

С. Н. КАШУБИН, О. В. ПЕТРОВ, Е. Д. МИЛЬШТЕЙН,
И. В. КУДРЯВЦЕВ, Е. А. АНДРОСОВ, И. Ю. ВИНОКУРОВ,
О. А. ТАРАСОВА, Ю. М. ЭРИНЧЕК (ВСЕГЕИ)

Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии

Приведены сведения об основных этапах глубинных исследований в России при создании Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин. Показаны возможности обобщения результатов этих исследований в виде комплекта карт глубинного строения земной коры на всю ее мощность. Дана краткая характеристика особенностей строения земной коры и верхней мантии основных тектонических структур Северо-Восточной Евразии. Приведен пример 3D-опорной геолого-геофизической модели по системе глубинных профилей на Северо-Востоке России.

Ключевые слова: *поверхность Мохоровичича, консолидированная земная кора, осадочный чехол, опорная геолого-геофизическая модель.*

S. N. KASHUBIN, O. V. PETROV, E. D. MILSHTAIN,
I. V. KUDRYAVTSEV, E. A. ANDROSOV, I. YU. VINOKUROV,
O. A. TARASOVA, YU. M. ERINCHEK (VSEGEI)

Deep structure of the Earth's crust and upper mantle in Northeastern Eurasia

The work provides information on the major stages of deep studies carried out in Russia along with creation of the State network of geological and geophysical survey base lines, parametric and superdeep wells. It offers possibilities to generalize the results of these studies in the form of a set of maps showing deep crust structure throughout its thickness. Features of the crust and the upper mantle structure of the tectonic frameworks in Northeastern Eurasia are briefly characterized. There is an example of a 3D-geological and geophysical model based on the system of deep seismic lines in Northeastern Russia.

Keywords: *the Moho, consolidated crust, sedimentary cover, base geological and geophysical model.*

Введение. Значение информации о строении земной коры и верхней мантии существенно возрастает по мере развития технологий геологического 3D-картографирования [9, 23]. Эта информация становится все более востребованной при решении фундаментальных проблем, связанных с развитием геотектонических моделей, определяющих понимание процессов формирования и минерагенической специализации крупных геологических провинций.

В России изучение глубинного строения носит системный характер и осуществляется в рамках региональных геолого-геофизических исследований по сети опорных геолого-геофизических профилей, обеспечивающих изучение земной коры на всю ее мощность и пересекающих практически все крупные геологические структуры Северо-Восточной Евразии [19, 25, 30]. Современная Государственная сеть опорных профилей реализуется как взаимосвязанный каркас протяженных (более тысячи километров) комплексных геолого-геофизических профилей, опирающихся на глубокие и сверхглубокие скважины и покрывающих не только сушу Российской Федерации, но и прилегающие акватории (рис. 1). По мере охвата этими исследованиями ранее не изученных районов Северо-Вос-

тока России и Дальнего Востока [22, 27] сложились предпосылки для обобщения информации о глубинном строении территорий в виде комплексов карт глубинного строения [35]. В статье приводятся результаты такого обобщения ретроспективных и современных исследований для российской части Северо-Восточной Евразии.

Основные этапы глубинных геолого-геофизических исследований России. Основу исследований земной коры и верхней мантии составляют сейсмические наблюдения, выполняющиеся в России более полувека. Принято выделять несколько этапов в развитии методики глубинных сейсмических исследований [20].

Первый период (до 1960 г.) связан с возникновением метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), предложенного и разработанного под руководством академика Г. А. Гамбурцева [1]. В этот период работы носили преимущественно опытно-методический характер.

Систематическое изучение территории бывшего СССР методом ГСЗ началось в период 1960–1971 гг. В это время работы выполнялись по отдельным профилям в пределах Урала, Западной и Восточной Сибири, Средней Азии и Украины. Наблюдения

