GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2017 VOLUME 8 ISSUE 4 PAGES 849–861 ISSN 2078-502X

https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0320

Recent Geodynamics

ASSESSMENT OF THE LOCALIZATION OF HYPOCENTERS OF CRUSTAL EARTHQUAKES RELATIVE TO THE DEPTH AND RELIEF OF THE BORDER DENSITY STRATIFICATION IN THE CRUST OF THE NORTHEASTERN SECTION OF THE REFERENCE GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL PROFILE 3-DV

N. K. Gayday[1, 2]

[1] *North-Eastern State University, Magadan, Russia*
[2] *N.A. Shilo North-Eastern Complex Scientific Research Institute, Far East Branch of RAS, Magadan, Russia*

Abstract: The total length of the seismic profiles in the northeastern regions of Russia and, accordingly, the area of the territories covered by the seismic data interpretations, remains insignificant in comparison with the total area of these regions. At the same time, the geological objects in the northeastern regions attract much attention in view of their prospects, including potential mineral resources. The challenge is to construct the regional models of the crust structure without deep seismic survey data, and to analyze the regional seismicity that depends on the features of the deep crust structure. We develop a density model of the crust structure using the new interpretational gravimetry method. The density modeling results show that the density changes in the crust can be used to estimate the position of a surface separating the lower (quasi-homogeneous) and upper (heterogeneous) parts of the crust, i.e. to assess the density boundary of stratification. This boundary is formed due to a complex of physical and chemical processes that facilitate the transition of the material in the lower part of the crust into the quasi-uniform (homogeneous) state. The study area is the junction zone of the Ayan-Yuryakh anticlinorium and Inyali-Debin synclinorium (62–63°N, 148–152° E). The initial interpretation of the deep seismic survey data on the reference geological-geophysical profile 3-DV was available, so the ambiguity of the density modeling was reduced. In turn, the density modeling results can provide additional information for geological-geophysical interpretation of the DSS results on the sites wherein the seismic profiles go along the fault zones. The relationship between seismic events and the relief of the density boundary of stratification in the crust was studied quantitatively on the basis of the data from the regional catalog of seismic events and the results of the earlier analysis of seismicity in the study area. The analysis shows that 74 % hypocenters are located above the density boundary of stratification. The earthquake hypocenters located at depths ranging from 20 to 35 km are usually confined to the systems of long-living regional crustal faults and occur below the density boundary of stratification. The energy class of such earthquakes does not exceed 9. In the study area, the seismically active zones are mainly confined to the areas of subduction of the density boundary of stratification. Most of the earthquake epicenters (80 %) occur in the zones where the gradient of the relief change of the density boundary does not exceed 1. The number of recorded seismic events practically reduces to zero in the regions where the dip angle of the density boundary exceeds 65°.

Key words: deep structure; density model; new interpretational gravimetry; density boundary of stratification; earthquake; hypocenter; reference profile 3-DV

RESEARCH ARTICLE

Recommended by V.S. Imaev

Received: January 17, 2017
Revised: August 25, 2017
Accepted: September 14, 2017

For citation: *Gayday N.K.*, 2017. Assessment of the localization of hypocenters of crustal earthquakes relative to the depth and relief of the border density stratification in the crust of the northeastern section of the reference geological-geophysical profile 3-DV. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 849–861. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0320.

Для цитирования: *Гайдай Н.К.* Оценка локализации гипоцентров коровых землетрясений относительно глубины и рельефа плотностной границы расслоения в земной коре северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 849–861. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0320.

Оценка локализации гипоцентров коровых землетрясений относительно глубины и рельефа плотностной границы расслоения в земной коре северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ

Н. К. Гайдай[1, 2]

[1] *Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия*
[2] *Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия*

Аннотация: Протяженность сейсмических профилей, пройденных по территории северо-востока России, а соответственно площадь территорий, для которых имеются результаты интерпретации сейсмических наблюдений, остаются незначительными в сравнении с ее общей площадью. В то же время геологические объекты северо-востока вызывают большой интерес в связи с их перспективами, в том числе и на полезные ископаемые. Построение региональных моделей структуры земной коры без использования данных глубинных сейсмических исследований и анализ сейсмичности территории, определяемой особенностями глубинного строения, являются актуальной задачей. Для построения плотностной модели структуры земной коры в работе использованы методы новой интерпретационной гравиметрии. Результаты плотностного моделирования показывают, что по характеру изменения плотности в земной коре можно выделить поверхность, разделяющую ее нижнюю (квазиоднородную) часть и верхнюю (гетерогенную) область, – плотностную границу расслоения. Причиной образования данной границы следует считать комплекс физико-химических процессов, способствовавших переводу вещества нижней части земной коры в квазиоднородное (гомогенное) состояние. Объектом исследования выступила земная кора зоны сочленения Аян-Юряхского антиклинория и Иньяли-Дебинского синклинория в пределах координат 62–63° с.ш. и 148–152° в.д. Наличие первичных данных по интерпретации результатов глубинных сейсмических исследований опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ позволило минимизировать неоднозначность плотностного моделирования. В свою очередь, результаты плотностного моделирования могут быть использованы как дополнительный материал для геолого-геофизической интерпретации результатов ГСЗ на участках, где сейсмический профиль проходит вдоль зон разломов. Содержание регионального каталога сейсмических событий и результаты проведенного ранее анализа сейсмичности территории позволили провести анализ их связи с рельефом плотностной границы расслоения в земной коре на количественной основе. Установлено, что 74 % гипоцентров располагаются выше плотностной границы расслоения. Гипоцентры землетрясений, расположенные в интервале глубин от 20 до 35 км, как правило, приурочены к системам долгоживущих сквозькоровых региональных разломов, при этом они локализованы в области, расположенной ниже плотностной границы расслоения. Их энергетический класс не превышает 9. Для данной территории зоны повышенной сейсмической активности в основном приурочены к областям погружения плотностной границы расслоения в земной коре. Эпицентры землетрясений преимущественно локализованы в зонах, где градиент изменения рельефа плотностной границы расслоения не превышает значения 1 (80 % гипоцентров землетрясений). В областях, где угол падения плотностной границы расслоения превышает 65°, количество зарегистрированных сейсмических событий практически сводится к нулю.

Ключевые слова: глубинное строение; плотностная модель; новая интерпретационная гравиметрия; плотностная граница расслоения; землетрясение; гипоцентр; опорный профиль 3-ДВ

1. Введение

На сегодняшний день выполнен достаточно большой объем исследований в области сейсмогеологии. В частности, для территории северо-востока этими проблемами занимались ряд авторов [*Vashchilov, 1979; Imaev et al., 1995, 2000; Smirnov, 1995, 2002; Grachev, 2000; Parfenov, Kuzmin, 2001; Vashchilov, Kalinina, 2003; Sharafutdinov, Mishin, 2006; Kalinina et al., 2013; и мн. др.*]. Однако среди подобных работ как в отечественной, так и в зарубежной литературе редко встречаются сообщения о результатах исследований, использующие количественные модели глубинного строения и анализирующие закономерность положений в земной коре гипоцентров землетрясений для тех участков, где отсутствуют сейсмические профили [*Petrishchevsky, 2012*]. Встречаются работы, анализирующие корреляцию эпицентров (реже – гипоцентров) землетрясений с глубинным строением вдоль профилей

магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [*Sharafutdinov, Khasanov, 2010; Mityukov et al., 2014*] или использующие комплексный анализ геологической и геофизической информации, полученной в ходе различных региональных исследований [*Tretyakov, 2009*]. Как правило, в остальных работах анализ связи особенностей глубинного строения и сейсмичности носит качественный характер.

