
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ИЮЛЬ № 3 2018 СЕНТЯБРЬ

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

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

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 3	Июль–сентябрь 2018
----------------	-------------------------------	-----	-----------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Дядьков П.Г., Романенко Ю.М., Козлова М.П., Цибизов Л.В., Дучкова А.А. Методические подходы к определению состояния блочной сейсмогенной среды на примере активизации 2008–2011 гг. в центральной части Байкальского рифта	4
Губин И.А., Таратенко А.В. Структурная характеристика венд-кембрийских отложений Восточной части Северо-Тунгусской НГО по данным сейсморазведки 2D в связи с нефтегазоносностью	14
Максимов М.А., Суролина И.В., Глинских В.Н. Быстрая инверсия данных разновысотных измерений магнитного поля с БПЛА на примере синтетических моделей с учетом рельефа.	30
Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратурное обеспечение высокоточного температурного мониторинга.	39
Яблоков А.В., Сердюков А.С. Метод автоматизированного извлечения дисперсионных кривых на основе временно-частотного распределения сейсмических данных. . . .	48

НОВОСИБИРСК
ИНГГ СО РАН
2018

ISSN 2619-1563 (Online)

Founded in 2004	Quarterly	No 3	July-September 2018
-----------------	-----------	------	------------------------

CONTENTS

Dyadkov P.G., Romanenko Y.M., Kozlova M.P., Tsibizov L.V., Duchkova A.A. Methodological approaches to determining the state of block seismogenic medium on the example of the 2008-2011 seismic activation in the Central part of the Baikal rift.	4
Gubin I.A., Taratenko A.V. Structural characteristics of Vendian-Cambrian sediments within the North-Tunguska OGR using seismic 2D data in connection with petroleum potential. .	14
Maksimov M.A., Surodina I.V., Glinskikh V.N. Fast inversion of UAV magnetic field data on the example of synthetic models with the topography.	30
Kazantsev S.A., Duchkov A.D. The equipment for precise temperature monitoring.	39
Yablokov A.V., Serdyukov A.S. Method of automated extracting of dispersion curves based on time-frequency distribution of seismic data.	48



МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТОЯНИЯ БЛОЧНОЙ СЕЙСМОГЕННОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ АКТИВИЗАЦИИ 2008–2011 ГГ. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

П.Г. Дядьков^{1,2}, Ю.М. Романенко^{1,2}, М.П. Козлова^{1,2}, Л.В. Цибизов^{1,2}, А.А. Дучкова¹

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

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

Предложены подходы к оценке состояния блочной сейсмогенной среды на основе совместного анализа ряда параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии: затишья и активизации, наклон графика повторяемости (*b*-value), сейсмическая активность A_{10} . Апробация методики выполнена на примере подготовки и развития сейсмической активизации 2008–2011 гг. в центральной части Байкальского рифта, во время которой произошли два сильных землетрясения с $M=5.3$. Выявлено, что в течение 2-х лет перед сильным Максимихинским землетрясением 2008 г. в земной коре эпицентральной области происходил переход от разупрочнения к упрочнению (консолидации) блочной среды. При этом в соседней области (район полуострова Святой Нос) наблюдался прямо противоположный характер изменений.

Байкальский рифт, сейсмический режим, подготовка землетрясения, b-value, сейсмическое затишье, блочная среда, упрочнение, среднесрочный прогноз

METHODOLOGICAL APPROACHES TO DETERMINING THE STATE OF BLOCK SEISMOGENIC MEDIUM ON THE EXAMPLE OF THE 2008-2011 SEISMIC ACTIVATION IN THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT

P.G. Dyadkov^{1,2}, Y.M. Romanenko^{1,2}, M.P. Kozlova^{1,2}, L.V. Tsibizov^{1,2}, A.A. Duchkova¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Based on the joint analysis of the seismic regime parameters, such as anomalies of seismic energy release, *b*-value, seismic activity A_{10} , approaches to assess the state of the block-seismic medium are proposed. The method validation was done for the example of preparation and development of seismic activity in 2008–2011 in the Central part of the Baikal rift, during which there were 2 strong $M5.3$ earthquakes. It was found that within 2 years before the strong Maximihinskoye Earthquake of 2008 in the Earth's crust of the epicentral region there is a transformation from softening to strengthening

(consolidation) of the block medium. At the same time, in the neighboring region (the area of the Svyatoy Nos Peninsula), the opposite nature of the changes is observed.

Baikal rift, seismic regime, earthquake preparation, b-value, seismic quiescence, block medium, hardening, medium-term forecast

ВВЕДЕНИЕ

Информация об изменении состояния среды является определяющей для понимания физики процессов, происходящих при подготовке землетрясений, и разработки соответствующих моделей. При этом требуется учитывать дискретность сейсмогенной среды (ее блочное строение) и, по возможности, ее реологическую неоднородность.

В 2008–2011 гг. в районе центральной части байкальской впадины произошли два крупных сейсмических события: Максимихинское, 20 мая 2008 г., $M=5.3$, с эпицентром на акватории оз. Байкал близ мыса Горевой [Гилева и др., 2014], и Туркинское, 16 июля 2011 г., $M=5.3$, в хребте Улан-Бургасы [Мельникова и др., 2013; Гилева и др., 2017] (рис. 1).

В данной работе применены подходы к оценке состояния сейсмогенной среды на основе расчета и совместного анализа параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии, сейсмическая активность A_{10} и наклон графика повторяемости землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера) [Gutenberg, Richter, 1944].

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматривая относительно сильное Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г., $M_w=5.3$, нельзя не отметить, что район Среднего Байкала, где произошло данное событие, традиционно считается высокосейсмичным [Мельникова и др., 2013]. Очаговая область этого землетрясения находится в обстановке сдвига с небольшой сбросовой компонентой [Гилева, Мельникова, 2014]. Оценка фокальных механизмов других землетрясений афтершоковой последовательности этого события показал, что в большинстве случаев в очагах доминирует типичное для центральных частей Байкальского рифта субгоризонтальное северо-западное растяжение.

Рифтовый фокальный механизм другого сильного сейсмического события этой активизации – Туркинского землетрясения 16 июля 2011 г., $M_w=5.3$, и отдельных его афтершоков свидетельствует о доминирующем влиянии в этом районе хребта Улан-Бургасы режима субгоризонтального растяжения, ориентированного вкрест простиранья основных геоструктур [Гилева и др., 2017].

Важно отметить, что в районе эпицентральной области Максимихинского землетрясения сильные землетрясения с $M \geq 5$ не происходили в радиусе ~ 40 км по крайней мере в последние 70 лет. Соседний участок – район полуострова Святой Нос – наоборот является концентратором событий с $M \sim 5$ –6. За этот же период здесь произошло пять событий такой интенсивности.

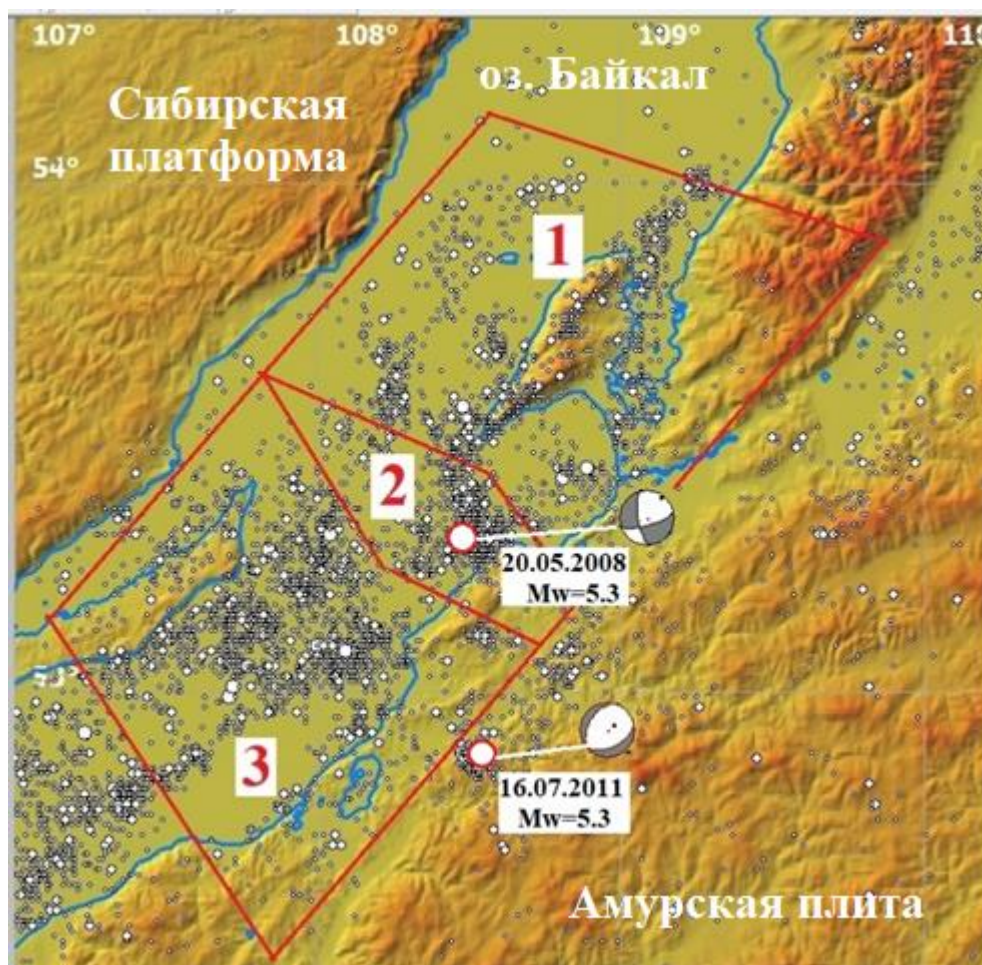


Рис. 1. Карта Среднего Байкала с нанесенными эпицентрами землетрясений с $M=1.5-5.3$ за 2001–2014 гг. (белые кружки и серые точки), с эпицентрами Максимихинского, 2008 г., и Туркинского, 2011 г., землетрясений и механизмами их очагов. Красными линиями выделены участки, для которых выполнялись расчеты значений наклона графика повторяемости

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для определения значений параметров графика повторяемости землетрясений, выражающего закон Гутенберга – Рихтера (формула 1), использовался метод построения линейной зависимости между IgN и магнитудой M на основе минимизации среднеквадратичного отклонения

$$IgN = a - bM, \quad (1)$$

где N – количество событий, a и b – коэффициенты, определяющие уровень сейсмической активности и наклон графика повторяемости.

Анализ сопоставления двух способов определения наклона графика повторяемости: по среднеквадратичному отклонению и по методу максимального правдоподобия, показал, что при больших N оба способа дают практически одни и те же значения параметра b-value [Шумилина, 1978].

Выбор представительных сейсмических событий для построения графика повторяемости землетрясений и определения параметра b -value осуществлялся на основе анализа регионального каталога землетрясений Байкальского филиала ГС РАН. При этом выполнялся анализ изменений количества событий низких энергетических классов в различные периоды, а также определялась минимальная магнитуда, с которой начиналось отклонение от прямолинейной зависимости в левой части графика повторяемости землетрясений. Кроме этого, принимались во внимание изменения в структуре сети сейсмических станций этого региона. Наилучшую представительность событий имеет период с 2001 г. по настоящее время, поскольку сеть сейсмических станций Байкальского филиала ГС РАН в этом районе дополнилась несколькими станциями Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Поэтому определение значений b -value для построения графиков его изменений во времени выполнялось для периода 2001–2014 гг. Афтершоковые последовательности не удалялись при расчетах b -value.

Выполненный анализ показал, что для рассматриваемого района исследований и выбранного периода 2001–2014 гг. уверенно представительными являются события с $M \geq 1.4 - 1.5$.

Аномалии выделения сейсмической энергии (сейсмические затишья и активизации) рассчитывались на основе методики SEQ [Дядьков, Кузнецова, 2008; Романенко, Дядьков, 2017], которая определяет степень дефицита или превышения выделяемой энергии на единицу площади за определенный период времени (например, год) относительно нормы, определяемой за длительный интервал времени.

Сейсмическая активность A_{10} определялась по стандартной методике [Сейсмическая сотрясаемость..., 1979]. Расчет всех вышеперечисленных параметров производился в геоинформационной системе EEDB [Dyadkov, Mikheeva, 2010].

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА СРЕДНЕМ БАЙКАЛЕ

Пространственные изменения значений наклона графика повторяемости и сейсмической активности. На первом этапе предпримем попытку качественной оценки пространственного распределения прочностных свойств (консолидированности) блочной среды исследуемого района Среднего Байкала. При этом используем известную зависимость между наклоном графика повторяемости землетрясений и прочностью (степенью консолидированности) блочной среды [Арефьев и др., 1989; Виноградов, Пономарев, 1999; Hatzidimitriou et al., 1985]. Кроме этого, необходимо помнить о возможном влиянии на величину наклона графика повторяемости и другого параметра – интенсивности и типа напряженного состояния [Kuznetsova et al., 1981; Schorlemmer et al., 2005]. Но отметим, что эти параметры, в свою очередь, также зависят от степени консолидированности блочной среды.

Будем определять значения наклона графика повторяемости b -value для отдельных участков земной коры Среднего Байкала и отдельных интервалов времени на основе построения и расчета параметров этого графика, выражающего закон Гутенберга–Рихтера (1).

На рис. 1 выделены три участка Среднего Байкала. Они фактически пересекают вкрест простираения впадину оз. Байкал с выходом на относительно асейсмичные области Восточно-Сибирской платформы на северо-западе и Амурской плиты на юго-востоке.

Для каждого из этих участков по данным регионального каталога Байкальского филиала ГС РАН для периода 2001–2014 гг. определялись значения параметра b-value графика повторяемости землетрясений. Выборка сейсмических событий для построения графика осуществлялась по следующим критериям: нижний предел магнитуд определялся представительностью событий, а верхний – по статистической значимости количества событий. Обычно эти пределы находились в рамках $M = 1.5 \div 3.5$. Полученные значения b-value были следующими: $b = 0.96 \pm 0.01$ – северный участок (1); $b = 1.12 \pm 0.01$ – участок, включающий эпицентральною область (2); $b = 1.05 \pm 0.01$ – юго-западный участок (3).

Эпицентральная область Туркинского землетрясения 2011 г. не включалась в участки, для которых выполнялись расчеты параметра b-value, ввиду малого количества сейсмических событий в этом районе, что не позволяет рассчитать этот параметр с необходимой точностью.

Полученные значения b-value для выделенных на рис. 1 участков указывают на то, что северный участок (1) является более консолидированным (условно более прочным), чем два других. Самым ослабленным является 2-й участок, включающий будущую зону очага. Будущая эпицентральная область Максимихинского землетрясения показывает еще более высокие значения $b \sim 1.24 \pm 0.02$ за период 2000–2006 гг. с некоторым понижением в 2007 г. непосредственно перед главным событием.

Причиной повышенных значений параметра b-value в этой зоне может являться ее несколько более высокая сейсмическая активность (по сравнению с ближайшим окружением), особенно в последние 5 лет перед землетрясением, за счет большого количества событий низких энергий, как правило не превышающих $M=3$. Существенно более слабая сейсмичность ее ближайшего окружения (кроме аппендикса в северном направлении, соединяющего будущую эпицентральную область с областью повышенной активности у южной оконечности п-ва Святой Нос) может свидетельствовать о том, что эта будущая эпицентральная область с несколько повышенной сейсмической активностью окружена более жесткой блочной средой (рис. 1 и 2).

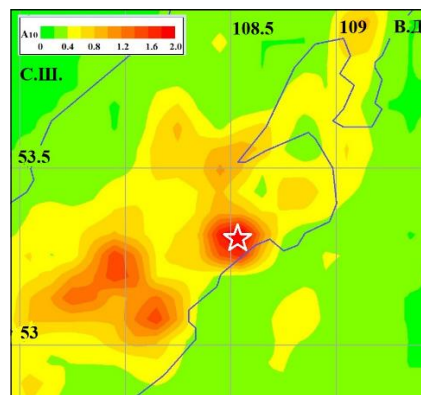
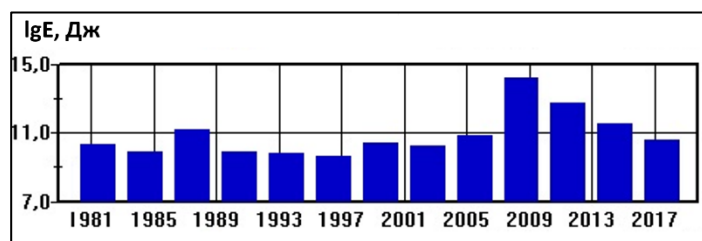


Рис. 2. Выделение сейсмической энергии за 4-летние интервалы времени с 1980 по 2017 гг. в эпицентральной области Максимихинского землетрясения 2008 г. с $M=5.3$ (слева) и сейсмическая активность A_{10} в исследуемом регионе за 5-летний период перед этим землетрясением (отмечено звездочкой) с 1 января 2003 г. по 19 мая 2008 г. (справа)

Изменения сейсмической активности и значений наклона графика повторяемости во времени. Ранее нами было выявлено, что Максимихинскому и Туркинскому землетрясениям предшествовало сейсмическое затишье в 2001–2004 гг., которое окаймляло будущую зону активизации 2008–2011 гг. [Дядьков и др., 2017]. Развитие северной части этого затишья, наиболее дефицитной по уровню выделения сейсмической энергии, территориально приуроченной к п-ву Святой Нос, отслеживалось нами в реальном масштабе времени (рис. 3) [Дядьков, Кузнецова, 2008]. Распад затишья был приурочен к умеренной активизации (ряд событий с $M \sim 4 - 4.5$), происшедшей в 2005–2006 гг. в районе п-ва Святой Нос (см. рис. 3).

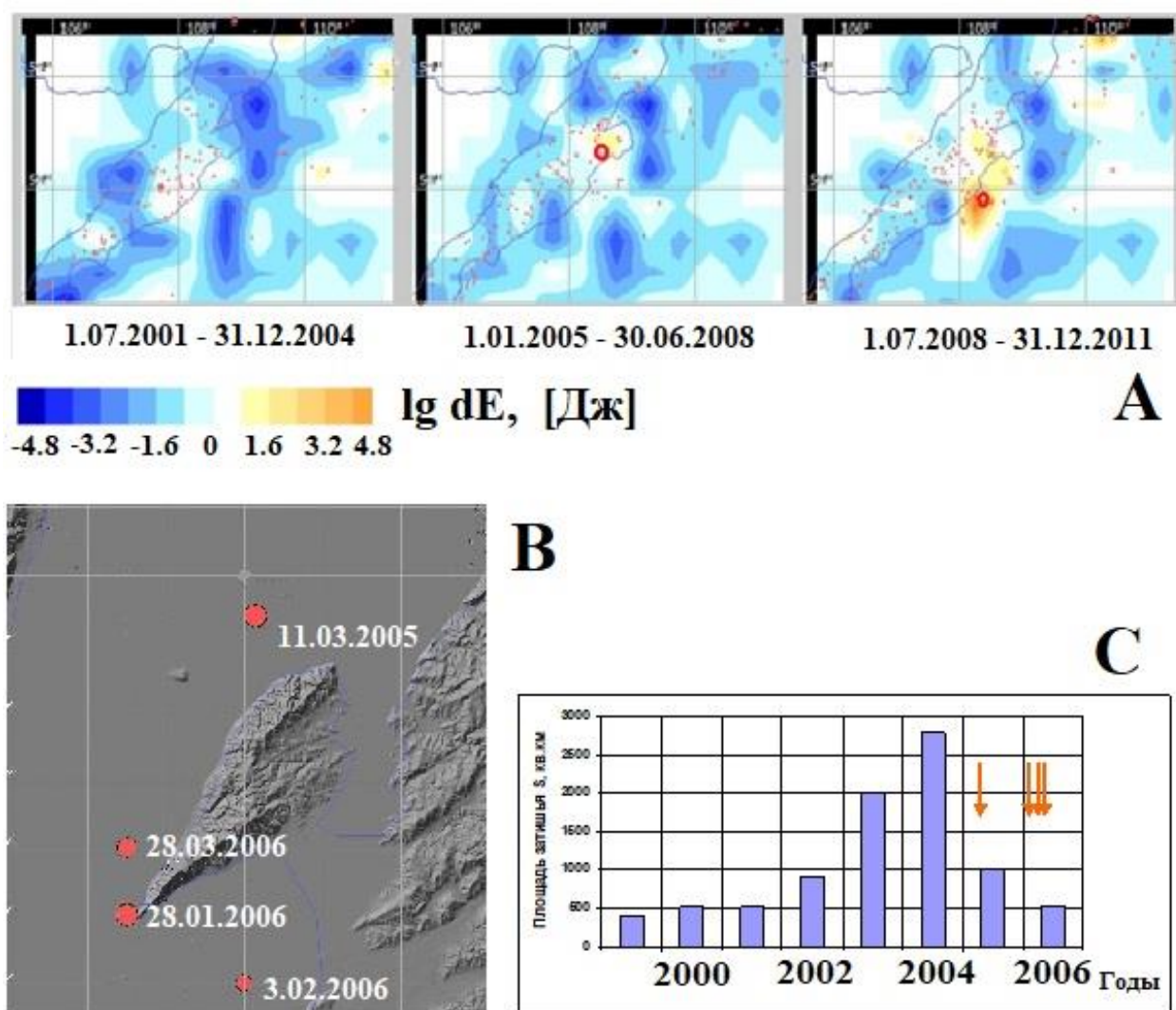


Рис. 3. Аномалии выделения сейсмической энергии в районе Среднего Байкала (А), синие оттенки – дефицит, желто-красные – активизации после 2000 г.; (В) – локальная активизация в районе п-ова Святой Нос в виде серии землетрясений умеренной интенсивности ($M \sim 4 - 4.5$) в 2005-2006 гг.; (С) – изменение во времени площади сейсмического затишья в районе п-ова Святой Нос в 1998–2008 гг.

