



## THREE-DIMENSIONAL VELOCITY STRUCTURE OF THE CRUST IN CENTRAL LAKE BAIKAL FROM LOCAL SEISMIC TOMOGRAPHY

L.Yu. Eponeshnikova <sup>1,2,✉</sup>, A.A. Duchkov <sup>1,2</sup>, D.P.-D. Sanzhieva <sup>3,4</sup>, S.V. Yaskevich <sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>3</sup>Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

<sup>4</sup>Buryat Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

<sup>5</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** This work deals with the importance of studying seismicity and deep structure of the Earth's crust in the region of the Baikal rift zone. The study presents a three-dimensional velocity structure of the Earth's crust in the central part of Lake Baikal, obtained from the results of tomographic inversion of the travel times of P- and S-waves from more than 800 seismic events. Synthetic tests provide substantiation for the resolution of the tomographic inversion algorithm. The seismic structure of the crust was obtained to a depth of 35 km and has a direct relationship with the geological structure. The three-dimensional distributions of seismic P- and S-wave velocity anomalies are in good agreement with each other.

The sharp contrast between the anomalies may indicate a difference in the material composition of the basement of the Central Baikal basin. At a 15-km depth below the Selenga River delta, there is observed a strong low-velocity anomaly which confirms the presence of a thick sedimentary cover therein. In the basement (at depths of 20 km or greater), to the northeast of the intersection between the Delta fault and the Fofanov fault, there occurs a high-velocity anomaly elongated towards the Olkhon Island. This anomaly is probably related to a rigid block in the earth's crust. The same depths, on the western side of the Baikal-Buguldeika fault, show a reduced  $V_p/V_s$  ratio: 1.56–1.65 versus 1.70–1.75 in the adjacent areas. This indicates another type of basement rock composition and the presence of consolidated matter there.

Besides, there has been made a more accurate hypocenter determination for further comparison between seismic events and active fault structures. For the central part of Lake Baikal, the distribution of seismicity mainly corresponds to depths of 10–22 km. The situation is different below the Selenga Delta – the only area where seismicity is observed at depths greater than 22 km, – which can be attributed to complex fault interactions.

The velocity anomalies discussed herein are confined to reliably identified active faults and correlate well with the distribution of seismicity and gas hydrate structures.

**KEYWORDS:** Baikal rift zone; Central Baikal basin; local seismicity; seismic tomography; Earth's crust

**FUNDING:** The work was done as part of research project FWZZ-2022-0017 IGG SB RAS and state assignment 075-01471-22, with the use of the data obtained from the Large-Scale Research Facilities "Seismic and infrasound monitoring of the Arctic cryolite zone and continuous monitoring of the Russian Federation, adjacent areas and the world".



### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Lyubov Yu. Eponeshnikova, [eponeshnikovalu@ipgg.sbras.ru](mailto:eponeshnikovalu@ipgg.sbras.ru)

Received: March 4, 2022

Revised: May 4, 2022

Accepted: May 16, 2022

**FOR CITATION:** Eponeshnikova L.Yu., Duchkov A.A., Sanzhieva D.P.-D., Yaskevich S.V., 2023. Three-Dimensional Velocity Structure of the Crust in Central Lake Baikal from Local Seismic Tomography. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0683. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0683

## ТРЕХМЕРНАЯ СКОРОСТНАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Л.Ю. Епонешникова<sup>1,2</sup>, А.А. Дучков<sup>1,2</sup>, Д.П.-Д. Санжиева<sup>3,4</sup>, С.В. Яскевич<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

<sup>4</sup> Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Бурятия, Россия

<sup>5</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Работа посвящена актуальной теме изучения сейсмичности и глубинной структуры земной коры в районе Байкальской рифтовой зоны. В исследовании представлена трехмерная скоростная структура земной коры в центральной части оз. Байкал, полученная по результатам томографической инверсии времен пробега Р- и S-волн от более чем 800 сейсмических событий. С помощью синтетических тестов обоснована разрешающая способность алгоритма томографической инверсии. Определена сейсмическая структура коры до глубины 35 км, которая имеет четкую связь с геологическим строением. Получены трехмерные распределения аномалий скоростей сейсмических Р- и S-волн, которые согласуются между собой.

Резкие контрасты аномалий могут свидетельствовать о различии в вещественном составе фундамента Центральной Байкальской котловины. На глубинах до 15 км в районе дельты р. Селенги наблюдается сильная низкоскоростная аномалия, что подтверждает наличие мощного осадочного чехла в этой области. В фундаменте (глубина 20 км и более), к северо-востоку от пересечения Дельтового и Фофановского разломов, наблюдается высокоскоростная аномалия, вытянутая в сторону о-ва Ольхон. Данная аномалия, вероятно, отражает жесткий блок в земной коре. На этой же глубине с западной стороны от Байкало-Бугульдейского разлома наблюдается пониженное соотношение  $V_p/V_s$ : 1.56–1.65 против 1.70–1.75 в прилежащих областях. Это свидетельствует об отличии породного состава фундамента и наличии здесь консолидированного вещества.

Также в работе была уточнена локализация гипоцентров сейсмических событий для их последующего сопоставления с активными разломными структурами. Для центральной части озера Байкал распределение сейсмичности в основном соответствует глубинам 10–22 км. Под дельтой р. Селенги ситуация меняется (что авторы связывают со сложным взаимодействием разломов) – это единственная область, где сейсмичность наблюдается на глубинах более 22 км.

Обсуждаемые в работе скоростные аномалии ограничены достоверно установленными активными разломами и коррелируют с распределением сейсмичности и газогидратных структур.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Байкальская рифтовая зона; Центральная Байкальская котловина; локальная сейсмичность; сейсмическая томография; земная кора

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках проекта НИР FWZZ-2022-0017 ИНГГ СО РАН, в рамках государственного задания № 075-01471-22, с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

### 1. ВВЕДЕНИЕ

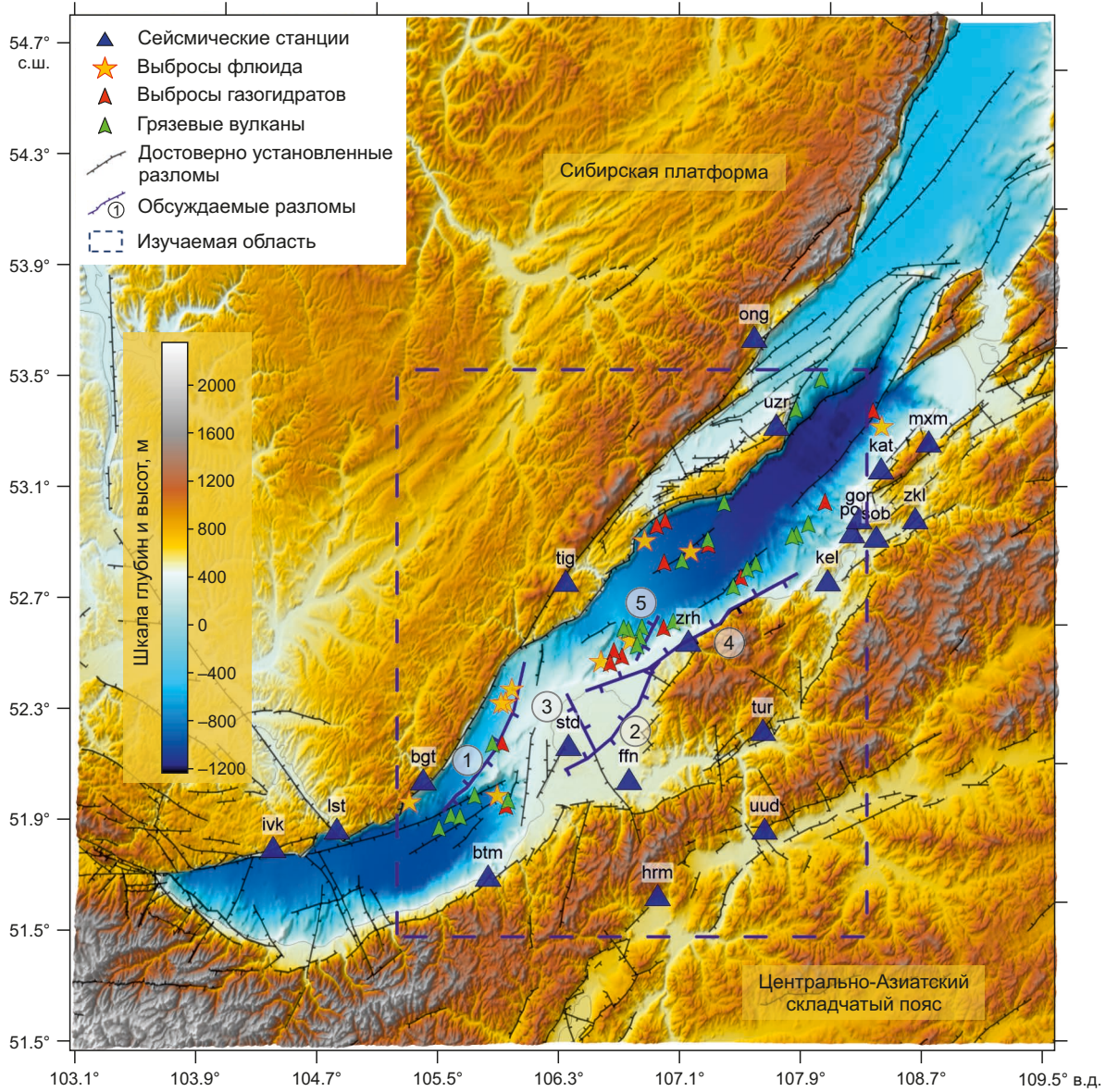
Байкальская рифтовая зона (БРЗ) – одна из крупнейших континентальных дивергентных границ. Здесь активно развивается рифтогенез и происходят процессы растяжения литосферы. БРЗ включает в себя крупные литосферные блоки: Сибирскую платформу, Амурскую плиту, а также Восточно-Саянскую, Монгольскую и другие микроплиты [Logachev, 2001]. По данным высокоточной спутниковой геодезии (GPS) Байкальский рифт раскрывается в среднем на 3–4 мм в год [Ashurkov et al., 2011, 2016; Calais et al., 2003; Likhnev et al., 2013; Sankov et al., 2003]. Коллизия Индостанской

и Евразийской плит выражается в смещении литосферных масс относительно Сибирской платформы в северо-восточном и широтном направлении. Сибирская платформа очень медленно смещается на север, а Амурская плита более активно движется на юго-восток [Ashurkov et al., 2011].

