

*А. В. Беляшов<sup>1\*</sup>*

## **Скоростная модель Центрального Байкала по данным Кударинского землетрясения**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Представлены результаты уточненной гипоцентрии событий Кударинского землетрясения – главного толчка и порядка 70 афтершоков. Наибольшее число событий локализовано в интервале глубин от 20 до 25 км. Пространственное распределение афтершоков позволяет уточнить существующую схему тектонических структур. По данным Р волн определены трехмерные скоростные характеристики в пределах изучаемого блока земной коры до глубины порядка 30 км. Выделена область пониженных до 3.0 - 4.0 км/с значений скорости с мощностью до 9 - 12 км в районе дельты р. Селенги. Отмечено блоковое строение исследуемой среды.

**Ключевые слова:** Центральный Байкал, локализация гипоцентров, 3D скоростная модель

*A. V. Belyashov<sup>1\*</sup>*

## **Central Baykal Velocity Model Basing On the Kudarinsky Earthquake Data**

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** Results of the Kudarinsky earthquake events (the main impact and about 70 aftershocks) improved localization are presented. The largest number of the events have been localized in the depth interval from 20 to 25 km. Aftershocks spatial distribution allows to update existing map of the tectonic faults. Basing on the P waves data 3D velocity features within the studied earth crust block to the depth up to 30 km are defined. Area with decreased up to 3.0 - 4.0 km/s velocity and 9-12 km thickness revealed in the Selenga river delta region. Block structure of the investigated media is observed.

**Keywords:** earthquake location, Central Baykal, 3D velocity model

### ***Введение***

Несмотря на многолетний интерес исследователей к району Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и ее активное изучение, объем детальной информации о пространственном распределении скоростных свойств, особенно в пределах Центрального Байкала, остается недостаточным. Основные результаты сейсмической изученности БРЗ можно свести к следующему:

- одномерные скоростные модели и двумерные разрезы, полученные, в основном, с помощью глубинного сейсмического зондирования [1 - 10];
- региональные трехмерные скоростные модели [11 - 15];
- малочисленные детальные трехмерные скоростные модели для Центрального Байкала [16].

Таким образом, задача уточнения и детализации трехмерной скоростной модели БРЗ сохраняет свою актуальность.

Кроме того, остается проблема неединственности решения, когда при использовании разных методических подходов в обработке сейсмических данных получаются разные результирующие модели. Соответственно, важными становятся разработка и применение альтернативных обоснованных способов построения скоростного разреза.

Работа выполнена с использованием данных Кударинского землетрясения, полученных на УНУ «Сейсмоинфраструктурный комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

### *Локализация событий Кударинского землетрясения*

С использованием методического подхода, описанного в [17], определено положение гипоцентров событий Кударинского землетрясения, произошедшего в декабре 2020 года [18]. На основании анализа исходных записей из более чем 200 афтершоков, было отобрано порядка 70 событий, пригодных для дальнейшей обработки. Критериями отбора служили: количество зарегистрировавших событие станций (не менее 6 станций на эпицентральных удалениях не более 110 км), качество сигнала Р и S волн на исходных записях. Результирующая ошибка гипоцентрии составила до 1.5 км по глубине и до 2 км по эпицентрии.

На рис. 1 представлены результаты локализации событий Кударинского землетрясения в плане. Главный толчок локализован на северной границе дельты р. Селенги. Эпицентры афтершоков выстроены в северо-восточном направлении вдоль оси зоны современной деструкции литосферы [19], при этом основная их часть сконцентрирована вблизи северо-западной границы Селенгинской дельты.