На рис. 4 представлены результаты определения изменений во времени значений наклона графика повторяемости b для трех участков района Среднего Байкала. Неравномерность распределения во времени этих значений обусловлена недостатком статистически значимого количества сейсмических событий на некоторых временных отрезках. В абсолютном большинстве случаев для определения b -value использовался диапазон магнитуд 1.5–3.5. При этом для построения графика отбирались только те значения, среднеквадратичное отклонение у которых не превышало 0.02. Количество событий, по которому определялось каждое из значений b , составляло, как правило, не менее 100–200.

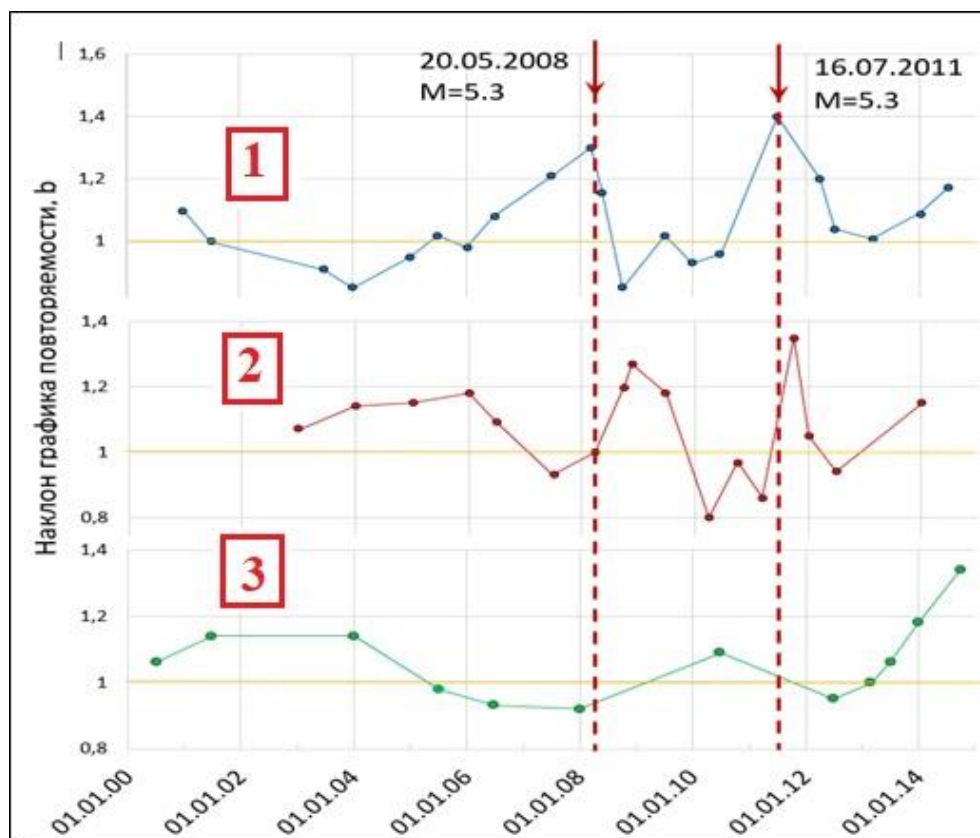


Рис. 4. Изменение наклона графика повторяемости землетрясений b в 2001–2014 гг. для трех участков района Среднего Байкала, показанных на рис. 1

Диапазон изменений значений b -value оказался достаточно широк: от 0.8 до 1.4 при среднеквадратичной погрешности, не превышающей 0.02, что указывает на достоверность полученных значений. Рассмотрим основные характерные особенности поведения параметра b -value за этот период.

Во-первых, на участке 1, в районе п-ва Святой Нос, в период 2001–2004 гг. параметр b -value имеет низкие значения в пределах $\sim 0.85 - 1.00$. Поскольку в этот же период в этом районе имело место сейсмическое затишье (см. рис. 3), это указывает на то, что оно обусловлено консолидацией блоковой среды. Этот результат имеет чрезвычайно важное значение, поскольку о природе сейсмических затиший сведений достаточно мало. Так как на региональном уровне затишье окаймляло всю область будущей активизации 2008–2011 гг. (см. рис. 3), то можно сделать предварительное заключение о том, что в 2001–2004 гг. консолидированные области окружали более разуплотненную область будущей активизации.

Во-вторых, после локальной умеренной активизации (2005–2006 гг.) значения параметра b -value в районе Святого Носа повышаются до значений 1.3 в 2006–2007 гг., что может свидетельствовать о разупрочнении блочной среды. В это же время на участке 2 (район будущего Максимихинского землетрясения) происходит обратный процесс – значения параметра b понижаются вплоть до основного события. Одно из объяснений такого поведения значений b -value – это ослабление консолидированного ансамбля блоков в районе п-ва Святой Нос, во время существования которого район будущего очага находился в условиях разуплотнения и, возможно, более низких значений касательных напряжений. По-видимому, ослабление участка 1 привело к некоторому дополнительному нагружению земной коры участка 2 – района будущего землетрясения. После землетрясения параметр b -value понижается на участке 1 и повышается на участке 2 в эпицентральной области.

Таким образом, наблюдается противоположное по знаку изменение параметра b на соседних участках 1 и 2 с начала 2006 по конец 2008 г.

В 2009 г. в эпицентральной области Максимихинского землетрясения (участок 2) величина параметра b -value вновь понижается до значений 0.80 – 0.95, после чего наблюдается рост параметра b до значений ~ 1.40 как на участке 1, так и на участке 2, возможно связанный со вторым сильным землетрясением рассматриваемой активизации – Туркинским, 16 июля 2011 г., $M=5.3$. Об изменениях параметра b -value на участке 3, расположенном юго-восточнее эпицентральной области Туркинского землетрясения, в период 2008-2012 гг. трудно судить из-за недостаточного количества представительных землетрясений. Однако некоторое повышение активности в этом районе в 2013–2014 гг., позволило получить несколько определений для этого периода, которые указывают на устойчивый рост параметра b -value в эти годы как на этом участке, так и в эпицентральной области Максимихинского землетрясения (участок 2), а также в районе п-ва Святой Нос (участок 1).

ВЫВОДЫ

Наиболее важный результат работы – обнаружение взаимосвязи состояния сейсмогенной блочной среды в эпицентральной области готовящегося сильного землетрясения (Максимихинского) и в соседней области с более жесткой, консолидированной блочной структурой (район п-ва Святой Нос и Баргузинский залив). В этих двух районах наблюдается обратная корреляция значений наклона графика повторяемости землетрясений как перед Максимихинским землетрясением в 2006–2007 гг., так и после него в 2008 г.

Другой важный результат связан с тем, что удалось установить вероятную природу сейсмического затишья, наблюдавшегося в 2001–2004 гг. в районе п-ва Святой Нос и имевшего здесь наибольший дефицит выделения сейсмической энергии. Периоду существования этого затишья соответствуют низкие значения b -value, что указывает на консолидацию блочной структуры в этот период в районе п-ва Святой Нос и Баргузинского залива. На региональном уровне затишье окружало область будущей активизации 2008–2011 гг., поэтому можно сделать предварительный вывод о том, что в 2001–2004 гг. области с консолидированной блочной структурой окружали разупрочненную (ввиду повышенных значений b -value) область будущей активизации.

Таким образом, предложенные методические подходы комплексного анализа параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии и наклон графика повторяемости землетрясений, позволили выявить особенности изменений в состоянии сейсмогенной среды при подготовке и реализации сильных землетрясений во время сейсмической активизации 2008–2011 гг. в центральной части Байкальского рифта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 17–05–01234, частичной поддержке Программы IX.128.2 ФНИ и проекта Комплексной программы СО РАН II.1.34. Авторы выражают благодарность Байкальскому и Бурятскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН за предоставление данных сейсмологических наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С., Татевосян Р.Э., Шебалин Н.В.** Об устойчивости собственной пространственно-временной структуры сейсмичности Кавказа // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 12. – С. 37–41.
- Виноградов С.Д., Пономарев В.С.** Экспериментальное изучение сейсмического режима // Природа. – 1999. – № 3. – С. 77–89.
- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И.** Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $K_p=14.3$, $M_w=5.3$, $I_0=7$ (Центральный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск, 2014. – С. 337–345.
- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Туркинское землетрясение 16 июля 2011 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.2$, $I_0=7–8$ (Центральное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 300–304.
- Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М.** Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 19–25.
- Дядьков П.Г., Романенко Ю.М., Дучкова А.А., Козлова М.П., Кулешов Д.А., Цибизов Л.В.** О критериях выделения областей подготовки сильных байкальских землетрясений на основе анализа сейсмического режима и результатов тектономагнитного мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 12 (спец. вып. № 36). – С. 11–18.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008–2011 годах // ДАН. – 2013. – Вып. 453, № 6. – С. 680–685.
- Романенко Ю.М., Дядьков П.Г.** Метод выделения сейсмического затишья SEQ (Seismic Energy Quiescence) на примере Кроноцкого землетрясения $M_w = 7.9$ (Камчатка) // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы пятой молодежной тектонофизической школы-семинара (г. Москва, 9–12 октября 2017 г.). – 2017. – С. 327–330.
- Сейсмическая** сотрясаемость территории СССР / Отв. редактор Ю.В. Ризниченко. – М.: Наука, 1979. – 220 с.

Шумилина Л.С. Сейсмическая опасность Камчатки и Командорских островов: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – М., 1978. – 213 с.

Dyadkov P.G., Mikheeva A.V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research // Bulletin of the Novosibirsk computing center. Series: Mathematical modeling in geophysics. – 2010. – № 13. – P. 15–30.

Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological society of America. – 1944. – Vol. 34. – P. 185–188.

Hatzidimitriou P.M., Papadimitriou E.E., Mountrakis D.M., Papazachos B.C. The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece // Tectonophysics. – 1985. – Vol. 120, Is. 1–2. – P. 141–151.

Kuznetsova K.I., Shumilina L.S., Zavyalov A.D. The physical sense of the magnitude-frequency relation // Proc. of the 2nd Intern. Symp. on the analysis of seismicity and on seismic hazard. – Liblice, 1981. – P. 27–46.

Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes // Nature. – 2005. – Vol. 437(7058). – P. 539–542.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЯДЬКОВ Петр Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доцент кафедры геофизики ГГФ НГУ. Область научных интересов: современные геодинамические процессы и процессы подготовки землетрясений на основе анализа параметров сейсмического режима и результатов многолетнего тектономагнитного мониторинга в Байкальском и Алтайском регионах.

РОМАНЕНКО Юлия Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: аномалии выделения сейсмической энергии при подготовке сильных землетрясений. E-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru.

КОЗЛОВА Марина Петровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: блоковое строение земной коры сейсмоактивных областей и численное моделирование. E-mail: KozlovaMP@ipgg.sbras.ru.

ЦИБИЗОВ Леонид Валерьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: построение моделей земной коры и численное моделирование напряженно-деформированного состояния. E-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru.

ДУЧКОВА Александра Аглямовна – инженер лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: анализ изменений во времени параметров сейсмического режима и результатов многолетних стационарных магнитных наблюдений. E-mail: DuchkovaAA@ipgg.sbras.ru.



**СТРУКТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕНД-КЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-ТУНГУССКОЙ НГО ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 2D
В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ**

И.А. Губин¹, А.В. Таратенко²

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

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

В результате комплексной интерпретации данных параметрического бурения и сейсмических материалов, полученных за счет федерального бюджета в зоне сочленения Курейской синеклизы и Анабарской антеклизы, были построены структурные карты по подошве венда, кровле куонамской свиты и карта толщин ванаварской свиты терригенного комплекса венда. Дано обоснование высоких перспектив нефтегазоносности ниже-среднекембрийских отложений. На основе анализа данных ГИС, описания керна и детальной корреляции временных разрезов составлены литолого-акустические модели по двум профилям, пересекающим барьерно-рифтовую систему, и рассчитаны двумерные синтетические временные разрезы, подтверждающие корректность представлений о внутренней структуре венд-кембрийских комплексов.

Литолого-акустическая модель, Северо-Тунгусская НГО, Курейская синеклиза, кембрий, барьерный риф, венд, временной разрез, структурная карта, отражающий горизонт

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF VENDIAN-CAMBRIAN SEDIMENTS WITHIN THE NORTH-TUNGUSKA OGR USING SEISMIC 2D DATA IN CONNECTION WITH PETROLEUM POTENTIAL

I.A. Gubin¹, A.V. Taratenko²

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: GubinIA@ipgg.sbras.ru*

Complex interpretation of seismic and parametric drilling data is performed. The data for interpretation are obtained within the conjunction zone of the Kureyka syncline and the Anabar antecline. As a result of complex interpretation the structural maps on the bottom of Vendian and the top of the Kuonamka formation are constructed. Map of the Vendian terrigenous complex was constructed. High prospects of oil and gas potential of the lower-middle Cambrian sediments are shown. Based on the analysis of logging data, core description and detailed correlation of time sections, the litho-acoustic models were compiled for two profiles crossing the barrier-reef system, and two-dimensional synthetic time sections were

calculated. Obtained results confirm the correctness of the ideas about the internal structure of the Vendian-Cambrian complexes.

Litho-acoustic model, the North-Tunguska OGR, the Kureyka syncline, Cambrian, Vendian, barrier reef, seismic section, structural map, reflective horizon

ВВЕДЕНИЕ

Впервые Северо-Тунгусская нефтегазоносная область (НГО) была выделена А.Э. Конторовичем, Н.В. Мельниковым и В.С. Старосельцевым в 1975 г. [Конторович и др., 1975] и в настоящее время является одной из наиболее крупных и наименее изученных геолого-геофизическими исследованиями территорией Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В 2015 г. коллективом ИНГГ СО РАН под руководством академика А.Э. Конторовича были определены и обоснованы приоритетные направления геологоразведочных работ в северных районах Красноярского края, а также составлена программа ГРП на территорию Северо-Тунгусской НГО с целью выявления гигантских и крупных месторождений углеводородов.

В тектоническом отношении Северо-Тунгусская НГО приурочена к Курейской синеклизе, которая далее на восток переходит в Мархино-Чуньскую моноклинали. В региональном плане с учетом широкого развития куонамской формации и рифейских отложений Ангара-Котуйского прогиба большая часть Курейской синеклизы может рассматриваться как крупная нефтегазогенерационная зона. На этой территории специалистами ИНГГ СО РАН выявлено два обширных очага нефтегазообразования в куонамской свите – Туринский и Ламско-Хантайский.

Северо-Тунгусская НГО занимает площадь порядка 380 тыс. км², ее западная часть, в отличие от восточной, практически не изучена сейсмическими работами и глубоким бурением. На востоке области и прилегающих территориях пробурено несколько параметрических скважин (Чириндинская-271, Сохолохская-706, Танхайская-708, Унга-Хахская-2980 и др.), а также проведены региональные сейсморазведочные работы.

С конца 1980-х до начала 2000-х гг. сейсморазведочные работы МОГТ в пределах исследуемой территории выполнялись силами Кислоканской, Котуйской, Чириндинской, Турунской и Экондинской сейсмопартий. В последние годы по заказу Роснедр компаниями ОАО «Центральная геофизическая экспедиция» и ОАО «Енисейгеофизика» под общим руководством главного геолога В.И. Вальчака были проложены и изучены региональные сеймотраверсы и их расщепки по маршрутам «п. Тура – скв. Чириндинская-271» (северное продолжение профиля «Алтай – Северная Земля»), «скв. Хошонская-256 – р. Мойеро», а также ряд профилей в зоне сочленения Курейской синеклизы и Анабарской антеклизы на Вилуйско-Мархинской площади. Эти работы позволили существенно уточнить строение и перспективы нефтегазоносности венд-кембрийских отложений, развитых в восточной части Северо-Тунгусской НГО и прилегающих территорий. В частности, было существенно детализировано западное продолжение Западно-Якутской системы барьерных рифов (рис. 1), уточнена область развития нефтегазоматеринской куонамской формации и выполнена оценка перспектив их нефтегазоносности [Филипцов и др., 2014; Вальчак и др., 2015].

Целью настоящей работы является продолжение изучения и уточнение геологического строения венд-нижнекембрийских отложений на основе детальной интерпретации сейсмических и скважинных данных и оценка перспектив их нефтегазоносности. В связи с тем, что исследуемая территория находится на региональной стадии геологического изучения, многие вопросы о деталях строения барьерного рифа, куонамской свиты, клиноформного комплекса майского века, масштабах проявления траппового магматизма остаются нераскрытыми. Тем не менее, анализ и обобщение имеющегося фактического материала позволяет получать новые сведения как о внутренней структуре, так и о перспективах нефтегазоносности венд-кембрийских отложений.

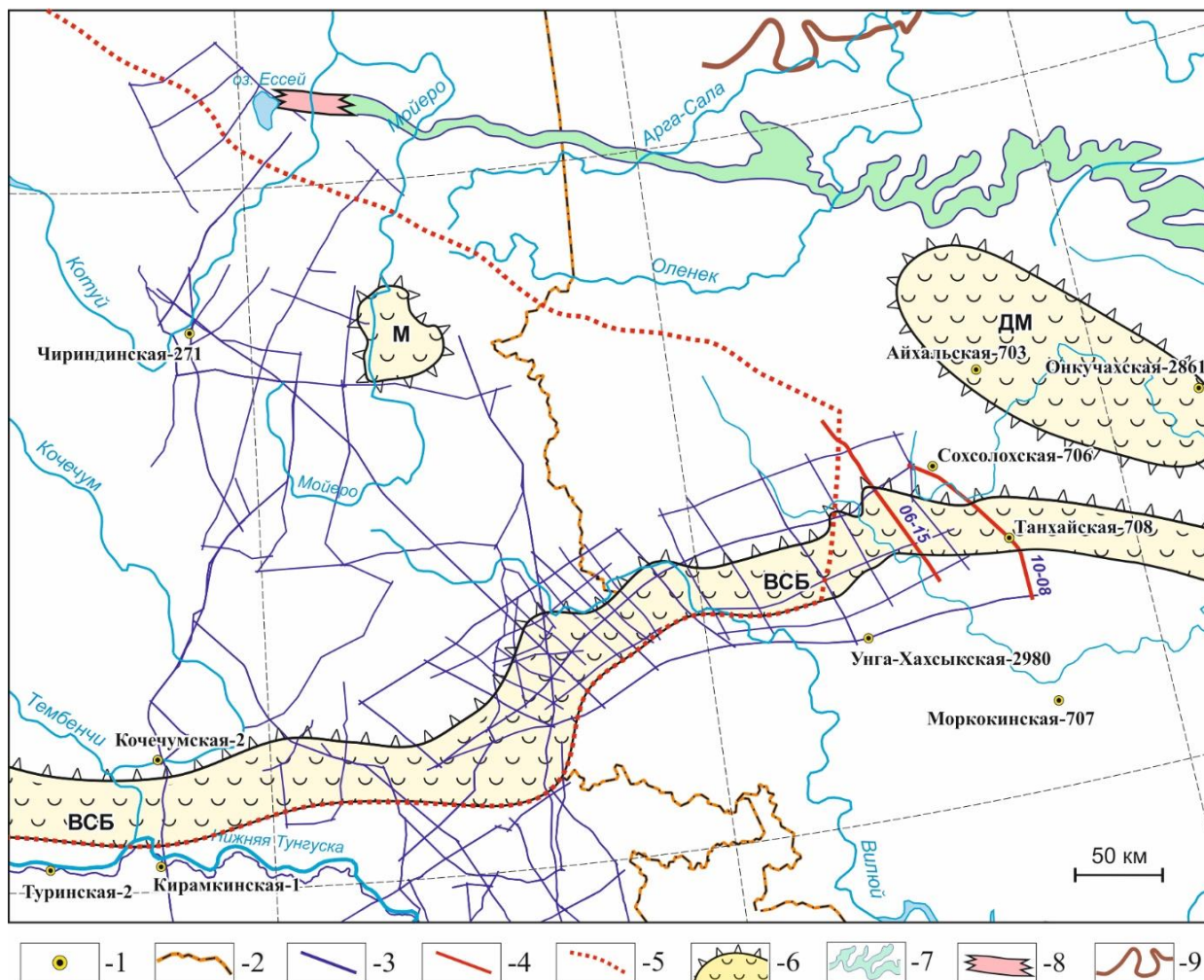


Рис. 1. Схема расположения кембрийских рифовых комплексов с элементами геолого-геофизической изученности. Усл. обозн.: 1 – скважины глубокого бурения, 2 – административные границы, 3 – линии сейсмических профилей, 4 – линии сейсмических профилей, вдоль которых выполнялось двумерное моделирование волновых полей, 5 – граница Северо-Тунгусской НГО, 6 – зоны рифовых комплексов, синхронных куонамской свите (ВСБ – Великой Сибирской системы барьерных рифов, ДМ – Далдыно-Мархинской карбонатной банки, М – Мойероканского рифового массива), 7 – выходы на дневную поверхность чукукской свиты (E_2), 8 – Дирингдинский рифовый массив Чукукского комплекса, 9 – выходы на дневную поверхность куонамской свиты (E_{1-2})

ТЕРРИГЕННЫЙ КОМПЛЕКС ВЕНДА

Традиционно основные перспективы разреза вендского интервала связаны с его нижними горизонтами, представленными терригенными разностями с относительно высокими коллекторскими свойствами (ванаварская свита, нижнебюкская подсвита и их стратиграфические аналоги).