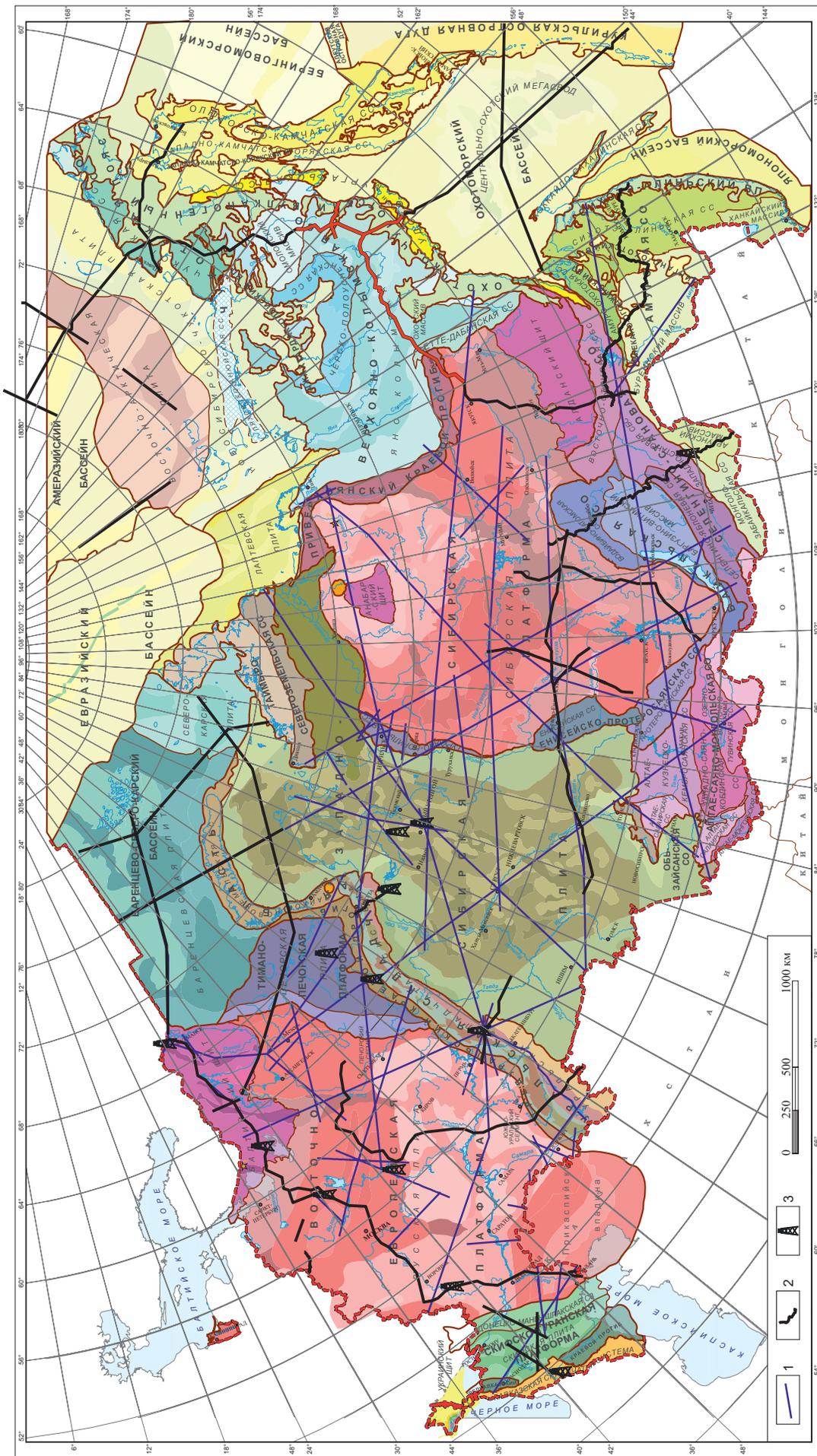


Рис. 1. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин на схеме геолого-структурного районирования территории России по С. И. Стрельникову (2009 г.) с сокращениями

1 — глубинные геофизические профили, выполненные до 1995 г., 2 — опорные геолого-геофизические профили, выполненные в 1995–2017 гг., 3 — сверхглубокие и параметрические скважины. Красным цветом показан фрагмент профилей, приведенный на рис. 3

велись по непрерывным системам с редким расположением пунктов взрывов или по системам точечных зондирований. В результате этих исследований были сформированы самые первые представления о глубинном строении изучаемых территорий и разработаны основы производственной методики таких работ.

Следующий этап 1972–1994 гг. связан с принятием в 1972 г. программы «Система регионального изучения коры и верхней мантии вдоль геотравверсов, проложенных через районы бурения глубоких и сверхглубоких скважин» и началом систематического широкомасштабного изучения глубинного строения литосферы сейсмическими методами, в том числе с использованием мирных ядерных взрывов [12]. За это время на территории бывшего СССР было отработано более 70 тыс. пог. км профилей ГСЗ-МОВЗ. Работы выполнялись преимущественно с использованием автономных сейсмических регистраторов и малоканалных сейсмостанций с трехкомпонентной регистрацией волнового поля. В результате обработки и интерпретации материалов была получена важная информация о глубинном геологическом строении огромной территории. Особое значение имели результаты глубокого и сверхглубокого бурения и в первую очередь по Кольской сверхглубокой скважине, давшие мощный импульс геологическому переосмыслению результатов глубинной геофизики.