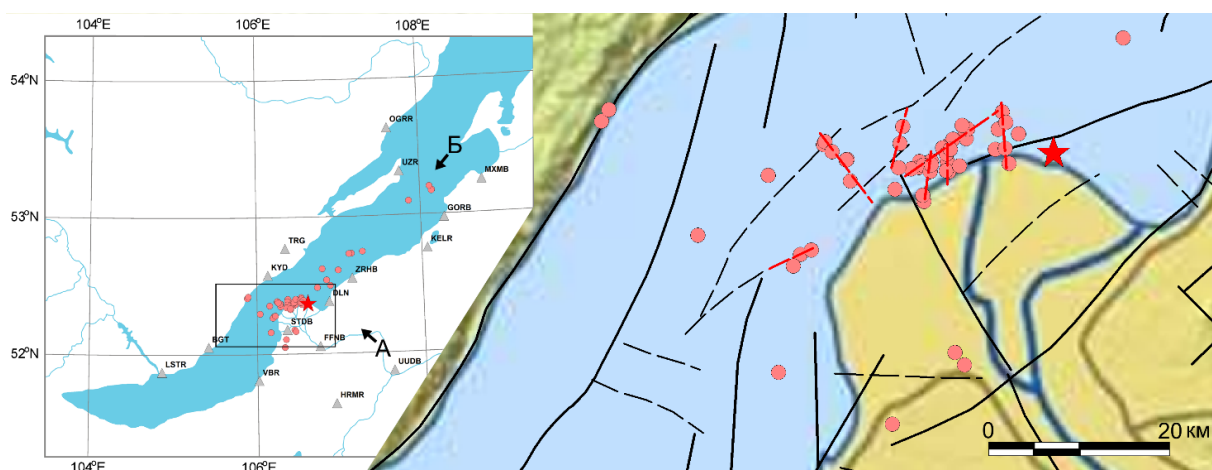


Рис. 1. Результаты гипоцентрии событий Кударинского землетрясения. На вставке представлен общий вид: красная звезда – главный толчок, кружки – эпицентры, серые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием.

На увеличенном фрагменте: черные линии – разломы по [20] (сплошные – достоверные, пунктирные – предполагаемые), красный пунктир – предлагаемые в данной работе разломы

На увеличенный фрагмент рис. 1 вынесена схема локальных разломов (черные линии) по [20]: сплошные линии – достоверные, пунктирные – предполагаемые. Небольшая часть событий контролируется существующими тектоническими структурами. Так, например, главный толчок с несколькими афтершоками локализован в зоне действия Сахалин-Энхалуковского разлома. Большая же часть эпицентров лежит в локальной области, ранее не отмеченной никакими тектоническими проявлениями. При этом сформированная эпицентрами афтершоков структура позволяет обозначить возможные элементы локальной тектоники (отмечены на рис. 1 красным пунктиром).

На рис. 2 показано рассредоточение событий по вертикали в плоскости срезов с позиций А и Б (см. вставку на рис. 1). На схемы красным пунктиром нанесены предполагаемые разломы. В соответствии с видом вдоль оси разломообразования (с позиции Б) развитие гипоцентров происходит по двум основным линиям – вертикальной вблизи очага главного толчка и дугообразной (к западу от первой). С позиции вкрест плоскости оси разломообразования (вид А) афтершоки в основном группируются ниже главного толчка к юго-западу от него, при этом здесь также проявляются некоторые линейные структуры, образованные, вероятно, секущими разломами. Возможно, в данном случае наблюдается приуроченность активных зон афтершоков к узлам с пересечениями разломов [21].