Анализ сейсмических данных показал, что при погружении венд-кембрийского осадочного чехла в западном направлении увеличивается временная мощность, соответствующая вендской части разреза. При этом фиксируется появление новых фаз по схеме подошвенного налегания. В восточной части территории исследования скважинами вскрыта только маломощная (менее 15 м) нижнебюкская подсвита. По аналогии с хорошо изученным терригенным комплексом венда в ботуобинской фациальной зоне можно предположить, что ее мощность будет оставаться относительно постоянной в пределах всей восточной части Северо-Тунгусской НГО и, таким образом, существенного влияния на волновую картину она оказать не может. Следовательно, наблюдаемая волновая картина обусловлена выклинивающимися терригенными отложениями ванаварской свиты, которые на исследуемой территории скважинами не вскрыты, однако уверенно прогнозируются по данным сейсморазведки (рис. 2).

К кровле ванаварской свиты приурочен отражающий горизонт M_2 , развитый фрагментарно. В пределах восточной части Северо-Тунгусской НГО отложения ванаварской свиты перекрывают рифейские толщи, выполняющие Ангаро-Котуйский прогиб, и породы кристаллического фундамента. По результатам интерпретации сейсморазведочных данных были построены структурные карты по подошве вендских отложений и кровле ванаварской свиты, закартирована граница выклинивания ванаварской свиты, а также составлена карта ее прогнозных толщин (рис. 3).

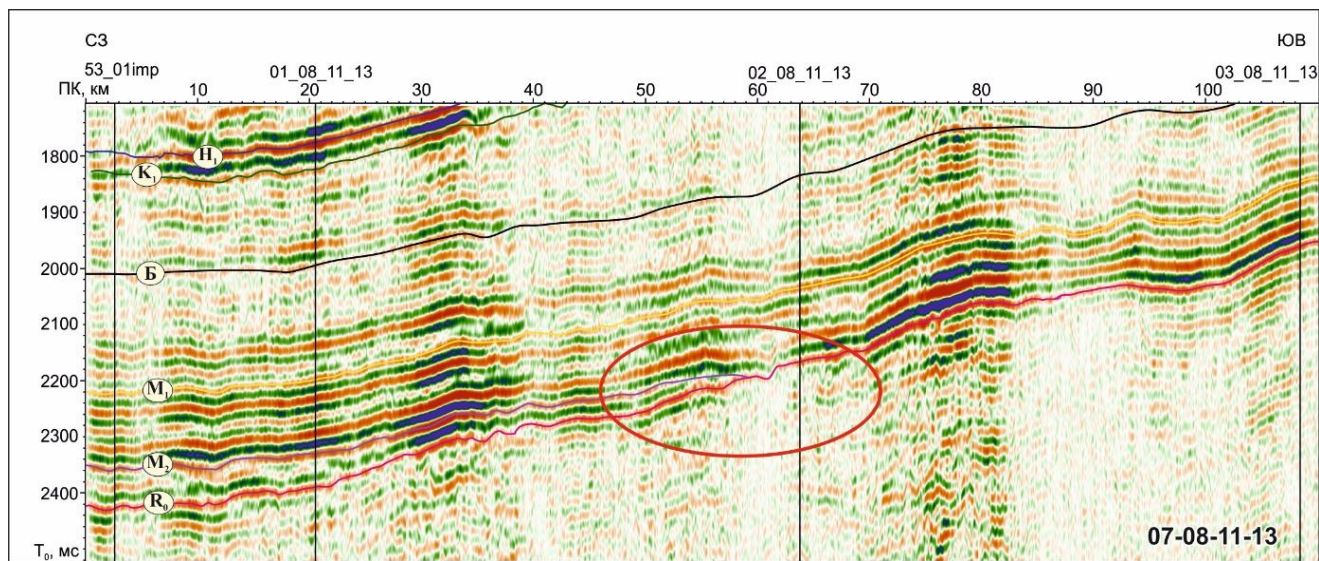


Рис. 2. Фрагмент временного разреза по профилю № 07–08 (Вилуйско-Мархинская площадь)

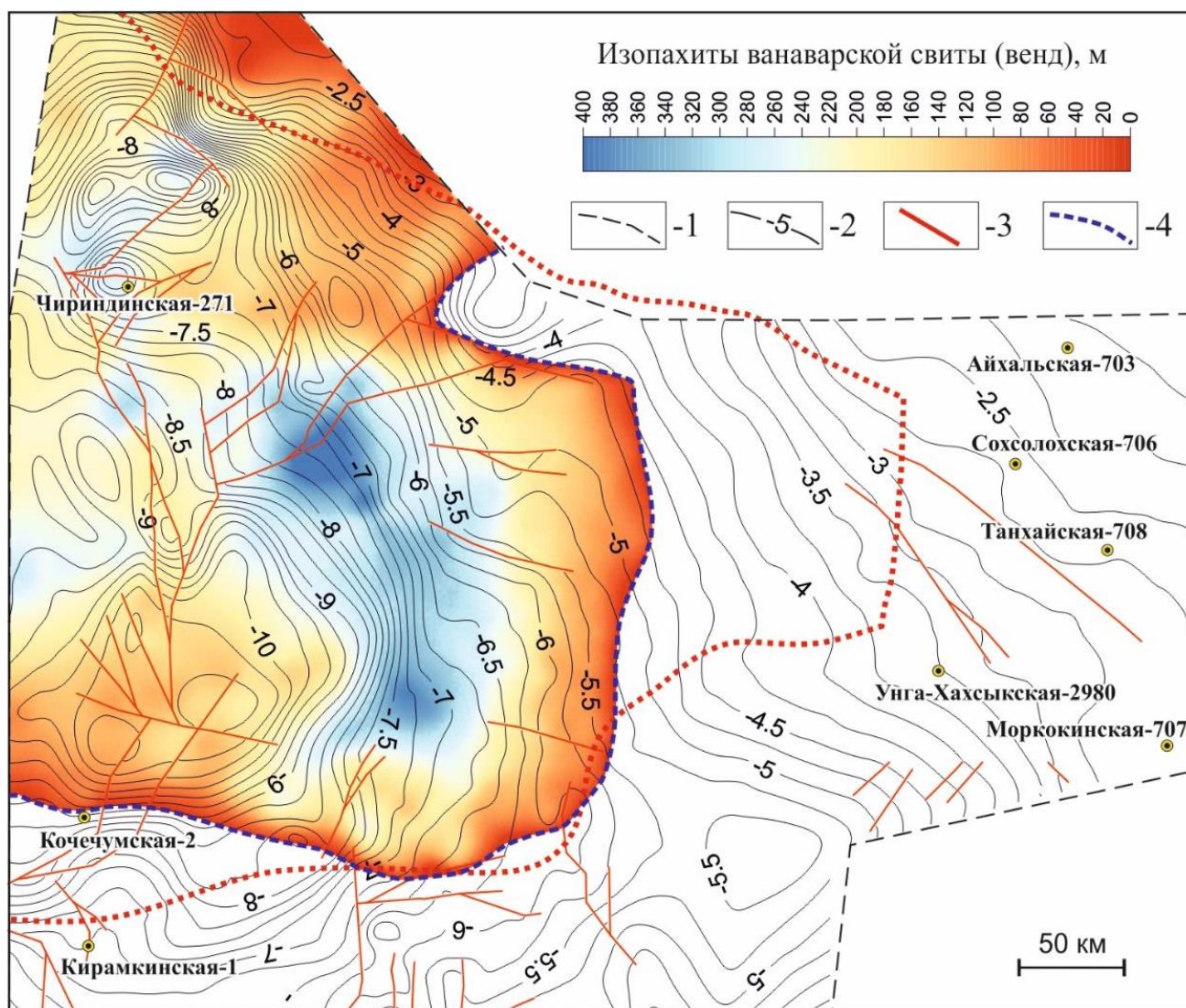


Рис. 3. Структурная карта по подошве венда.

Усл. обозн.: 1 – контур структурных построений, 2 – изогипсы подошвы венда в км, 3 – разломы, 4 – граница выклинивания ванаварской свиты. Остальные усл. обозн. см. рис. 1

По аналогии с вендскими терригенными отложениями Непско-Ботубинской антеклизы можно предположить, что в зоне резкого сокращения мощности ванаварского комплекса создавались наиболее благоприятные условия для образования песчаных тел прибрежно-морского генезиса, вдольбереговых баров и разобщенных изолированных тел песчаных авандельтовой природы, которые представляют определенный интерес в отношении нефтегазоносности. Выделение конкретных локализованных объектов не представляется возможным ввиду низкой плотности сейсмических профилей.

Анализ геолого-геофизических материалов показал, что вендский терригенный комплекс залегает на большей части территории на глубинах около 5,5 км и ниже, что существенно затрудняет вскрытие этого уровня скважинами. Тем не менее, в юго-западных районах Прианабарья прогнозируются участки, где ванаварская свита находится на глубинах 3 км и менее и вполне доступна для глубокого бурения.

НИЖНЕ-СРЕДНЕКЕМБРИЙСКИЙ КОМПЛЕКС

Современные палеогеографические реконструкции, выполненные сотрудниками ИНГГ СО РАН и СНИИГГиМСа, свидетельствуют о том, что на всей территории Северо-Тунгусской НГО в конце раннего кембрия (515–505 млн. лет назад) существовал открытый глубоководный бассейн (Эвенкийское палеоморе) с некомпенсированным осадконакоплением. Глубина бассейна достигала 1 км, возможно, и более [Сухов, 2014]. Здесь шло накопление высоко обогащенных органическим веществом карбонатных илов, позднее в процессе диагенеза превратившихся в горючие сланцы куонамской свиты. Этот бассейн с юга был ограничен системой барьерных рифов, разделявших мелководный солеродный бассейн от Эвенкийского палеоморя.

Обширная регрессия моря в майском веке (505–500 млн. лет назад) привела к исчезновению мелководного солеродного бассейна и масштабной денудации ранее накопленных осадочных отложений, в том числе и барьерного рифа. Котловина обмелевшего Эвенкийского палеоморя начала лавинообразно заполняться флишoidalными образованиями, представленными в основном обломочным несортированным терригенно-карбонатным материалом. Эти осадки имеют клиноформную структуру, ясно распознаваемую на временных сейсмических разрезах.

Вместе с регрессией моря на север отступала и полоса рифообразования, при этом проградация карбонатной платформы в майском веке составила почти 400 км [Сухов, 2014]. Предполагается, что «наследниками» амгинских барьерно-рифовых систем являются органогенные сооружения чукукского среднекембрийского комплекса, которые по мнению некоторых исследователей плащеобразно перекрывают толщу заполнения майского яруса [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2016]. В пределах исследуемой территории в составе этого комплекса наиболее полно изучен Дирингдинский рифовый массив, фрагменты которого обнажаются на дневной поверхности вблизи оз. Ессей (см. рис. 1).

Таким образом, в Северо-Тунгусской НГО сочетаются несколько благоприятных факторов, предопределяющих высокие перспективы нефтегазоносности ниже-среднекембрийских отложений. К основным из них относятся: широкое развитие черносланцевой куонамской свиты и клиноформное строение осадочных пород майского яруса, залегающих непосредственно на отложениях куонамской свиты, наличие рифогенного барьера, а также обособленных рифогенных сооружений типа Далдыно-Мархинской и Мойероканской банок (рис. 4).

Рифогенные постройки и клиноформные комплексы майского яруса выступают в качестве аккумулирующих коллекторов, а породы куонамской свиты – в качестве нефтегазопроизводящих толщ, хотя последние по аналогии с бакеновской горючесланцевой формацией (США) могут также выступать и в роли коллектора. Флюидоупором являются перекрывающие отложения малыкайской и мархинской свит среднего-верхнего кембрия, сложенные глинисто-карбонатными породами общей мощностью до километра [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2016].

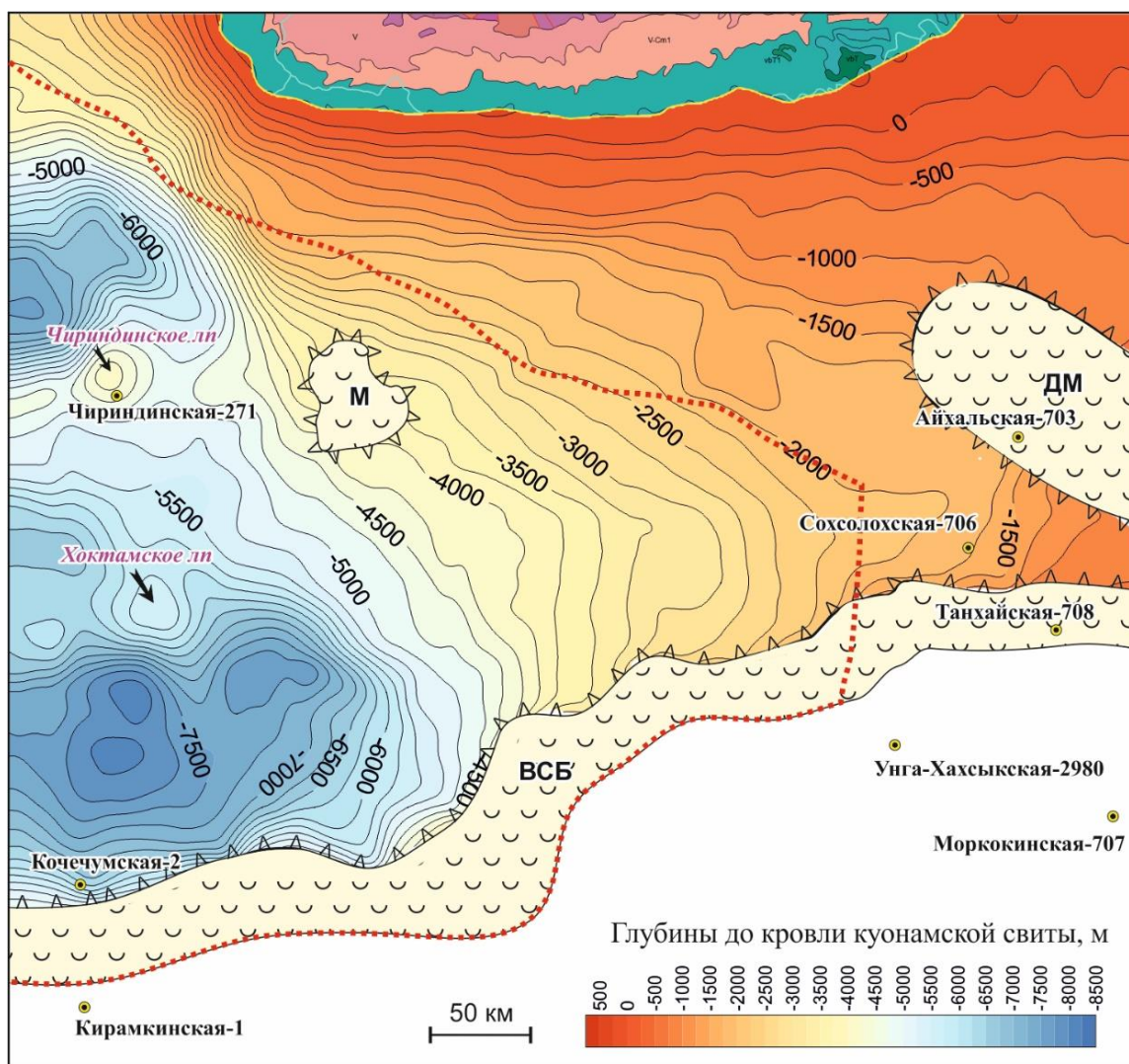


Рис. 4. Структурная карта по кровле куонамской свиты. Усл. обозн. см. рис. 1

К югу от Анабарского щита куонамская свита выходит на дневную поверхность (рис. 1), в юго-западном направлении она резко погружается, достигая глубин 8 км и более (рис. 4). Таким образом, очевидно, что в куонамской свите были достигнуты необходимые термодинамические условия для запуска процессов нефтегазогенерации, которые, как свидетельствуют выполненные в ИНГГ СО РАН палеорекострукции, протекали здесь еще в дотриасовое (дотрапповое) время.

На исследуемой территории куонамская свита вскрыта скважиной Чиридинская-271 (инт. 4364–4466 м с интрузией в средней части мощностью 35 м) и Сохсолохская-706 (инт. 2023–2247 м с интрузией 100 м). В Чиридинской скважине вынос керна из интервала куонамской свиты составил всего 17,8 %, где он представлен глинистыми известняками темно-серой и черной окраски. Остаточное содержание Сорг в нем составило 0,86–0,94 % [Дивина и др., 1996]. Начальное же содержание Сорг могло достигать 15 % [Бахтуров и др., 1988].

В рельефе кровли куонамской свиты выделяются контрастные антиклинальные структуры – Чириндинское и Хоктамское локальные поднятия (см. рис. 4). Они так же, как и не исследованная бурением Мойероканская банка, представляют определенный интерес в отношении нефтегазоносности ниже-среднекембрийских отложений, однако ни в Чириндинской-271, ни в Сохсолохской-706 скважинах интервалы куонамской свиты и перекрывающих ее клиноформных отложений не испытывались. Рифогенные образования удачининской свиты, вскрытые в скважинах Айхальская-703 и Танхайская-708, также не были опробованы. Поэтому вопрос о нефтегазоносности рассматриваемых комплексов остается открытым.

Из непосредственных признаков нефтегазоносности, выявленных в пределах исследуемой территории, можно отметить нафтидопроявления при бурении параметрической и колонковых скважин на Чириндинской площади. Там же в отложениях ордовика и силура по стилолитовым швам и в мелких порах известняков отмечалась жирная густая нефть, а из кровельной части верхнего кембрия было зафиксировано газопроявление [Филипцов и др., 1995]. На юго-западном склоне Далдыно-Мархинской банки обнаружена разрушенная залежь в битуминизированных отложениях с незначительными остаточными притоками нефти [Сухов, Варламов, 2004].

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЛИТОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

По результатам анализа акустического каротажа двух скважин, Сохсолохской-706 и Танхайской-708, были составлены пластовые скоростные модели венд-кембрийского разреза. Предварительно кривые акустического каротажа подверглись процедурам сшивки, редакции и восстановления недостающих фрагментов по регрессионным зависимостям от данных радиоактивного каротажа (ГК и НГК). На основе полученных зависимостей показания АК исправлялись напротив каверн. Итоговые одномерные модели по скважинам 706 и 708 состояли из 223 и 234 слоев соответственно, средняя толщина каждого слоя составила 12 м.

Наиболее детальная волновая картина наблюдается в интервале венд-кембрийских отложений на тех профилях, где кровля куонамской свиты залегает на абсолютных глубинах 2 км и выше. Для анализа были отобраны два профиля № 10–08 и № 06–15, обработанных в компании ООО «Эвенкиягеофизика», которые обладают наилучшим качеством сейсмического материала в целевом интервале разреза. Положение обоих профилей показано на рис. 1. Первый из них проходит через обе анализируемые скважины, что позволяет составить вдоль него пластовую скоростную модель разреза (рис. 5).