Хорошо известно, что сейсмическая активность любой территории определяется рядом различных факторов, одним из которых является ее глубинная структура, и в частности ее неоднородности различной природы [*Novoselova, Turutanov, 1982a, 1982b; Krylov, Duchkov, 1996; Radziminovich et al., 2003; Gol'din et al., 2006; Tubanov, 2009; Sloan et al., 2011; Turutanov, 2012; Mityukov et al., 2014; и др.*]. На сегодняшний день наиболее достоверным источником информации о глубинном строении территории (за исключением результатов бурения) считаются результаты интерпретации данных, полученных в ходе сейсмических исследований методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки [*Khmelevskoy, 1999; Boganik, Gurvich, 2006; Turchkov, 2013*]. Однако часто существующей сети сейсмических профилей оказывается недостаточно для решения конкретных задач. Для территории северо-востока России эта проблема является особенно актуальной. Интерес к богатым недрам этой территории, не потерянный и в настоящее время, подводит к мысли о комплексном исследовании ее глубин. Но к настоящему моменту в распоряжении исследователей имеются результаты интерпретации только трех сейсмических профилей (профиль ГСЗ Магадан – Усть-Среднекан, опорный геофизический профиль п-ов Кони – о. Врангеля и недавно пройденный опорный геолого-геофизический профиль 3-ДВ Сковородино – Томмот–Якутск – Сусуман – Мякит) [*Kuznetsov et al., 2010; Suvorov et al., 2014*].

С учетом вышесказанного, для получения информации о глубинном строении часто приходится привлекать результаты других геофизических исследований. В частности, для построения глубинных моделей земной коры нередко прибегают к использованию гравиметрических методов, так как гравиметрическая съемка выполнена для всей территории региона [*Petrishchevsky, 2014*]. В нашей работе для интерпретации аномалий гравитационного поля использованы методы новой интерпретационной гравиметрии (далее – НИГ) [*Vashchilov, 2005*]. Решение ряда региональных задач показало эффективность их использования в комплексе с другими геофизическими методами для оценки глубинного строения как крупных региональных структур, так и отдельных рудных узлов [*Vashchilov et al., 2008; Khasanov, Gayday, 2011; Khasanov et al., 2017*].

Стремительное развитие компьютерных технологий дает возможность быстрой обработки большого массива информации, что, в свою очередь, позволяет увеличивать детальность глубинных исследований [*Gayday, 2010*]. Детализация геофизических моделей земной коры конкретных геологических объектов дает возможность на количественной основе более углубленно исследовать связи между различными процессами, происходящими в геологической среде.

Целью данной работы являлась оценка локализации гипоцентров коровых землетрясений относительно рельефа плотностной границы расслоения в земной коре северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ [*Gayday, 2013*]. Исследования положения гипоцентров землетрясений относительно плотностных неоднородностей для других территорий проводились в различное время с помощью комплекса геофизических методов [*Novoselova, Turutanov, 1982a, 1982b; Tretyakov, 2009; Turutanov, 2012; Mityukov et al., 2014; и др.*], но для данного участка такая оценка осуществлена автором впервые.

2. Методика исследования

Традиционно строение земной коры представляется в виде нескольких геофизических слоев: осадочного, гранитного (гранитно-метаморфического) и базитового, выделяемых по характеру распределения скорости звуковой волны в земной коре [*Fedynsky, Vashchilov, 1980; Vashchilov, 1984; Senachin et al., 2013*]. Иногда гранитный слой разбивается на подслои [*Surkov et al., 2007*].

Считается, что на границе данных слоев происходит скачкообразное изменение физических свойств вещества [*Vashchilov, 1984*]. Однако результаты многолетних исследований автора в области плотностного моделирования структуры земной коры гравиметрическими методами (в частности методами НИГ), а также результаты, полученные коллегами автора (моделирование глубинного строения методами, использующими интерпретацию данных МТЗ), показывают, что не в каждой точке контакта таких геофизических слоев действительно устанавливается резкое изменение тех или иных физических свойств вещества [*Vashchilov et al., 2008; Gayday, Sharafutdinov, 2010; Khasanov, Gayday, 2011; Gaidai, Kalinina, 2011; Gayday, Kalinina, 2012; Khasanov et al., 2017; и др.*]. Этот факт подтверждается и в ходе анализа результатов интерпретации данных сейсмических исследований (сейсмических разрезов). Анализ показывает, что выделяемые сейсмические границы в земной коре не представляют собой непрерывную линию [*Goshko et al., 2014*].

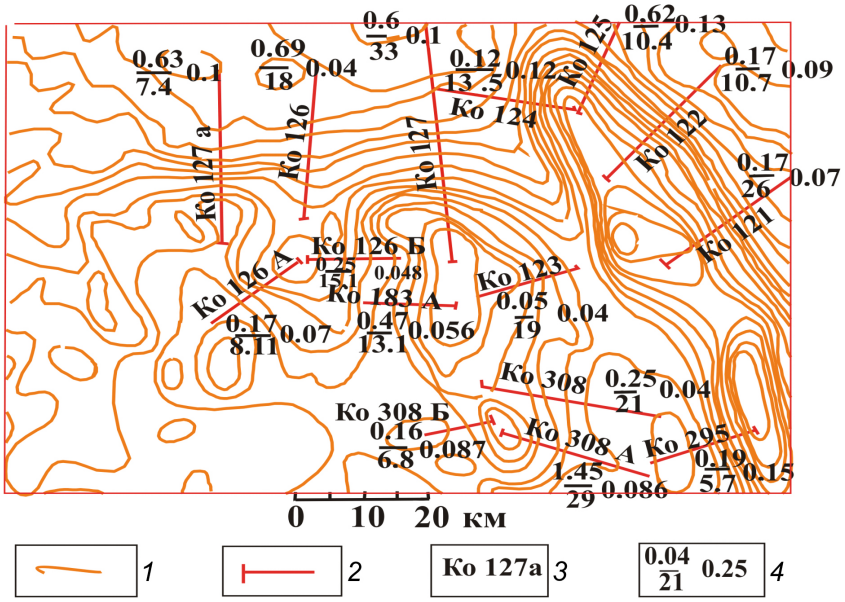

Рис. 1. Определение параметров плотностных блоков – источников аномалий поля силы тяжести.

1 – изолинии наблюденного поля силы тяжести; *2* – интерпретационные профили; *3* – название профиля; *4* – результаты интерпретации: 0.04 – глубина верхней границы блока, 21 – глубина нижней границы блока, 0.25 – разность в плотности соседних блоков (вдоль профиля).

Fig. 1. Determination of the parameters of density units – sources of anomalies in the gravity field.

1 – isolines of the observed gravity field; *2* – interpretative profiles; *3* – profile name; *4* – interpretation results: 0.04 – depth of the upper boundary of the block, 21 – depth of the lower boundary of the block, 0.25 – difference in the density of the adjacent blocks (along the profile).

Следовательно, результат оценки рельефа определенного геофизического слоя (кровля гранитного слоя, кровля базитового слоя и др.) отражает частный взгляд и индивидуальное мнение интерпретатора, а соответственно ее положение в пространстве в ряде координат определяется субъективно и не является однозначным.

Методы НИГ используют представления о преимущественно блоковой природе источников аномалий поля силы тяжести в земной коре [*Vashchilov, 1984, 2005; Gayday, 2010*]. Данные методы не являются в полной мере новыми. Как и другие методы, использующие гравитационные поля, они позволяют по гравитационным аномалиям оценить плотностную структуру земной коры, выделить зоны разрывных нарушений, определить мощность интрузивов и т.п. Методы НИГ относятся к блоку физико-геологических методов интерпретации аномалий поля силы тяжести [*Petrishchevsky, 2014*]. Практика показывает эффективность их использования для решения региональных задач, связанных с оценкой плотностной структуры объектов Яно-Колымской складчатой системы [*Vashchilov, 2005; Vashchilov et al., 2008; Khasanov, Gayday, 2011; Khasanov et al., 2017*].