Несмотря на достигнутые успехи в изучении глубинного строения, к середине 1990-х годов полученные результаты перестали в полной мере удовлетворять потребности геологической науки. Для надежного прогнозирования и обнаружения новых рудных объектов и минерагенических таксонов разного ранга требовалось повышение информативности и детальности глубинных геологических и геофизических методов, выявление малокоонтрастных признаков изменения геологической среды. Сейсморазведка методом ГСЗ не могла в полной мере обеспечить решение поставленных задач. В то же время значительно больший объем детальной геофизической информации по структуре всей земной коры, по латеральным и вертикальным неоднородностям поверхности Мохоровичича и верхней мантии предоставляли современные глубинные сейсмические исследования методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ).

Современный период берет свой отсчет с 1994–1995 гг., когда при глубинных сейсмических исследованиях стали широко применяться многоканальные телеметрические системы регистрации и многократные системы наблюдений глубинного МОВ-ОГТ. В настоящее время работы по созданию Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей носят комплексный характер и выполняются как на суше, так и в пределах морских акваторий.

В настоящее время Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей включает как сверхдлинные профили ГСЗ с ядерными взрывами, отработанные до 1995 г. [2], так и комплексные опорные геолого-геофизические профили, выполненные на современной аппаратурно-технологической базе [22]. Комплекс полевых работ на современных опорных профилях, помимо глубинных сейсмических наблюдений, включает геоэлектрические исследования, а камеральный этап – обработку

ретроспективных данных по полю силы тяжести и аномальному магнитному полю. Общий объем сверхдлинных профилей ГСЗ, входящих в Государственную сеть опорных геолого-геофизических профилей России, составляет более 57 000 пог. км, а объем современных комплексных геолого-геофизических профилей почти 32 000 пог. км, из них на акваториях более 12 500 пог. км [9].

Построение карт глубинного строения. Общими элементами глубинного строения, выделяемыми как на ретроспективных, так и современных геолого-геофизических профилях, являются глубина залегания границы Мохоровичича (граница М, отождествляемая с подошвой земной коры); подошва осадочного слоя или поверхность фундамента (в зависимости от особенностей геологического строения регионов поверхность, отождествляемая с кровлей консолидированной (осадочной метаморфизованной) коры или кристаллической (верхней) земной коры; граница между верхней и нижней кристаллической корой (между гранито-гнейсовым и базальтовым слоями). Наиболее надежно определяются положение границы М (по записям закрытых отраженных РмР и преломленных Рг-волн и значениям скоростей $V_p > 7,8–8,0$ км/с ниже этой границы) и подошва осадочного слоя (по характерной смене волновой картины на временных разрезах МОВ-ОГТ и скачку скоростей V_p от значений меньших 3,5–4,5 км/с до 5,5 км/с и выше). Выделение остальных элементов глубинного строения сталкивается с большей неоднозначностью как в связи с меньшей контрастностью этих элементов в геофизических полях, так и неопределенностью их геологической интерпретации.

К настоящему времени для всей рассматриваемой территории создан комплект, являющийся ключевым элементом карт глубинного строения Международного проекта «Глубинные процессы и металлогения Северной, Центральной и Восточной Азии». Комплект создан средствами ArcGIS и представлен цифровыми картами (шаг гридирования 5×5 км) в единой системе координат с использованием топографической основы м-ба 1 : 5 000 000 в проекции Lambert Conformal Conic с центральным меридианом 92° в.д. и стандартными параллелями 35° и 65° с.ш. Комплект включает следующие три карты, отражающие параметры основных подразделений земной коры: глубина залегания поверхности М, мощность осадочного чехла, мощность консолидированной земной коры. Помимо этого, комплект содержит карту комплексного районирования потенциальных полей и карту типов земной коры [34].

Карта глубины залегания поверхности М играет важную роль при изучении глубинного строения Земли. При сейсмологических и глобальных геофизических построениях знание данного параметра необходимо для расчета соответствующих поправок, а при геологической интерпретации он является базовым элементом как для структурных, так и геодинамических построений. Глубина залегания поверхности М (рис. 2, а) используется для определения мощности земной коры: на суше вводится поправка за высоту рельефа, на акваториях – за глубину моря. Изменение мощности коры в совокупности со скоростными параметрами служит основным критерием для выделения континентального и океанического типов земной коры