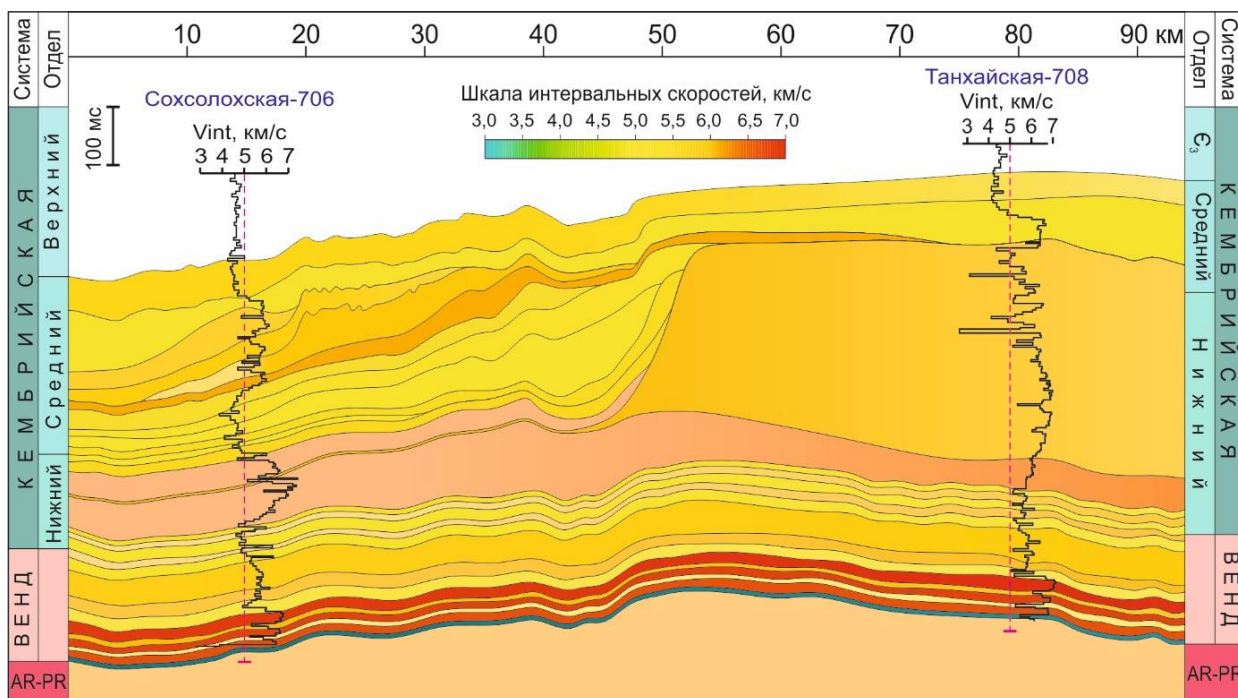


Рис. 5. Скоростная модель разреза вдоль линии сейсмопрофиля № 10–08

В соответствии с выделенными отражающими горизонтами на временном разрезе по профилю № 10–08 исходные одномерные скоростные модели по скважинам были укрупнены до 11 слоев для вендской части разреза и до 18 (в скв. 706) и 8 (в скв. 708) слоев для кембрийской части разреза. Различное количество слоев, необходимых для скоростной характеристики кембрия, обусловлено его резкими фаціальными изменениями в пределах анализируемого профиля, вариант геологической интерпретации которого приведен на рис. 6А, а также практически полным отсутствием отражений в интервале развития барьерно-рифовых образований (рис. 6В).

Более детально модель строения ниже-среднекембрийских отложений показана на примере профиля № 06–15 (рис. 7), на который основные закономерности распределения литологических разностей и скоростных параметров были перенесены с соседнего разреза по профилю № 10–08.

Моделирование двумерных синтетических разрезов выполнялось в программном комплексе Mink, разработанном в ИНГГ СО РАН (автор сверточного алгоритма – М.М. Немирович-Данченко, программной оболочки – М.С. Канаков). В качестве зондирующего импульса использовался импульс Берлаге с несущей частотой, полученной из анализа спектров реального волнового поля. Параметры литолого-акустической модели в межскважинном пространстве подбирались итеративным путем по принципам, описанным в работе [Корягин, Сахаров, 1988]. Поскольку в скважинах плотностной каротаж не проводился, значение плотности было принято за единицу. Качество итоговой модели оценивалось по сходству реального и синтетического временных разрезов.

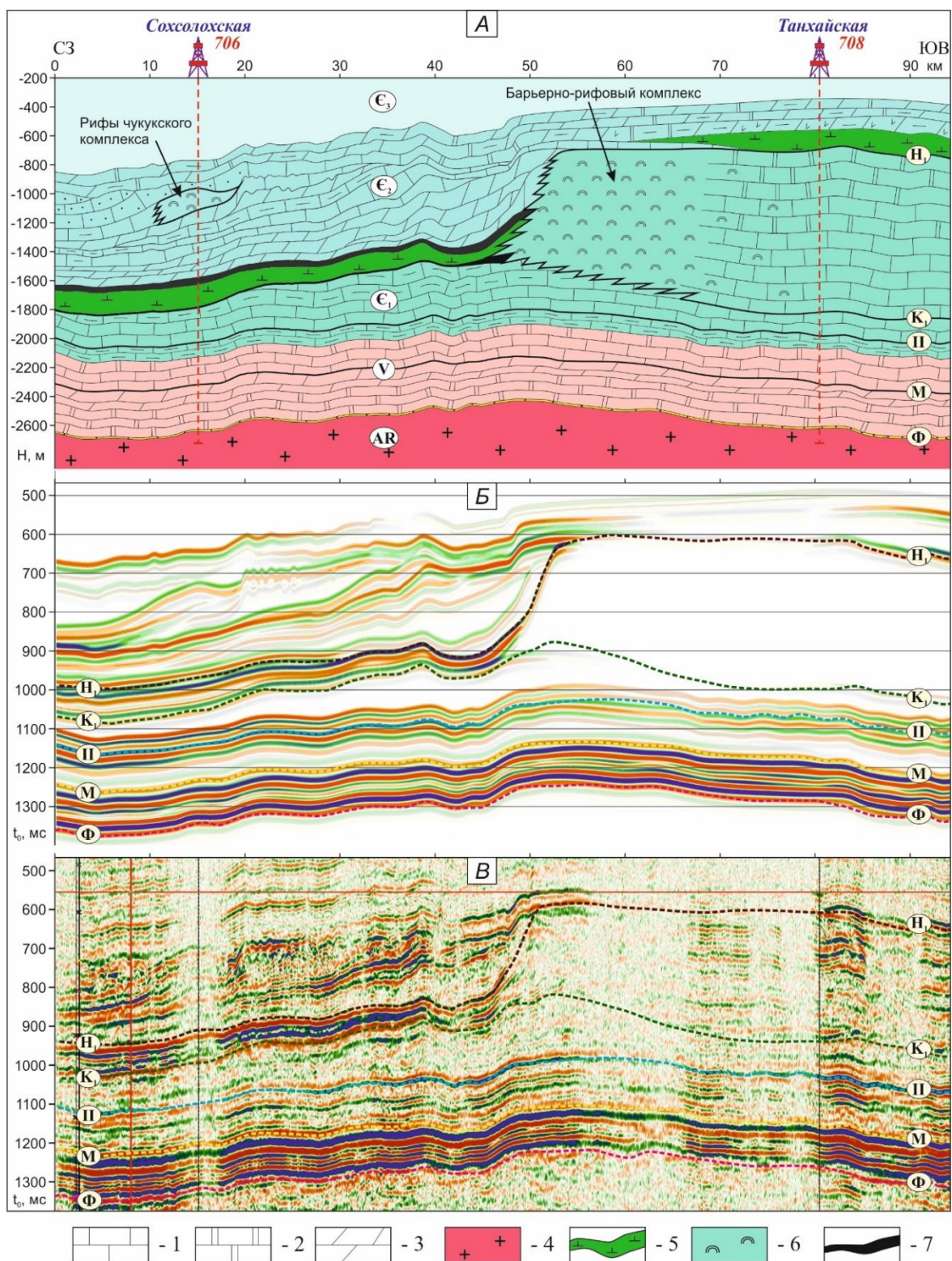


Рис. 6. Геологический разрез (А), синтетический временной разрез (Б) и фрагмент реального временного разреза (В) вдоль сейсмического профиля № 10–08.

Усл. обозн.: 1 – известняки, 2 – доломиты, 3 – мергели, 4 – граниты, 5 – долериты, 6 – органогенные известняки рифогенного комплекса, 7 – глубоководные отложения куонамской свиты

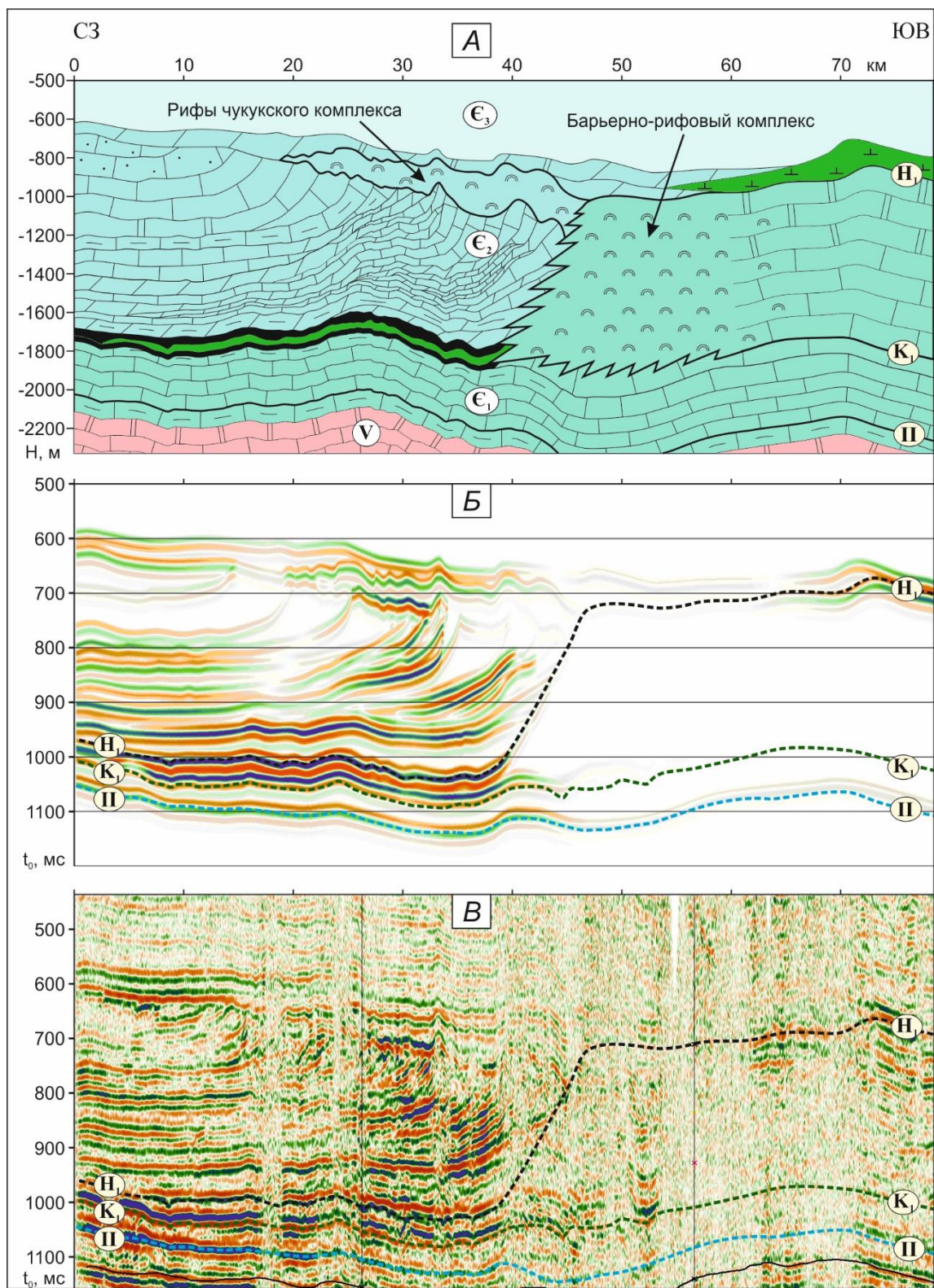


Рис. 7. Геологический разрез (А), синтетический временной разрез (Б) и фрагмент реального временного разреза (В) вдоль сейсмического профиля № 06–15. Усл. обозн. см. рис. 6

СТРОЕНИЕ ВЕНД-КЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДВУМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Вендские отложения и билирская свита, залегающая в базальной части нижнего кембрия, относительно выдержаны по своим акустическим характеристикам. Нижняя подсвита бюксской свиты венда (ботуобинская пачка) входит в состав терригенного комплекса венда и сложена трансгрессивными кварцевыми песчаниками. В пределах профиля ее мощность меняется от 12 до 18 м, а скорость распространения продольных волн (V) составляет 3–4 км/с. Она перекрывает высокоскоростные ($V > 6$ км/с) породы фундамента, сложенные гранитами и гранито-гнейсами.

В нижней части венда на ботуобинской пачке залегает верхнебюкская подсвита. Согласно акустическим данным и описанию керна, в ее строении принимают участие три выдержанных по толщине высокоскоростных ($V = 6,5–7$ км/с) пропластка плотных доломитов с ангидритом, разделенных относительно низкоскоростными ($V = 5,2–5,5$ км/с) мергелями и глинистыми доломитами (см. рис. 5).

Акустические свойства вышележащих отложений успунской, кудулахской, юряхской и билирской свит менее дифференцированы и также не претерпевают существенных изменений на всем протяжении профиля. Такой циклический характер строения вендских отложений, включая билирскую свиту, выдержан на протяжении многих десятков километров, что создает на временных и синтетических сейсмических разрезах устойчивую высокоамплитудную интерференционную картину (рис. 6Б, В).

Как отмечалось выше, куонамская свита, вскрытая скважиной 706 содержит интрузию траппов мощностью 100 м, которая осложняет наиболее амплитудный волновой пакет в кембрийской части разреза между отражающими горизонтами H_1 и K_1 , приуроченными к кровле и подошве куонамской свиты соответственно. Перепад скоростей на границе траппа составляет 1,4–1,8 км/с. При приближении к барьерному рифу уменьшается временной интервал $\Delta T(H_1-K_1)$ и происходит слияние отдельных фаз волнового пакета, что вероятнее всего связано с уменьшением толщины интрузии вплоть до ее полного выклинивания у подножия рифа (рис. 6А).

Согласно стратиграфическим разбивкам скважины № 706 [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2016], куонамскую свиту перекрывают нерасчлененные зеленоцветная и оленекская свиты майского яруса среднего кембрия общей мощностью 481 м, входящие в состав толщи заполнения. Эти отложения сложены чередованием мергелей и известняков (как правило, плотных, водорослевых) и на временном разрезе имеют ярко выраженное косослоистое строение.

Присутствие низкоскоростных глинистых разностей в толще заполнения обуславливает ее акустическую дифференциацию и появление в волновом поле достаточно интенсивных отражающих горизонтов. Уменьшение количества амплитудных наклонных отражений с юго-востока на северо-запад на ряде разрезов Вилъюско-Мархинской площади (рис. 7Б, В) свидетельствует о том, что на начальном этапе формирования толщи заполнения доля глинистого материала была существенной и постепенно уменьшалась по мере проградации склона бассейна, уступая место чистым известнякам. Однако судя по профилям, уходящим далеко на север вглубь куонамского бассейна («п. Тура – скв. Чириндинская-271» и «скв. Хошонская-256 – р. Мойеро»), такая тенденция не сохраняется и участки потери отражений

периодически сменяются (примерно через каждые 90 км) зонами регулярных амплитудных наклонных цугов волн.

Отдельной проблемой является выявление на сейсмических разрезах рифовых построек майского века (чукукский рифовый комплекс), которые уже не являются барьерными, однако также представляют поисковый интерес в качестве ловушек для углеводородов. Благодаря своим аномально высоким акустическим характеристикам, рифогенные известняки весьма контрастно выделяются среди вмещающих глинисто-известковистых пород толщи заполнения. Ранее их предлагалось выделять по результатам частотного анализа сейсмической записи [Умперович и др., 1984], в последние годы для этой цели широко используются инверсионные методы [Кондратьев и др., 2015].

В скважине Сохсолохская-706 подобная рифогенная постройка предположительно вскрыта в интервале чукукской свиты на абсолютных отметках –915...–1082 м (см. рис. 6А). Состав свиты охарактеризован как песчаники известняковые и доломитистые известняки [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2016]. Об органогенном происхождении известняков также не упоминается и в описании керна из дела скважины, согласно которому она представлена массивными плотными известняками и кавернозными засоленными доломитами с мергелями. Однако в том же деле скважины при описании проходки сказано, что в интервале чукукской свиты пройдены бурением рифогенные отложения. На рифовую природу известняков косвенно указывают весьма высокие значения скоростей, определенные по данным АК, до 6 км/с (см. рис. 5), а также структура облекания, зарегистрированная на временах 720–750 мс (см. рис. 6А). Судя по волновой картине, это одиночное рифовое тело, не имеющее связи с барьерным рифом, что подтверждается результатами двумерного моделирования (см. рис. 6А, Б).

Принципиально иная картина строения чукукского рифового комплекса наблюдается в 35 км западнее на соседнем профиле № 06–15 (рис. 7). Здесь характер волнового поля позволяет предположить ограниченное площадное развитие рифовых образований майского века, отходящих от верхней кромки барьерного рифа в соответствии с представлениями С.С. Сухова о модели развития окраины Иркутско-Олекминской карбонатной платформы [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2016]. Однако, как показывают результаты сейсмогеологического моделирования (см. рис. 7А, Б), его протяженность невелика и составляет порядка 30 км при мощности 100–200 м. Поскольку перекрывающие отложения малыкайской свиты залегают без стратиграфического перерыва и размыв чукукской свиты исключен, то представленные результаты свидетельствуют о мозаичном характере распространения рифовых комплексов майского века.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют на новом уровне охарактеризовать структуру венд-кембрийских комплексов, развитых в восточной части Северо-Тунгусской НГО. В настоящей работе представлены результаты анализа структурных карт по подошве венда и кровле куонамской свиты, осуществлен прогноз развития ванаварской свиты венда, составлены детальные литолого-акустические модели по двум профилям, пересекающим барьерно-рифовую систему и рассчитаны двумерные синтетические временные разрезы, подтверждающие корректность геологической интерпретации.

Из основных результатов исследований отметим следующие:

1. По сейсмическим данным в восточной части Северо-Тунгусской НГО прогнозируется широкое поле развития терригенного комплекса венда в составе ванаварской свиты и нижнебюкской подсвиты. Последняя не представляет поискового интереса в связи с малой мощностью. Отложения ванаварской свиты скважинами не вскрыты и рекомендуются к разведке в виду наличия потенциально нефтематеринских рифейских толщ. Максимальная прогнозируемая мощность ванаварской свиты достигает 400 м. На большей части территории она залегает на больших глубинах (более 5,5 км), воздымаясь на северо-восток в сторону Анабарской антеклизы до глубин порядка 2,5 км.

2. В пределах восточной части Северо-Тунгусской НГО имеются все необходимые предпосылки для формирования крупных залежей углеводородов в кембрии, благодаря уникальному сочетанию таких благоприятных факторов, как:

- широкое развитие нефтематеринских пород куонамской свиты;
- наличие коллекторов в виде рифовых комплексов, имеющих различное строение (барьерный риф, крупные Далдыно-Мархинская и Мойероканская банки, одиночные рифы чукукского комплекса), а также в виде клиноформно построенных пород майского яруса;
- присутствие глинисто-карбонатных пород малыкайской и мархинской свит, выступающих в качестве регионального флюидоупора.

3. Анализ сейсмического материала в пределах Вилуйско-Мархинской площади показал, что вблизи склона барьерного рифа развита переменнo-амплитудная косоcлоистая сейсмофация, которая может быть связана со значительной долей глинистого материала, привносимого на начальных этапах формирования толщи заполнения, которая по мере проградации карбонатной платформы на север падала. Именно с этой сейсмофацией следует связывать наибольшие перспективы нефтегазоносности клиноформного комплекса, поскольку здесь можно ожидать развитие зональных глинистых флюидоупоров.

4. Плащеобразное развитие чукукского рифового комплекса в пределах куонамского бассейна не подтверждается результатами сейсмофациального анализа и двумерного сейсмического моделирования. Наиболее вероятно, что этот комплекс представляет собой серию линз различной протяженности (до первых десятков километров) и отдельных биогермов, типа Дирингдинского рифового массива.

Исследования проводились в рамках проекта НИР IX.131.1.2. «Построение моделей геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности фанерозойских и неопротерозойских осадочных комплексов Лено-Тунгусской НГП для формирования программы геологоразведочных работ и лицензирования недр».