Однозначного мнения о причинах рифтогенеза до сих пор не сформировано, но не вызывает сомнений, что БРЗ является тектонически активной областью. Активные тектонические процессы проявляются в наличии сложной системы разломов и сейсмичности [Logachev, 1999, 2003; Sherman, Levi, 1977; Levi et al., 1995,

1997; Sherman et al., 2012]. Континентальный рифтогенез обычно сопровождается активным вулканизмом и магматизмом. Однако для БРЗ установлен вулканизм только для неогенового периода кайнозойской эры, а в четвертичном периоде вулканическая активность снизилась [Logatchev, Zorin, 1987].

Исзуемая авторами область приурочена к Центральной котловине Байкала (рис. 1). Здесь находится дельта р. Селенги, которая является крупнейшей континентальной дельтой и считается депоцентром оз. Байкал с мощным слоем осадков около 8 км [Hutchinson et al., 1992; Scholz, Hutchinson, 2000]. Район дельты



**Рис. 1.** Карта рельефа и основных структурных и тектонических элементов в районе Байкальской впадины. На карте обозначены достоверно установленные плиоцен-четвертичные разломы [Lunina, 2016]. Цифры в кружках соответствуют обсуждаемым в статье разломам: 1 – Байкало-Бугульдейский, 2 – Дельтовый, 3 – Фофановский, 4 – Сахалин-Энхалукский, 5 – без названия. Зеленые и красные метки обозначают грязевые вулканы и выбросы газогидратов соответственно. Желтыми звездами показаны выбросы флюида [Khlystov et al., 2018]. Синим треугольникам соответствуют сейсмические станции. Рассматриваемая в статье область выделена синими пунктирными линиями. Цифровой рельеф для визуализации на территорию оз. Байкал был взят с сайта <https://www.gebco.net/>, где данные находятся в свободном доступе.

**Fig. 1.** Map of relief and main structural and tectonic elements in the area of the Baikal depression. The map shows reliably identified Pliocene-Quaternary faults [Lunina, 2016]. Numbers in circles correspond to the faults under discussion: 1 – Baikal-Buguldeika, 2 – Delta, 3 – Fofanov, 4 – Sakhalin-Enkhaluk, 5 – unnamed. Green and red marks represent mud volcanoes and gas hydrate emissions, respectively. Fluid ejections are shown by yellow stars [Khlystov et al., 2018]. Seismic stations correspond to blue triangles. The herein-considered area is shown as blue dashed lines. Digital elevation model for Lake Baikal was taken from <https://www.gebco.net/> where the data is freely available.

р. Селенги представляет собой депрессию со сложной разломно-блоковой структурой и высокой сейсмической активностью. Ключевую роль здесь играют процессы растяжения литосферы по данным о механизмах очагов крупных землетрясений [Misharina, Solonenko, 1972, 1977; Misharina et al., 1983; Melnikova, Radziminovich, 1998]. Сложная геодинамическая обстановка в районе дельты р. Селенги определяется взаимным пересечением Дельтового, Фофановского и Сахалин-Энхалукского разломов [Lunina et al., 2009].

В данной работе рассматривается метод локальной сейсмической томографии, который позволяет проводить одновременное уточнение скоростной модели и гипоцентров событий по временам прихода Р- и S-волн [Nolet, 1990]. Для Байкальского региона было построено несколько региональных томографических моделей [Kulakov, 1999, 2008; Mordvinova et al., 2000; Burkholder et al., 1995; Gao et al., 2003; Petit et al., 1998; Tiberi et al., 2003; Yakovlev et al., 2007; Zhao et al., 2006], которые имеют схожие черты (высокие скорости для Сибирской платформы и низкоскоростные аномалии для верхней мантии Южно-Байкальской впадины), но могут значительно отличаться в деталях. Согласно результатам работ, проведенных с использованием локальных данных [Kulakov, 1999; Petit et al., 1998], можно выделить сильную отрицательную аномалию под Байкальской складчатой областью до глубины 20 км, сменяющуюся положительной. В работе [Yakovlev et al., 2007] используются региональные данные для получения скоростных аномалий в коре и верхней мантии. По результатам исследования выделены отрицательные аномалии, совпадающие с областями кайнозойского вулканизма. К сожалению, результаты упомянутых работ не позволяют судить о детальном строении земной коры в интересующей авторов области.

В статье приведены результаты изучения трехмерной скоростной структуры земной коры в районе Центральной котловины оз. Байкал методом локальной сейсмической томографии с одновременным уточнением гипоцентров землетрясений. Локальная сейсмическая томография позволяет выявить блоковую структуру земной коры, что может быть полезно для лучшего понимания тектонических процессов в изучаемом районе. Результаты, полученные в работе, дают возможность рассмотреть структуру скоростного строения земной коры в центральной части Байкала более детально, чем в предшествующих работах по сейсмической томографии, проведенных в Байкальском регионе.

## 2. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Существует две основные гипотезы образования БРЗ. Это концепции активного и пассивного рифтогенеза.

Идея активного рифтогенеза объясняется существованием под Байкалом мантийного плюма, который приводит к поднятию и раздвижению литосферы

[Logatchev, 1993; Logatchev, Zorin, 1987; Zorin, Turutanov, 2005]. В пользу этой теории может свидетельствовать повышенный тепловой поток – в районе БРЗ его значения изменчивы (от 40 до 200 мВт/м<sup>2</sup>), но смещены в сторону высоких значений [Golubev, 2007; Duchkov, Sokolova, 2014]. Также по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) выявлены свидетельства астеносферного выступа с пониженными скоростями под Байкалом (7.7–7.8 км/с), который интерпретируется как аномальная мантия [Song et al., 1996]. По гравиметрическим данным положительные аномалии в редукции Буге свидетельствуют о внедрении основных и ультраосновных магматических пород [Khain, Lomize, 2005; Gao et al., 1997], отрицательные аномалии соответствуют крупным неоднородностям в мантии [Dobretsov et al., 2019].

Другой причиной образования рифта считают пассивный рифтогенез. Эта модель объясняется наличием межплитных взаимодействий, которые вызывают растяжение литосферы. Согласно данной концепции, растяжение вызвано коллизией Индостанской и Евразийской плит и субдукцией Тихоокеанской плиты [Nicolas et al., 1994; Peltzer, Tapponnier, 1988; Zonenshain, Savostin, 1981]. Существуют также комбинированные теории об образовании рифта, в которых предполагается от двух до трех этапов его формирования [Logachev, 2003; Achauer, Masson, 2002; Chemenda et al., 2002; Lesne et al., 2000; Mats, 2012, 2015; Petit et al., 1998].

Байкальская впадина является крупнейшим звеном БРЗ. Выделяют три основные котловины оз. Байкал – Южную, Центральную и Северную [Logachev, 2003]. Оценка мощности осадочной толщи Байкальской впадины варьируется в разных исследованиях. В акватории озера были проведены сейсмические работы методом отраженных волн (МОВ), что позволило оценить мощность осадков для Северной и Центральной котловины в 7–8 км [Hutchinson et al., 1992]. По сейсмическим данным метода преломленных волн (МПВ) для Центральной котловины получены оценки мощности осадков до 9.5 км [Ten Brink, Taylor, 2002], самое глубокое залегание фундамента показано для Южной котловины – до 14 км [Suvorov, Mishen'kina, 2005].

Побережье оз. Байкал сложено породами разного возраста. Западный борт Байкала преимущественно сложен архейскими и архей-протерозойскими комплексами пород фундамента и осадочного чехла древней Сибирской платформы, а восточный – фанерозойскими породами Саяно-Байкальского складчатого пояса [State Geological Map..., 2009; Gvozdkov, 1998; Grudinina, Chuvashova, 2011]. К синрифтовым отложениям Байкальского региона относятся верхнемеловые кайнозойские породы, период накопления которых соответствует времени развития рифтогенеза и формирования котловины оз. Байкал [Mats, 2012]. Верхнемеловые – палеогеновые отложения озерного и аллювиального генезиса встречаются в пределах дельты р. Селенги и о-ва Ольхон [Logachev, 1974; Mats, 2012, 2015]. Отложения четвертичной системы широко развиты во всех

межгорных и предгорных впадинах, где они сложены разнообразными по составу и генезису рыхлыми накоплениями. Подробный обзор кайнозойских отложений в пределах Байкальской впадины дан в работе [Mats et al., 2001]. Таким образом, разнообразие пород обрамления озера позволяет предположить, что фундамент Байкала имеет сложную разновозрастную блочную структуру.

Изучаемая нами область приурочена к Центральной котловине оз. Байкал. Важными структурами в изучаемом районе являются Дельтовый, Фофановский и Сахалин-Энхалукский разломы.

Расположенный в приустьевой части р. Селенги Дельтовый разлом (рис. 1) является основной сейсмоактивной структурой в этом районе (например [Lunina et al., 2012]) и имеет сбросовую кинематику. Смещение по разлому происходило в условиях СЗ-ЮВ растяжения. Активизация этого разлома связана с Цаганским землетрясением (1862 г.), которое стало причиной образования залива Провал. Образование и развитие залива Провал весьма подробно описано в работе [Shchetnikov et al., 2012] в контексте анализа общих морфологических характеристик Байкальского рифта.

Ортогонально Дельтовому разлому расположен Фофановский разлом (рис. 1), который глубоко проникает в земную кору вплоть до верхней мантии (см. [Solonenko, 1981]), а также выделяется по данным магнито-разведки. Разлом разделяет блоки с разной глубиной фундамента, является правым сдвиго-сбросом по данным [Lunina et al., 2009, 2010], северная часть разлома характеризуется повышенной сейсмичностью.

Сахалин-Энхалукский (рис. 1) разлом пересекается с Дельтовым на побережье рядом с северо-восточной частью залива Провал, имеет северо-восточное простирание и сбросовую кинематику. Он относится к наиболее сейсмоактивным разломам, вдоль него обнаружены многочисленные термальные источники [Solonenko, 1981; Lunina et al., 2009].

