-Саянского региона)	34
8. <i>Н. Е. Сибирияков, Е. Б. Сибирияков.</i> Численное моделирование взрывного источника поперечных волн	40
9. <i>М. В. Свиридов, А. П. Мосин, Ю. Е. Антонов.</i> Высокопроизводительное картирование областей неопределенности параметров в задачах геонавигации	47
10. <i>А. С. Сердюков, А. В. Яблоков.</i> Многоканальный анализ поверхностных волн с фокусированием пространственно-временных спектров	53
11. <i>М. И. Протасов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова.</i> Томография времен первых вступлений в углепородном массиве	58
12. <i>З. Я. Сердюк, С. В. Арефьев, М. Р. Мазитов, И. И. Гарифуллин, Н. В. Белов, Л. И. Зубарева, О. Н. Стефаненко, И. Е. Стариченко.</i> Комплексная интерпретация геолого-геофизических параметров пласта ЮВ ₁ с целью изучения осадконакопления и нефтегазоносности в условиях унаследованного роста структур Северо-Покачевской моноклинали в верхнеюрском мелководно-морском бассейне седиментации	64

13. С. И. Шерман, О. А. Кучай, Н. А. Бушенкова. Геодинамическая и сейсмическая зональность формирования сильнейших землетрясений Центральной Азии	71
14. А. Ю. Соболев, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов. Атлас электрогидродинамических моделей прискважинной зоны	76
15. Е. В. Поспеева. Картирование новейших разломов методом магнитотеллурического зондирования (на примере восточной части Горного Алтая)	81
16. П. А. Сантаев, А. А. Власов, М. Ш. Урамаев. Разработка высокопроизводительного программного средства для моделирования сигналов плотностного гамма-гамма каротажа	86
17. Г. С. Чернышов, А. А. Дучков, А. С. Сердюков. Применение метода волновой томографии для обработки данных малоглубинной сейсморазведки	90
18. И. И. Фадеева. Конструктивные особенности игольчатого зонда, используемого для определения теплофизических свойств горных пород	95
19. В. Д. Суворов, Е. А. Мельник, А. С. Сальников. Региональное структурно-тектоническое районирование верхней коры Забайкалья по данным КМПВ (профиль 1-СБ, южный участок)	100
20. В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев, С. А. Елагин, И. Е. Романенко, Н. А. Галева. Глубинные сейсмические исследования на Байкало-Патомском фрагменте восточного участка опорного профиля 1-СБ	106
21. Н. В. Юркевич, С. Б. Бортникова, В. В. Оленченко, И. В. Проворная, О. П. Саева. Оценка современного состояния хвостохранилища золоторудного производства: ценные и токсичные компоненты	113
22. Т. С. Хачкова, Я. В. Базайкин, Д. Р. Колюхин, В. И. Костин, В. В. Лисица, Г. В. Решетова. Двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств горной породы по цифровым изображениям керна	118
23. В. В. Романенко, Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев. Тепловые особенности в районе «боевой» скважины 104 Семипалатинского испытательного полигона	123
24. М. В. Чубаров, А. А. Власов, А. Е. Шалагинов. Построение трехмерных геоэлектрических моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне на основе результатов одномерной инверсии	129
25. А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, А. А. Брыксин. Результаты исследования методом стоячих волн сейсмоизолированного здания (Национальный университет Тайвани, корпус гражданского строительства, г. Тайбэй)	135
26. М. А. Корсаков, Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников. Программно-алгоритмическая система для моделирования и совместной интерпретации данных площадных и многокомпонентных импульсных индукционных зондирований	141

27. <i>А. В. Китаев, Г. М. Тригубович, О. В. Мурзин.</i> Закономерности размещения и критерии прогноза колчеданно-полиметаллического оруденения Салаира по данным аэрогеофизической съемки	146
28. <i>Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов.</i> Влияние глубины залегания магнитовязкого основания и разноса установки на индукционные переходные характеристики.....	151
29. <i>Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов.</i> Возбуждение переходных процессов вызванной поляризации с помощью источника напряжения	156
30. <i>Г. Н. Логинов, А. А. Дучков, Ю. П. Стефанов, А. В. Мясников.</i> Изучение связи механизмов разрушения горных пород с тензором сейсмического момента точечного источника на основе численного геомеханического моделирования.....	162
31. <i>М. А. Новиков, В. В. Лисица.</i> Анализ проявлений связности трещин в сейсмических волновых полях на основе численного моделирования	167
32. <i>П. С. Лапин.</i> Современная активизация верхнеюрского нефтегазоносного комплекса в пределах Каймысовской НГО	173
33. <i>А. А. Красников, А. Ф. Еманов, А. А. Бах.</i> Оценка полноты конечно-элементных моделей инженерных сооружений по экспериментальным данным метода стоячих волн	179
34. <i>Д. Ю. Кушнир, М. В. Свиридов, Г. В. Дятлов, Ю. А. Дашевский.</i> Применимость 1D-инверсии данных электромагнитного каротажа в 2D-моделях: изгиб границ пласта и впадина	185
35. <i>Ю. И. Колесников, К. В. Федин.</i> Определение резонансных свойств верхней части разреза на территории геофизической обсерватории «Ключи» по записям микросейсм	191
36. <i>З. Н. Гнибиденко, А. В. Левичева, В. А. Маринов.</i> Палеомагнетизм верхнемеловых отложений северо-востока Западной Сибири (по результатам изучения керна скважин)	196
37. <i>В. Н. Доровский, Е. В. Вторушин, Е. И. Роменский.</i> Разрушение горной породы. Нелокальная теория упругости	202
38. <i>С. М. Бабушкин, Н. Н. Неведрова.</i> Аппаратурные и методические средства при поисках рудных месторождений методом нестационарного электромагнитного зондирования	207
39. <i>П. А. Дергач, В. И. Юшин.</i> Способ прогноза шума низкочастотной деконволюции	213
40. <i>А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, В. Ю. Тимофеев.</i> Модели релаксации для постсейсмических смещений Горного Алтая.....	218
41. <i>М. Й. Шумскайте, В. Н. Глинских, П. А. Ян, С. В. Родякин.</i> Экспресс-определение фильтрационно-емкостных свойств образцов керна на примере опорной скважины Западно-Тымская 1 лабораторным методом ЯМР-релаксометрии.....	225