ЛИТЕРАТУРА

- Бахтуров С.Ф., Евтушенко В.М., Переладов В.С.** Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация. – Новосибирск: Наука, 1988. – 161 с.
- Вальчак В.И., Каминский В.М., Евграфов А.А., Горюнов Н.А., Култышев В.Ю., Бархатов И.П.** Новые данные по геологии нефтегазоперспективных рифогенных объектов севера Сибирской платформы // Природные ресурсы Красноярского края. – 2015. – № 24. – С. 28–31.
- Дивина Т.А., Старосельцев В.С., Тезиков В.Ю., Белобородова Г.В., Филипцов Ю.А.** Прогноз нефтегазогеологических параметров палеозойских отложений севера Тунгусской синеклизы // Геология и проблемы поисков новых крупных месторождений нефти и газа в Сибири: Результаты работ по Межведомственной региональной научной программе «Поиск» за 1994 год. Ч. II. – Новосибирск, 1996. – С. 113–115.
- Конторович А.Э., Мельников Н.В., Старосельцев В.С.** Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы. Труды СНИИГГиМС. – Новосибирск, 1975. – Вып. 222. – С. 4–21.
- Кондратьев И.К., Бондаренко М.Т., Кучеря М.С., Киссин Ю.М., Тарасенко Е.М.** Выявление органогенных построек с помощью пластовой акустической инверсии в Лено-Тунгусской НГП // Геофизика. – 2015. – № 4. – С. 2–9.
- Корягин В.В., Сахаров Ю.П.** Математическое моделирование в сейсморазведке. – М.: Наука, 1988. – 160 с.
- Стратиграфия** нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы / Под ред. Ю.Я. Шабанова. В 2-х т. Т. 1. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2016. – 497 с.
- Сухов С.С., Варламов А.И.** Кембрийские рифовые образования Якутии (к истории исследований и перспективам их нефтегазоносности) // Актуальные вопросы геологии нефти и газа Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – С. 63–78.
- Сухов С.С.** От слоистой структуры осадочных бассейнов к палеореконструкциям (о некоторых седиментологических причинах ошибок в тектонических и геоисторических реконструкциях Сибирской платформы и смежных территорий) // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири: Материалы 1-й научно-практической конференции. Т. 1 – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. – С. 231–235.
- Умперович Н.В., Еханин А.Е., Роменко В.И.** Проявление кембрийских рифовых тел Якутии в геофизических полях // Методика и результаты изучения Сибирской платформы геофизическими методами. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1984. – С. 56–63.
- Филипцов Ю.А., Мельников Н.В., Ефимов А.С., Вальчак В.И., Горюнов Н.А., Евграфов А.А., Смирнов Е.В., Щербаков В.А., Култышев В.Ю.** Нижне-среднекембрийский рифогенный барьер на севере Сибирской платформы – объект первоочередных нефтегазопроисловых работ // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 2(18). – С. 25–35.
- Филипцов Ю.А., Дивина Т.А., Ларичев А.И.** Геохимические предпосылки нефтегазоносности Северо-Тунгусской НГО (по материалам бурения на Ледянской и Чириндинской площадях) // Результаты работ по Межведомственной региональной научной программе «Поиск» за 1992–1993 годы. Ч. 1. – Новосибирск, 1995. – С. 40–56.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГУБИН Игорь Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: сеймостратиграфия и региональная геология Сибирской платформы, интерпретация сейсмических данных.

ТАРАТЕНКО Алексей Владимирович – магистрант Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: сеймостратиграфия венд-кембрийских отложений Курейской синеклизы, сейсмогеологическое моделирование, интерпретация сейсмических данных.



БЫСТРАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ РАЗНОВЫСОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С БПЛА НА ПРИМЕРЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

М.А. Максимов^{1,3}, И.В. Суролина^{1,2}, В.Н. Глинских^{1,3}

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

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,*

³*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,
e-mail: MaksimovMA@ipgg.sbras.ru*

Реализован высокопроизводительный алгоритм инверсии данных для беспилотного магнитометрического комплекса. Приведены результаты тестирования разработанного алгоритма томографической инверсии данных разнорысотной магнитной съемки. Показаны результаты расчетов для тестовой модели с магнитным объектом в виде цилиндра конечной высоты. Сформулированы рекомендации по применению метода для инверсии реально наблюдаемых данных.

БПЛА, магниторазведка, инверсия, томография

FAST INVERSION OF UAV MAGNETIC FIELD DATA ON THE EXAMPLE OF SYNTHETIC MODELS WITH THE TOPOGRAPHY

M.A. Maksimov^{1,3}, I.V. Surodina^{1,2}, V.N. Glinskikh^{1,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Lavrentiev Avenue, 6, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MaksimovMA@ipgg.sbras.ru*

High-performance algorithm for an unmanned magnetometer complex data inversion is proposed. We provide numerical tests for tomographic inversion of data for the different-height magnetic surveying. We show the results of calculations for a test model with a magnetic object in the form of a cylinder of finite height. We propose the recommendations for the method application for the inversion of the observed data.

UAV, magnetic survey, inversion, tomography

ВВЕДЕНИЕ

Магниторазведка – один из наиболее распространенных методов разведочной геофизики. При необходимости выполнения магнитной съемки в удаленных районах со сложным рельефом оптимальной является многоуровневая съемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это оборудование позволяет проводить быстрые высокоточные измерения магнитного поля на различных высотах, что дает возможность с приемлемой достоверностью определять параметры геологических объектов, таких как рудные тела, кимберлитовые трубки, а также решать задачи археологии [Эпов и др., 2016].

При разведочных работах, когда нет возможности полноценной связи с компьютерными центрами, встает вопрос необходимости расчетов предварительных результатов инверсии данных с целью определения перспективных участков для более детального исследования, выделения основных аномалий магнитной восприимчивости и оценки их уровня. Для этого необходим быстрый алгоритм инверсии магнитометрических данных с БПЛА, работающий на мобильных платформах, учитывающий рельеф и априорные данные.

Непосредственно вопросами использования различных математических методов для решения интерпретационных задач магниторазведки занимались, в частности, Ю.И. Блох [Блох, 2009] и М.С. Жданов [Жданов, 2007]. Ими проведены широкие обзоры большинства методов инверсии и интерпретации. Также широко освещены подходы к регуляризации решений и выбору параметризации задачи.

Использование параллельных вычислений при решении СЛАУ для геофизических задач широко освещены в работах В.Н. Страхова. Им предложен метод линейных интегральных представлений, который является одним из эффективных подходов к интерпретации данных. Особенно стоит отметить его вклад в развитие методики нахождения устойчивых приближенных решений СЛАУ в задачах гравиметрии и магнитометрии [Страхов, 1991; Страхов, Страхов, 2002].

Нами был разработан и программно реализован быстрый высокопроизводительный алгоритм решения прямой задачи разновысотной магнитометрии, основанный на классическом магнитостатическом подходе к уравнениям Максвелла, который описан, в частности, в работе [Блох, 2009], путем дискретизации основного уравнения конечно-разностным методом на неравномерной сетке с использованием однородной консервативной схемы [Самарский, 1979] и последующей его симметризацией. Этот алгоритм позволяет предсказывать характер поведения магнитного поля во всем моделируемом пространстве и выбирать любые необходимые данные с заданными координатами, что обеспечивает возможность для реализации быстрой инверсии данных беспилотной разновысотной съемки в режиме реального времени. Подход интегральных уравнений дает возможность учета остаточной намагниченности и эффектов перемангничивания (для сильномагнитных тел), подкрепленный растущей производительностью современных расчетных устройств.

Стоит также отметить, что в теории интерпретации геофизических полей особую роль играет теория некорректно поставленных задач, классические методы решения которых были предложены в работах [Лаврентьев, 1962; Тихонов, 1963]. Как известно, обратные задачи геофизики и магнитометрии в

частности являются некорректно поставленными, поэтому теории, развитые М.А. Лаврентьевым и А.Н. Тихоновым, успешно применялись для интерпретации потенциальных полей. Значит при реализации алгоритма инверсии особое внимание необходимо уделить вопросам единственности и эквивалентности.

В данной работе представлен комбинированный алгоритм инверсии магнитных данных. За основу взяты два подхода: минимизация с использованием градиентов функционала невязки [Fletcher, 1987] и инверсия линейной системы уравнений путем обратной подстановки сингулярного разложения (SVD) [Стренг, 1980].

Разработанный алгоритм протестирован на синтетической модели, состоящей из цилиндрического тела конечной высоты во вмещающей среде с пологим трехмерным рельефом земной поверхности.

АЛГОРИТМ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ И ИНВЕРСИИ

В постановке магнитостатики уравнения Максвелла сводятся к решению уравнения Пуассона:

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) = \operatorname{div} \vec{I}_n,$$

где U – скалярный магнитный потенциал, $\mu = (1 + \kappa)$ – относительная магнитная проницаемость, κ – магнитная восприимчивость, $\vec{I}_n$ – вектор естественной остаточной намагниченности. Таким образом, прямой задачей является нахождение распределения магнитного потенциала и его производных в пространстве по известной магнитной восприимчивости и внешнему полю; а обратная задача – восстановление магнитной восприимчивости по измеренным разновысотным данным.

Проведем дискретизацию данного уравнения на неравномерной сетке. Использование неравномерной сетки позволит более точно описать мелкие объекты и учесть большую область при моделировании. Используем однородную консервативную схему. В результате дискретизации уравнения получим систему линейных алгебраических уравнений с несимметричной, вещественной, положительно определенной, семидиагональной матрицей. Используя обобщенный на трехмерный случай алгоритм симметризации с помощью диагонального преобразования подобия [Кузнецов, Агапитова, 2003], приведем к системе вида

$$Ax = F,$$

с симметричной матрицей A . Полученная система уравнений наиболее эффективно решается итерационным методом сопряженных градиентов (CG). Все операции в формулах для метода CG являются матрично-векторными и хорошо распараллеливаются на GPU. Но без эффективного предобуславливателя скорость сходимости данного метода будет очень низкой.

Специально для данного типа матриц был предложен алгоритм построения целого класса предобуславливателей [Labutin, Surodina, 2013], требующий минимальных временных ресурсов и ресурсов глобальной памяти на GPU. Такой предобуславливатель, построенный нами на основе алгоритма Хотеллинга-Шульца, имеет несколько преимуществ перед предобуславливателем, содержащимся в стандартной библиотеке CUSPARSE CUDA NVIDIA.

Во-первых, предобуславливатель, использующий только первый шаг алгоритма Хотеллинга, не требует никаких затрат на построение (при предварительном масштабировании системы уравнений). Во-вторых, все операции в предобусловленном методе сопряженных градиентов (PCG) (в том числе в алгоритме, использующем несколько шагов метода Хотеллинга) остаются матрично-векторными. В-третьих, и это немаловажно, данный алгоритм очень прост в реализации на GPU.

Как было отмечено выше, все операции в предложенном алгоритме PCG являются матрично-векторными и легко распараллеливаются на GPU с помощью библиотеки CUBLAS. Время решения прямой задачи (на видеокарте TESLA M2090) в данном случае составляет от 5 до 20 секунд для сеток порядка 5-10 млн узлов. Для дополнительного ускорения расчета умножения матрицы на вектор использован алгоритм, позволяющий хранить значения элементов матрицы в отдельных массивах, опираясь на то, что мы знаем структуру матрицы. Для реализации параллельной программы и ее компиляции использовались инструменты NVIDIA CUDA и компилятор pgfortran.

Одним из наиболее желаемых результатов полевых работы является интерпретация полученных данных непосредственно при нахождении на объекте, что позволяет построить предварительный результат инверсии, уточнить характер и форму аномальных тел, проложить дополнительные разведочные профили и т. п. Но при отсутствии мощных источников питания или качественной связи обращение к кластерным системам невозможно. К тому же высокопроизводительные компьютерные системы являются дорогостоящим оборудованием, требующим качественного обслуживания и своевременной модернизации. Решением этих проблем являются получившие на сегодняшний день большое развитие высокопроизводительные мобильные устройства с возможностью производить расчеты, используя различные ускорители. Использование данных устройств позволяет выполнять параллельные вычисления с приемлемым уровнем быстродействия при максимальной энергоэффективности. Так, современное аппаратно-программное обеспечение от компании NVIDIA, при условии эффективного распараллеливания задачи, позволяет добиться значительных результатов в быстродействии, во много раз превосходящих вычисления на CPU.

Традиционно инверсия является крайне ресурсоемкой задачей и перед ее реализацией необходимо максимально оптимизировать алгоритм решения прямой задачи, что и позволяет решение большой СЛАУ на GPU. Чем быстрее работает непосредственно прямая задача, тем более детальную инверсию можно получить за конечное время при прочих равных условиях, так как время решения обратной задачи напрямую зависит от числа определяемых модельных параметров и от времени решения прямой задачи.

Большинство алгоритмов инверсии базируются на минимизации целевой функции невязки с использованием градиентного метода. Примерами таких алгоритмов является метод сопряженных градиентов с предобусловлением или квазиньютоновский подход. В этих случаях эффективность существенно повышается, если имеется возможность быстро и достаточно точно вычислить градиент функционала невязки. Такой возможностью обладает, например, метод сопряжения [Fichtner, 2011].

Пусть $\vec{d}_o$ – вектор наблюдаемых данных магниторазведки с БПЛА (аномальное магнитное поле), $\vec{d}_t$ – вектор сгенерированных синтетических (тестовых) данных путем решения прямой задачи для

некоторой модели $\vec{m}_t$ (распределение магнитной восприимчивости в среде), $\vec{w}_o$ – вектор относительной погрешности наблюдаемых данных. При решении задачи минимизации одним из часто используемых является функционал невязки следующего вида:

$$F = 1/n \sum_i (d_{o,i} - d_{t,i})^2 / (w_{o,i} d_{o,i})^2,$$

где n – число измерений, $d_{o,i}$ – компоненты вектора наблюдаемых данных, $d_{t,i}$ – компоненты вектора текущих тестовых данных, $w_{o,i}$ – компоненты соответствующих погрешностей измерений. Задача минимизации состоит в нахождении такого набора модельных параметров $\vec{m}_t$, который позволит максимально приблизить данные $\vec{d}_t$ к наблюдаемым $\vec{d}_o$. Если наблюдаемые и синтетические данные в среднем различаются меньше, чем на погрешность измерений, то целевая функция F будет меньше 1.

Техника квазиньютоновской минимизации позволяет быстро и с высокой точностью решить обратную задачу с небольшим числом модельных параметров независимо от априорной информации. Это обстоятельство можно использовать для построения референтной модели среды. Мы используем подход Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно в условиях ограниченной памяти (L-BFGS) [Fletcher, 1987].

В качестве основного метода инверсии было выбрано псевдообращение, основанное на сингулярном (SVD) разложении матрицы чувствительностей данных к модельным параметрам. Такой подход позволяет быстро и качественно разрешить СЛАУ, исключив линейно-зависимые данные и выделив неразрешимые модельные параметры. Однако для его применения необходимо, чтобы стартовая модель несущественно отличалась от искомой.

Совместив вместе два подхода к инверсии, мы создали комбинированный алгоритм, который основан на построении первичной модели низкого разрешения на основе градиентного метода и последующего ее уточнения через псевдообращение матрицы чувствительности.

Нами был реализован данный комбинированный алгоритм в среде Fortran90 с использованием библиотек Intel MKL.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

В качестве тестовой модели была выбрана упрощенная модель кимберлитовой трубки (рис. 1) – магнитный цилиндр конечной высоты во вмещающей слабомagnetной среде под пологим рельефом амплитудой 5 м.

Диаметр цилиндра $D=40$ м, глубина верхней кромки $H_0=5$ м, высота цилиндра $H_T=40$ м; магнитные восприимчивости цилиндра $K_T=0.005$ СИ и вмещающих пород $K_0=0.00005$ СИ.

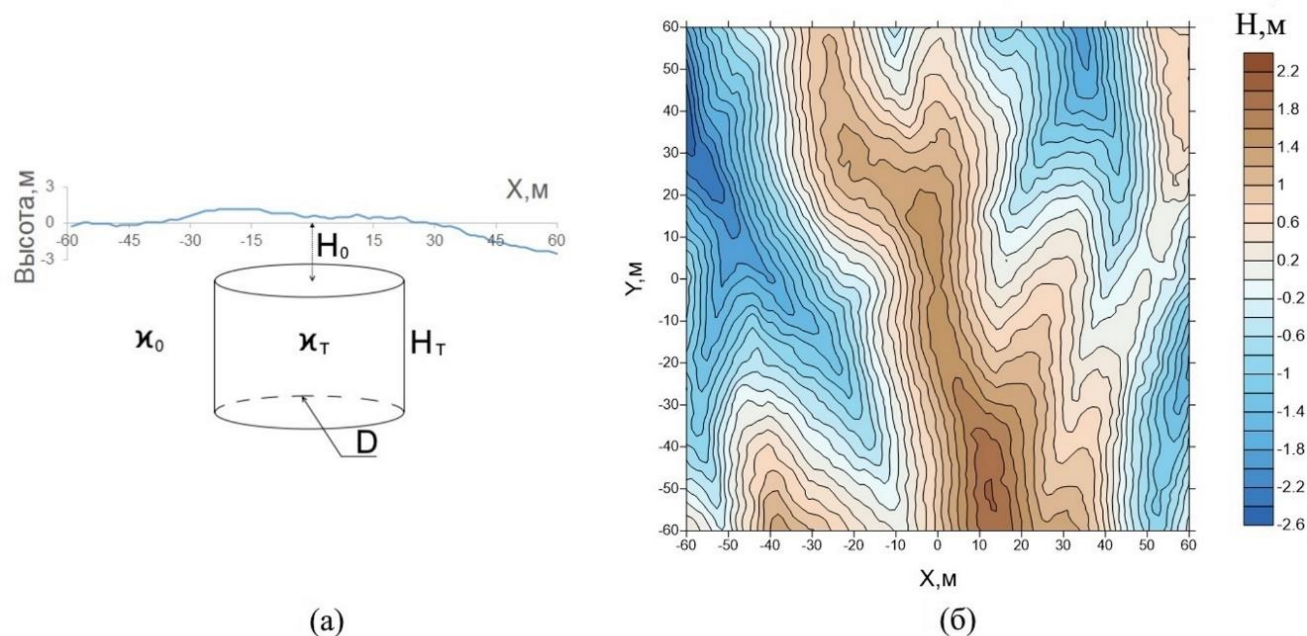


Рис. 1. Модель «кимберлитовая трубка» (а) и карта дневной поверхности (б)

Для тестовой модели были рассчитаны модули вектора магнитной индукции (далее сигналы) на трех высотах: 2 м с огибанием рельефа (наземная съемка или съемка с БВС по огибающему рельеф маршруту), 5 м и 10 м по абсолютной высоте. Распределение сигналов в поверхностях полетов показаны на рис. 2. Как видно, рельеф сильно влияет на характер сигнала при огибающем маршруте, поскольку он существенно зависит от расстояния до объекта. При полете на фиксированной высоте влияние рельефа на сигнал значительно ниже. Таким образом полеты по абсолютной высоте позволяют более наглядно представить расположение реальных магнитных аномалий и интересных объектов.

Для оценки точности приближения модельного поля к измеренному использовалась целевая функция

$$C = \sum_i \frac{(d_{t,i} - d_{o,i})^2}{d_{o,t}^2} * 100\%,$$

определяющая поточечное относительное расхождение между сигналом в текущей тестовой модели и наблюдаемыми данным. Пример такой функции для конечной итерации инверсии показан на рис. 2, г.

Для томографической инверсии тестировался ряд разбиений нижнего полупространства на блоки равного размера и предварительно оценивался референтный уровень магнитной восприимчивости для «наблюдаемых» сигналов.

Поскольку резких перепадов значений магнитной восприимчивости в полученном решении не должно быть (условие регуляризации решения через псевдообращение), исследуемая «трубка» несколько размазывается на томографической модели и ее реальную границу можно выбирать по

положению среднего значения между относительными максимумами и минимумами на градиентных границах. Из рис. 3 видно, что в такой постановке положение цилиндра четко определяется в горизонтальной плоскости, начиная с разбиения на блоки размером 6 м x 6 м при общей сетке наблюдений 120 м x 120 м.