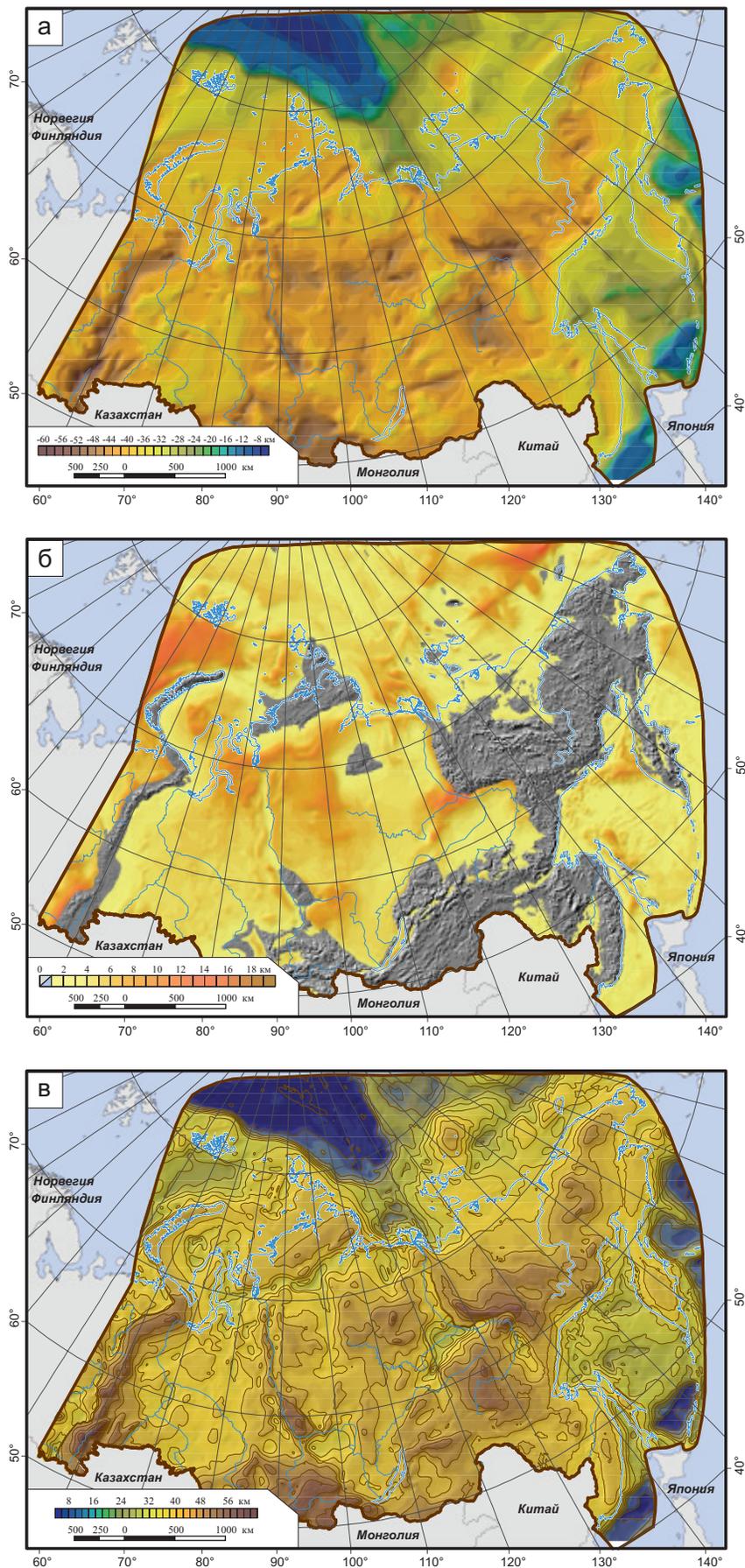


Рис. 2. Комплект карт глубинного строения Северо-Восточной Евразии

а – глубина залегания поверхности М (белыми линиями показаны основные профили глубинных сейсмических исследований); *б* – мощность осадочного чехла; *в* – мощность консолидированной земной коры

при изучении областей перехода от континентов к океанам.

Мощность земной коры определяется прежде всего сейсмическими методами. Общеизвестна методика глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), когда подошва земной коры отождествляется с границей М, рассчитанной по данным преломленных и закритических отраженных волн [36]. Иногда подошва земной коры выделяется на сейсмических разрезах, полученных методом отраженных волн (МОВ-ОГТ) [22] и по методике обменных волн удаленных землетрясений (МОВЗ) [8]. При отсутствии сейсмических данных мощность земной коры оценивается с помощью корреляционных соотношений между глубиной залегания поверхности М, топографией и аномалиями Буге [6, 18].

Начиная с 1990-х годов по мере развития сети глубинных геолого-геофизических профилей целым рядом исследователей предпринимались попытки обобщения информации о глубинах залегания подошвы земной коры и основных границах раздела в ее пределах путем построения соответствующих карт на отдельные регионы [7, 26] и территорию России в целом [3, 14, 22]. Большинство этих построений не утратили своей актуальности и поныне. Однако в связи с постоянным наращиванием информации о глубинном строении существует необходимость актуализации этих карт и унификации методик их построения.