Для построения трехмерной плотностной модели земной коры на карте поля силы тяжести по полосам повышенных горизонтальных градиентов Δg фиксируется сеть разломов. Установленными разрывными нарушениями определяются контуры плотностных неоднородностей-блоков, выступающих источниками гравитационных аномалий (рис. 1). Источниками аномалий могут служить как структуры в общепринятом структурно-тектоническом понимании (горсты, грабены и т.д.), так и магматические или метаморфические геологические тела, а также тела комбинированной природы, которые часто в плане оконтуриваются разрывными нарушениями [*Vashchilov, 1984, 2005*]. Для каждого такого блока исследуемого участка с помощью альбома палеток [*Vashchilov, 1984*] определены глубины его нижнего и верхнего ограничений (рис. 1). Полученные значения глубин нижних ограничений системы блоков, моделирующих земную кору исследуемой территории, позволяют оценить рельеф поверхности, оконтуривающей нижние ограничения всех аномалеобразующих гравитационных объектов. Таким образом, в пространстве выделяется поверхность, разделяющая две области земной коры (плотностная граница расслоения). В области, лежащей выше выделенной границы, при переходе от одного блока к другому (по латерали) возможны изменения плотности отдельных блоков. Вещество здесь находится в неоднородном состоянии (по плотностным характеристикам), и

эта часть земной коры представляет собой гравитационно-неоднородную среду. В области, расположенной ниже устанавливаемой моделированием плотностной границы расслоения, разница в плотности соседних блоков не устанавливается, т.е. по плотностным характеристикам вещество земной коры в данной области пространства находится в квазиоднородном состоянии.

Вещество недр подвергается глубоким метаморфическим преобразованиям различной интенсивности и природы, и данная граница, вероятно, является фронтом метаморфизации вещества земной коры. Основанием для данного утверждения можно считать, например, процессы автохтонного парциального плавления корового вещества [*Rozen, Fedorovsky, 2001*], отражение длительных процессов гранитогнейсового метаморфизма в характере частоты сейсмических волн [*Goshko et al., 2014*], оценку глубины переработки вещества и магмогенерации [*Glaznev et al., 2014*] и др.

Наиболее вероятной причиной образования плотностной границы расслоения в земной коре следует считать воздействие на вещество недр теплового потока различной интенсивности, который, собственно, и привел к преобразованию вещества [*Matsushima et al., 2003; Golubev, 2009; и др.*]. Распределение пунктов наблюдения теплового потока для территории северо-востока России крайне неравномерно. Так, в глобальной базе данных теплового потока для материковой части Магаданской области есть только одно упоминание о значении теплового потока – для Ветренского месторождения, находящегося к юго-западу от рассматриваемого участка [*Veselov, Lipina, 2017*]. Имеются также две точки наблюдения в акватории Охотского моря [*Senachin et al., 2013*]. Такая ситуация со значением теплового потока связана с тем, что его измерения, как правило, проводятся на отдельных участках на территории рудников, в результате чего информация остается в рабочей документации и не является открытой. По этой причине проанализировать связь теплового потока с глубиной плотностной границы расслоения в земной коре на количественной основе не представляется возможным.

Кроме этого, вероятной причиной формирования плотностной границы расслоения в земной коре одновременно могут выступать и другие физико-химические процессы, в том числе тектонические [*Peive, 1982; Gubanova, Petrishchevsky, 2014; Egorov, 2015; и др.*].

3. Результаты исследования и обсуждение

Объектом исследования выступает земная кора зоны сочленения Аян-Юряхского антиклинория и Иньяли-Дебинского синклинория в пределах координат 62–63° с.ш. и 148–152° в.д. общей площадью 24 тыс. км^2 (рис. 2). Одним из определяющих факторов выбора данной территории является наличие результатов сейсмических исследований опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ (участок Сусуман – Ягодное – Оротукан) (рис. 3). Устанавливаемые плотностным моделированием особенности глубинного строения для данной территории не только позволят проследить связь плотностных неоднородностей с сейсмичностью, но и послужат дополнительным материалом при проведении интерпретации результатов глубинных сейсмических исследований [*Goshko, Gayday, 2016*].

Исследуемая территория сложена разнообразными осадочными, осадочно-вулканогенными, вулканогенными, хемогенными, метаморфическими образованиями широкого возрастного диапазона [*Simakova, 1998; Sosunov, 1999*]. Максимальную часть рассматриваемой площади занимают юрские отложения. Широко распространены интрузивные и субвулканические образования, преимущественно в виде крупных гранитоидных массивов от позднеюрского до позднемелового возраста.

За период с 1968 по 2013 г. на данной территории зарегистрировано 252 землетрясения с энергетическим классом от 5.6 до 13.0 (по Т.Г. Раутиан) [*Rautian, 1964; Sharafutdinov, Malinovsky, 2011*] (землетрясения с меньшим энергетическим классом не учитывались, так как они могли быть результатами промышленных взрывов). Для 70 землетрясений имеется информация о глубинах гипоцентров, 66 % из которых зафиксированы в верхней части земной коры до глубины 10 км.

Методами НИГ с использованием описанной выше методики оценены глубина и рельеф плотностной границы расслоения в земной коре (рис. 3). Для оценки количественной связи между положением гипоцентров и характером изменения установленного моделированием рельефа плотностной границы расслоения в земной коре для каждого эпицентра землетрясения рассчитан угол уклона поверхности расслоения. Для тех же координат ранее определены значения сейсмической активности (по методике Ю.В. Ризниченко) [*Riznichenko, 1979*], а также значение удельной плотности разломов, выделенных по неотектоническим данным [*Kalinina, Gayday, 2012*].

Анализ положения гипоцентров в земной коре исследуемой территории показал, что 74 % гипоцентров землетрясений располагаются выше установленной моделированием плотностной границы расслоения в земной коре (рис. 3, рис. 4). Вероятно, повышенный тепловой поток, ставший причиной образования данной границы, привел к переводу вещества, находящегося ниже ее, в более пластич-

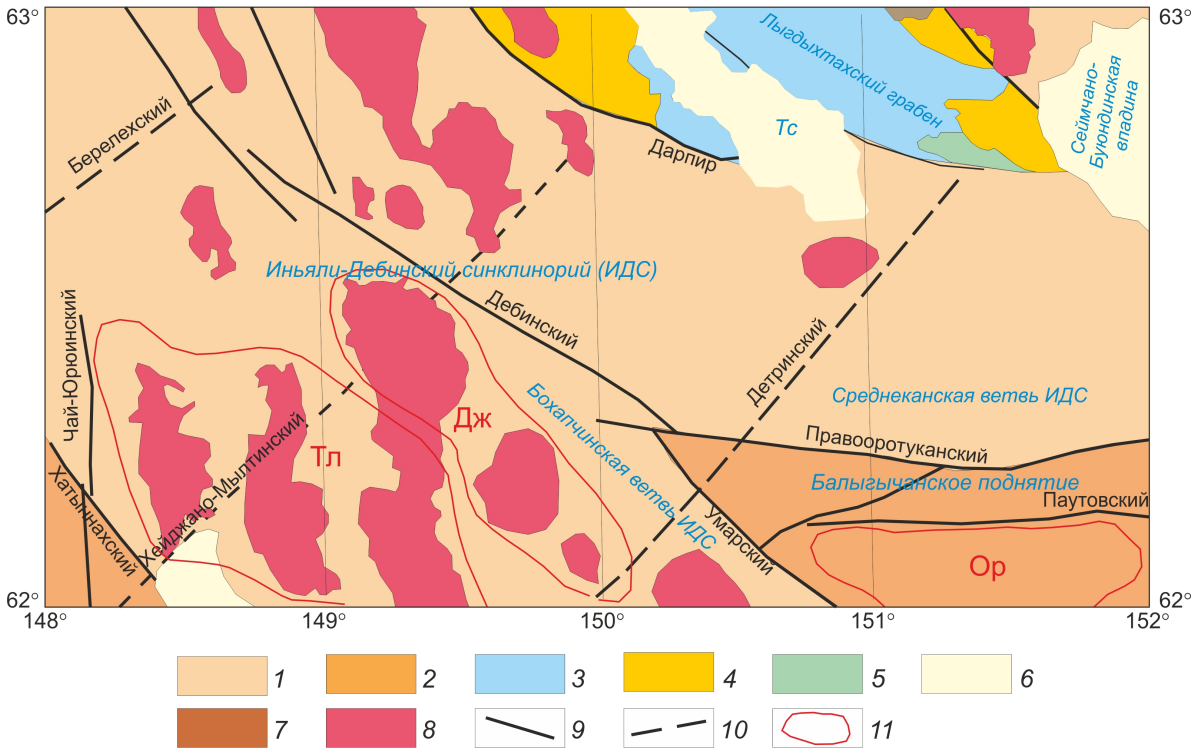

Рис. 2. Тектоническая схема (на основании схемы тектонического районирования Колымо-Охотского водораздела В.М. Кузнецова).