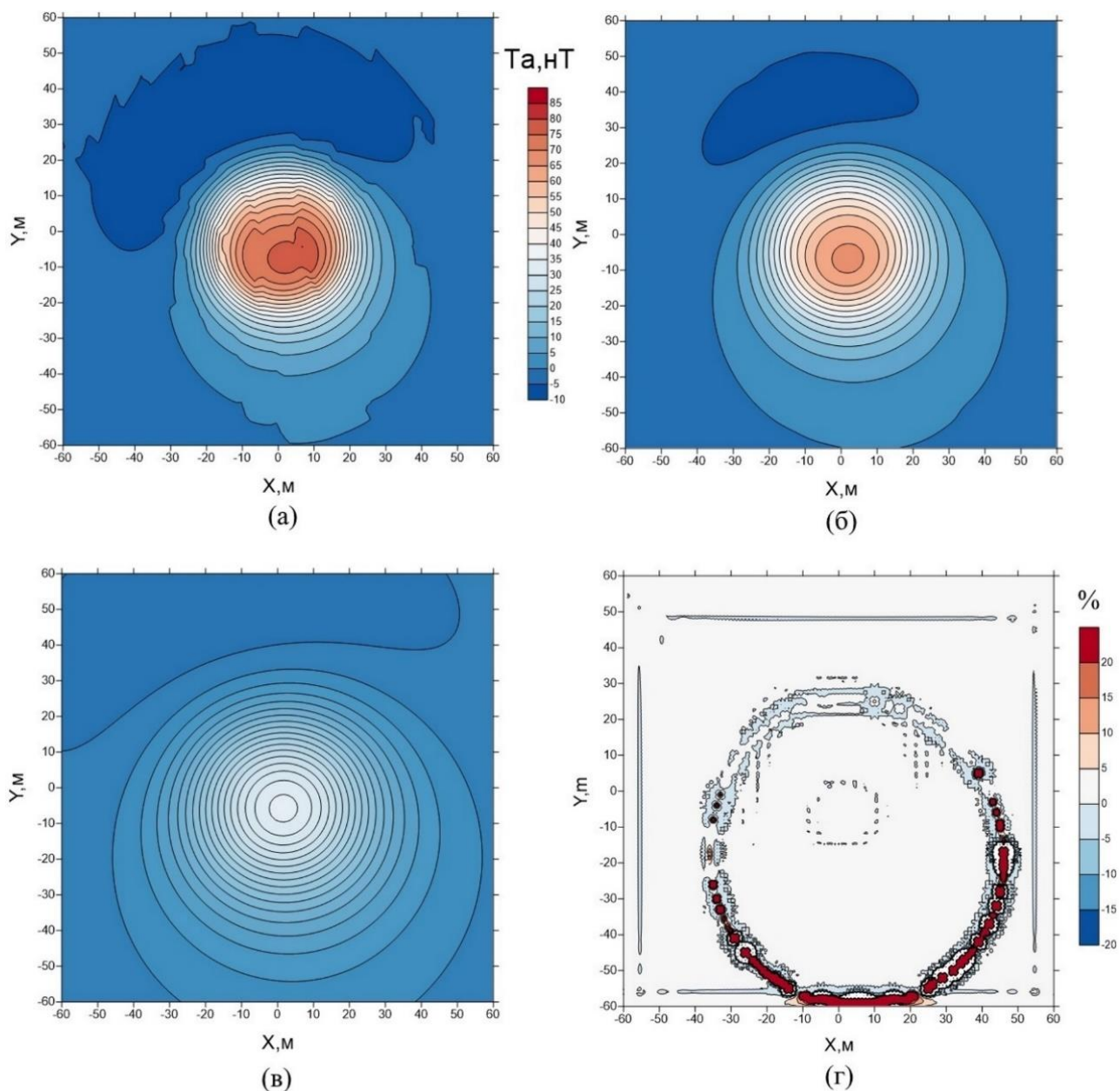


Рис. 2. Синтетические данные для модели «Кимберлитовая трубка». Съемка с огибанием рельефа: *а* – относительная высота 2 м, *б* – съемка на абсолютной высоте 5 м, *в* – съемка на абсолютной высоте 15 м, *г* – целевая функция для разбиения 3 x 3 м и высоты полета 5 м

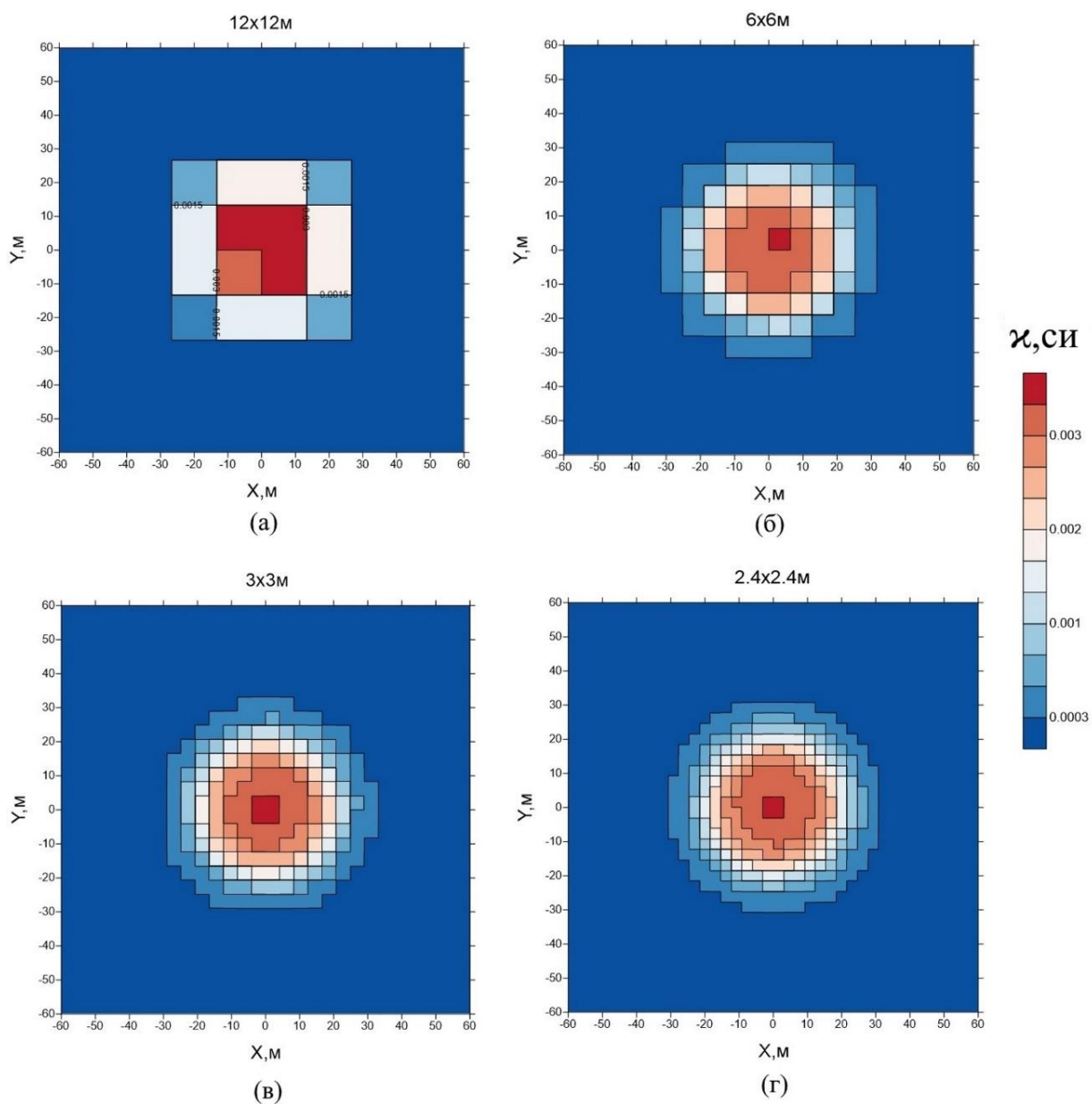


Рис. 3. Инверсия данных с использованием различных размеров тестовых блоков. Протестированы разбиения на блоки размерами: а – 12 м х 12 м, б – 6 м х 6 м, в – 3 м х 3 м и г – 2.4 м х 2.4 м

ВЫВОДЫ

Задача инверсии равновысотных магнитных данных быстро и качественно разрешается для классических моделей геологических тел и, в частности, для модели «кимберлитовая трубка», разработанным алгоритмом инверсии на GPU, что позволит применять его на мобильных устройствах в полевых условиях.

Имеется неоднозначность решения по оси Z, обусловленная эквивалентностью распределения источников, присущей всем обратным задачам для потенциальных полей, и для ее устранения

необходимы априорные данные о характере залегающих тел или магнитных восприимчивостей объектов исследования.

При изучении характера затухания сигналов использование разновысотных данных позволяет уточнить получаемые результаты за счет более высокой точности измерения интерпретируемого поля, а также корректно учесть влияние рельефа. Необходимо дополнительное развитие технологии и включение их в разработанное программное обеспечение.

ЛИТЕРАТУРА

- Блох Ю.И.** Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: Уч. пособ. – М., 2009. – 231 с.
- Жданов М.С.** Теория обратных задач и регуляризации в геофизики. – М.: Научный мир, 2007. – 712 с.
- Кузнецов Ю.И., Агапитова Н.С.** Математические основы моделирования на ЭВМ. – Ю.-Сахалинск: ЮСИЭПИ, 2003. – 214 с.
- Лаврентьев М.А.** О некоторых некорректных задачах математической физики. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 92 с.
- Самарский А.А.** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 655 с.
- Страхов В.Н.** Решение линейных задач гравиметрии и магнитометрии вариационным и структурно-параметрическими методами при мультипликативно-аддитивных помехах в экспериментальной информации // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319, № 6. – С. 1361–1365.
- Страхов В.Н., Страхов А.В.** Методы нахождения устойчивых приближенных решений систем линейных алгебраических уравнений с приближенно заданной правой частью, допускающие глубокое распараллеливание вычислений // Вычислительные методы программирования. – 2001. – Т. 2. – С. 34–55.
- Стренг Г.** Линейная алгебра и ее применения. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- Тихонов А.Н.** О регуляризации некорректно поставленных задач // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 153, № 1. – С. 49–52.
- Эпов М.И., Фирсов А.П., Савлук А.В., Злыгостев И.Н.** Магниторазведчик: нам сверху видно все // Наука из первых рук. – 2016. – Т. 71–72. – № 5–6. – С. 104–109.
- Fichtner A.** Full seismic waveform modelling and inversion. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – 343 p.
- Fletcher R.** Practical methods of optimization. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 436 p.
- Labutin I.B., Surodina I.V.** Algorithm for sparse approximate inverse preconditioners in conjugate gradient method // Reliable computing. – 2013. – Vol. 19. – P. 120–126.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАКСИМОВ Михаил Андреевич – аспирант, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: обратные задачи и математическое моделирование.

СУРОДИНА Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: математические методы, параллельные вычисления, численное моделирование.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.



АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

С.А. Казанцев, А.Д. Дучков

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

В статье дано описание современного варианта аппаратуры для автономного мониторинга температуры в скважинах и водоемах. Для характеристики возможностей аппаратуры представлены результаты ее применения при длительных измерениях температуры торфяников Васюганского болота (Томская область) и дна (воды и осадков) озер Байкал и Телецкое.

Мониторинг температуры в скважинах и водоемах, автономные измерители температуры, озеро Байкал, Телецкое озеро, Васюганское болото

THE EQUIPMENT FOR PRECISE TEMPERATURE MONITORING

S.A. Kazantsev, A.D. Duchkov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KasantsevSA@ipgg.sbras.ru, DuchkovAD@ipgg.sbras.ru*

The article describes the modern version of the equipment for the autonomous temperature monitoring in boreholes and reservoirs. To characterize the capabilities of the equipment, the results of the long-term measurements of the temperature of Vasyugan swamp (Tomsk region) peatlands and the bottom (water and sediment) of lakes Baikal and Teletskoye are presented.

Temperature monitoring in boreholes and reservoirs, autonomous temperature meters, lakes Baikal and Teletskoye, Vasyugan swamp

ВВЕДЕНИЕ

Накопленные к настоящему времени геотермические данные выявили существенную нестационарность температурного поля Земли. Наибольший практический интерес представляет короткопериодная часть (от часов до нескольких лет) нестационарной компоненты, которая определяется как естественными физическими процессами (климатическими, метеорологическими, фазовыми переходами, гидрогеологическими, приливными, тектоническими и сейсмическими), так и

искусственными, связанными с конструкцией скважины и методикой температурных измерений (свободная конвекция, внутрискважинные и заколонные перетоки флюидов, влияние системы измерений).

Вариации температурного поля, связанные с этими причинами, могут быть непосредственно зарегистрированы с помощью систем непрерывного геотермического мониторинга в скважинах разной глубины и в донных осадках водоемов. Результаты мониторинга позволяют оценить глубинный тепловой поток в условиях сильных климатических помех, влияние поверхностных условий на распространение в горные породы климатического сигнала; выяснить прогностические возможности геотемпературного поля в сейсмоактивных районах. В настоящее время высокоточный мониторинг температуры входит в обязательный комплекс исследований изменений природной среды и климата. Он проводится обычно в скважинах геодинамических, мерзлотных и гидрологических полигонов.

Высокоточный (до сотых–тысячных долей градуса) мониторинг температуры (Т) начал развиваться сравнительно недавно. Он стал возможен после появления во второй половине XX столетия автономной аппаратуры для выполнения таких измерений. В ИНГГ СО РАН первые разработки высокоточных автономных многоканальных измерителей температуры были выполнены авторами еще в 1980-х годах [Авторское свидетельство, 1985]. Тогда же один из первых вариантов станции под названием «ГЕТАС» был выпущен малой серией (около 20 штук) Опытным заводом СО АН СССР. Аппаратура за год–два разошлась по геологическим институтам страны, проводящим геотермические исследования. В последующие годы развитие аппаратуры непрерывно продолжалось [Дучков, Казанцев, 1993; Казанцев и др., 2013].

В данной статье описаны конструктивные особенности современного варианта аппаратуры и обсуждаются наиболее интересные результаты ее использования, дающие представление о возможностях автономных измерителей температуры.

ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА (СТМ)

Технической особенностью последней версии автономной станции температурного мониторинга является то, что она может работать как с аналоговыми датчиками температуры, термисторами, так и с цифровыми датчиками типа DS18B20 (совместно или отдельно, в зависимости от решаемых задач). Термисторные датчики собираются в многопроводные гирлянды (термокосы) различной длины, а цифровые в трехпроводную гирлянду. Термокоса размещается в скважине, регистрирующая часть СТМ – на устье скважины или прикапывается рядом со скважиной. При измерениях в водоемах СТМ размещается в герметичном контейнере, что позволяет ее погружать в изучаемую среду вместе с термокосой.

Функциональная схема СТМ представлена на рис. 1. Станция работает следующим образом: часы реального времени через заданные интервалы активизируют микропроцессор (в нашем случае STM32L151R) на проведение измерений. Микропроцессор предназначен для управления режимами работы станции в целом, установки параметров аналого-цифрового преобразователя, таймера и первичной обработки данных, записи их в энергонезависимую память.

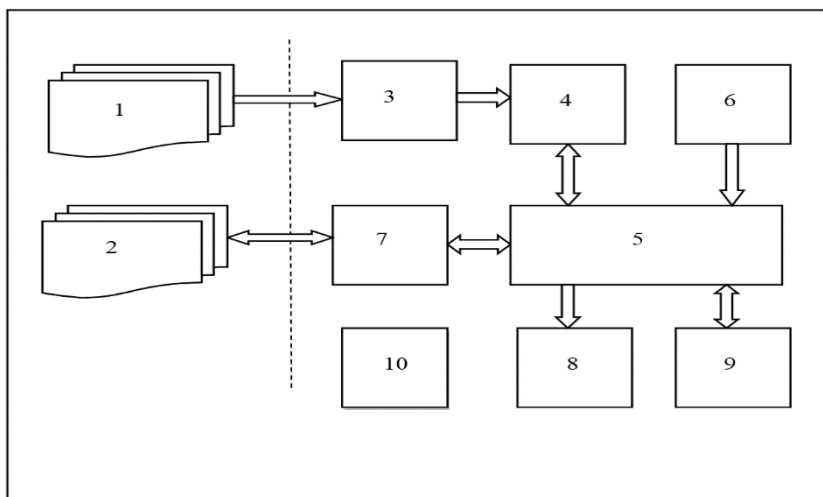


Рис. 1. Функциональная схема станции температурного мониторинга. 1 – термисторные датчики температуры, 2 – цифровые датчики температуры, 3 – коммутатор, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – микропроцессор, 6 – часы реального времени, 7 – контроллер 1-Wire шины, 8 – оперативная память, 9 – модем радиосвязи, 10 – элемент питания

В процессе измерений термисторные датчики температуры поочередно подключаются к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) с помощью 8-канального коммутатора. АЦП обеспечивает выходной цифровой код в зависимости от установки режима 16 или 24 разряда. Контроллер 1-Wire шины обеспечивает подключение цифровых температурных датчиков. Далее результаты измерений записываются в энергонезависимую память объемом до 100 000 измерений. Затем станция переходит в режим хранения информации. Микропроцессор имеет режим микропотребления при хранении информации и активизируется только для измерения, записи или передачи записанных данных, благодаря чему обеспечивается минимальное энергопотребление, фактически всего 2–5 мкА. Литий-ионные аккумуляторы станции (нормальное напряжение 4 В) обеспечивают непрерывную запись температуры сроком до года. Время старта и интервал между измерениями задается программно с клавиатуры компьютера и может составлять от десятков секунд до десятков часов. Высокоточные часы реального времени определяют временные интервалы работы микропроцессора и обеспечивают временную привязку результатов измерений. Точность измерения абсолютных значений температуры всех устройств определяется возможностями калибровки датчиков и составляет $0,01 \pm 0,02^\circ \text{C}$. Относительные изменения температуры регистрируются с разрешением до $0,002^\circ \text{C}$.

Результаты измерений термисторных датчиков хранятся в памяти СТМ в Омах и пересчитываются по индивидуальным калибровкам в температуры уже в компьютере. Данные с цифровых датчиков сохраняются сразу в градусах Цельсия. Специализированная программа считывает записанную информацию на компьютер через USB-порт, при необходимости память устройства очищается. После отключения компьютера регистратор автоматически переходит в рабочий режим. Данные проходят предварительную обработку и сохраняются в табличном виде. В зоне покрытия сотовой связи возможна передача данных в реальном масштабе времени по каналам GPRS.

В дальнейшем будет показано, что СТМ изготавливалась в разных вариантах (в основном изменялись виды корпусов, термокос и количество датчиков), наиболее удобных для проведения того или иного эксперимента. На рис. 2 показаны два вида СТМ.



Рис. 2. Вид СТМ во влагозащитном и герметичном корпусах

Описанная станция является основным звеном целого комплекса аппаратуры, который может быть использован для изучения температурного режима различных природных объектов, измерения теплофизических свойств пород. В состав комплекса, помимо устройств для мониторинга температуры, входят стенд для автоматизированной калибровки датчиков [Казанцев, Кальяк, 2018], лабораторные измерители теплофизических свойств пород [Казанцев, Фадеева, 2015].

Автономные СТМ использовались авторами и другими исследователями при длительном изучении температурных вариаций в шпурах и скважинах Быстровского и Ключевского полигонов (Новосибирская область) [Юшин и др., 2011], обсерватории Талая (южный берег оз. Байкал) [Пермяков и др., 2014], Семипалатинского полигона [Аюнов и др., 2017], в донных осадках оз. Байкал [Дучков и др., 2007] и Телецкого озера [Дучков, Казанцев, 2007], в торфах Васюганского болота [Дюкарев и др., 2009] и других часто трудно доступных геологических объектах. В данной статье мы ограничимся рассмотрением только нескольких результатов температурного мониторинга.

ТЕМПЕРАТУРА ДНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Наиболее интересные результаты получены нами в процессе годичного мониторинга температуры дна (вода и осадки) глубоководной части озера Байкал [Дучков и др., 2007]. Такой эксперимент был выполнен впервые и до сих пор не превзойден. Электронная часть погружного зонда была построена на основе СТМ и помещена в тяжелый герметичный контейнер, который обычно применяется при измерении тепловых потоков в донных осадках глубоких водоемов.

Постановка зонда на дно оз. Байкал была осуществлена 28.03.2003 г. вблизи подводного метанового источника «Старый» (51°54' с.ш., 105°36,4' в.д.; глубина дна ~1350 м). Зонд поднят на поверхность через год – 11.03.2004 г. В течение мониторинга датчики опрашивались через 1,5 часа (16 измерений в сутки). Результаты мониторинга (графики изменения температуры) приведены на рис. 3. Два нижних, практически совпадающих, графика иллюстрируют вариации температуры придонной воды (датчики Т6 и Т8). Датчики Т5–Т2 зафиксировали годовые изменения температуры в осадках. Анализ экспериментальных кривых показывает, что температура дна вблизи источника «Старый» постоянно изменяется, хотя амплитуды вариаций невелики – от 0,07° С до 0,01° С и менее. Длительность вариаций температуры придонной воды колеблется от нескольких месяцев до суток. По записям отчетливо различаются два периода изменения температуры дна (как воды, так и осадков): относительно «спокойный» летне-осенний период (середина июня 2003 г. – начало февраля 2004 г.) и зимне-весенний «нестационарный». Практически все вариации температуры придонной воды проникали в поверхностный слой осадков (график Т5). Датчики, расположенные глубже (графики Т4–Т2), отметили только самые значительные изменения температуры придонной воды, которые наблюдались в «нестационарные» периоды. В «спокойный» период на этих глубинах сохранялась постоянная температура, нарушаемая лишь приборными шумами. Очевидно, что «спокойный» период является наиболее благоприятным для изучения теплового потока в Южно-Байкальской впадине. При работе в зимний период возможны значительные ошибки в оценке геотермического градиента в верхнем метровом слое осадков.