Карта, представленная на рис. 2, а, построена по методике, подробно изложенной в работе [10]. Сначала значения глубины до границы М, снятые с сейсмических разрезов с шагом 25 км, были вынесены на карту фактического материала. Затем для заполнения значениями глубин до границы М межпрофильного пространства и обширных территорий, где сейсмические данные полностью отсутствуют, использовались цифровые карты аномального поля силы тяжести, рельефа дневной поверхности и глубин дна океана. По осредненным в радиусе 100 км значениям аномалий Буге и отметок рельефа по формулам, приведенным в [10], рассчитывались глубины Z_m отдельно для континентальной и морской частей территории с последующей увязкой изолиний в области их сочленения. Погрешность интерполяции при пересчете значений глубин Z_m в равномерный шаг оценивалась путем сравнения интерполированных и исходных значений по точкам, где значения глубин выносились по сейсмическим данным. Среднеквадратическое отклонение между интерполированными и исходными значениями не превысило ± 2 км, в связи с чем сечение между изолиниями на результирующей карте было принято равным 4 км.

Карта мощности осадочного чехла играет важную роль как для понимания внутреннего строения земной коры, так и оценки перспектив нефтегазоносности исследуемой территории. Под осадочным чехлом принято понимать толщу осадочных слабо-дислоцированных и обычно метаморфизованных горных пород, характеризующихся пологим залеганием и составляющих верхнюю часть разреза земной коры. На континентах осадочный чехол залегает на консолидированной коре, а в океанах — на втором океаническом слое. В то же время в некоторых осадочных бассейнах между осадочным чехлом и кристаллическим фундаментом выделяются промежуточные комплексы, представленные слабометаморфизованными и/или в различной сте-

пени дислоцированными образованиями. Иногда эти образования включают в осадочный слой, но чаще их рассматривают как образования так называемого промежуточного структурного этажа. Осадочный чехол уверенно определяется на сейсмических разрезах по характеру сейсмической записи и по значениям скоростей упругих волн, поэтому сейсмические методы играют ведущую роль при изучении осадочного чехла. На временных разрезах МОВ-ОГТ подошва осадочного чехла обычно фиксируется резкой сменой протяженных и субгоризонтально ориентированных осей синфазности на штриховое разноориентированное поле отражателей или полное прекращение регулярной сейсмической записи. Этот горизонт, индексируемый на разрезах МОВ-ОГТ как акустический фундамент (АФ), обычно совпадает со скоростью границей первого рода, выделяемой при наблюдениях методом преломленных волн (МПВ), ГСЗ и соответствующей, как отмечалось выше, резкому повышению скоростей продольных волн от значений меньших 3,5–4,5 до 5,5 км/с и выше. Как правило, по этим признакам и строится подошва осадочного чехла по сейсмическим данным.

Изученность территории сейсмическими методами крайне неравномерна. Наиболее изученными сейсмическими методами являются Западно-Сибирский и Восточно-Сибирский регионы. Общий объем сейсмических исследований МОВ-ОГТ в пределах нефтегазоносных провинций (в основном на шельфе и в Западной Сибири) превышает сотни тысяч погонных километров, при этом подавляющая часть данных обобщена в виде среднемасштабных структурных карт. Поэтому для построения карты мощности осадочного чехла нет необходимости использовать первичные сейсмические данные, а достаточно результатов этих предшествующих более детальных построений.

Следует отметить, что исследуемая территория в целом обеспечена картографическими материалами для построения карты мощности осадочного чехла в м-бе 1 : 5 000 000. Сведения об основных материалах, использованных при построении карты мощности осадочного чехла Северо-Восточной Евразии, приведены в табл. 1.

Создание компиляционной карты потребовало унификации использованных данных и увязки их в областях перекрытия карт. Необходимость унификации связана с тем, что исходные картографические материалы являют собой различные по форме представления информационные массивы: обобщающие карты отражают как мощность осадочного чехла, так и рельеф разновозрастного фундамента. Увязка имеющихся карт в областях их сочленения осуществлялась путем редактирования стыков с учетом характера потенциальных полей. На перекрывающихся участках предпочтение отдавалось более детальной информации. На сводной карте изопахитами с сечением один километр представлена мощность разновозрастного осадочного чехла (рис. 2, б).

Карта мощности консолидированной земной коры (рис. 2, в) была построена как разность между картами мощности земной коры и мощности осадочного чехла.