Сложная геодинамическая обстановка в районе дельты р. Селенги определяется взаимным пересечением Дельтового, Фофановского и Сахалин-Энхалукского разломов [Lunina et al., 2009]. Интересно, что сейсмичность, приуроченная к этим разломам, достигает глубин ниже 22 км, в то время как в остальной части Центральной котловины Байкала сейсмичность приурочена к глубинам 10–22 км [Radziminovich, 2010; Suvorov, Tubanov, 2008]. По данным электромагнитного мониторинга в районе дельты р. Селенги наблюдается мозаичное (блочное) строение – чередуются поднятые и погруженные относительно небольшие блоки [Nevedrova, Eпов, 2004; Lunina et al., 2009].

Интересными объектами, расположенными в пределах аванделты р. Селенги, являются Посольская банка и Кукуйская грива. Они представляют собой тектонически поднятые блоки, которые ранее входили в единую поверхность дельты р. Селенги и связаны общим разломом [Logachev, 2003]. В исследовании [Khlystov

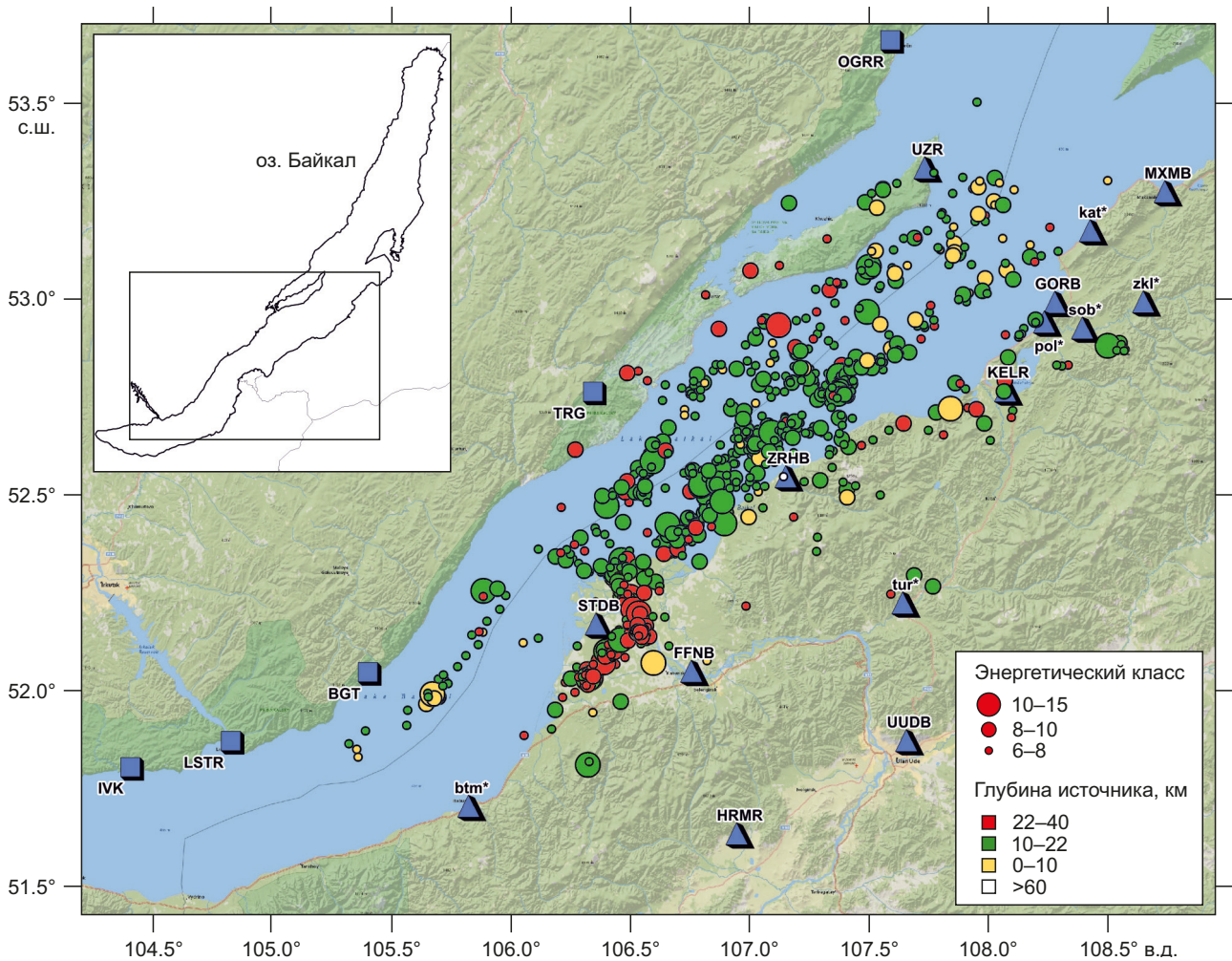
et al., 2016] говорится о резкой активизации сейсмо-тектонической деятельности около 1.0–0.8 млн лет назад, которая привела к отделению Посольской банки и Кукуйской гривы от дельты р. Селенги и их дальнейшему автономному существованию. С юго-восточной стороны гривы расположен каньон, формирование которого, вероятно, связано с процессами рифтогенеза, о чем свидетельствуют резкие изгибы русла и ступенчатость бортов каньона. Кукуйский каньон также известен большой концентрацией грязевых вулканов и газогидратов [Khlystov et al., 2018].

Центральная часть Байкальской впадины характеризуется высокой сейсмичностью. Наиболее сейсмоактивной областью является дельта р. Селенги. Вопросу о распределении сейсмичности в районе Байкала посвящено значительное количество работ начиная с 60-х годов XX в. (например, работы А.А. Трескова, Л.А. Мишариной, С.И. Голенецкого, М.Б. Вертлиб, С.В. Крылова и др.). В разных работах указывается, что основная сейсмичность приурочена к интервалу глубин 0–10 км [Krylov, 1980], 5–20 км [Golenetsky, Perevalova, 1988], в некоторых приведены оценки глубин очагов до 30 км [Déverchère et al., 1991] и даже до 40 км [Déverchère et al., 2001; Gileva et al., 2000]. В статье [Suvorov, Tubanov, 2008] получено распределение очагов под Центральным Байкалом в рамках скоростной модели, построенной по данным ГСЗ, что позволило выделить сейсмоактивный слой на глубинах 10–22 км, который погружается под Селенгинскую депрессию. Похожий результат был получен в работе [Radziminovich, 2010].

### 3. ДАННЫЕ И МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В работе используются времена пробега прямых волн (Pg и Sg), зарегистрированных в 20 пунктах наблюдения. Сейсмические станции принадлежат Байкальскому и Бурятскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН. Сейсмологическая сеть вытянута вдоль Байкала, и распределение станций неравномерно. Была проведена обработка каталога с данными о временах пробега P- и S-волн от локальных землетрясений за период 2001–2011 гг. Диапазон энергетического класса для данной выборки К 6.5–12.2. На рис. 2 показана конфигурация сейсмологической сети и распределение сейсмичности. В обработке использовались записи сейсмических событий, которые были зарегистрированы минимум в пяти пунктах наблюдения, станции удалены от эпицентра не более чем на 100 км. После отбора в каталоге осталось 826 событий с временами пробега Pg-волн (6406 шт) и Sg-волн (6461 шт).

В работе используется метод локальной сейсмической томографии, реализованный в программе LOTOS [Koulakov, 2009]. Она позволяет проводить одновременное уточнение трехмерной скоростной модели и гипоцентров событий по временам пробега P- и S-волн. Для расчета времен пробега и томографической инверсии используется лучевое трассирование. Томографическая инверсия проводится в несколько итераций,



**Рис. 2.** Распределение сейсмичности в исследуемом районе (приведены эпицентры после их уточнения в ходе томографической инверсии).

Треугольники – сейсмические станции Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН (\* – региональный (локальный) код станции), квадраты – станции Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН. На врезке прямоугольником обозначен район исследования.

**Fig. 2.** Distribution of seismicity in the study area (the epicenters are shown after their more precise determination during tomographic inversion).

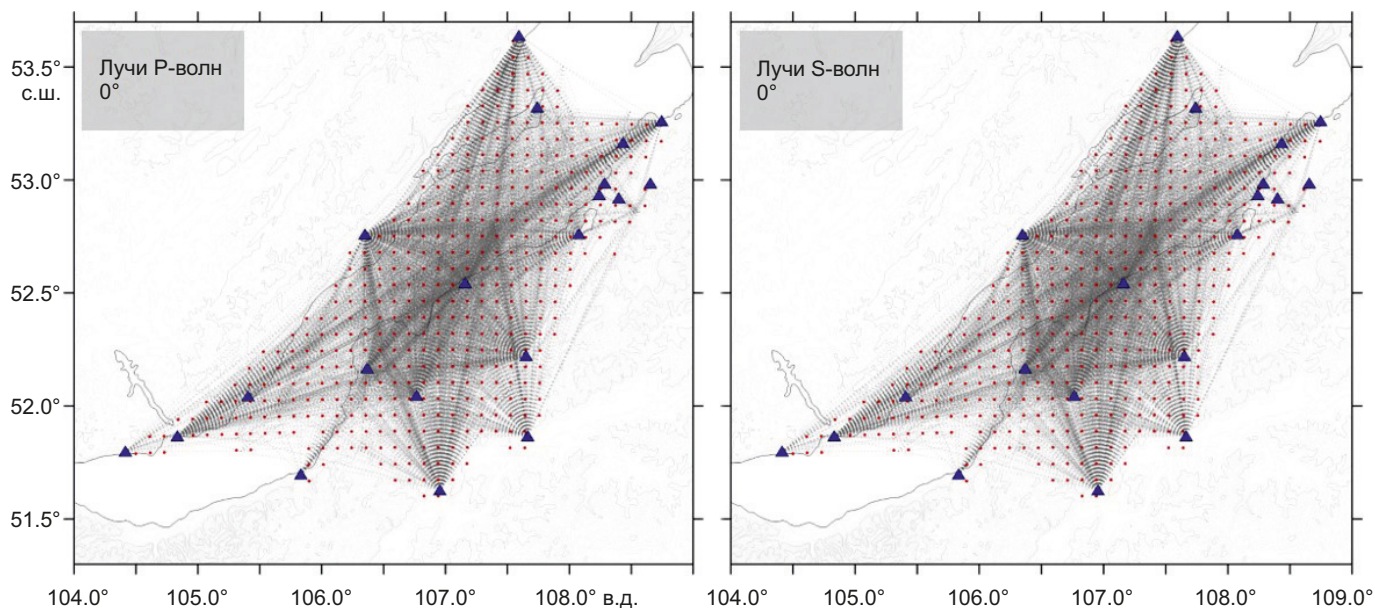
Triangles are seismic stations of the Buryat Branch of the FRC UGS RAS (\* – the regional (local) code of the station), squares are the stations of the Baikal Branch of the FRC UGS RAS. In the insert, the rectangle shows the studied area.