CONTENTS

1. <i>E. A. Melnik, V. D. Suvorov, E. V. Pavlov.</i> Lateral Seismic Heterogeneities of the Upper Mantle Beneath the Siberian Craton.....	3
2. <i>V. S. Permyakov, A. N. Haritonov, D. V. Manzyrev, A. V. Edelev, I. N. El'tsov.</i> Employment Aspects of Electrochemical Methods of Analysis for Testing of Genesis Associated Waters of Gas Condensate wells	8
3. <i>V. S. Seleznev, A. A. Bryksin, A. A. Emanov, A. F. Emanov, E. V. Leskova, A. V. Fateev.</i> Trigger Effects in the Development of Induced Seismicity and the Influence of Human Being Over the Natural Seismicity of Kuzbass and Baikal Regions of Russia.....	13
4. <i>A. V. Chernyshev, G. M. Trigubovich, Ya. F. Kovalskiy, A. V. Kuklin, A. S. Sverkunov.</i> The Results of Experimental Studies to Increase the Resolution of TEM in Polarizing Mediums	18
5. <i>O. A. Kuchay, P. G. Dyadkov, Yu. M. Romanenko, Z. Jumagalieva.</i> Features of Distribution of Types of Shifts in the Foci in the Areas of Preparation and Implementation of the Strongest Earthquakes	23
6. <i>P. O. Polyansky, A. F. Emanov, A. S. Salnikov.</i> Methodological Features of Head Waves Dynamic Conversion on Reference Geophysical Profile 3-DV	28
7. <i>V. M. Solovyev, V. N. Kashun, S. A. Elagin, N. A. Serezhnikov, N. A. Galyova, I. A. Antonov.</i> Seasonal Ground Changes at Upper Layer Under CV-40 Vibrator and Its Effect on Emission Characteristics (During Vibro Seismic Monitoring at Altay-Sayan Region).....	34
8. <i>N. E. Sibiriakov, E. B. Sibiriakov.</i> Numerical Modelling Method of the S-wave Explosive Source	40
9. <i>M. V. Sviridov, A. P. Mosin, Yu. E. Antonov.</i> High-Performance Mapping of Parameter Uncertainty Region in Reservoir Navigation Applications.....	47
10. <i>A. S. Serdyukov, A. V. Yablokov.</i> Surface Waves Multichannel Analysis Using Time-Spatial Power Spectrum Focusing	53
11. <i>M. I. Protasov, L. A. Nazarov, L. A. Nazarova.</i> Tomography of the First Arrival Travel Times in Coal-Rock Mass.....	58
12. <i>Z. Ya. Serdyuk, S. V. Arefiev, M. R. Mazitov, I. I. Garifullin, N. V. Belov, L. I. Zubareva, O. N. Stefanenko, I. E. Starichenko.</i> Complex Interpretation of Geological and Geophysical Parameters of YuV ₁ Layer to Study Sedimentation and Oil and Gas Potential Under the Conditions of Inherited Growth of Structures in the Severo-Pokachevsky Monocline in Upper Jurassic Shallow-Marine Sedimentation Basin.....	64