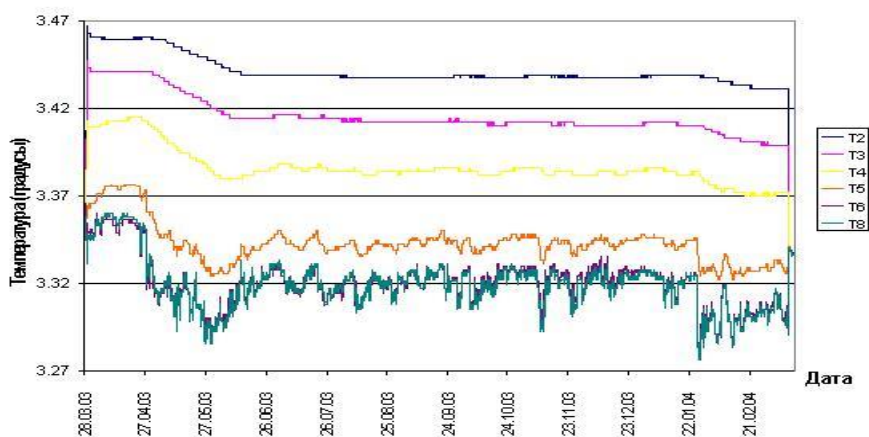


Рис. 3. Температура придонной воды и илов дна озера Байкал. Индексы кривых (Т2–Т8) соответствуют номерам термодатчиков. Датчики Т6 и Т8 располагались в воде (выше дна примерно на 20 и 110 см), датчики Т5–Т2 – в донных илах (ниже дна примерно на 10, 46, 82 и 118 см)

ТЕМПЕРАТУРА ДНА ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

Аналогичный эксперимент с применением той же аппаратуры был выполнен в донных осадках наиболее глубокой центральной части Телецкого озера (профиль р. Корбу – р. Чадор, глубина дна 320 м, длительность мониторинга – 2,8 месяца) [Дучков, Казанцев, 2007]. Результаты мониторинга приведены на рис. 4 в виде графиков температуры придонной воды (T_v) и верхнего слоя осадков. В процессе мониторинга зафиксированы значительные вариации температуры дна (воды и осадков) на максимальной для этого озера глубине. Очевидно, что изменения температуры в осадках вызваны проникновением в них температурной волны, формирующейся в придонном водном слое. Вплоть до 04.12.2005–05.12.2005 г. происходило увеличение T_v (на $0,6^\circ\text{C}$), а в осадках сохранялся отрицательный геотермический градиент (Γ). В последующем зафиксирована резкая смена температурного режима в системе «вода-осадки»: произошло уменьшение T дна более, чем на 1°C и начали устанавливаться положительные значения Γ . За весь период наблюдений геотермический градиент изменялся в изучаемом слое (0–140 см) от -360 до $+170$ мК/м. Полученные экспериментальные данные впервые зафиксировали значительную нестационарность температурного поля верхнего слоя (более 1,4 м) донных осадков даже в наиболее глубокой части Телецкого озера. Это обстоятельство не позволяет измерить стандартными методами (погружными зондами) глубинную составляющую геотермического градиента (теплового потока). Можно предположить, что только длительный мониторинг температуры (более 1–2 года) в осадках на разных глубинах в слое 1,5–2 м может дать достаточно материала для оценки стационарных значений температуры осадков на глубине расположения датчиков.



Рис. 4. Температура придонной воды и илов дна центральной части Телецкого озера в октябре–декабре 2005 г. Номера восьми датчиков указаны справа от графиков. Датчики 6–8 расположены в придонном слое воды, датчик 5 – на дне, датчики 4–1 – ниже дна на 35, 70, 105 и 140 см соответственно

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Температурный режим почв формируется под влиянием климатических условий и факторов, характеризующих тепловое взаимодействие горных пород с атмосферой. Для изучения этих факторов нами совместно с сотрудниками ИМКЭС СО РАН (г. Томск) экспериментально изучены закономерности изменений температурного поля торфяной залежи в одном из районов Васюганского болота, расположенного в южной части Западной Сибири [Дюкарев и др., 2009].

Для проведения этих работ было изготовлено специальное устройство (зонд), состоящее из небольшого герметичного контейнера (диаметр 40 мм, длина 200 мм) с присоединенной стальной трубкой длиной 1 м. В контейнере размещалась модификация СМТ, а в трубке – восемь терморезисторов. После внедрения зонда в почву датчики температуры располагались на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см от поверхности. Измерения температуры торфяной залежи проводились в течение 812 дней с 28 июня 2005 г. по 26 сентября 2007 г. В зимнее время года измерения T выполнялись в автономном режиме через 1 час, а в летнее время – через 15 минут. В результате получен огромный экспериментальный материал. Для иллюстрации результатов измерений на рис. 5 приведены две летние записи (30.07.2007 и 02.07.2006) суточного хода температуры воздуха и торфяной почвы на разных глубинах. В 2007 г. записан «нормальный» ход суточной температуры, запись 2006 г. иллюстрирует влияние на температуру инфильтрации осадков (дождя). Осадки приводят во второй половине суток к резкому снижению T_a и, наоборот, к возрастанию T почв. Экспериментальные данные можно использовать для количественного анализа процессов теплопередачи в торфяной почве, формирования и разрушения сезонно-мерзлого слоя, инфильтрации осадков, взаимодействия солнечного и внутриземного тепловых потоков.

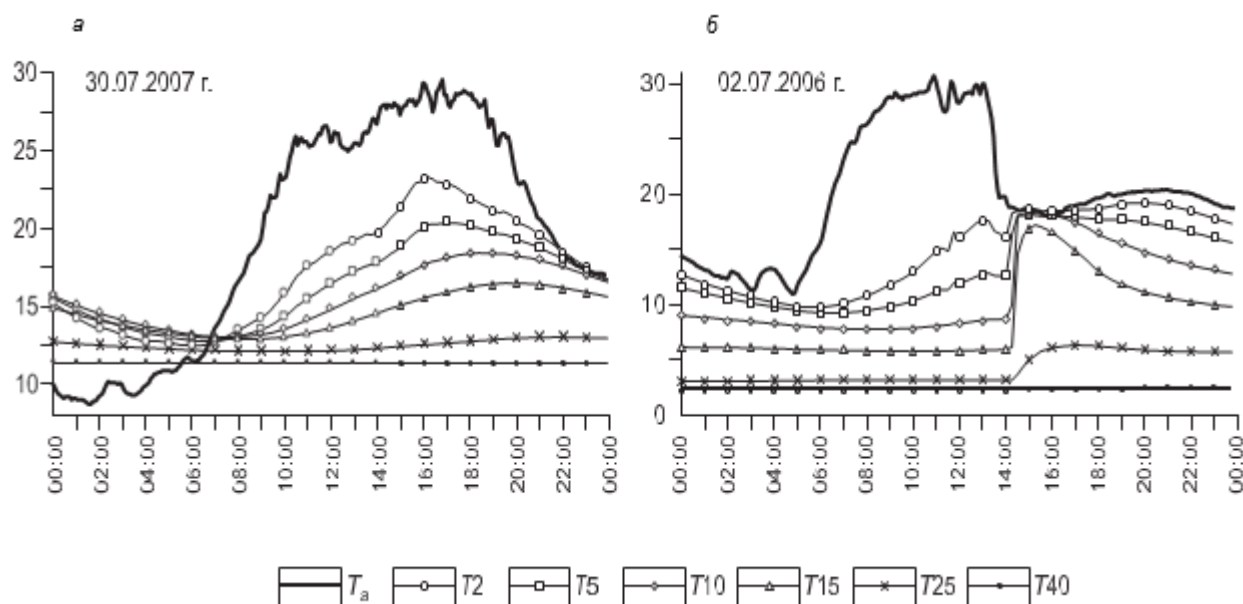


Рис. 5. Суточный ход температуры почвы (T_2 - T_{40}) на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40 см и температуры воздуха (T_a): а – 30.07.2007 – «нормальный» суточный ход T торфяного слоя; б – 02.07.2006 – суточный ход T , нарушенный прогреванием почвы дождевой водой (T_a при этом существенно охлаждается)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие природные явления (климатические, геологические) и техногенные факторы, связанные с освоением земной поверхности и ее недр, сохраняют свой «энергетический след» в тепловом поле Земли, в его нестационарной компоненте. Выявление этого «следа», т. е. вариаций температурного поля в горных породах, осуществляется с помощью геотермического мониторинга. В ИНГГ СО РАН многие годы осуществляются разработка и изготовление автономных регистраторов температуры, ориентированных главным образом на измерение сигналов от гирлянд (термокос) датчиков, размещенных в скважинах разной глубины или водоемах. Показано, что несомненными достоинствами комплекса аппаратуры являются его надежность, точность измерения температуры, большие объемы памяти, низкое общее энергопотребление, возможность длительной автономной работы, простота и удобство в работе и обслуживании. Рассмотренные в статье примеры применения разработанных станций мониторинга температуры убедительно показывают, что описанная техника позволяет осуществлять автономный мониторинг температуры труднодоступных природных геологических объектов. Получаемые при этом материалы могут быть использованы при решении различных практических задач, связанных, например, с изучением динамики распространения климатических температурных волн в горные породы, водных потоков, криогенных процессов и т. д.

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ отделения геофизики ИНГГ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Авторское свидетельство** 1148992. Устройство для измерения температуры в скважине / С.А. Казанцев, А.Д. Дучков, С.И. Чазов (СССР). – № 3665801; заявл. 10.10.1983; опубл. 07.04.1985, Бюл. № 13. – 3 с.: ил.
- Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Казанцев С.А., Романенко В.В., Субботин С.Б.** Современный температурный режим Атомного озера (Семипалатинский испытательный полигон) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 7. – С. 1082–1086.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 365–373.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Аномальные изменения температурного режима дна (воды и осадков) Телецкого озера в осенне-зимний период // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1366–1370.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А., Дучков А.А.** Мониторинг температуры дна озера Байкал // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 4. – С. 472–480.
- Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 745–754.
- Казанцев С.А., Кальяк А.А.** Совершенствование методики градуировки полупроводниковых термодатчиков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии

поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Сб. материалов в 6 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2018. – С. 223–226.

Казанцев С.А., Пермяков М.Е., Дучков А.Д. Устройство для оперативного температурного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.): Междунар. научн. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 203–207.

Казанцев С.А., Фадеева И.И. Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2015. – С. 82–85.

Пермяков М.Е., Дучков А.Д., Демежко Д.Ю., Казанцев С.А. Мониторинг температуры в скважине обсерватории «Талая» (южное побережье оз. Байкал) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». Сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 3–7.

Юшин В.И., Аюнов Д.Е., Дучков А.Д. Мониторинг изменений температуры под плитой действующего сейсмического вибратора // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: Сб. материалов в 6 т. Т. 2, Ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 32–36.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, газовые гидраты.

КАЗАНЦЕВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: аппаратура и методика температурного мониторинга.



МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННО-ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.В. Яблоков, А.С. Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

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

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия,

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

e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru, SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

В работе рассматривается метод многоканального анализа поверхностных волн. Предлагается автоматизированный способ выделения поверхностных волн на основе временно-частотного представления сейсмограмм и их дальнейшего пространственного спектрального анализа. Такой подход является помехоустойчивым и обеспечивает полностью автоматическое извлечение плавных и реалистичных дисперсионных кривых, что приводит к более достоверному определению скоростных разрезов поперечных сейсмических волн методом многоканального анализа поверхностных волн. В статье приводятся результаты тестирования разработанного подхода с использованием зашумленных синтетических и реальных сейсмических данных.

Сейсморазведка, поверхностные волны, спектральный анализ, верхняя часть разреза

METHOD OF AUTOMATED EXTRACTING OF DISPERSION CURVES BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION OF SEISMIC DATA

A.V. Yablokov, A.S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,

Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

Chinakal Institute of Mining SB RAS, Krasny Avenue, 54, Novosibirsk, 630091, Russia,

Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru, SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the method of multichannel analysis of surface waves. We propose an automated method of surface waves extraction, based on the time-frequency representation of seismograms and their subsequent spatial spectral analysis. This approach is robust for the extraction of smooth and realistic dispersion curves in automatic mode. This provides a more reliable assessment of high-velocity sections of shear waves by the method of multichannel analysis of surface waves. The article presents the results of testing of the developed approach with using noisy synthetic and real seismic data.

Seismic, surface waves, spectral analysis, near-surface section

ВВЕДЕНИЕ

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [Park et al., 1999] широко применяется в течение двух последних десятилетий в области инженерно-геотехнических изысканий [Socco et al., 2010; Foti et al., 2014]. В разведочной сейсморазведке анализ поверхностных волн используется для расчета статических поправок объемных волн [Mari, 1984; Roohollah, 2013].

Для записей данных обычно используются маломощные импульсные источники (кувалда, падающий груз, сейсморужье и др.) и линейные системы наблюдений [Schwenk et al., 2016]. Существуют исследования, направленные на регистрацию и обработку данных от пассивных источников (техногенный шум, приливные волны и др.), как для линейных, так и для площадных систем наблюдений [Cheng et al., 2015].

Фундаментальная мода поверхностной волны извлекается путем пикирования максимумов амплитуд на f - k спектре сейсмограммы. Присутствие помех (шумов и других типов волн) приводит к появлению локальных спектральных максимумов, не связанных с истинной дисперсионной кривой. Из-за короткой длины приемной линии (на практике длина расстановки ограничена особенностями рельефа и степенью горизонтальной неоднородности исследуемого объекта) проявляется эффект размывания спектра (при вычислении волновых чисел), что приводит к сдвигу и/или слиянию соседних спектральных максимумов. Поэтому на практике при обработке методом MASW пикирование дисперсионных кривых выполняется вручную. Интерпретатор должен учитывать искажения спектра и выделять максимально реалистичный тренд. Эта особенность процесса обработки поверхностных волн ограничивает применимость метода в области разведочной сейсморазведки, где требуется обработка больших объемов данных.

Заключительный этап метода MASW состоит в решении обратной задачи подбора 1D-модели скорости поперечной волны по наблюдаемым дисперсионным кривым фазовой скорости поверхностной волны. Для восстановления горизонтальных неоднородностей исследуемой толщи грунтов, которые необходимы для многих геотехнических приложений, набор 1D-моделей V_s интерполируется в псевдо-2D (3D) разрез [Boiero, Socco, 2010; Mi et al., 2017].

Для уменьшения влияния помех при f - k анализе поверхностные волны часто выделяются непосредственно на сейсмограмме, где они образуют низкоскоростную треугольную область высоких энергий с вершиной в источнике и расширяющуюся по времени и расстоянию источник–приемник. Такая процедура позволяет избавиться от быстрых волн первых вступлений, но не удаляет другие типы более сложных волн (отраженные, обратно-рассеянные, интерференционные) и требует ручной предобработки.

Нами предлагается автоматизированный способ выделения поверхностных волн с использованием частотно-временного представления сейсмограмм. Такой подход обеспечивает извлечение плавных и реалистичных дисперсионных кривых в автоматическом режиме. Предлагаемый алгоритм состоит из трех этапов. На первом этапе с помощью преобразования Стоквелла (S -преобразования) [Stockwell et al., 1996] рассчитывается частотно-временное распределение для каждой сейсмической трассы. На втором этапе выполняется пространственное преобразование Фурье вдоль спектральных максимумов поверхностной волны, которые в этой области представляют собой

прямые наклонные линии. На третьем этапе строится f - k изображение и пикируется максимум энергии на каждой частоте. В статье приводятся примеры апробации на синтетических моделях и реальных полевых данных.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для обработки сейсмических данных широко используется непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) [Smith et al., 2008], которое в отличие от стандартного оконного преобразования Фурье (STFT) не требует предварительного выбора длины окна и имеет переменное частотно-временное разрешение. Преобразование Стоквелла (S-преобразование) обеспечивает частотно-временное разрешение сигнала схожее с CWT, но в отличие от него сохраняет прямую связь со спектром Фурье. В работе [Kulesh et al., 2005] показана возможность оценки фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на основе CWT. Аналогичный метод, основанный на S-преобразовании и позволяющий независимо друг от друга оценивать фазовые и групповые скорости поверхностных волн, был предложен [Roohollah, 2013].

Обобщенное S-преобразование сигнала $d(t)$ определяется выражением

$$S[d(t)](\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2\sigma^2}} e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

где σ – масштабирующий параметр, контролирующий ширину вейвлета, f – частота, τ и t – временные переменные.

Рассмотрим два сигнала $d_1(t)$ и $d_2(t)$, зарегистрированных парой приемников, расположенных на одной линии с источником. В случае, если сигнал состоит только из одной моды поверхностной волны, S-преобразование второго сигнала (записи второго приемника) связано с S-преобразованием первого сигнала [Roohollah, 2013]

$$S[d_2(t)](\tau, f) = e^{-2\pi k(f)l} e^{-\lambda(f)l} S[d_1(t)](\tau - k'(f)l, f), \quad (2)$$

где $k(f)$ – волновое число, $\lambda(f)$ – частотно-зависимый параметр затухания и l – расстояние между приемниками. На основе модели распространения поверхностных волн между одной парой приемников (2), возможно определить фазовую $v(f) = f/k(f)$ и групповую $u(f) = 1/k'(f)$ скорости. Как правило, зависимость волнового числа от частоты имеет линейный характер, начиная с некоторой частоты, т. е. $k(f) = k_0 + \alpha f$. Групповая скорость в этом случае становится постоянной $U(f) = 1/\alpha$, как в однородной среде. Если при этом k_0 не нулевое, то фазовая скорость не постоянна – она характеризует зависимость скорости S-волны от глубины.

Определение фазовых скоростей поверхностных волн более эффективно при использовании большего числа приемников. Применение f - k анализа позволяет разделить различные моды

поверхностной волны и оценить их фазовые скорости независимо. В данной работе мы предлагаем метод, позволяющий использовать модель распространения поверхностных волн на основе S-преобразования (2) при анализе многоканальных данных.

Рассмотрим нестационарный поверхностно-волновой пакет, распространяющийся вдоль линейной системы наблюдения. Применим S-преобразование (1) к каждой трассе полученной сейсмограммы $d(x, t)$. Так мы получим трехмерное распределение по времени, расстоянию и частоте. Рассмотрим сечение полученного трехмерного распределения на фиксированной частоте

$$\hat{d}_f(x, t) = S[d(x, t)](\tau, f, x). \quad (3)$$

Так как методика MASW предполагает однородное горизонтально-слоистое строение среды, будем считать, что групповая скорость поверхностных волн не зависит от расстояния x . При анализе псевдосейсмограмм на фиксированной частоте годограф поверхностно-волнового пакета образует прямую наклонную линию, выходящую из точки источника. Будем считать, что источник генерирует импульс в начале координат (как по времени, так и по пространству). Для каждой частоты f и групповой скорости u введем одномерную комплекснозначную функцию пространственной горизонтальной координаты

$$\hat{d}_{f,u}(x) = \hat{d}_f\left(x, \frac{x}{u}\right). \quad (4)$$

Для получения волнового числа к функции (4) применим одномерное преобразование Фурье по пространственной переменной

$$\Omega(u, f, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{d}_{f,u}(x) e^{-2\pi i x k} dx. \quad (5)$$

Для получения из 3-мерного распределения (5) традиционного f - k изображения необходимо выполнить поиск максимумов амплитуд функции для серии групповых скоростей, покрывающих область возможных наклонов пакета поверхностной волны:

$$D(f, k) = \max_u \Omega(u, f, k). \quad (6)$$

Вместо стандартных f - k или f - v изображений, полученных с помощью традиционного двумерного преобразования Фурье, для извлечения дисперсионной кривой мы предлагаем анализировать распределение (6). Локализация по времени на каждой частоте повышает соотношение сигнал/помеха, поскольку исключает шум от помех или от других волн, которые не попадают в эффективную ширину соответствующего вейвлета.

Следующим этапом предлагаемого подхода является пикирование дисперсионной кривой путем поиска максимумов амплитуд на каждой частоте

$$k(f) = \underset{k}{\operatorname{argmax}} D(f, k). \quad (7)$$

Как показывают наши эксперименты по обработке реальных данных, дисперсионная кривая (7) имеет более гладкий характер по сравнению с кривой, получаемой с помощью стандартного f - k преобразования. Заметим, что расчетные (теоретические) дисперсионные кривые в горизонтально-слоистых средах всегда гладкие. Этот факт свидетельствует об эффективности предлагаемого подхода. Далее в статье приводятся примеры применения предлагаемого алгоритма извлечения дисперсионных кривых на синтетических и реальных данных.

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА НА ЗАШУМЛЕННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для демонстрации фильтрационных свойств предлагаемого метода рассмотрим горизонтально-слоистую модель среды с неоднородными включениями (рис. 1, а-в). Неоднородности добавлялись случайным образом с увеличением их размера по мере увеличения глубины, при этом сохранялась средняя скорость в каждом слое.

Полное упругое волновое поле рассчитывалось с помощью конечно-разностной схемы на сдвинутых сетках (Virieux, 1986). Источник – вертикально направленный удар с формой импульса Риккера с $f_0=30$ Гц. Сейсмограмма вертикальной компоненты смещений представлена на рис. 1, г. Сейсмограмма состоит из 101 трассы с шагом между приемниками – 2 м. К данным был добавлен нормально распределенный шум Гаусса (рис. 1, д).