каждая из которых включает этапы уточнения локализации гипоцентров, вычисление томографической матрицы и ее инверсию. Более подробно конкретная реализация алгоритмов описана в работах [Kulakov, 1999; Koulakov et al., 2002]. Итеративный процесс продолжается до тех пор, пока дисперсия невязок на следующем шаге не выходит на постоянный уровень (уменьшается менее чем на 3–5 %). В данной работе процесс инверсии обычно сходился после трех итераций.

На рис. 3 показано распределение лучей в изучаемой области и узлов, параметризующих скоростную модель. Площадь покрытия лучами определяет область, в которой есть принципиальная возможность восстановить скоростную модель. Видно, что область покрывает Центральную котловину, северную часть Южной котловины и часть юго-восточного берега. Необходимо отметить, что в алгоритме LOTOS большое

внимание уделяется тому, чтобы уменьшить влияние распределения узлов параметризационной сетки на результаты. Для этого выполняется инверсия с использованием несколько сеток с различной ориентацией (в указанном случае 0°, 22°, 45° и 67°). После вычисления результатов для сеток с разной ориентацией они объединяются в одну сводную модель, уменьшая любые артефакты, связанные с ориентацией сетки.

Результат томографической инверсии зависит от выбора регуляризирующих параметров: сглаживания и амплитудного демпфирования. Подбор оптимальных параметров проводится на основе синтетических тестов. Большие значения параметров обеспечивают единственность и устойчивость решения, но заглаживают его, т.е. падает детальность получаемой модели. Малые значения параметров приводят к неустойчивости решения – в модели появляются аномалии



**Рис. 3.** Распределение лучей P- и S- волн (серые линии), сейсмических станций (синие треугольники) и узлов параметризационной сетки с ориентацией 0° (красные точки).

**Fig. 3.** Distribution of P- and S-wave rays (gray lines), seismic stations (blue triangles) and nodes of parameterization grids with orientation of 0° (red dots).

скорости, которые мало влияют на время пробега, т.е. не обусловлены данными. В Прил. 1 приведены результаты тестов на модели «шахматной доски». Во-первых, эти тесты позволяют определить оптимальные регуляризирующие параметры (отсутствие в получаемых моделях лишних аномалий). Во-вторых, они позволяют определить разрешающую способность используемой системы наблюдений, т.е. область и размеры аномалий скорости, которые надежно восстанавливаются для данного распределения сейсмичности и положения станций. По результатам тестов сделан вывод, что интерпретируемыми являются аномалии, которые имеют горизонтальный размер 30 км и более (Прил. 1, рис. 1.1).

Для лучевой томографии важным является выбор начальной скоростной модели, так как ее близость к истинной модели обеспечивает правильность результатов томографической инверсии. За основу была взята одномерная модель земной коры по данным метода ГСЗ [Song et al., 1996]. Далее модель уточнялась внутренними инструментами программы LOTOS (проводится уточнение одномерной модели так, чтобы аномалии скорости имели среднее нулевое значение на всех глубинах). В результате была получена начальная скоростная модель, которая показана в табл. 1 (скорость между приведенными глубинами аппроксимируется линейно).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ

Прежде всего были определены предварительные гипоцентры событий в начальной одномерной модели, затем проведены три итерации томографической

**Таблица 1.** Начальная скоростная модель  
**Table 1.** Initial Velocity Model

Глубина, км	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с
-2	5.14	2.99
5	5.67	3.40
10	6.03	3.54
15	6.20	3.60
20	6.34	3.67
30	6.49	3.82
40	7.13	4.15

**Таблица 2.** Усредненные значения временных невязок (с)  
**Table 2.** Average misfits of arrival times (s)

№ итерации	dtP, с	dtS, с
1	0.29	0.49
2	0.22	0.31
3	0.22	0.30

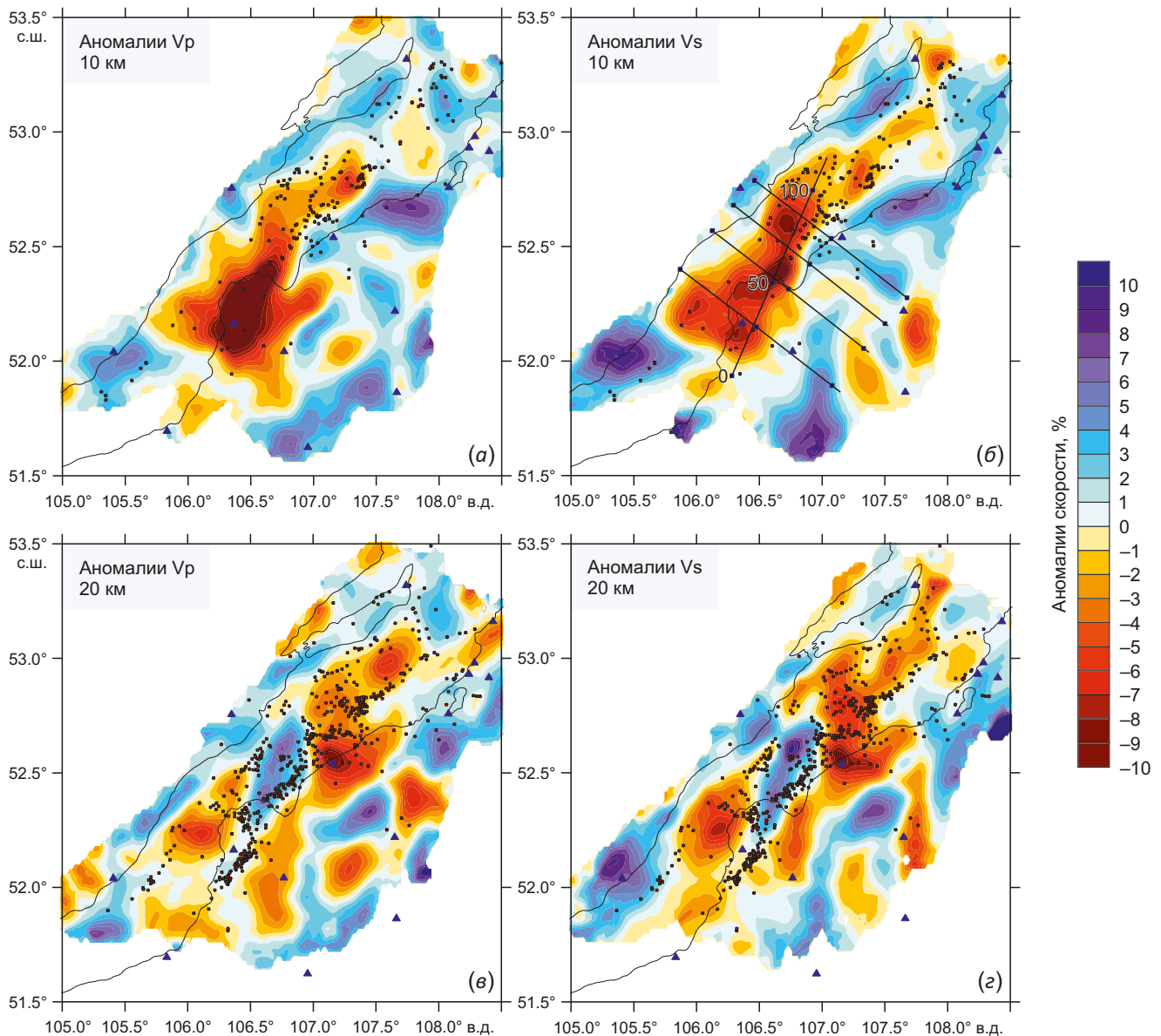
**Таблица 3.** Распределение сейсмичности по глубине после томографической инверсии  
**Table 3.** Depth distribution of seismicity after tomographic inversion

Глубина, км	Количество событий, шт
0-10	65
10-22	593
22-40	167
>60	1

инверсии. Значения среднеквадратических невязок времен пробега P- и S-волн после каждой итерации приведены в табл. 2. После третьей итерации невязки сократились до 0.22 с (для P-волн) и 0.30 с (для S-волн).

В результате проведения томографической инверсии было получено трехмерное распределение скоростных аномалий для P- и S- волн, которые показаны на горизонтальных (рис. 4) и вертикальных (рис. 5, 6) сечениях. На рисунках видно, что в большинстве случаев аномалии скоростей P- и S-волн согласуются между собой. На рисунках (см. рис. 4, 5; рис. 6) точками показаны уточненные положения источников (после

инверсии), причем на вертикальных срезах (см. рис. 5; рис. 6) приведены источники в полосе шириной 7 км вокруг соответствующих сечений (уточненные эпицентры для всего каталога показаны на рис. 2). В табл. 3 представлено распределение источников по глубине. Видно, что основная часть землетрясений происходит на глубине 10–22 км, что совпадает с оценками, полученными в исследованиях [Radziminovich, 2010; Suvorov, Tubanov 2008]. В районе дельты р. Селенги наблюдается скопление событий с глубокими гипоцентрами – до глубин в 30 км. Одно событие, расположенное в районе станции Заречье (ZRHB), имеет глубину >60 км (см. рис. 2).