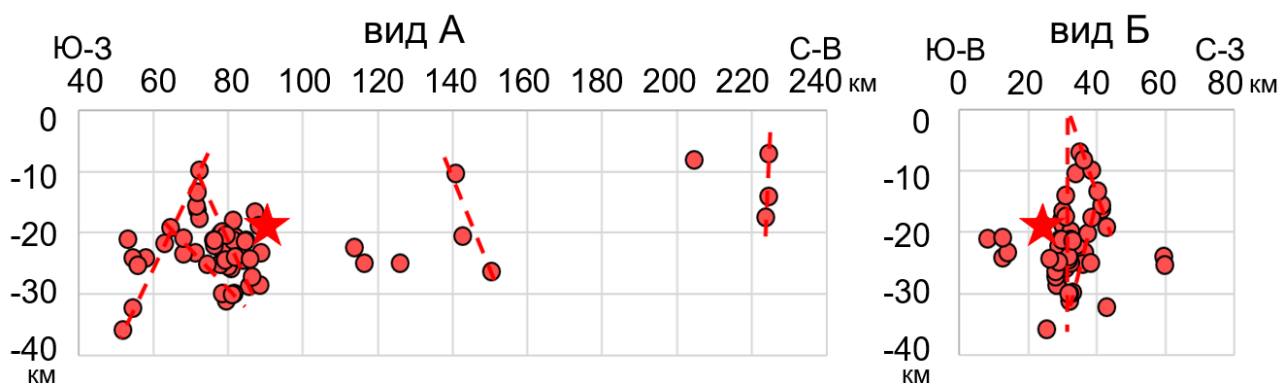


Рис. 2. Вертикальные глубинные срезы с позиций А и Б (условные обозначения см. на рис. 1)

Согласно глубинному распределению гипоцентров (рис. 3), основная часть афтершоков (32 события) локализована в интервале от 20 до 25 км. Обоснование такого распределения событий по глубине в сопоставлении с оценками других авторов также приведено в статье [17].

### ***Скоростные характеристики Центрального Байкала (по данным Р волн)***

Одним из входных расчетных параметров в программе локализации Nuro-ellipse является коэффициент  $V_p/V_s$ , извлекаемый из графиков Вадати по каждому событию [17]. Оценка зависимости значений  $V_p/V_s$  от глубины очага (рис. 4) демонстрирует устойчивую обратную корреляцию ( $R^2=0.77$ ) – с увеличением глубины от 7 до 32 км коэффициент  $V_p/V_s$  снижается с 1.8 до 1.68.