13. <i>S. I. Sherman, O. A. Kuchay, N. A. Bushenkova.</i> Geodynamic and Seismic Zonation of the Formation of the Strongest Earthquakes in Central Asia	71
14. <i>A. Yu. Sobolev, G. V. Nesterova, I. N. Yeltsov.</i> Atlas of the Electrohydrodynamic Models of Borehole Environment	76
15. <i>E. V. Pospeeva.</i> Mapping New Faults by Magnetotelluric Sounding (for Exampal, the Easten Parth of the Gorny Altai).....	81
16. <i>P. A. Santaev, A. A. Vlasov, M. Sh. Uramaev.</i> Development of High Performance Software Tools for Simulation Signal of Gamma-Gamma Density Logging	86
17. <i>G. S. Chernyshov, A. A. Duchkov, A. S. Serdyukov.</i> Application of Wave-Equation Traveltime Inversion for Near Surface Geophysics Studies.....	90
18. <i>I. I. Fadeeva.</i> Structural Features of Needle Probe, Which Used to Determine the Thermal Properties of Rocks	95
19. <i>V. D. Suvorov, E. A. Melnik, A. S. Salnikov.</i> Regional Tectonic Structure of the Transbaikalia Upper Crust from Refracted Waves (Profile 1-SB)	100
20. <i>V. M. Solovyev, A. S. Salnikov, V. S. Seleznev, S. A. Elagin, I. E. Romanenko, N. A. Galyova.</i> Deep Seismic Sounding at Baikal-Patom Fragment of Eastern Section 1-SB Profile	106
21. <i>N. V. Yurkevich, S. B. Bortnikova, V. V. Olenchenko, I. V. Provornaya, O. P. Saeva.</i> The Current State of Gold Mining Tailings: Valuable and Toxic Components	113
22. <i>T. S. Khachkova, Ya. V. Bazaikin, D. R. Kolyukhin, V. I. Kostin, V. V. Lisitsa, G. V. Reshetova.</i> Numerical Two-Scale Method for Estimation of Elastic Properties from Digital Rock Images	118
23. <i>V. V. Romanenko, D. E. Ayunov, A. D. Duchkov, S. A. Kazantsev.</i> Heat Features at the Spot of «Warfare» Borehole 104 of Semipalatinsk Test Site.....	123
24. <i>M. V. Chubarov, A. A. Vlasov, A. E. Shalaginov.</i> Constructing Three-Dimensional Geoelectric Model for Methods Sensing Formation Near Field Based on the Results of One-Dimensional Inversion	129
25. <i>A. V. Liseikin, V. S. Seleznev, A. A. Briksin.</i> Results of Investigation of Seismic Isolated Building by the Standing Waves Method (National Taiwan University Civil Engineering Building, Taipei).....	135
26. <i>M. A. Korsakov, E. Yu. Antonov, N. O. Kozhevnikov.</i> Geophysical Modelling and Joint Interpretation System for Time-Domain Electromagnetic Soundings in Conductive Polarizable Medium	141
27. <i>A. V. Kitaev, G. M. Trigubovich, O. V. Murzin.</i> Regularities of Placement and Criterion of the Forecast of Pyrite-Polymetallic Mineralization of Salair According to Aerogeophysical Surveys.....	146
28. <i>N. O. Kozhevnikov, E. Yu. Antonov.</i> The Effect of the Depth to Magnetically Viscous Base and of the Receiver Position on the TEM Response	151
29. <i>N. O. Kozhevnikov, E. Yu. Antonov.</i> Transient Induced Polarization Response to a Rectangular Voltage Pulse.....	156

30. G. N. Loginov, A. A. Duchkov, Yu. P. Stefanov, A. V. Myasnikov. Study of Connection Between Rock Failure Mechanisms and Seismic Moment Tensor of Point Source by Numerical Geomechanical Modeling	162
31. M. A. Novikov, V. V. Lisitsa. Analysis of Fracture Connectivity Effects in Seismic Wavefields on the Base of Numerical Simulation.....	167
32. P. S. Lapin. Modern Activation Upper Jurassic Oil and Gas Complex in the Area of Oil and Gas Kaymysovskoy	173
33. A. A. Krasnikov, A. F. Emanov, A. A. Bakh. Finite Element Model of Engineering Structures Completeness Assessment by Standing Waves Method Experimental Data	179
34. D. Yu. Kushnir, M. V. Sviridov, G. V. Dyatlov, Yu. A. Dashevsky. Applicability of 1D-inversion of Resistivity Data in 2D-formation Models: Boundary Folding and Trough	185
35. Yu. I. Kolesnikov, K. V. Fedin. Determination of Near Surface Resonant Properties in the Territory of Geophysical Observatory «Kluchi» Using Microtremor Records	191
36. Z. N. Gnibidenko, A. V. Levicheva, V. A. Marinov. Paleomagnetism of the Upper Cretaceous Sediments on the North-East of Western Siberia (on Results PF Study Wells)	196
37. V. N. Dorovsky, E. V. Vtorushin, E. I. Romenski. Rock Failure and Nonlocal Elasticity Theory	202
38. S. M. Babushkin, N. N. Nevedrova. Application of the Areal EM Soundings Technology Within Limits of the Yergozhu Ore Field in the Irkutsk Region	207
39. P. A. Dergach, V. I. Yushin. Low Frequency Deconvolution Noise Prediction Method	213
40. A. V. Timofeev, D. G. Ardyukov, E. V. Boyko, V. Yu. Timofeev. Relaxation Models for Postseismic Displacement of Gornii Altay.....	218
41. M. Y. Shumskayte, V. N. Glinskikh, P. A. Yan, S. V. Rodyakin. Express Characterization of Reservoir Properties of Core Samples in Terms of Key-Well West-Tym 1 by Laboratory NMR Method	225

Научное издание

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ

Т. 4

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 26.05.2017. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 13,78. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.