Построение опорных геолого-геофизических моделей. Создание опорной геолого-геофизической модели — основного источника информации о глу-

**Основные картографические материалы, использованные
при построении карты мощности осадочного чехла Северо-Восточной Евразии**

| Год | Автор (редактор) | Год | Автор (редактор) | Год | Автор (редактор) |
|------|-----------------------------|------|---------------------|------|---------------------------|
| 1981 | Сурков В.С. и др. | 2001 | Парфенов Л.М. и др. | 2009 | Сурков В.С. и др. |
| 1982 | Семенович В.В. и др. | 2002 | Эринчек Ю.М. и др. | 2009 | Дивинс Д.Л. и др. (англ.) |
| 1986 | Красный Л.И. и др. | 2004 | Грамберг И.С. и др. | 2009 | Грантз А. и др. (англ.) |
| 1988 | Костюченко С.Л. и др. | 2004 | Веселов О.В. и др. | 2010 | Ласке Г. и др. (англ.) |
| 1988 | Богданов Н.А. и др. | 2005 | Ким Б.И. и др. | 2010 | Шокальский и др. С. П. |
| 1999 | Эринчек Ю.М. и др. | 2006 | Корень Т.Н. и др. | 2011 | Сакулина Т.С. и др. |
| 2000 | Костюченко С.Л. и др. | 2007 | Сурков В.С. и др. | 2011 | Поселов В.А. и др. |
| 2001 | Грамберг И.С. и др. (англ.) | 2008 | Ларичев А.И. и др. | 2016 | Петров О.В. и др. (англ.) |

бинном строении – направлено на решение фундаментальных и прикладных задач региональной геологии и рассматривается как основа последующих геолого-тектонических построений в крупных регионах. Опорная модель земной коры и верхней мантии представляется как иерархическая система, включающая комплекс геофизических (монометодных) разрезов и результатов их интерпретации (комплексных моделей). Все элементы опорной геолого-геофизической модели строятся (трансформируются) на единой модельной линии, соответствующей линии срединных точек МОВ-ОГТ (наиболее детальный полевой геофизический метод). Модель призвана максимально полно, достоверно и наглядно отображать совокупность данных о глубинном строении.

Комплекс монометодных разрезов представлен результатами обработки и интерпретации полевых материалов, полученных на опорных геолого-геофизических профилях и ретроспективных данных. Разрезы, построенные по полевым материалам, включают глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ, скоростной разрез (данные ГСЗ), геоэлектрический разрез (совокупность данных АМТЗ, МТЗ, ГМТЗ), а результаты обработки и интерпретации ретроспективных данных – плотностной разрез, карты аномального магнитного поля и поля силы тяжести в полосе профиля шириной не менее 150 км.

Результаты интерпретации вышеприведенного комплекса монометодных разрезов и карт выражены в двух моделях: согласованной структурно-физической и комплексной геолого-геофизической. Структурно-физическая модель, отражающая распределение физических параметров и структурных элементов земной коры и верхней мантии, представляет собой согласованную «свертку» монометодных моделей и является основой дальнейшей интерпретации, визуализированной в комплексной геолого-геофизической модели.

В качестве примера опорной геолого-геофизической модели приведены три ее основных элемента, представленные в виде системы блок-диаграмм по восточному фрагменту композиционного опорного профиля 3-ДВ–2-ДВ (красная линия на рис. 1), обработка и интерпретация которого была завершена в 2016 г. Блок-диаграммы (3D-модели) демонстрируют структурно-физические параметры вертикального среза земной коры (рис. 3, а, б) и результат их интерпретации (рис. 3, в) в совокупности с картами соответствующего содержания.

Глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ, дополненный схемой районирования потенциальных полей (рис. 3, а), отражает наиболее «тонкие» структурные особенности как строения земной коры на всю ее мощность (вертикальный срез), так и положение крупных структур глубинного строения по площади (схема районирования на основе комплексной классификации гравимагнитных данных).

Глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ является результатом обработки полевых работ на опорном геолого-геофизическом профиле 3-ДВ. Основные показатели методики полевых работ представлены в табл. 2.

Обработка материалов МОВ-ОГТ выполнена с использованием обрабатывающей системы ProMAX 2D/3D с учетом особенностей волнового поля и 25 секундной длительности записи. Граф обработки включал следующие процедуры:

- инсталляция геометрии профиля, ввод данных о координатах и высотах точек профиля;
- сортировка трасс для суммирования по ОГТ с учетом истинного положения глубинных точек в плане (бинирование) в связи с криволинейностью профиля;
- редакция трасс и ослабление звуковой волны;
- восстановление амплитуд и нормализация трасс;
- выбор процедур регулировки амплитуд для сохранения максимальной динамической выразительности записи;
- деконволюция исходных трасс;
- резекция помех в верхней части записи (интервал 0–5 с);
- выполнение интерактивной автоматической коррекции статических поправок для каждого этапа корреляции кинематических поправок;
- полосовая фильтрация;
- миграция временного разреза (постстэкмиграция);
- FX-деконволюция;
- пересчет временного разреза в линейный масштаб глубин с использованием скоростей ГСЗ.