1 – терригенный конденсированный комплекс чехла срединных массивов и прогибов Яно-Колымской системы; *2* – терригенный конденсированный комплекс антиклинориев и поднятий Яно-Колымской системы; *3* – верхнеюрские терригенные молассы краевых прогибов; *4* – тонкотерригенные формации прогибов Яно-Колымской системы; *5* – нижнемеловые, преимущественно терригенные молассы; *6* – молассы неотектонических впадин; *7* – морские терригенные и «отдаленно» кремнистые формации; *8* – позднеюрские гранитоиды орогенного (коллизионного) этапа; *9* – крупнейшие установленные разломы и тектонические нарушения; *10* – скрытые разломы фундамента; *11* – контуры зон тектономагматической активизации, магматогенные поднятия: Тл – Тыэллахское магматогенное поднятие, Ор – Оротуканское магматогенное поднятие, Дж – Джелгалинская тектономагматическая зона.

Fig. 2. Tectonic scheme (based on the scheme of tectonic zoning of the Kolyma-Okhotsk watershed by V.M. Kuznetsov).

1 – terrigenous condensed complex of the nappe of the median massifs and troughs in the Yana-Kolyma system; *2* – terrigenous condensed complex of the anticlinoria and uplifts in the Yana-Kolyma system; *3* – Upper Jurassic clastic molasses of foredeeps; *4* – subtly terrigenic formation of the troughs in the Yana- Kolyma system; *5* – Lower Cretaceous, mainly terrigenic molasses; *6* – molasses of neotectonic depressions; *7* – marine terrigenic and 'remotely' siliceous formations; *8* – Late Jurassic granitoids of the orogenic (collision) phase; *9* – confirmed largest faults and tectonic faults; *10* – hidden faults in the foundation; *11* – contours of the zones of tectonic and magmatic activity, and magmatic uplifts: Тл – Tyellakh magmatic uplift, Ор – Orotukan magmatic uplift, Дж – Dzhelgala tectonomagmatic zone.

ное состояние, не способствующее накоплению значительной механической энергии.

Следует отметить также, что ≈90 % гипоцентров расположены в областях, где плотностным моделированием установлены интрузивы, вскрытые или не вскрытые на дневной поверхности, что, вероятно, объясняется понижением прочности вещества земной коры при внедрении магматических расплавов и дальнейшем формировании интрузивов (рис. 4). Аналогичные результаты были получены, например, для Байкальской горной области [*Turutanov, 2012*].

Плотностная граница расслоения в земной коре, установленная методами НИГ, практически совпадает с подошвой верхнего слоя коры, выделяемой по энергетическому разрезу, построенному новосибирскими коллегами с помощью программного комплекса «StreamSDS» (за исключением областей, где устанавливаются зоны тектономагматической активизации) [*Goshko et al., 2014; Goshko, Gayday, 2016*] (рис. 4). Этот комплекс позволяет вычислять и визуализировать динамические характеристики сейсмического разреза отраженных волн, полученного по методу общей глубинной точки (ОГТ). Сопоставление плотностного и энергетического разрезов позволяет отметить, что более глубокие гипоцентры землетрясений, расположенные в интервале глубин земной коры от 20 до 35 км, приурочены к системам долгоживущих сквозькоровых региональных разломов: Хейджано-Мылтинской и пересече-

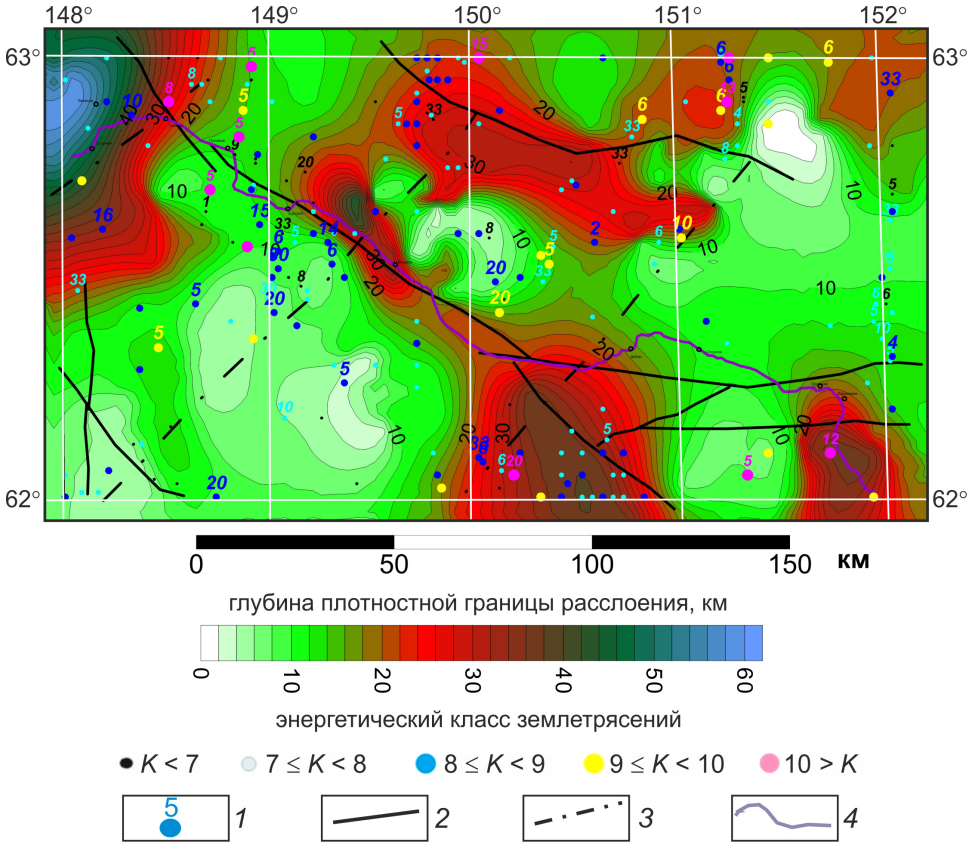

Рис. 3. Рельеф плотностной границы расслоения и положение эпицентров землетрясений.

1 – глубина гипоцентра (для имеющихся данных); *2* – крупнейшие установленные разломы и тектонические нарушения; *3* – скрытые разломы фундамента; *4* – линия опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ.

Fig. 3. Relief of the density boundary of stratification, and the positions of the earthquake epicenters.

1 – hypocenter depth (for the available data); *2* – confirmed largest faults and tectonic faults; *3* – hidden faults in the foundation; *4* – line of the reference geological-geophysical profile 3-DV.

нию Умаро-Дебинской (северо-западного простирания) с Правооротуканской (северо-восточного простирания). Их протяженность составляет сотни километров, глубина заложения – не менее 40 км [*Shakhtyrov, 2010*]. При этом следует заметить, что более глубокие гипоцентры приурочены к областям, в которых плотностным моделированием устанавливается квазиоднородная структура вещества.

Анализ энергетического класса гипоцентров землетрясений, расположенных на различных глубинах, показал, что энергетический класс всех землетрясений с гипоцентрами, расположенными ниже плотностной границы расслоения в земной коре, не превышает 9 (см. рис. 3, рис. 4). Вероятно, пластичное состояние вещества на данных глубинах препятствует накоплению большого количества энергии и дальнейшей ее разрядке в виде мощных землетрясений.

Анализ сейсмической активности территории [*Gaidai, Kalinina, 2011; Kalinina et al., 2013*] и глубины плотностной границы расслоения показал, что зоны повышенной сейсмической активности в основном приурочены к областям погружения плотностной границы расслоения в земной коре (см. рис. 3).