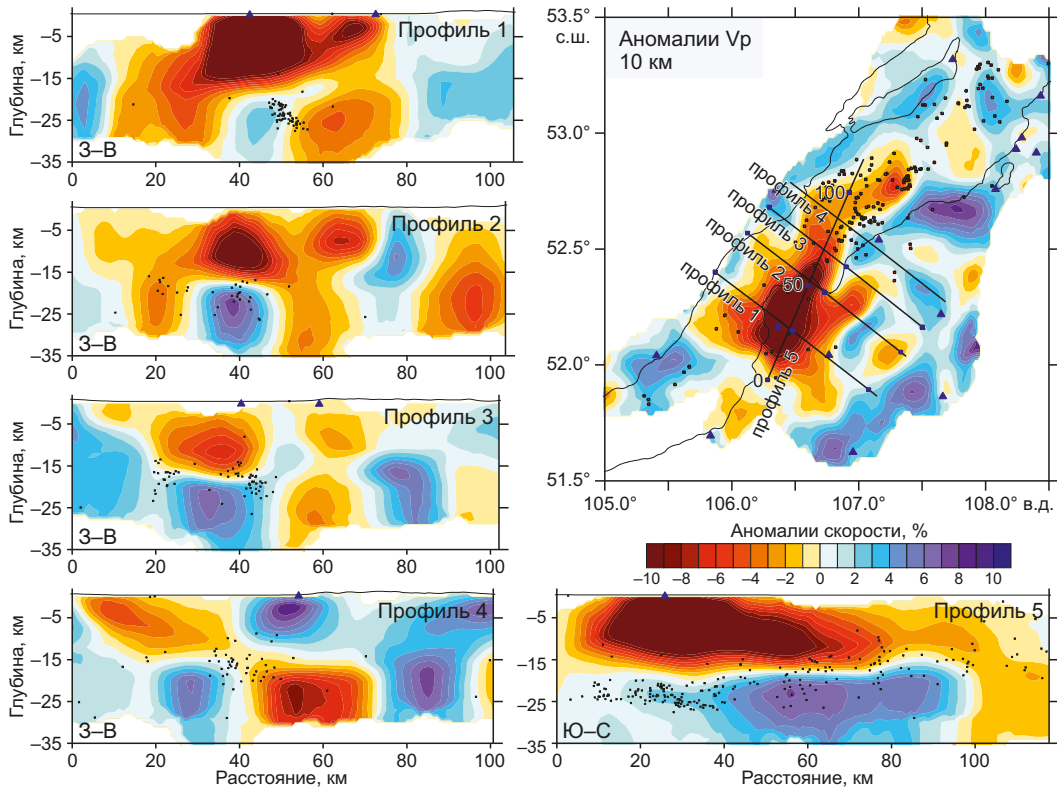
**Рис. 4.** Структура аномалий скоростей P- и S-волн по результатам томографической инверсии.

Горизонтальные сечения на глубине 10 км (а, б) и 20 км (в, з); точки – события на соответствующей глубине; треугольники – сейсмические станции. Местоположение профилей для построения вертикальных сечений указано на фрагменте (б).

**Fig. 4.** P- and S-velocity anomalies from tomographic inversion.

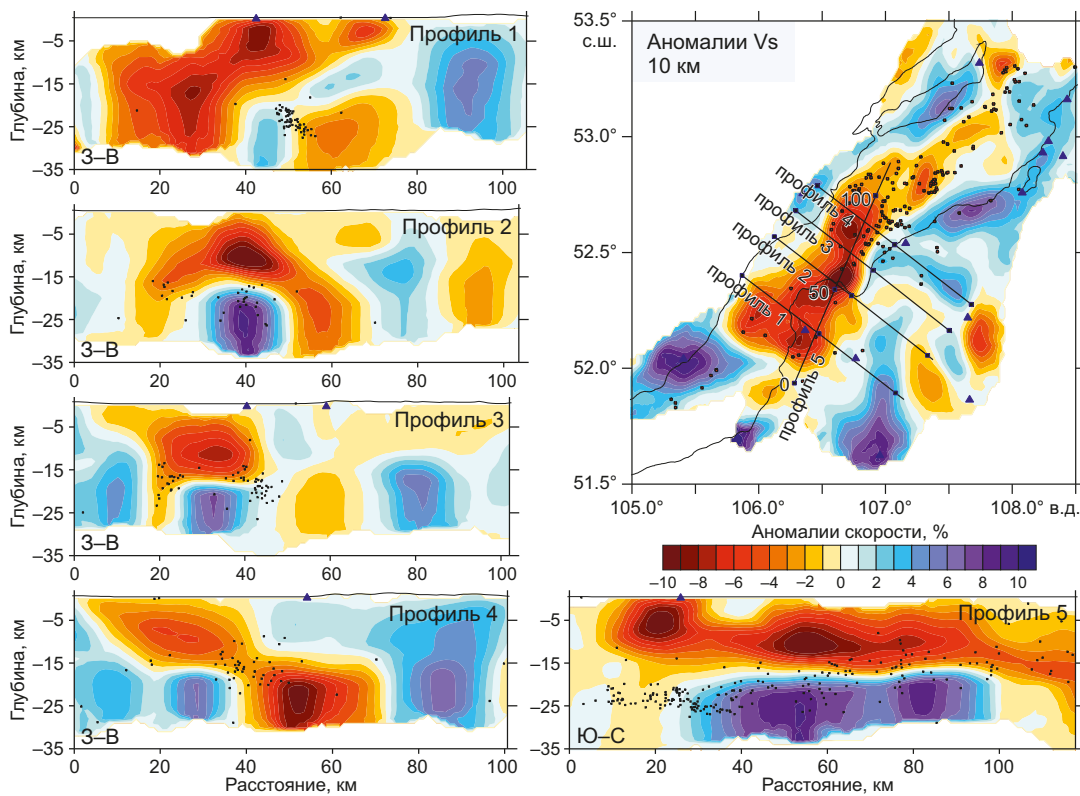
Horizontal sections at depths of 10 km (a, b) and 20 km (v, z); dots denote the events at corresponding depths; triangles denote seismic-station locations. The location of the profiles for constructing vertical sections is indicated in the fragment (b).





**Рис. 5.** Структура аномалий скоростей Р-волн по результатам томографической инверсии (вертикальные сечения). Точки – события вблизи сечения (полоса в 7 км); треугольники – сейсмические станции. Линии вертикальных сечений указаны на верхнем правом фрагменте.

**Fig. 5.** P-velocity anomalies from tomographic inversion (vertical sections). Dots denote the events near the section (within a 7-km layer); triangles denote seismic-station locations. Vertical section lines are shown in the upper right fragment.



**Рис. 6.** Структура аномалий скоростей S-волн по результатам томографической инверсии (вертикальные сечения).

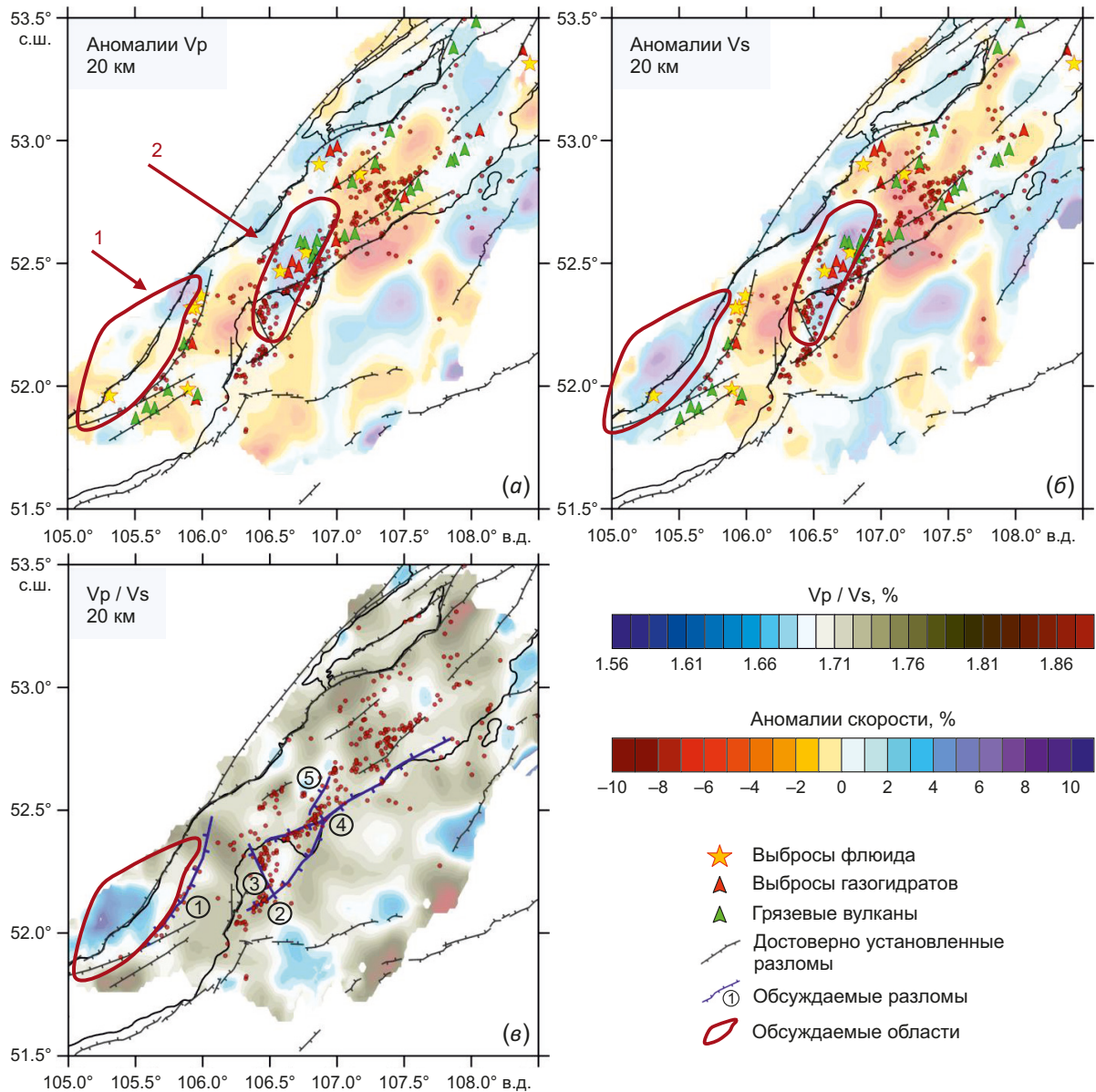
**Fig. 6.** S-velocity anomalies from tomographic inversion (vertical sections).

**5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

На рис. 7 проведено сопоставление полученных скоростных аномалий с достоверно установленными разломами [Lunina, 2016].

Аномальная область 1 отмечена на рис. 7 и расположена на северо-западе от дельты р. Селенги. По сейсмическим данным [Hutchinson et al., 1992] здесь находится опущенный блок акустического фундамента, достигающая мощности отложений около 7.5 км. С юго-востока данная область ограничена Байкало-Бугульдейским

разломом, который характеризуется сбросовой кинематикой [Lunina, 2016] и является активным, так как к нему приурочена и сейсмичность, и газогидратные структуры [Khlystov et al., 2016, 2018]. Разлом отделяет область 1 от соседнего низкоскоростного блока (по аномалиям скоростей S-волн), для которого характерна низкая сейсмичность (согласно данным регионального каталога за период 1960–2021 гг.). Также здесь находится Посольская банка. Новым результатом является то, что область характеризуется аномальным



**Рис. 7.** Интерпретация результатов томографической инверсии. Аномалии на глубине 20 км: Vp (а), Vs (б) и отношение Vp/Vs (в); точки – сейсмичность вблизи глубины 20 км. Линиями показаны достоверно установленные плиоцен-четвертичные разломы [Lunina, 2016]. Цифры в кружках соответствуют разломам: 1 – Байкало-Бугульдейский, 2 – Дельтовый, 3 – Фофановский, 4 – Сахалин-Энхалукский, 5 – без названия. Обсуждаемые аномальные области выделены красными контурами.