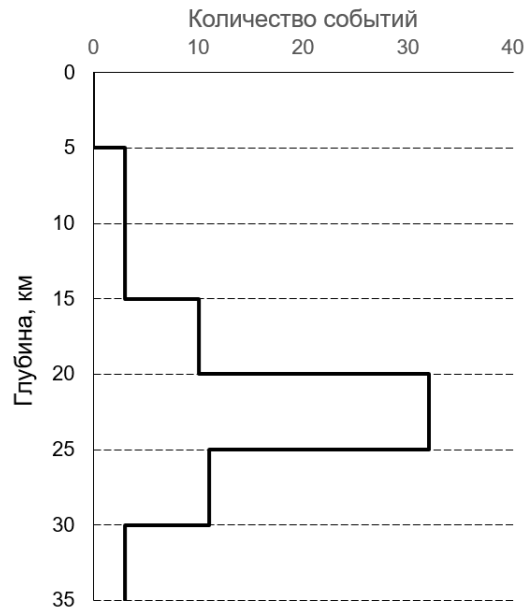


Рис. 3. Глубинное распределение событий Кударинского землетрясения

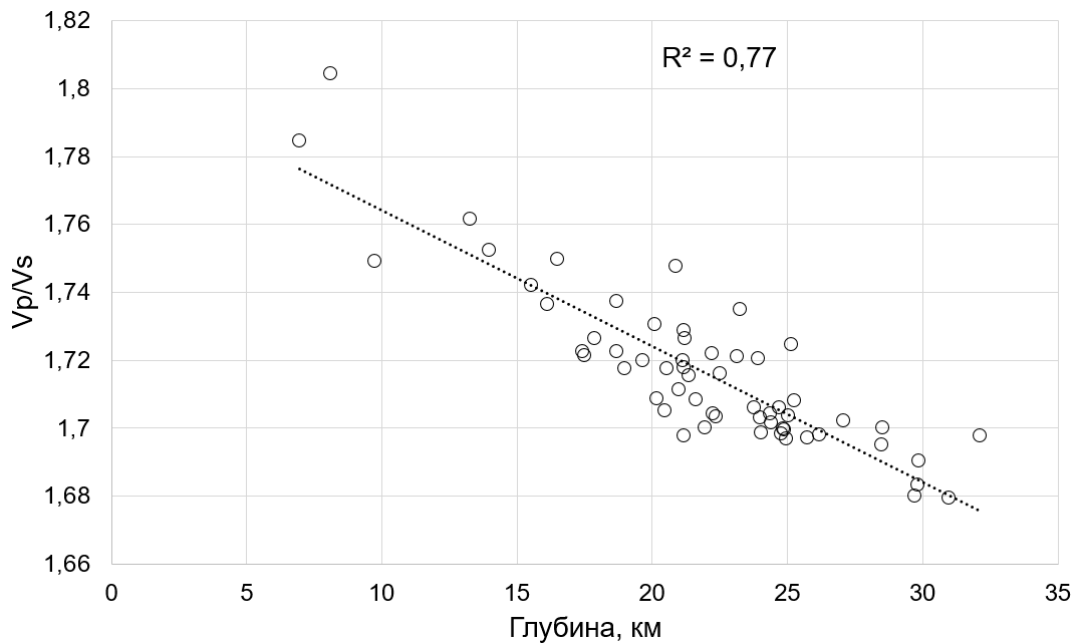


Рис. 4. График зависимости значений  $V_p/V_s$  событий Кударинского землетрясения от глубины очага

Такая закономерность соответствует общим представлениям о поведении параметров  $V_p/V_s$  и коэффициента Пуассона в зависимости от физических свойств среды – эти параметры, как правило, снижаются при переходе от разуплотненных пластичных осадочных отложений к консолидированным хрупким породам фундамента [22].

Пространственные скоростные свойства блока земной коры в районе Центрального Байкала определялись в программе Nupoellipse в ходе локализации ги-

поцентов. В расчетах использовалась многокомпонентная скоростная модель, состоящая из набора 1D моделей, отдельных и независимых для каждой из регистрирующих сейсмических станций [17]. Окончательное решение по локализации определялось путем итерационной корректировки этих моделей, в результате для каждого из событий получена информация о скорости (с точностью 0.1 км/с) от очага по направлению на станции.

Исследуемый блок земной коры размером 260x240x40 км был разбит на ячейки 3x3x3 км, для всех событий рассчитаны лучевые траектории, пересекаемым ячейкам присвоены соответствующие значения скорости. При этом необходимо учитывать ограниченность используемой системы наблюдений – для самой верхней части разреза скоростную информацию можно получить только для участков расположения сейсмических станций. Область достоверных данных, обеспеченных относительно плотной сетью сейсмических лучей, начинается с глубины порядка 6 км.

На рис. 5 представлены горизонтальные срезы в значениях скорости Р волн для интервалов глубин 6-9, 15-18 и 21-24 км, а также вертикальный разрез вдоль линии А-В (ее положение показано на срезе глубины 6-9 км).