Анализ связи сейсмической активности, а также значений удельной плотности разломов с градиентом изменения рельефа плотностной границы расслоения позволил сделать вывод о том, что эпицентры преимущественно отмечаются в зонах, где градиент изменения рельефа не превышает значения 1 (т.е. угол погружения данной границы не превышает 45°). В таких областях расположены 80 % гипоцентров землетрясений исследуемой территории. При этом максимальные значения сейсмической активности наблюдаются на участках, где значение градиента составляет 0.5 (т.е. угол погружения границы составляет порядка 27°). При увеличении угла погружения поверхности границы расслоения количество зафиксированных землетрясений уменьшается и при угле падения границы, превышающем 65°, практически сводится

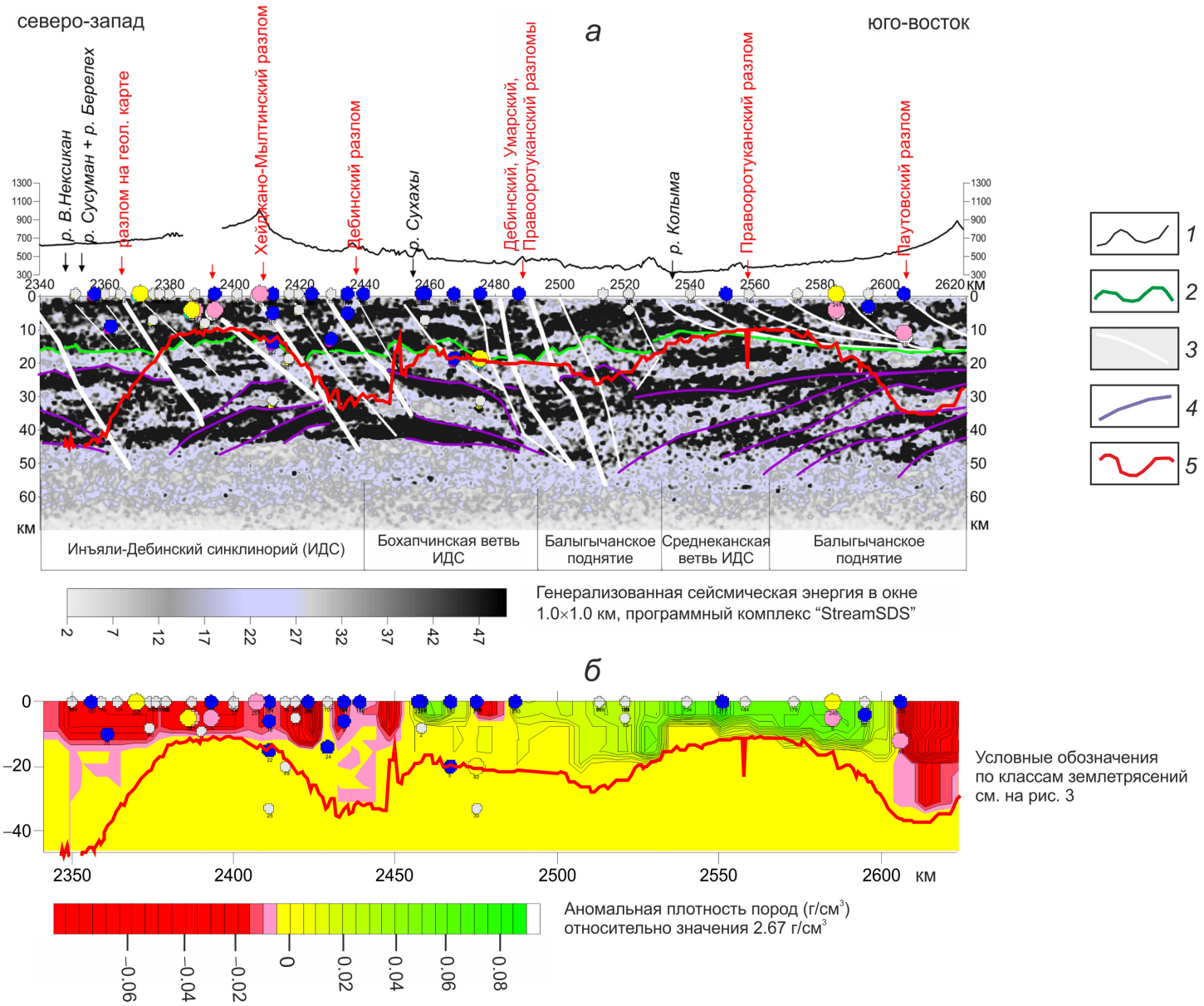

Рис. 4. Глубинный разрез генерализованной энергии отраженных волн по фрагменту опорного геофизического профиля 3-ДВ и схематическая структурная модель основных слоев и разломов Инъяли-Дебинского синклинория и Балыгычанского поднятия (*а*); плотностной разрез земной коры в аномальных значениях плотности (*б*).

1 – высота рельефа дневной поверхности; *2* – подошва верхнего слоя коры, выделенная по сейсмическим данным; *3* – глубинные разломы, выделенные по сейсмическим данным; *4* – границы слоев в нижней части коры (по сейсмическим данным); *5* – плотностная граница расслоения в земной коре (установленная плотностным моделированием).

Fig. 4. Deep profile of the generalized energy of reflected waves for a fragment of the reference geophysical profile 3-DV, and a schematic structural model of the major layers and faults in the Inyali-Debin synclinorium and Balygychan uplift (*a*); density profile of the crust in anomalous density values (*б*).

1 – height of the surface relief; *2* – bottom of the upper crustal layer according to the seismic data; *3* – deep faults identified from the seismic data; *4* – boundaries of the layers in the lower crust (according to the seismic data); *5* – density boundary of stratification in the crust (established by the density modeling).

к нулю. Близкий к вертикальному рельеф плотностной границы расслоения характерен для зон разрывных нарушений в области контакта двух разнородных по плотности блоков. Таким образом, с точки зрения механики данные области представляют собой вещество, пронизанное сетью разрывных нарушений, и, соответственно, механически ослаблены, что, в свою очередь, не способствует накоплению механической энергии и ее дальнейшей разрядке в виде землетрясений.

Связь сейсмичности и глубинного строения изучалась многими авторами [*Vashchilov, 1979; Novoselova, Turutanov, 1982a, 1982b; Imaev et al., 1995; Smirnov, 1995; Krylov, Duchkov, 1996; Radziminovich et al., 2003; Gol'din et al., 2006; Tretyakov, 2009; Tubanov, 2009; Sharafutdinov, Khasanov, 2010; Sloan et al., 2011; Petrishchevsky, 2012; Turutanov, 2012; Kalinina et al., 2013; Mityukov et al., 2014; и др.*]. Но для исследуемой территории такие сопоставления сделаны впервые (как и впервые построена детальная трехмерная плотностная модель земной коры всей площади). Результаты, полученные в ходе данного исследования, не противоречат выводам, сделанным ранее для других территорий.

4. Заключение

Количественная оценка связи распределения эпицентров и гипоцентров землетрясений относительно рельефа плотностной границы расслоения в земной коре для данной территории показывает, что:

– подавляющая часть сейсмических событий зафиксирована в тех областях земной коры, которые расположены выше установленной моделированием плотностной границы расслоения. Это объясняется тем, что для данной территории вещество в верхней части земной коры находится в более хрупком состоянии;

– энергетический класс землетрясений, гипоцентры которых зафиксированы в областях земной коры, расположенных ниже установленной моделированием плотностной границы расслоения, для данной территории не превышает 9, что объясняется, вероятно, более вязким, пластичным состоянием вещества в данных областях пространства;

– повышенная сейсмическая активность здесь характерна для участков с практически плоским и максимально углубленным рельефом плотностной границы расслоения, что согласуется с необходимостью накопления критической массы твердого вещества для наступления разрядки механического напряжения;

– участки с поведением рельефа плотностной границы расслоения, близким к вертикальному, для данной территории отличаются практически нулевой сейсмичностью, так как ослабленные с механической точки зрения наличием сети разрывных нарушений области препятствуют накоплению механического напряжения.

Таким образом, максимальная сейсмичность на данной территории регистрируется в тех областях, где глубина погружения установленной моделированием плотностной границы расслоения в земной коре стремится к максимальному значению и где при этом не наблюдается резкого изменения рельефа данной границы. Как известно, для накопления механических напряжений, приводящих к разрядке в виде мощных землетрясений, необходимо наличие достаточно больших объемов вещества с высокой вязкостью и небольшой пластичностью [*Kostrov, 1975*]. Плотностное моделирование показывает, что на данной территории в нижней части земной коры, в областях, расположенных ниже установленной плотностной границы расслоения, вещество находится в достаточно однородном состоянии (с плотностной точки зрения). Воздействие повышенных давлений и температур способствует переводу вещества в маловязкое, пластичное состояние, в котором механические напряжения нивелируются быстрее. Период релаксации напряжений в таких породах значительно уменьшается, а следовательно, уменьшается и вероятность возникновения землетрясений [*Mining Encyclopedia, 2017*], что количественно подтверждают результаты исследования.