**Fig. 7.** Interpretation of the results of tomographic inversion. Vp (a) and Vs (b) anomalies and the Vp/Vs ratio (c) at a depth of 20 km; the dots stand for seismicity around 20-km depth. The lines show the reliably identified Pliocene-Quaternary faults [Lunina, 2016]. Numbers in circles correspond to the faults: 1 – Baikal-Buguldeika, 2 – Delta, 3 – Fofanov, 4 – Sakhalin-Enkhaluk, 5 – unnamed. The discussed regions are shown by red contours.

пониженным отношением  $V_p/V_s$  (1.56–1.65) в сравнении с окружающими породами (1.70–1.75) (рис. 7, в). Таким образом, можно заключить, что блоки по разные стороны от Байкало-Бугульдейского разлома не только смещаются друг относительно друга, но и различаются по вещественному составу.

Область 2 расположена к северо-востоку от пересечения Дельтового и Фофановского разломов, вытянута в сторону о-ва Ольхон (рис. 7). По результатам сейсмической томографии здесь выделяется высокоскоростной («жесткий») блок в земной коре на глубине около 20 км, который, вероятно, сложен породами, отличными от состава вмещающих пород.

На вертикальном разрезе по профилю 5 (см. рис. 5, 6) четко виден этот аномальный блок и распределение сейсмичности вокруг него. Он имеет размеры ~80–100 км в длину и ~20 км в ширину, залегает на глубине 15–35 км. Сейсмичность концентрируется в основном на границе между областями пониженных и повышенных скоростей сейсмических волн на глубине 15–20 км.

Анализ распределения сейсмичности (гипоцентров) показывает, что происходит сложный процесс взаимодействия этого блока с соседними структурами (рис. 7). Во-первых, сейсмичность «концентрируется» вдоль юго-восточного края жесткого блока. Здесь можно увидеть дуговую структуру, которая похожа на Байкало-Бугульдейский разлом. Она имеет субмеридиональное направление и формируется южной частью Дельтового разлома и разломом 5 на рис. 7, который продолжается в акваторию Байкала и также трассируется выходами газогидратов и подводных вулканов [Khlystov et al., 2018]. Здесь же находится Кукуйский каньон – самый длинный каньон на дне Байкала, имеющий сложный изломистый характер, который можно отчасти объяснить наличием сети разломов [Khlystov et al., 2016].

Не весь юго-восточный край высокоскоростного блока является сейсмически активным. Так, сейсмичность наблюдается только в южной части Дельтового разлома. Авторы это связывают со вторым процессом – Сахалин-Энхалукский разлом «прорезает» высокоскоростной блок в юго-западном направлении. Вдоль этой линии блок кажется расколотым – сейсмичность проходит уже не по краю, а прямо через него. Согласно работам [Solonenko, 1981; Lunina et al., 2009], вдоль этого разлома находятся многочисленные термальные источники. Наконец, сейсмичность также наблюдается по юго-западному краю блока вдоль Фофановского разлома.

Таким образом, можно говорить о сложном взаимодействии блоков земной коры в данной области, что, вероятно, является результатом наложения разных периодов развития Байкальского рифта [Mats, 2012]. Особенность обсуждаемого взаимодействия подчеркивается большой глубиной гипоцентров, приуроченных к Дельтовому и Фофановскому разломам (22–30 км), в то время как в остальной части изучаемой

области сейсмичность на данных глубинах практически отсутствует.

Выявленные авторами контрасты аномалий скоростей Р- и S-волн (срезы на глубине 20 км, см. на рис. 4) в целом могут свидетельствовать о заметном различии породного состава фундамента Байкальской котловины. Согласно геологическим исследованиям обрамление Байкала сложено породами разных возрастов. Например, на западном побережье в районе области 1 есть выходы архей-протерозойских мигматитов, кристаллических сланцев с перемежающимися областями неопротерозойских комплексов осадков. Восточный борт Байкала сложен в основном фанерозойскими породами. [State Geological Map..., 2009; Gvozdkov, 1998; Grudin, Chuvashova, 2011]. В районах дельты р. Селенги и о-ва Ольхон встречаются верхнемеловые – палеогеновые отложения озерного и аллювиального генезиса [Logachev, 1974; Mats, 2012, 2015]. Таким образом, разнообразие пород обрамления озера позволяет предположить, что фундамент Байкала имеет сложную разновозрастную блочную структуру. Это дает возможность интерпретировать выявленные контрасты аномалий скоростей сейсмических волн и их соотношение как разновозрастные блоки.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования методом сейсмической томографии было получено трехмерное распределение аномалий скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, а также проведено уточнение гипоцентров для района Центральной Байкальской котловины. Работа выполнена на основе сейсмологического каталога региональных событий, зарегистрированных в 2001–2011 гг. Набор данных обеспечивает покрытие лучами исследуемой области и обеспечивает надежное выделение аномалий с горизонтальными размерами, начиная от 30 км.

К северо-востоку от пересечения Дельтового и Фофановского разломов выделяется аномалия повышенных скоростей сейсмических волн, вытянутая в сторону о. Ольхон. Эта аномальная область интерпретируется как жесткий блок в земной коре. Размеры этого блока достигают 80–100 км в длину и около 20 км в ширину, глубина залегания – от 15 до 35 км. Этот блок «прорезает» Сахалин-Энхалукский разлом, что приводит к сложному взаимодействию блоков земной коры в данной области. Особенность взаимодействия подчеркивается большой глубиной гипоцентров, приуроченных к Дельтовому и Фофановскому разломам (22–30 км), тогда как в остальной части изучаемой области сейсмичность на данных глубинах практически отсутствует.

На юго-западе исследуемого района выделяется область повышенных скоростей S-волн. Аномально низкие значения отношения  $V_p/V_s$  свидетельствуют о том, что данная аномалия обозначает блок фундамента, который отличается вещественным составом от окружающих пород. Известно, что данный блок погружался, так

как над ним наблюдалось увеличение мощности донных отложений до 7.5 км. С юго-востока блок ограничен Байкало-Бугульдейским разломом, который, вероятно, разделяет блоки фундамента разных возрастов.

Таким образом, получены новые данные о блочном строении земной коры под Байкальской впадиной, которые могут быть дальше использованы для построения геологических и тектонических моделей Байкальского рифта.

### 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Тубанову Ц.А. за предоставленные данные, рекомендации по усовершенствованию исследования и конструктивные замечания.

### 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Обработка данных, интерпретация результатов, подготовка текста рукописи и графического материала – Епонешникова Л.Ю.; интерпретация результатов, доработка текста рукописи – Дучков А.А.; доработка текста рукописи и графического материала – Санжиева Д.П.-Д., Яскевич С.В. Все авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Data processing, results interpretation, manuscript and graphic preparation – Eponeshnikova L.Yu.; results interpretation, manuscript revision – Duchkov A.A.; manuscript and graphic revision – Sanzhieva D.P.-D., Yaskevich S.V. All authors read and approved the final manuscript.

### 9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

### 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Achauer U., Masson F., 2002. Seismic Tomography of Continental Rifts Revisited: From Relative to Absolute Heterogeneities. *Tectonophysics* 358 (1–4), 17–37. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00415-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00415-8).

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Lukhnev A.V., Sorokin A.P., Serov M.A., Byzov L.M., 2011. GPS Geodetic Constraints on the Kinematics of the Amurian Plate. *Russian Geology and Geophysics* 52 (2), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.017>.

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Serov M.A., Luk'yanov P.Y., Grib N.N., Bordonskii G.S., Dembelov M.G., 2016. Evaluation of Present-Day Deformations in the Amurian Plate and Its Surroundings, Based on GPS Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1626–1634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008>.

Burkholder P.D., Meyer R.P., Delitsin L.L., Davis P.M., Zorin Yu.A., 1995. A Teleseismic Tomography Image of the Upper Mantle beneath the Southern Baikal Rift Zone. In: *Proceeding of the XXI General Assembly of the International*

Union of Geodesy and Geophysics (July 2–14, 1995, Boulder, Colorado, USA). IUGG, 400 p.

Calais E., Vergnolle M., Sankov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Amarjargal S., Déverchère J., 2003. GPS Measurements of Crustal Deformation in the Baikal-Mongolia Area (1994–2002): Implications on Current Kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B10), 2501. <https://doi.org/10.1029/2002JB002373>.

Chemenda A., Déverchère J., Calais E., 2002. Three-Dimensional Laboratory Modelling of Rifting: Application to the Baikal Rift, Russia. *Tectonophysics* 356 (4), 253–273. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00389-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00389-X).

Déverchère J., Houdry F., Diament M., Solonenko N.V., Solonenko A.V., 1991. Evidence for a Seismogenic Upper Mantle and Lower Crust in the Baikal Rift. *Geophysical Research Letters* 18 (6), 1099–1102. <https://doi.org/10.1029/91GL00851>.

Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., Sankov V., 2001. Depth Distribution of Earthquakes in the Baikal Rift System and Its Implications for the Rheology of the Lithosphere. *Geophysical Journal International* 146 (3), 714–730. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.1484.484.x>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vasilevsky A.N., 2019. Geodynamic Complexes and Structures of Transbaikalia: Record in Gravity Data. *Russian Geology and Geophysics* 60 (3), 254–266. <https://doi.org/10.15372/RGG2019021>.

Duchkov A.D., Sokolova L.S., 2014. Heat Flow in Siberia. In: *Geophysical Methods for the Study of the Earth's Crust. Proceedings of the All-Russian Conference Dedicated to the 100<sup>th</sup> Anniversary of the Birth of Academician N.N. Puzyrev. Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk*, p. 211–216 (in Russian) [Дучков А.Д., Соколова Л.С. Тепловой поток Сибири // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (8–13 декабря 2014 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. С. 211–216].