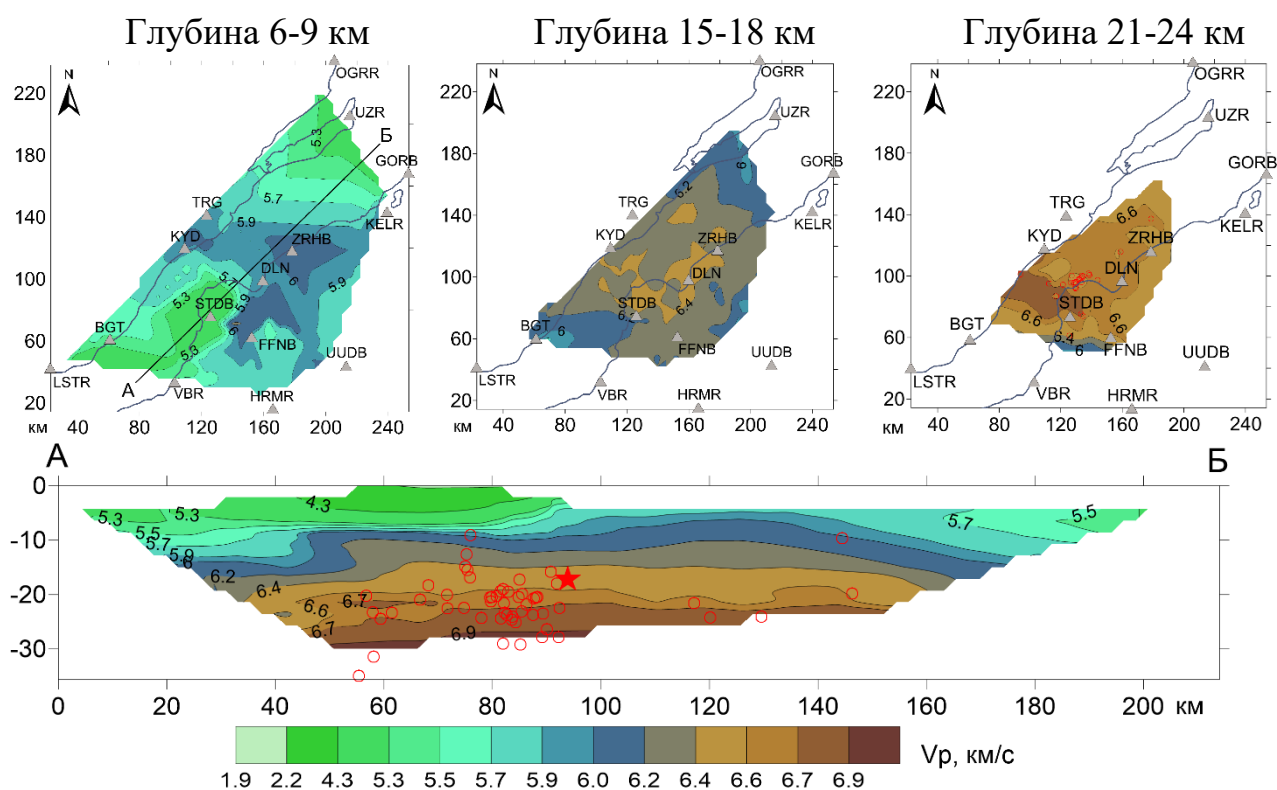


Рис. 5. Результаты определения скоростных свойств блока земной коры Центрального Байкала (сверху – горизонтальные срезы на разной глубине, снизу – вертикальный разрез по линии А-Б)

На всех срезах отмечается блоковая структура, имеющая, в основном, северо-восточное простирание, с чередованием областей повышенных и пониженных значений скорости.

На срезе для интервала глубин 6-9 км в юго-западной части проявлена область со скоростью 5.3 км/с, предположительно приуроченная к докайнозойским породам и прослеживаемая от дельты р. Селенги в сторону Южной котловины оз. Байкал [4, 9]. В центральной части скорость увеличивается до 5.9-6.0 км/с, что связано с выходом на глубине порядка 8 км кровли кристаллического фундамента [8].

На вертикальном разрезе (рис. 5 внизу) область в начале профиля протяженностью порядка 100 км со скоростью от 2.2 до 5.3 км/с относится к осадочным неоген-четвертичным и докайнозойским отложениям Южной котловины оз. Байкал и дельты р. Селенги. Мощность данной области увеличивается в сторону Южной котловины до 12-14 км. Скорость на кровле кристаллического фундамента составляет 5.8-6.2 км/с, увеличиваясь на глубине 30 км до 6.8-6.9 км/с. Эти данные хорошо согласуются с результатами детальных сейсмических исследований [4, 9].

На срез для глубины 21 км и на вертикальный разрез вынесено положение гипоцентров событий Кударинского землетрясения, при этом обнаружить какой-либо устойчивой корреляции между распределением очагов и скоростной структурой пока не удалось.

### ***Заключение***

Представленные результаты нужно рассматривать как предварительные, поскольку задействованы данные только по скорости Р волн. Планируется подключение данных по S волнам с определением пространственного распределения физических параметров среды ( $V_p/V_s$ , коэффициент Пуассона).

Также, учитывая, что афтершоки Кударинского землетрясения в основном сконцентрированы в ограниченном объеме геологической среды, построить детальную и полноценную 3D скоростную модель по этим данным невозможно. Соответственно, планируется дальнейшая доработка и уточнение полученной модели с подключением других землетрясений, распределенных по участку исследований.