5. Литература / References

Boganik G.N., Gurvich I.I., 2006. Seismic Exploration. AIS, Tver, 744 p. (in Russian) [*Боганик Г.Н., Гурвич И.И.* Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.].

Egorov A.S., 2015. Deep structure and composition characteristics of the continental Earth's crust geostructures on the Russian Federation territory. *Journal of Mining Institute* 216, 13–30 (in Russian) [*Егоров А.С.* Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России // *Записки Горного института*. 2015. Т. 216. С. 13–30].

Fedynsky V.V., Vashchilov Y.Y., 1980. Layered-block structure of the lithosphere. In: Geophysics. Geology and catastrophic natural phenomena. Geology of continental margins. Nauka, Moscow, p. 37–44 (in Russian) [*Федынский В.В., Ващилов Ю.Я.* Слоисто-блоковое строение литосферы // Геофизика. Геология и катастрофические природные явления. Геология континентальных окраин. М.: Наука, 1980. С. 37–44].

Gaidai N.K., Kalinina L.Y., 2011. Fault density, earthquakes, and the topography of crustal stratification interfaces: Central Magadan Oblast. *Journal of Volcanology and Seismology* 5 (6), 431–437. https://doi.org/10.1134/S0742046311050046.

Gayday N.K., 2010. New interpretational gravimetry. Concepts. Capabilities. Prospects of Use. *Bulletin of the North-Eastern State University* 13 (Special Issue), 10–14 (in Russian) [*Гайдай Н.К.* Новая интерпретационная

гравиметрия. Понятия. Возможности. Перспективы использования // *Вестник Северо-Восточного государственного университета*. 2010. № 13. Спецвыпуск. С. 10–14].

Gayday N.K., 2013. On peculiarities in the distribution of earthquake hypocenters relative to the density boundary of stratification in the crust (some areas in the northeastern region of Russia). *Geodinamika* (2 (15)), 124–126 (in Russian) [*Гайдай Н.К.* Об особенностях распределения гипоцентров землетрясений относительно плотностной границы расслоения в земной коре (на примере отдельных участков севера-востока России) // *Геодинаміка*. 2013. № 2 (15). С. 124–126].

Gayday N.K., Kalinina L.Y., 2012. Relationship between the deep structure of the Multan-Ola volcanic structure (Magadan region) and seismicity. *Bulletin of the Northeastern State University* 17 (Special Issue), 30–32 (in Russian) [*Гайдай Н.К., Калинина Л.Ю.* Связь глубинного строения Малтано-Ольской вулканической структуры (Магаданская область) с сейсмичностью // *Вестник Северо-Восточного государственного университета*. 2012. № 17. Спецвыпуск. С. 30–32].

Gayday N.K., Sharafutdinov V.M., 2010. Modeling of the crust structure by the methods of new interpretative gravimetry. *Gaudeamus* (2 (16)), 337–340 (in Russian) [*Гайдай Н.К., Шарафутдинов В.М.* Моделирование структуры земной коры методами новой интерпретационной гравиметрии // *Гаудеамус*. 2010. № 2 (16). С. 337–340].

Glaznev V.N., Muravina O.M., Voronova T.A., Kholin V.M., 2014. Estimation of the thickness of the gravity-active layer of the crust in the Voronezh crystalline massif. *Bulletin of Voronezh State University. Geology Series* (4), 78–84 (in Russian) [*Глазнев В.Н., Муравина О.М., Воронова Т.А., Холин В.М.* Оценка мощности гравиактивного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // *Вестник ВГУ. Серия Геология*. 2014. № 4. С. 78–84].

Gol'din S.V., Suvorov V.D., Makarov P.V., Stefanov Y.P., 2006. An instability gravity model for the structure and stress-strain state of lithosphere in the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 47 (10), 1079–1090.

Golubev V.A., 2009. Geophysical data confirming lack of Late Cenozoic mantle intrusions in the Earth's crust under the Baikal depression. *Doklady Earth Sciences* 426 (1), 623–627. https://doi.org/10.1134/S1028334X09040254.

Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S., 2014. The recent structure and the assumed history of formation of the crust in the south-eastern segment of the North Asian craton along Reference Profile 3-DV. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 785–798 (in Russian) [*Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С.* Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // *Геодинамика и тектонофизика.* 2014. Т. 5. № 3. С. 785–798. https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0155.

Goshko E.Yu., Gayday N.K., 2016. Relationship between deep earthquake hypocenters and long-living crustal faults in the Inyali-Debin synclinorium along the reference geophysical profile 3-DV. In: Modern methods of seismic data processing and interpretation. Materials of the XI International Seismological School. FRC GS RAS, Obninsk, p. 114–116 (in Russian) [*Гошко Е.Ю., Гайдай Н.К.* Связь гипоцентров глубоких землетрясений и долгоживущих сквозькоровых разломов Иньяли-Дебинского синклинория вдоль опорного геофизического профиля 3-ДВ // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 114–116].

Grachev A.F. (Ed.), 2000. Modern Tectonics, Geodynamics and Seismicity of Northern Eurasia. PROBEL Publishing House, Moscow, 475 p. (in Russian) [Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Ред. А.Ф. Грачев. М.: Изд-во "ПРОБЕЛ", 2000. 475 с.].

Gubanova M.A., Petrishchevsky A.M., 2014. Gravity and seismological features of rheological layering of Far East Russia lithosphere. *Litosfera* (*Lithosphere*) (6), 150–161 (in Russian) [*Губанова М.А., Петрищевский А.М.* Гравитационные и сейсмологические признаки реологического расслоения литосферы дальневосточных окраин России // *Литосфера*. 2014. № 6. С. 150–161].

Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., 1995. Seismicity, active faults and zones of probable earthquake foci in Yakutia. In: V.I. Ulomov (Ed.), Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Vol. 2–3. UIPE RAS, Moscow, p. 260–275 (in Russian) [*Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмичность, активные разломы и зоны вероятных очагов землетрясений Якутии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2–3 / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1995. С. 260–275].

Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., 2000. Seismotectonics of Yakutia. GEOS, Moscow, 226 p. (in Russian) [*Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 226 с.].

Kalinina L.Y., Gayday N.K., 2012. Analysis of the relationship between the spatial distribution of earthquake epicenters and the crustal structure in the central part of the Magadan region. *Bulletin of the Northeastern State University* (17), p. 90–96 (in Russian) [*Калинина Л.Ю., Гайдай Н.К.* Анализ связи пространственного распределения эпицентров землетрясений и строения земной коры центральной части Магаданской области // *Вестник Северо-Восточного государственного университета*. 2012. № 17. С. 90–96].

Kalinina L.Y., Smirnov V.N., Kondratyev M.N., 2013. Analysis of the spatial association between earthquakes and the network of relief-forming faults at the southeastern flank of the Chersky seismic belt. *Bulletin of the North-East Scientific Center of FEB RAS* (3), 18–23 (in Russian) [*Калинина Л.Ю., Смирнов В.Н., Кондратьев М.Н.* Анализ пространственной связи землетрясений с сетью рельефообразующих разрывных нарушений на юго-западном фланге сейсмического пояса Черского // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2013. № 3. С. 18–23].

Khasanov I.M., Gayday N.K., 2011. Geoelectrical image of the upper crust in the southeastern areas of the Yana-Kolyma folded system and characteristic features of the structure of gold nodes from geophysical data. *Geodinamika*

(*Geodynamics*) (2 (11)), 323–325 (in Russian) [*Хасанов И.М., Гайдай Н.К.* Геоэлектрический образ верхней части земной коры юго-востока Яно-Колымской складчатой системы и характерные особенности строения золоторудных узлов по геофизическим данным // *Геодинаміка*. 2011. № 2 (11). С. 323–325].