Gao S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Rigor A.W., Zorin Y.A., Logatchev N.A., 1997. SKS Splitting beneath Continental Rift Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (B10), 22781–22797. <https://doi.org/10.1029/97JB01858>.

Gao S.S., Liu K.H., Davis P.M., Slack P.D., Zorin Y.A., Mor-dvinova V.V., Kozhevnikov V.M., 2003. Evidence for Small-Scale Mantle Convection in the Upper Mantle beneath the Baikal Rift Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B4), 2194. <https://doi.org/10.1029/2002JB002039>.

Gileva N.A., Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Déverchère J., 2000. Location of Earthquakes and Average Velocity Parameters of the Crust in Some Areas of the Baikal Region. *Russian Geology and Geophysics* 41 (5), 609–615.

Golenetsky S.I., Perevalova G.I., 1988. On the Use of Computers in Integrated Processing of the Data from Seismic Network in the Baikal Zone. In: *A Study on the Search for Earthquake Precursors in Siberia. Nauka, Novosibirsk*, p. 99–108 (in Russian) [Голенецкий С.И., Перевалова Г.И. Об

использовании ЭВМ при сводной обработке наблюдений локальной сети сейсмических станций в Байкальской зоне // Исследования по поискам предвестников землетрясений в Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. С. 99–108].

Golubev V.A., 2007. Conductive and Convective Heat Transfer in the Baikal Rift Zone. GEO, Novosibirsk, 222 p. (in Russian) [Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.].

Grudin M.I., Chuvashova I.S (Eds), 2011. Baikal. Geology. Human. ISU Publishing House, Irkutsk, 239 p. (in Russian) [Байкал. Геология. Человек // Ред. М.И. Грудинин, И.С. Чувашова. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 239 с.].

Gvozdkov A.N., 1998. Geochemistry of the Recent Bottom Sediments of Lake Baikal. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 209 p. (in Russian) [Гвоздков А.Н. Геохимия современных донных осадков озера Байкал: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1998. 209 с.].

Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Schol C.A., Klitgord K.D., 1992. Depositional and Tectonic Framework of the Rift Basins of Lake Baikal from Multi-channel Seismic Data. *Geology* 20 (7), 589–592. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2).

Khain V.E., Lomize M.G., 2005. Geotectonics with Fundamentals of Geodynamics. University Book House, Moscow, 500 p. (in Russian) [Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Книжный дом «Университет», 2005. 500 с.].

Khlystov O.M., Khabuev A.V., Minami H., Hachikubo A., Krylov A.A., 2018. Gas Hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 2018 (1), 66–70. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66>.

Khlystov O.M., Kononov E.E., Khabuev A.V., Belousov O.V., Gubin N.A., Solovyeva M.A., Naudts L., 2016. Geological and Geomorphological Characteristics of the Posolsky Bank and the Kukuy Griva, Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 57 (12), 1759–1767. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.11.001>.

Koulakov I., 2009. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99 (1), 194–214. <https://doi.org/10.1785/0120080013>.

Koulakov I., Tychkov S., Bushenkova N., Vasilevsky A., 2002. Structure and Dynamics of the Upper Mantle beneath the Alpine–Himalayan Orogenic Belt, from Teleseismic Tomography. *Tectonophysics* 358 (1–4), 77–96. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00418-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00418-3).

Krylov S.V., 1980. On Depths of the Baikal Earthquakes and Factors Controlling Seismicity. *Russian Geology and Geophysics* 5, 97–112 (in Russian) [Крылов С.В. О глубинах байкальских землетрясений и сейсмоконтролирующих факторах // Геология и геофизика. 1980. № 5. С. 97–112].

Kulakov I.Yu., 1999. Three-Dimensional Seismic Heterogeneities beneath the Baikal Region According to Data of

Local Teleseismic Tomography. *Russian Geology and Geophysics* 40 (3), 317–331 (in Russian) [Кулаков И.Ю. Трехмерные сейсмические неоднородности под Байкальским регионом по данным локальной и телесеismicческой томографии // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 317–331].

Kulakov I.Yu., 2008. Upper Mantle Structure beneath Southern Siberia and Mongolia, from Regional Seismic Tomography. *Russian Geology and Geophysics* 49 (3), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.016>.

Lesne O., Calais E., Deverchère J., Chéry J., Hassani R., 2000. Dynamics of Intracontinental Extension in the North Baikal Rift from Two-Dimensional Numerical Deformation Modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B9), 21727–21744. <https://doi.org/10.1029/2000JB900139>.

Levi K.G., Babushkin S.M., Badardinov A.A., Buddo V.Y., Larkin G.V., Miroshnichenko A.I., Colman S., 1995. Active Baikal Tectonics. *Russian Geology and Geophysics* 36 (10), 143–154.

Levi K.G., Miroshnichenko A.I., Sankov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D., 1997. Active Faults of the Baikal Depression. *Bulletin des Centres de Recherches Elf Exploration Production* 21 (2), 399–434.

Logachev N.A., 1974. The Sayan-Baikal and Stanovoe Highlands. In: N.A. Florensov (Ed.), *Highlands of Pribaikalie and Transbaikalia*. Nauka, Moscow, p. 16–162 (in Russian) [Логачев Н.А. Саяно-Байкальское становое нагорье // Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1974. С. 16–162].

Logatchev N.A., 1993. History and Geodynamics of the Lake Baikal Rift in the Context of the Eastern Siberia Rift System: A Review. *Bulletin des Centres de Recherches Elf Exploration Production* 17 (2), 353–370.

Logachev N.A., 1999. Main Structural Features and Geodynamics of the Baikal Rift Zone. *Physical Mesomechanics* 2 (1–2), 163–170 (in Russian) [Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1–2. С. 163–170].

Logachev N.A., 2001. On Historical Core of the Baikal Rift Zone. *Doklady Earth Sciences* 376 (4), 510–513 (in Russian) [Логачев Н.А. Об историческом ядре Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН. 2001. Т. 376. № 4. С. 510–513].

Logachev N.A., 2003. History and Geodynamic of the Baikal Rift. *Russian Geology and Geophysics* 44 (5), 391–406.

Logatchev N.A., Zorin Yu.A., 1987. Evidence and Causes of the Two-Stage Development of the Baikal Rift. *Tectonophysics* 143 (1–3), 225–234. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90092-8).

Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Sankov A.V., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Calais E., 2013. GPS-Measurements of Recent Crustal Deformation in the Junction Zone of the Rift Segments in the Central Baikal Rift System. *Russian Geology*

and Geophysics 54 (11), 1417–1426. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.010>.

Lunina O.V., 2016. The Digital Map of the Pliocene–Quaternary Crustal Faults in the Southern East Siberia and the Adjacent Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (3), 407–434 (in Russian) [Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>.

Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.S., 2012. The Tsagan Earthquake of 1862 on Lake Baikal Revisited: A Study of Secondary Coseismic Soft-Sediment Deformation. *Russian Geology and Geophysics* 53 (6), 594–610. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.04.007>.

Lunina O.V., Gladkov A.S., Nevedrova N.N., 2009. Rift Basins in Pribaikal'e: Tectonic Structure and Development History. *GEO, Novosibirsk*, 316 p. (in Russian) [Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Гео, 2009. 316 с.].

Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherstyankin P.P., 2010. A New Electronic Map of Active Faults for Southeastern Siberia. *Doklady Earth Sciences* 433, 1016–1021. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10080064>.

Mats V.D., 2012. The Sedimentary Fill of the Baikal Basin: Implications for Rifting Age and Geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 53 (9), 936–954. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.07.009>.

Mats V.D., 2015. The Baikal Rift: Pliocene (Miocene) – Quaternary Episode or Product of Extended Development since the Late Cretaceous under Various Tectonic Factors. A Review. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 467–490 (in Russian) [Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 467–490]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0190>.

Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Cenozoic Baikal Rift Basin: Its Structure and Geological History. *GEO, Novosibirsk*, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.].

Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Focal Mechanisms of the Earthquakes of the Baikal Region for 1991–1996. *Russian Geology and Geophysics* 39 (11), 1598–1607 (in Russian) [Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991–1996 гг. // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 1598–1607].

Misharina L.A., Melnikova V.I., Baljinnyam I., 1983. Southwestern Boundary of the Baikal Rift Zone from the Data on Earthquake Focal Mechanisms. *Volcanology and Seismology*

2, 74–83 (in Russian) [Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Балжинням И. Юго-западная граница Байкальской рифтовой зоны по данным о механизме очагов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1983. № 2. С. 74–83].

Misharina L.A., Solonenko N.V., 1972. On Stresses at Small Earthquake Sources in Pribaikal'ye. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth* 4, 24–36 (in Russian) [Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. О напряжениях в очагах слабых землетрясений Прибайкалья // Известия АН СССР. Физика Земли. 1972. № 4. С. 24–36].

Misharina L.A., Solonenko N.V., 1977. Earthquake Focal Mechanisms and Stressed State of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone. In: N.A. Logachev, N.A. Florensov (Eds), *A Role of Rifting in Geological History of the Earth*. Nauka, Novosibirsk, p. 120–125 (in Russian) [Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Механизм очагов землетрясений и напряженное состояние земной коры в Байкальской рифтовой зоне // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / Ред. Н.А. Логачев, Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 120–125].

Mordvinova V.V., Vinnik L.P., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Treusov A.V., 2000. Teleseismic Tomography of the Baikal Rift Lithosphere. *Doklady Earth Sciences* 372 (4), 716–720.

Nevedrova N.N., Epov M.I., 2004. Analysis of Electromagnetic Monitoring Results at Baikal Prognostic Test-Site. *NNC RK Bulletin* 2, 143–149 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Анализ результатов электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // Вестник НЯЦ РК. 2004. № 2. С. 143–149].

Nicolas A., Achauer U., Daignieres M., 1994. Rift Initiation by Lithospheric Rupture. *Earth and Planetary Science Letters* 123 (1–3), 281–298. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90274-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90274-7).

Nolet G. (Ed.), 1990. *Seismic Tomography. With Applications in Global Seismology and Explorational Geophysics*. Mir, Moscow, 416 p. (in Russian) [Сейсмическая томография: с приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике / Ред. Г. Нолет. М.: Мир, 1990. 416 с.].

Peltzer G., Tapponnier P., 1988. Formation and Evolution of Strike-Slip Faults, Rifts, and Basins during the India-Asia Collision: An Experimental Approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93 (B12), 15085–15117. <https://doi.org/10.1029/JB093iB12p15085>.