Схема районирования потенциальных полей, дополняющая глубинный сейсмический разрез, представляет фрагмент ранее созданной Е. Д. Мильштейн схемы районирования потенциальных полей Циркумпольной Арктики [17] с детализацией и уточнениями. Один из основных принципов районирования – выделение структур на уровне

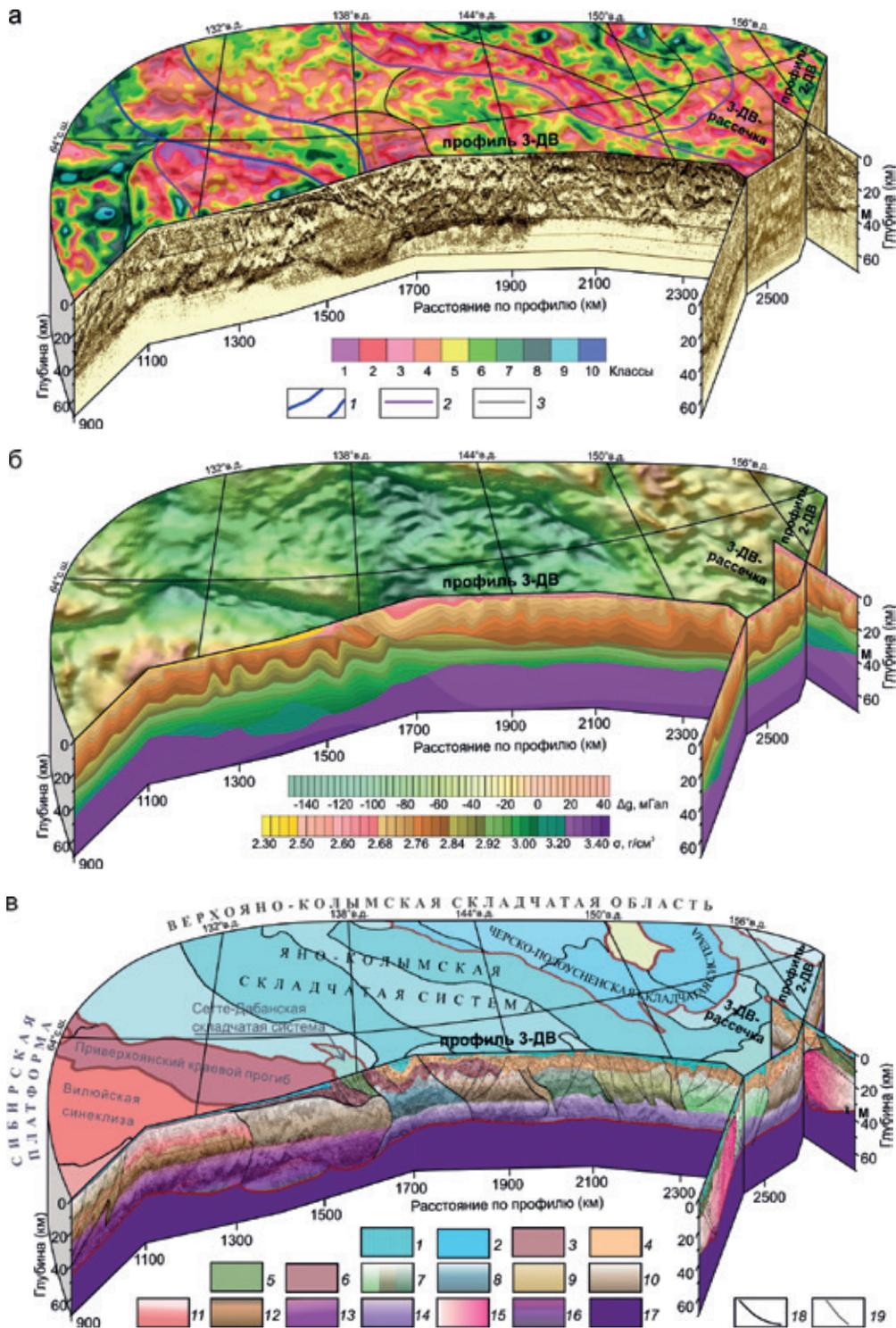


Рис. 3. Пример опорной геолого-геофизической модели

a – глубинный разрез МОВ-ОГТ и схема районирования по потенциальным полям; *б* – плотностной разрез и карта аномалий силы тяжести (ред. Буге); *в* – геолого-геофизическая модель и схема геолого-структурного районирования. Положение профиля см. на рис. 1.

а: 1 – зона сочленения (пограничная зона) аномальных областей, определенная по комплексу параметров: максимальным значениям мощности КК, реке градиентного изменения значений мощности КК, морфологическим признакам аномалий классов; 2 – границы аномальных районов, определенные по морфологическим признакам аномалий классов и с учетом параметров глубинного строения; 3 – границы аномальных участков (блоков), определенные по морфологическим признакам аномалий классов и с учетом параметров глубинного строения.