Khasanov I.M., Gayday N.K., Ganov A.P., Tkachev A.V., 2017. Deep structure peculiarities of the Agan-Utesninsky ore knot from geophysical data. *Bulletin of the North-East Scientific Center of FEB RAS* (1), 32–43 (in Russian) [*Хасанов И.М., Гайдай Н.К., Ганов А.П., Ткачев А.В.* Особенности глубинного строения Аган-Утеснинского рудного узла по геофизическим данным // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН.* 2017. № 1. С. 32–43].

Khmelevskoy V.K., 1999. Geophysical Methods of the Earth's Crust Studies. Book 1. Methods of Applied and Borehole Geophysics. International University of Nature, Society and Man, Dubna, 203 p. (in Russian) [*Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Книга 1. Методы прикладной и скважинной геофизики. Дубна: Международный университет природы, общества и человека, 1999. 203 с.].

Kostrov B.V., 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake Source. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [*Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.].

Krylov S.V., Duchkov A.D., 1996. Study of the conditions of crust earthquake occurrences: deformation-strength zoning of seismoactive medium. *Transactions* (*Doklady*) *of the Russian Academy of Sciences / Earth Science Sections* 349 (6), 1050–1052.

Kuznetsov V.L., Sal'nikov A.S., Starosel'tsev V.S., Surkov V.S., Lipilin A.V., Emanov A.F., Soloviev V.M., 2010. Crustal structure in the section of the reference profile 2-DV from DSS data. *Geology and Mineral Resources of Siberia* (2), p. 21–30 (in Russian) [*Кузнецов В.Л., Сальников А.С. Старосельцев В.С., Сурков В.С., Липилин А.В., Еманов А.Ф., Соловьев В.М.* Строение земной коры в сечении опорного профиля 2-ДВ по данным ГСЗ // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2010. № 2. С. 21–30].

Matsushima J., Okubo Y., Rokugawa S., Yokota T., Tanaka K., Tsuchiya T., Narita N., 2003. Seismic reflector imaging by prestack time migration in the Kakkonda geothermal field, Japan. *Geothermics* 32 (1), 79–99. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(02)00052-4.

Mining Encyclopedia, 2017 (in Russian) [*Горная энциклопедия,* 2017]. Available from: http://www.mining-enc.ru (last accessed August 1, 2017).

Mityukov V.E., Rybin A.K., Bataleva E.A., Batalev V.Yu., 2014. The structure of the main Pamir thrust from magnetotelluric sounding data. In: Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis. Abstracts of the All-Russia conference (August 11–16, 2014, Irkutsk). IEC SB RAS, Irkutsk, p. 56 (in Russian) [*Митюков В.Е., Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Структура главного Памирского надвига по данным магнитотеллурического зондирования // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания (11–16 августа 2014 г., г. Иркутск). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. С. 56].

Novoselova M.R., Turutanov E.Kh., 1982a. Morphology of gabbroid massifs and the scale of basic magmatism in the Olkhon region. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) (6), 46–53 (in Russian) [*Новосёлова М.Р., Турутанов Е.Х.* Морфология габброидных массивов и масштабы основного магматизма в Приольхонье // *Геология и геофизика*. 1982. № 6. С. 46–53].

Novoselova M.R., Turutanov E.Kh., 1982b. Morphology of the Ozersk and Krestovsky gabbroid massifs from gravimetric data. *Sovetskaya Geologiya* (*Soviet Geology*) (5), 110–116 (in Russian) [*Новосёлова М.Р., Турутанов Е.Х.* Морфология Озёрского и Крестовского габброидных массивов по гравиметрическим данным // *Советская геология*. 1982. № 5. С. 110–116].

Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Eds.), 2001. Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia). Nauka, Moscow, 571 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: Наука, 2001. 571 с.].

Peive A.V. (Ed.), 1982. Tectonic Stratification of Lithosphere in Modern Mobile Belts. Nauka, Moscow, 115 p. (in Russian) [Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов / Ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1982. 115 с.].

Petrishchevsky A.M., 2012. New method for estimating the rigidity of tectonic media from gravimetric data and its use in seismicity analysis. In: Modern geodynamics of Central Asia and hazardous natural processes: results of quantitative studies. Proceedings of the All-Russia conference and the youth school on modern geodynamics. IEC SB RAS, Irkutsk, Vol. 1, p. 53–56 (in Russian) [*Петрищевский А.М.* Новый метод оценки жесткости тектонических сред по гравиметрическим данным и его использование при анализе сейсмичности // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. С. 53–56].

Petrishchevsky A.M., 2014. Three ways of thinking and the three approaches to the interpretation of gravity anomalies. *Regional'nye Problemy* (*Regional Problems*) 17 (2), 5–17 (in Russian) [*Петрищевский А.М.* Три образа мышления и три подхода к интерпретации гравитационных аномалий // *Региональные проблемы*. 2014. Т. 17. № 2. С. 5–17].

Radziminovich N.A., Balyshev S.O., Golubev V.A., 2003. Earthquake focal depths and crustal strength in the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 44 (11), 1175–1183.

Rautian T.G., 1964. On the determination of the energy of earthquakes at distances up to 3000 km. In: Experimental seismics. Proceedings of IPE, the USSR Acad. Sci., No. 32 (199). Nauka, Mocow, p. 88–93 (in Russian) [*Раутиан Т.Г.*

Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР, № 32 (199). М.: Наука, 1964. С. 88–93].

Riznichenko Yu.V., 1979. Seismic Activity of the USSR Territory. Nauka, Moscow, 192 p. (in Russian) [*Ризниченко Ю.В.* Сейсмическая активность территории СССР. М.: Наука, 1979. 192 с.].

Rozen O.M., Fedorovsky V.S., 2001. Collision Granitoids and Stratification of the Earth's Crust. Nauchny Mir, Moscow, 188 p. (in Russian) [*Розен О.М., Федоровский В.С.* Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры. М.: Научный мир, 2001. 188 с.].

Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P., Kochergin E.V., 2013. Digital model of the Earth's crust in the region of the Okhotsk Sea. *Geoinformatika* (*Geoinformatics*) (4), 33–44 (in Russian) [*Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П., Кочергин Е.В.* Цифровая модель земной коры Охотоморского региона // *Геоинформатика*. 2013. № 4. С. 33–44].

Shakhtyrov V.M., 2010. Shear Structural Ensembles and Gold Mineralization in the Yana-Kolyma Fold System. Abstract of PhD thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). NESC FEB RAS, Magadan, 51 p. (in Russian) [*Шахтыров В.М..* Сдвиговые структурные ансамбли и золотое оруденение Яно-Колымской складчатой системы: Автореф. дис. … докт. геол.-мин. наук. Магадан: МПО СВНЦ ДВО РАН, 2010. 51 с.].

Sharafutdinov V.M., Khasanov I.M., 2010. The deep structure of the Kulu earthquake-generating zone in the upper Kolyma highland from geophysical data. *Journal of Volcanology and Seismology* 4 (5), 343–353. https://doi.org/10.1134/S0742046310050040.

Sharafutdinov V.M., Malinovsky S.B., 2011. Geoinformation System: Seismicity of the Magadan Region. Certificate of State Registration of the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks No. 2011615022 of June 24, 2011 (in Russian) [*Шарафутдинов В.М., Малиновский С.Б.* Геоинформационная система «Сейсмичность Магаданской области». Свидетельство о государственной регистрации Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011615022 от 24.06.2011].

Sharafutdinov V.M., Mishin S.V., 2006. Seismicity of the Northeastern regions of Russia. In: A.I. Khanchuk (Ed.), Geodynamics, magmatism and metallogeny of Eastern Russia. Book 1. Dal'nauka, Vladivostok, p. 74–76 (in Russian) [*Шарафутдинов В.М., Мишин С.В.* Сейсмичность северо-востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Книга 1 / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 74–76].

Simakova K.V. (Ed.), 1998. Geological Map, and the Map of Mineral Resources of the Kolyma-Omolon Region. Scale 1:500000. Explanatory Note. Magadangeologiya State Enterprise, Magadan, 207 p. (in Russian) [Геологическая карта и карта полезных ископаемых Колымо-Омолонского региона. Масштаб 1:500000. Объяснительная записка / Ред. К.В. Симакова. Магадан: ГП «Магадангеология», 1998. 207 с.].