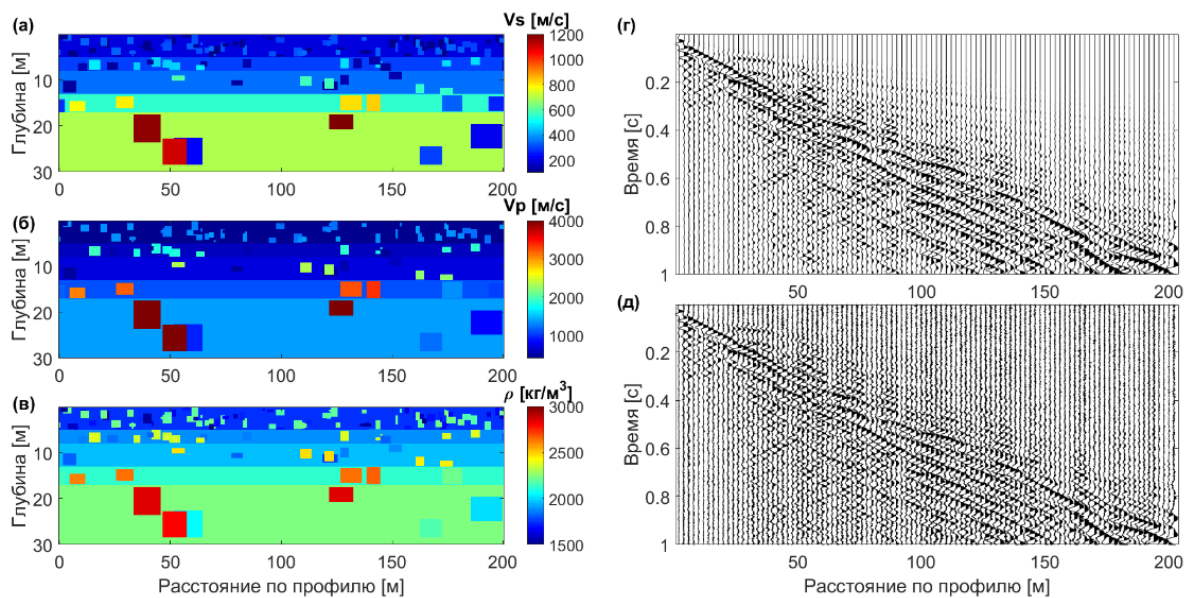


Рис. 1. Модель среды и данные для синтетического теста № 1: а – модель скоростей поперечной волны (м/с); б – модель скоростей продольной волны (м/с); в – модель плотности (кг/м³); г – сейсмограмма вертикальной компоненты смещения; д – сейсмограмма с добавлением нормально-распределенного шума Гаусса (SNR = 13 dB)

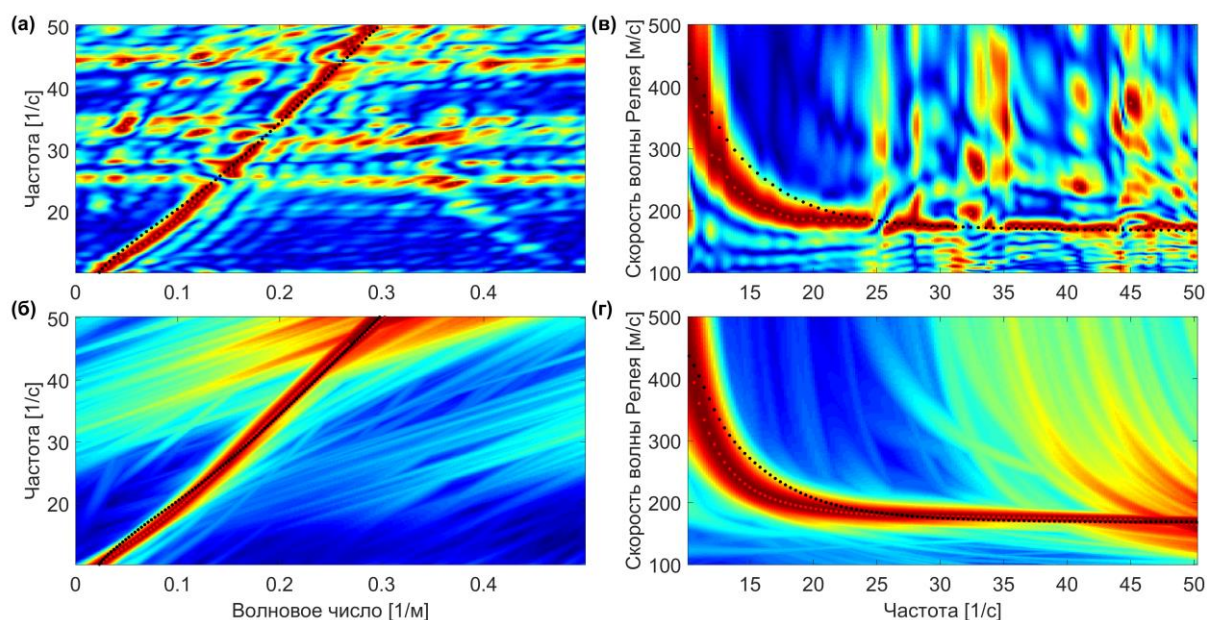


Рис. 2. Спектральные образы сейсмограммы с ПВ 0 м: *а* – f - k спектр, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *б* – f - k спектр, полученный с помощью S-преобразования; *в* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *г* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью S-преобразования. Черными точками нанесена аналитическая кривая, рассчитанная для среды со средними по слоям значениями упругих параметров, красными точками нанесены автоматически определенные максимумы

На рис. 2 представлены f - k и v - f изображения, полученные с помощью стандартного двумерного преобразования Фурье и предлагаемого подхода на основе S-преобразования. Значения амплитуд нормируются – приведены в долях от максимального значения на каждой частоте. Предлагаемый метод усиливает пакет поверхностных волн путем фильтрации других волн на временно-частотном распределении. В результате получается более гладкое и «чистое» спектральное изображение. При использовании стандартного подхода на спектральном изображении наблюдаются многочисленные ложные локальные максимумы, искажающие положение и амплитуды спектральных пиков, соответствующих фундаментальной моде.

Анализируя спектральные изображения (см. рис. 2), отметим, что кривая, полученная с помощью S-преобразования, находится в лучшем согласии с аналитической кривой, чем при стандартном подходе. Таким образом, предлагаемый подход позволяет автоматизировать процесс извлечения дисперсионных кривых поверхностных волн, как в случае простой горизонтально-слоистой среды, так и при наличии неоднородностей, которые приносят сложный шум в спектр и делают неоднозначным процесс пикирования.

ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Полевые работы выполнялись по системе непрерывного профилирования для метода МПВ вблизи с. Бурмистрово, Новосибирская область. Вертикальные 10-герцовые сейсмоприемники устанавливались

с шагом 5 м. Длина линии наблюдения 455 м. Источник – падающий груз массой 100 кг перемещался вдоль профиля с шагом 20 м. Пример сейсмограммы представлен на рис. 4. Шаг по временным отсчетам – 1 мс.

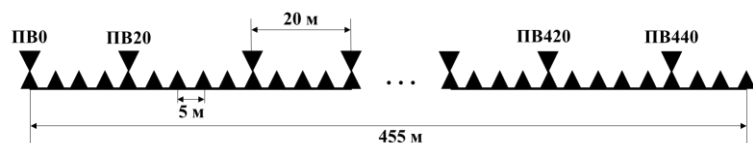


Рис. 3. Схема системы наблюдений для сейсморазведочных работ на профиле

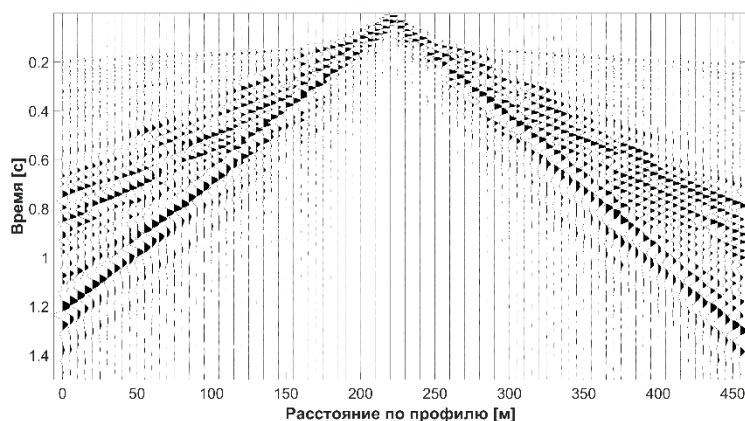


Рис. 4. Сейсмограмма вертикальной компоненты скорости смещений для пункта возбуждения с координатой 220 м

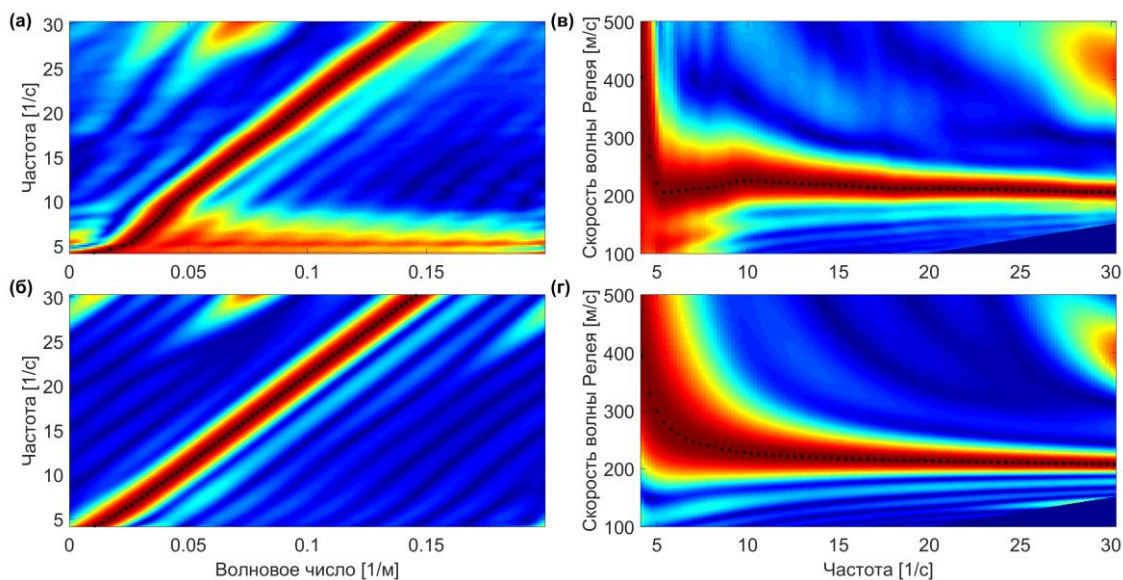


Рис. 5. Спектральные изображения сейсмограммы с ПВ 220: а – f - k спектр, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; б – f - k спектр, полученный с помощью S-преобразования; в – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; г – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью S-преобразования. Черными точками нанесены автоматически определенные дисперсионные кривые

Для построения двумерного скоростного разреза по методу MASW используется фланговая система наблюдений с источником слева, т. е. к сейсмограммам применяется прямоугольное пространственное окно со сдвигом от источника. Для сравнения двух различных подходов автоматического определения дисперсионных кривых спектры рассчитывались путем применения стандартного двумерного преобразования Фурье и с помощью предлагаемого подхода через S-преобразование. На рис. 5 представлены $f-k$ и $v-f$ изображения сейсмограммы с ПВ 220 м с применением пространственного окна длиной 50 м и сдвигом от источника 10 м. Все дисперсионные кривые извлекаются в автоматическом режиме и к каждой применяется эмпирическая инверсия [Foti et al., 2014] для определения начальных значений скоростей. Затем стартовые модели уточняются на основе алгоритма Оккама [Lai, 2005]. Результат для каждой инверсии привязывается к серединной точке расстановки и все одномерные модели интерполируются в двумерный разрез. На рис. 6 представлено сравнение результатов двух подходов к извлечению дисперсионных кривых, где пунктирными линиями нанесены положения границ, определенных по методу t_0' . Отметим, что разрез на рис. 6, а имеет более выраженную однородную горизонтально-слоистую структуру, что согласуется с имеющимися данными по этому участку.

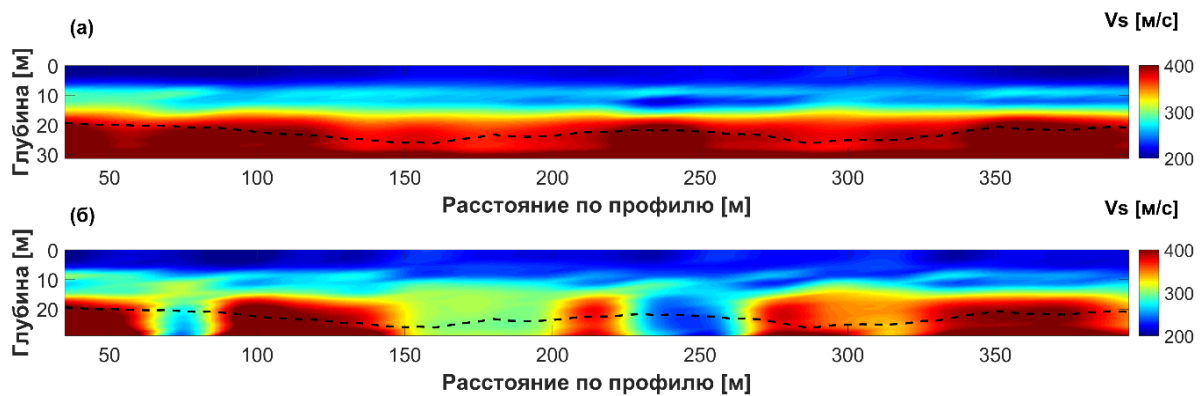


Рис. 6. Результаты решения обратной задачи (разрез скорости поперечной волны в м/с): а – инверсия набора кривых, полученных с помощью временно-частотного представления сейсмограмм, б – инверсия набора кривых, полученных стандартным преобразованием Фурье. Пунктирными линиями нанесены положения границ, полученных по методу t_0'

Глубина восстанавливаемого разреза в методе MASW прямо пропорционально зависит от длины линии наблюдения [Park et al., 2001]. Используя описанный выше алгоритм, были получены скоростные модели после применения пространственного окна длиной 200 м и сдвигом от источника 55 м (рис. 7). Разрезы, полученные на большой базе наблюдения, отличаются повышенной глубинностью, но при этом имеют худшее разрешение в верхней части (за счет затухания высоких частот). Отметим, что при увеличении базы наблюдения снижается эффект спектрального размытия, которому подвержено стандартное преобразование Фурье, но тем не менее разрез, полученный предлагаемой методикой является более выдержанным.

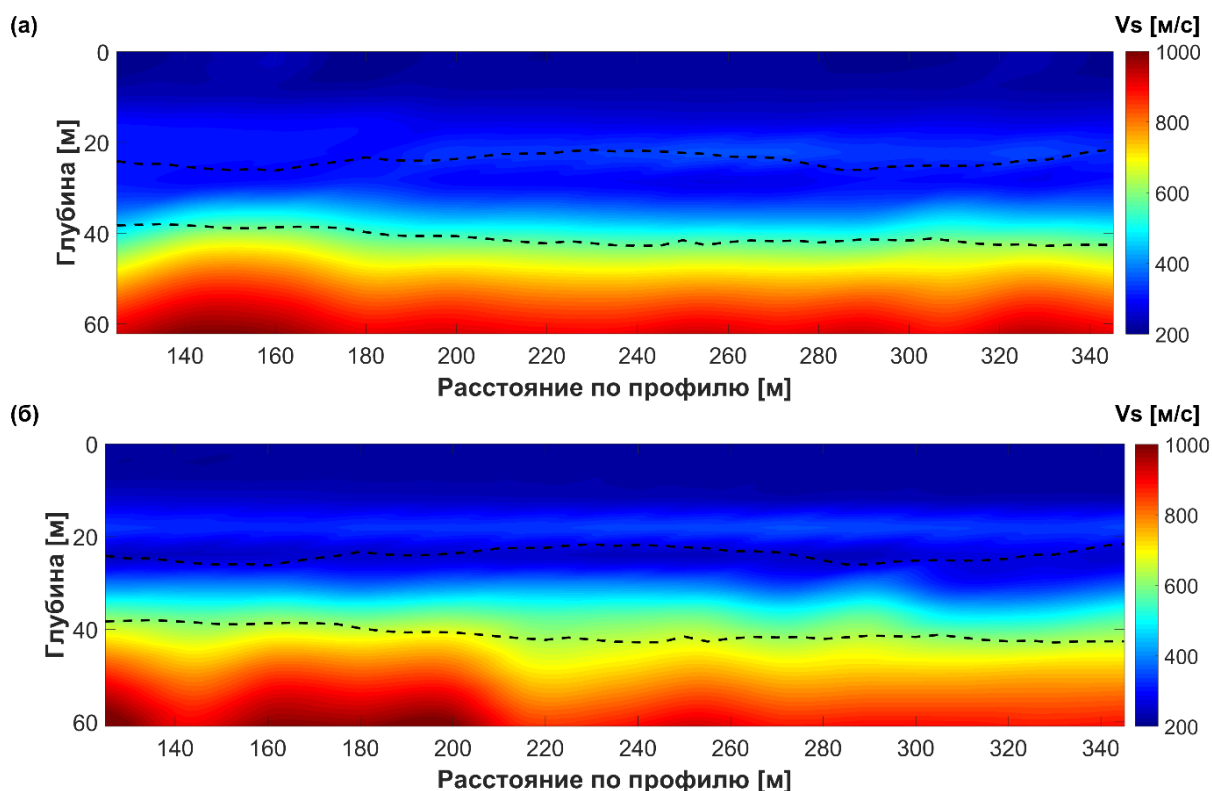


Рис. 7. Результаты решения обратной задачи (разрез скорости поперечной волны в м/с): а – инверсия набора кривых, полученных с помощью временно-частотного представления сейсмограмм, б – инверсия набора кривых, полученных стандартным преобразованием Фурье. Пунктирными линиями нанесены положения границ, полученных по методу t_0'

ВЫВОДЫ

Новый метод спектрального анализа поверхностных волн на основе S-преобразования более помехоустойчив по сравнению со стандартным двумерным преобразованием Фурье. При последующем автоматическом пикировании извлекаются более точные и гладкие дисперсионные кривые поверхностных волн, что имеет решающее значение для метода многоканального анализа поверхностных волн.

Разработанная методика была протестирована и апробирована на реальных данных. Преимуществами предлагаемой реализации метода MASW являются: автоматизация процедуры обработки данных поверхностных волн – от этапа спектрального анализа и до определения скоростного разреза, высокая надежность получаемых результатов за счет извлечения точных и гладких дисперсионных кривых и, как следствие, достоверность восстановленных скоростных разрезов при изучении слоистых сред с гладкими горизонтальными неоднородностями.

Эффективность быстрых алгоритмов инверсии в комплексе с предлагаемым методом автоматического извлечения дисперсионных кривых позволяет реализовать метод восстановления сейсмического разреза на основе поверхностных волн в задачах сейсморазведки на месторождениях или в качестве экспресс-метода для мониторинга сейсмических параметров среды в режиме реального времени для решения геотехнических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта № МК-6451.2018.5.

ЛИТЕРАТУРА

- Boiero D., Socco L.V.** Retrieving lateral variations from surface wave dispersion curves // *Geophysical prospecting*. – 2010. – Vol. 58, № 6. – P. 977–996.
- Cheng F., Xia J., Xu Y., Xu Z., Pan Y.** A new passive seismic method based on seismic interferometry and multichannel analysis of surface waves // *Journal of applied geophysics*. – 2015. – № 117. – P. 126–135.
- Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C.** Surface wave methods for near-surface site characterization. – CRC Press, 2014. – 487 p.
- Kulesh M., Holschneider M., Diallo M.S., Xie Q., Scherbaum F.** Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms // *Pure and applied geophysics*. – 2005. – Vol. 162, № 5. – P. 843–855.
- Lai C.G.** Surface waves in dissipative media: Forward and inverse modelling // *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*. – Vienna: Springer, 2005. – P. 73–163.
- Mari J.L.** Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49, № 8. – P. 1169–1179.
- Mi B., Xia J., Shen C., Wang L., Hu Y., Cheng F.** Horizontal resolution of multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 2017. – Vol. 82, № 3. – P. EN51–EN66.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J.** Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, № 3. – P. 800–808.
- Park C. B., Miller R. D., Xia J.** Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW) // *Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems 2001*. – Kansas: SEG, 2001. – P. SSM4.
- Roohollah A.** Surface wave analysis and its application to the calculation of converted wave static corrections: PhD thesis. – Calgary, 2013. – 112 p.
- Schwenk J.T., Sloan S.D., Ivanov J., Miller R.D.** Surface-wave methods for anomaly detection // *Geophysics*. – 2016. – Vol. 81, № 4. – P. 29–42.
- Smith M., Perry G., Stein J., Bertrand A., Yu G.** Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform // *First break*. – 2008. – Vol. 26, № 6. – P. 97–102.
- Socco L.V., Foti S., Boiero D.** Surface-wave analysis for building near-surface velocity models—Established approaches and new perspectives // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75, № 5. – P. 75A83–75A102.
- Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P.** Localization of the complex spectrum: the S transform // *IEEE transactions on signal processing*. – 1996. – Vol. 44, № 4. – P. 998–1001.
- Virieux J.** P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // *Geophysics*. – 1986. – Vol. 51, № 4. – P. 889–901.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЯБЛОКОВ Александр Викторович – аспирант Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета (НГУ), младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН), младший научный сотрудник Института горного дела СО РАН (ИГД СО РАН). Область научных интересов: метод многоканального анализа поверхностных волн в горизонтально-неоднородных средах, спектральные преобразования.

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Физического факультета НГУ, старший научный сотрудник ИНГГ СО РАН, научный сотрудник ИГД СО РАН. Область научных интересов: адаптивные методы частотно-временной и пространственно-временной спектральной фильтрации сейсмических сигналов.