Petit C., Koulakov I., Deverchère J., 1998. Velocity Structure around the Baikal Rift Zone from Teleseismic and Local Earthquake Traveltimes and Geodynamic Implications. *Tectonophysics* 296 (1–2), 125–144. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00140-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00140-1).

Radziminovich N.A., 2010. Focal Depths of Earthquakes in the Baikal Region: A Review. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46, 216–229. <https://doi.org/10.1134/S1069351310030043>.

Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Ashurkov S.V., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Calais E., Déverchère J., Vergnolle M., Bechtur B., Amarjargal Ch., 2003. Present-Day Movements of the Earth's Crust in the

Mongol-Siberian Region Inferred from GPS Geodetic Data. Reports of the Academy of Sciences 393 (8), 1082–1085.

Scholz C.A., Hutchinson D.R., 2000. Stratigraphic and Structural Evolution of the Selenga Delta Accommodation Zone, Lake Baikal Rift, Siberia. *International Journal of Earth Sciences* 89, 212–228. <https://doi.org/10.1007/s00531000095>.

Shchetnikov A.A., Radziminovich Y.B., Vologina E.G., Ufimtsev G.F., 2012. The Formation of Proval Bay as an Episode in the Development of the Baikal Rift Basin: A Case Study. *Geomorphology* 177–178, 1–16. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.023>.

Sherman S.I., Levi K.G., 1977. Transform Faults of the Baikal Rift Zone. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 233 (2), 461–464 (in Russian) [Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 2. С. 461–464].

Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A., 2012. A Tectonophysical Model of the Baikal Seismic Zone: Testing and Implications for Medium-Term Earthquake Prediction. *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.003>.

Solonenko V.P. (Ed.), 1981. *Seismogeology and Detailed Seismic Zoning of Pribaikalye*. Nauka, Novosibirsk, 168 p. (in Russian) [Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1981. 168 с.].

Song Y., Krylov S.V., Yang B., Cai L., Dong S., Liang T., Li J., Xu X., Mishenkina Z.R., Petrik G.V., Shelud'ko I.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., 1996. Deep Seismic Sounding of the Lithosphere on the Baikal – Northeastern China International Transect. *Russian Geology and Geophysics* 37 (2), 3–15 (in Russian) [Сун Юншен, Крылов С.В., Ян Баоцзюнь, Лю Цай, Дун Шисюэ, Лян Течен, Ли Цзинчжи, Сюй Синчжуи, Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на международном трансекте Байкал – Северо-Восточный Китай // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 2. С. 3–15].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet N-48 (Irkutsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House,

Saint Petersburg, 574 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангара-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист N-48 (Иркутск): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 574 с.].

Suvorov V.D., Mishen'kina Z.R., 2005. Structure of Sedimentary Cover and Basement beneath the South Basin of Lake Baikal Inferred from Seismic Profiling. *Russian Geology and Geophysics* 46 (11), 1141–1149.

Suvorov V.D., Tubanov T.A., 2008. Distribution of Local Earthquakes in the Crust beneath Central Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 49 (8), 611–620. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.019>.

Ten Brink U.S., Taylor M.H., 2002. Crustal Structure of Central Lake Baikal: Insights into Intracontinental Rifting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B7), 2132. <https://doi.org/10.1029/2001JB000300>.

Tiberi C., Diament M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U., 2003. Deep Structure of the Baikal Rift Zone Revealed by Joint Inversion of Gravity and Seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B3), 2133. <http://doi.org/10.1029/2002jb001880>.

Yakovlev A.V., Koulakov I.Yu., Tychkov S.A., 2007. Moho Depths and Three-Dimensional Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle beneath the Baikal Region, from Local Tomography. *Russian Geology and Geophysics* 48 (2), 204–220. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.005>.

Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S.S., 2006. Deep Structure and Origin of the Baikal Rift Zone. *Earth and Planetary Science Letters* 243 (3–4), 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.033>.

Zonenshain L.P., Savostin L.A., 1981. Geodynamics of the Baikal Rift Zone and Plate Tectonics of Asia. *Tectonophysics* 76 (1–2), 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1).

Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., 2005. Plumes and Geodynamics of the Baikal Rift Zone. *Russian Geology and Geophysics* 46 (7), 685–699 (in Russian) [Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 7. С. 685–699].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

## СИНТЕТИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ

Для проверки достоверности результатов инверсии экспериментальных данных был проведен ряд синтетических тестов.

Для проверки разрешающей способности проводился тест «шахматная доска». Он заключается в следующем: строится синтетическая модель, которая состоит из чередующихся положительных и отрицательных скоростных аномалий заданного размера (напоминает шахматную доску). Для этой модели решается прямая задача (расчет времени пробега сейсмических волн) для распределения сейсмичности и положения станций из исследуемого каталога. Потом для рассчитанного времени решается обратная задача томографической инверсии.

Для выявления горизонтального разрешения был выполнен ряд тестов «шахматной доски» с различными размерами аномалий и амплитудой аномалий  $\pm 5\%$ . На рис. 1.1, приведены результаты для размера аномалий  $30 \times 30$  км. Видно, что амплитуда и форма аномалий такого размера восстанавливаются до глубины 20 км во всей области, где проводится инверсия. Аналогичный тест для аномалий меньшего размера ( $25 \times 25$  км) показал, что аномалии начинают расплываться с увеличением глубины. По результатам тестирования сделан

вывод о возможности достоверно определять аномалии с горизонтальными размерами 30 км и более до глубины 20 км. Для исследования разрешения по вертикали было использовано задание модели вдоль вертикальных участков с чередующимися аномалиями амплитудой  $\pm 10\%$ , шириной 30 км и со сменой знака аномалий на глубине 15 км. Аномалии таких размеров и контрастный переход со сменой знака на глубине были также восстановлены.

Синтетические тесты позволяют подобрать оптимальные регуляризирующие параметры для проведения инверсии. Устойчивое решение (отсутствие лишних аномалий) достигается при следующих значениях параметров: сглаживание по горизонтали и вертикали (1.0 для Р-волн, 2.0 для S-волн), амплитудное демпфирование (0.6 для Р-волн, 1.0 для S-волн).

Для оценки надежности выделения аномалий и влияния случайных шумов на результаты томографии был проведен тест с четными и нечетными номерами источников. Для этого исходный каталог делится на две выборки (с четными и нечетными номерами источников), и инверсия проводится для двух независимых выборок отдельно. По результатам данного теста можно отметить корреляцию в выделении аномалий.



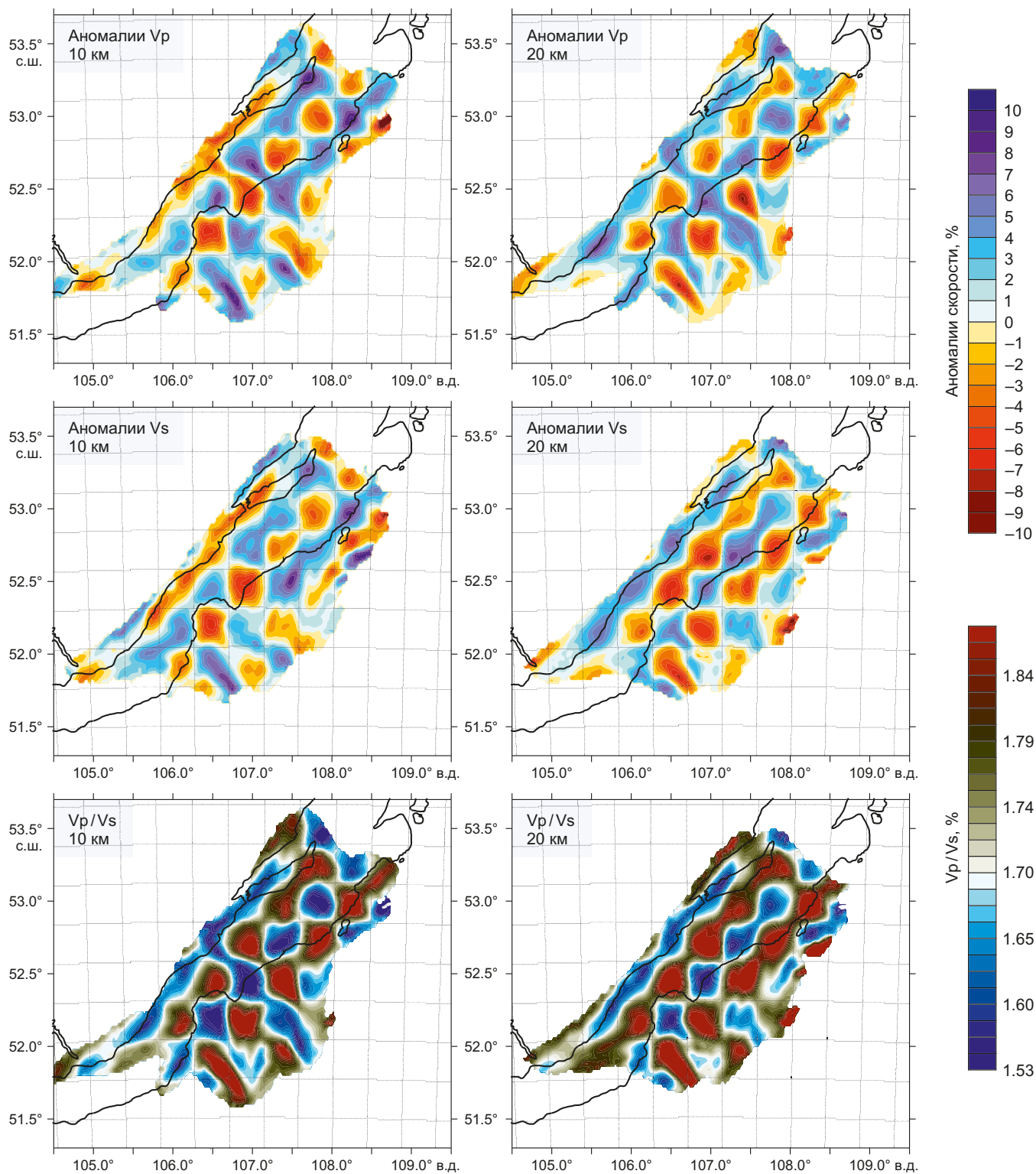


Рис. 1.1. Результат восстановления синтетических аномалий размера 30×30 км для исследуемой области на глубинах 10 и 20 км.

Fig. 1.1. The result of reconstructing synthetic anomalies of size 30×30 km for the study area at depths of 10 and 20 km.