Sloan R.A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K., 2011. Earthquake depth distributions in Central Asia, and their relations with lithosphere thickness, shortening and extension. *Geophysical Journal International* 185 (1), 1–29. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04882.x.

Smirnov V.N., 1995. Morphotectonics of Mountain-Building Areas in Northeastern Asia. PhD brief thesis (Doctor of Geography Sciences). Moscow State University, Moscow, 41 p. (in Russian) [*Смирнов В.Н.* Морфотектоника областей горообразования северо-востока Азии: Автореф. дис. … докт. географ. наук. М.: МГУ, 1995. 41 с.].

Smirnov V.N., 2002. Active structures and seismicity of the Okhotsk Sea – Kolyma region. In: Structure, geodynamics and metallogeny of the Okhotsk region and adjacent parts of the Northwestern Pacific plate. Proceedings of the International Symposium. Yuzhno-Sakhalinsk, p. 236–240 (in Russian) [*Смирнов В.Н.* Активные структуры и сейсмичность Охотско-Колымского региона // Строение, геодинамика и металлогения Охотского региона и прилегающих частей Северо-Западной Тихоокеанской плиты: Материалы международного симпозиума. Южно-Сахалинск, 2002. С. 236–240].

Sosunov G.M. (Ed.), 1999. Geological Map, and the Map of Mineral Resources of the Okhotsk Sea – Kolyma Region. Scale 1:500000. Explanatory Note in four books. Book 1. Geological description. Minerals, mineragenic zoning and forecast assessment of the territory. Magadangeologia State Enterprise, Magadan, 181 p. (in Russian) [Геологическая карта и карта полезных ископаемых Охотско-Колымского региона. Масштаб 1:500000. Объяснительная записка в 4-х книгах. Кн. 1. Геологическое описание. Полезные ископаемые, минерагеническое районирование и прогнозная оценка территории / Ред. Г.М. Сосунов. Магадан: ГП «Магадангеология», 1999. 181 с.].

Surkov V.S., Sal'nikov A.S., Kuznetsov V.L., Lipilin A.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Soloviev V.M., 2007. Structure of the crust in the Magadan sector of the northeastern regions of Russia from DSS data. In: A.S. Sal'nikov (Ed.), Structure of the Earth's crust in the Magadan sector of Northeastern Russia from geological and geophysical data. Nauka, Novosibirsk, p. 13–21 (in Russian) [*Сурков В.С., Сальников А.С., Кузнецов В.Л., Липилин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М.* Строение земной коры Магаданского сектора северо-востока России по данным ГСЗ // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным / Ред. А.С. Сальников. Новосибирск: Наука, 2007. С. 13–21].

Suvorov V.D., Mel'nik E.A., Sal'nikov A.S., 2014. Structure of the upper crust from the refraction correlation data along the profile 3-DV (Skovorodino – Tommot – Yakutsk – Susuman – Myakit). In: Geophysical methods for studying the Earth's crust. Proceedings of the All-Russia conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician N.N. Puzyrev (December 8–13, 2014, Novosibirsk). IOGG SB RAS, Novosibirsk, p. 264–268 (in Russian) [*Суворов В.Д., Мельник Е.А., Сальников А.С.* Строение верхней части земной коры по данным КМПВ вдоль профиля 3-ДВ (Сковородино – Томмот – Якутск – Сусуман – Мякит) // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рож-

дения академика Н.Н. Пузырева (8–13 декабря 2014 г., г. Новосибирск). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. С. 264–268].

Tretyakov M.F., 2009. Features of Crustal Structure of the Chersky Seismic Belt. Abstract of PhD thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). S. Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, 27 p. (in Russian) [*Третьяков М.Ф.* Особенности строения земной коры сейсмического пояса Черского: Автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе. 2009. 27 с.].

Tubanov Ts.A., 2009. Earthquake Focal Depth in the Central Lake Baikal Region from Local Observation Data. Abstract of PhD thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, 18 p. (in Russian) [*Тубанов Ц.А.* Глубина очагов землетрясений в области Центрального Байкала по данным локальной системы наблюдений: Автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. Улан-Удэ: Геологический институт СО РАН, 2009. 18 с.].

Turchkov A.M., 2013. Reflection seismic for engineering applications. *Seismic Technologies* (2), 98–111 (in Russian) [*Турчков А.М.* Метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке // *Технологии сейсморазведки*. 2013. № 2. С. 98–111].

Turutanov E.Kh., 2012. Composition and morphology of large density inhomogeneities in the crust – the factor of influence on seismic activity. *Otechestvennaya Geologiya* (*Russian Geology*) (3), 66–72 (in Russian) [*Турутанов Е.Х.* Состав и морфология крупных плотностных неоднородностей земной коры – фактор влияния на сейсмическую активность // *Отечественная геология*. 2012. № 3. С. 66–72].

Vashchilov Y.Y., 1979. Seismicity and issues of the deep structure of the northeastern regions of the USSR. In: Geophysical studies of the structure and geodynamics of the crust and upper mantle of the northeastern regions of the USSR. SVKNII FEB RAS, Magadan, p. 138–157 (in Russian) [*Ващилов Ю.Я.* Сейсмичность и вопросы глубинного строения северо-востока СССР // Геофизические исследования структуры и геодинамики земной коры и верхней мантии северо-востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1979. С. 138–157].

Vashchilov Y.Y., 1984. Block-Layered Model of the Earth's Crust and Upper Mantle. Nauka, Moscow, 238 p. (in Russian) [*Ващилов Ю.Я.* Блоково-слоистая модель земной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1984. 238 с.].

Vashchilov Y.Y., 2005. The new interpretation gravimetry – instead of and side-by-side with the deep seismic researches. 1. The new interpretation gravimetry methods. *Bulletin of the North-East Scientific Center of FEB RAS* (3), 2–16 (in Russian) [*Ващилов Ю.Я.* Новая интерпретационная гравиметрия – вместо и вместе с глубинными сейсмическими исследованиями. Статья 1. Методические основы новой интерпретационной гравиметрии // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2005. № 3. С. 2–16].

Vashchilov Y.Y., Gaidai N.K., Sakhno O.V., 2008. Three-dimensional deep density model of the Pautovaya Horst and its geological interpretation (Northeast Russia). *Russian Journal of Pacific Geology* 2 (4), 299–313. https://doi.org/10.1134/S1819714008040039.

Vashchilov Y.Y., Kalinina L.Yu., 2003. Study of the relationship between earthquakes and faults and the deep structure of the Okhotsk Sea – Kolyma region (from geophysical data). In: Geodynamics, magmatism and minerageny of continental margins of the North Pacific. Materials of the All-Russia meeting. SVKNII FEB RAS, Magadan, Vol. 1, p. 229–232 (in Russian) [*Ващилов Ю.Я., Калинина Л.Ю.* Исследование связи землетрясений с разломами и глубинной структурой Охотоморско-Колымского региона (по геофизическим данным) // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин севера Пацифики: Материалы Всероссийского совещания. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 1. С. 229–232].

Veselov O.V., Lipina E.N., 2017. Heat Flow Data Catalog of Asia, Australia, and the Pacific Ocean. World Data Center on Solid Earth Physics. Global Heat Flow Database (in Russian) [*Веселов О.В., Липина Е.Н.* Каталог данных о тепловом потоке Азии, Австралии и Тихого океана. Мировой центр данных по физике твердой Земли. Глобальная база данных теплового потока]. Available from: http://www.wdcb.ru/sep/heat_flow/hf_cat_r1.ru.html (last accessed July 3, 2017).

Гайдай Наталия Константиновна, канд. геол.-мин. наук, директор Политехнического института СВГУ, профессор
Северо-Восточный государственный университет
685000, Магадан, ул. Портовая, 13, Россия
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН
685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия
Тел.: +79294533289, ✉ e-mail: nataly_mag@rambler.ru

Gayday, Nataliya K., Candidate of Geology and Mineralogy, Director of Polytechnic Institute of NESU, Professor
North-East State University
13 Portovaya street, Magadan 685000, Russia
N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far East Branch of RAS
16 Portovaya street, Magadan 685000, Russia
Tel.: +79294533289; ✉ e-mail: nataly_mag@rambler.ru