Таким образом, практическая значимость работы лежит в методической плоскости – с использованием данных конкретного сейсмического события разработан и опробован методический подход по уточненной локализации гипоцентров с определением скоростных свойств среды.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

Особая благодарность за помощь в работе с исходными данными сотрудникам Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Krupskaya G.V. and Petrick G.V. Deep seismic investigations in the Baikal rift zone // *The Structure of the Earth's Crust, based on Seismic Data. Tectonophysics.* – 1973. – Vol. 20 (1-4). – P. 85-95.
2. Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Petrick G.V. and Krupskaya G.V. Deep structure of the Baikal and other continental rift zones from seismic data // *Geodynamics of the Baikal Rift Zone. Tectonophysics.* – 1978. – Vol. 45. – P. 15-22.
3. Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П. и др. Недр Байкала (по сейсмическим данным). – Новосибирск: Наука, 1981. – 105 с.
4. Крылов С. В., Селезнев В. С., Соловьев В. М., Петрик Г. В., Шелудько И. Ф. Изучение Байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах // *Доклады РАН.* – 1995. – т. 345. – №5. – С. 674-677.
5. 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.
6. Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Земная кора и ее изостатическое состояние в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных территориях по данным ГСЗ // *Геология и геофизика.* – 1999. – т. 40. – №3. – С. 304-316.
7. Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Треусов А.В. Телесеismicкая томография литосферы Байкальского рифта // *Доклады Академии наук.* – 2000. – т. 372. – №2. – С.248-252.
8. Brink U. and Taylor M. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // *Journal of Geophysical Research.* – 2002. – Vol. 107. – No. B7. – P. 1-15.
9. Суворов В.Д., Мишенькина З.Р. Структура осадочных отложений и фундамента под южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // *Геология и геофизика.* – 2005. – т. 46. – №11. – С. 1159-1167.
10. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics.* – 2009. – No. 470. – P. 298-318.
11. Petit C., Deverchere J. Velocity structure of the northern Baikal rift, Siberia, from local and regional earthquake travel times // *Geophysical Research Letters.* – 1995. – Vol. 2. – No. 13. – P. 1677-1680.
12. Petit C., Koulakov I, Deverchere J. Velocity structure around the Baikal rift zone from teleseismic and local earthquake traveltimes and geodynamic implications // *Tectonophysics.* – 1998. – 296. – P. 125-144.
13. Кулаков И.Ю. Трехмерные сейсмические неоднородности под Байкальским регионом по данным локальной и телесеismicкой томографии // *Геология и геофизика.* – 1999. – т. 40. – № 3. – С. 317-331.
14. Яковлев А.В., Кулаков И.Ю., Тычков С.А. Глубина Мохо и трехмерная структура сейсмических аномалий земной коры и верхов мантии в Байкальском регионе по данным локальной томографии // *Геология и геофизика.* – 2007. – т. 48. – № 2. – С. 261-282.
15. Мордвинова В.В., Артемьев А.А. Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по обменным волнам // *Геология и геофизика.* – 2010. – т. 51. – № 6. – С. 887-904.
16. Епонешникова Л.Ю., Дучков А.А., Санжиева Д.П.-Д., Яскевич С.В. Трехмерная скоростная структура земной коры центральной части озера Байкал по данным локальной сейсмической томографии // *Геодинамика и тектонофизика.* – 2023. – т. 14. – № 1. – С. 1-17.
17. Беляшов А.В., Предеин П.А. Методические аспекты локализации коровых землетрясений в центральной части озера Байкал на примере Кударинского события // *Геофизика.* – 2022. – № 6. – С. 16-22.

18. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (mw = 5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2021. – т. 48. – №4. – С. 32-47.
19. Шерман С.И., Лысак С.В., Горбунова Е.А. Тектонофизическая модель Байкальской сейсмической зоны, ее тестирование и возможности среднесрочного прогноза землетрясений // Геология и геофизика. – 2012. – т. 53. – № 4. – С. 508-526.
20. 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.
21. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Устойчивые структуры афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. // Геология и геофизика. – 2022. – т. 63. – № 1. – С. 87-101.
22. Wang, X.-Q., Schubnel A., Fortin J., David E.C., Gueguen Y., Ge H.-K. High VP/VS ratio: Saturated cracks or anisotropy effects? // Geophysical Research Letters. – 2012. – Vol. 39. – P. 1-6.

© А. В. Беляшов, 2023