в: 1–3 – структурно-вещественные комплексы осадочного чехла: 1 – терригенный мезозойский, 2 – осадочно-вулканогенный позднемезозойский, 3 – карбонатно-терригенный верхнепротерозойско-нижнепалеозойский; 4–6 – структурно-вещественные комплексы складчато-метаморфического комплекса надвигово-складчатых поясов: 4 – терригенно-карбонатный верхнепалеозойско-нижнемезозойский, 5 – терригенно-карбонатный ниже-среднепалеозойский, 6 – карбонатно-терригенный зеленосланцевый верхнепротерозойско-среднепалеозойский; 7–9 – кристаллическая верхняя кора складчатых областей (по возрасту главного преобразования): 7 – позднемезозойская, 8 – раннемезозойская, 9 – каледонская; 10, 11 – верхняя кора платформенных областей: 10 – позднепротерозойская, 11 – раннепротерозойская; 12 – средняя кора; 13, 14 – нижняя кора: платформенных (13), и складчатых (14) областей; 15 – кора островодужных систем, нерасчлененная; 16 – коро-мантийная смесь; 17 – верхняя мантия; 18 – границы тектонических блоков; 19 – разрывные нарушения

Основные показатели методики проведения работ методом МОВ-ОГТ

| Сейсморазведка | Параметры |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Метод | МОВ-ОГТ-2D |
| Тип сейсмостанции | Телеметрическая, I/O-IV |
| Система наблюдений | Центральная, симметричная |
| Общее число каналов | 1000 |
| Кратность перекрытия ОГТ | 600–100 |
| Длина рабочей расстановки | 20 050 м |
| Максимальное расстояние ПВ-ПП | 10 025 м |
| Минимальное расстояние ПВ-ПП | 25 м |
| Шаг дискретизации | 2 мс |
| Длительность сейсмической записи | 25 с |
| Расстояние между ПВ | 100 м |
| Расстояние между центрами групп СП | 50 м |
| Количество сейсмоприемников в группе | 12 |
| Источник возбуждения | Вибрационный |
| – тип источников | СВ-30/150Б «РУСИЧ» |
| – количество источников в группе | 4 |
| – количество накоплений | 8–10 |
| – длительность СВИП-сигнала | 20 с |
| – частота управляющего сигнала | 10–60 Гц |

кровли кристаллической коры, в связи с этим их границы могут не совпадать с геологическими границами, картируемыми на поверхности. Основой районирования являлся комплексный анализ в виде схемы классификации аномального магнитного поля и поля силы тяжести (рис. 3, а), а также комплект карт глубинного строения (мощность консолидированной земной коры и осадочного чехла).

При окомтуривании таксонов различных порядков основное внимание уделялось сочетанию морфоструктурных особенностей потенциальных полей и в меньшей степени знаку и интенсивности аномалий. Выделенные таксоны нескольких порядков отражают особенности строения крупных тектонических структур: аномальные провинции – континентов и океанов; аномальные области – платформ, океанических бассейнов, крупных складчатых областей; аномальные районы – крупных блоков. Помимо этого, были выделены линейные структуры, отвечающие зонам сочленения таксонов соответствующего порядка. Представленный фрагмент демонстрирует положение таксонов, соответствующих второму-третьему порядкам ранее созданной схемы, и дополнен таксонами более высокого порядка (участки).

Плотностной разрез в сочетании с картой поля силы тяжести в редукции Буге ($\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$) демонстрирует распределение плотностных неоднородностей в земной коре (рис. 3, б). Разрез создан по методике плотностного моделирования [21], рассматривающей результирующий разрез как совокупность двух элементов: регионально-градиентное нарастание плотности с глубиной) и локальных плотностных неоднородностей. Региональные 2D-модели рассчитываются на основе скоростных сейсмических разрезов ГСЗ. Разрез локальных плотностных неоднородностей представляет 3D-решение обратной задачи гравиметрии

в спектральной области с последующим независимым снижением неоднозначности решения по двум параметрам (глубине и интенсивности локальных неоднородностей) на основе априорной информации: соответствие выделенной подошвы земной коры среднему уровню границы М региона и общемировые петрофизические обобщения [15, 16, 24, 31].

Исходными данными для построения плотностного разреза явился фрагмент цифровой модели (грид $2 \times 2 \text{ км}$) «Гравиметрической карты территории России, сопредельных государств и акватории прилегающих морей м-ба 1 : 5 000 000», составленной Д. С. Зеленецким, Л. А. Целищевой в 2003 г. и дополненный цифровыми материалами съемок 1 : 200 000 в полосе профиля шириной порядка 200 км. В качестве априорной информации использованы результаты сейсмических исследований: глубинный разрез МОВ-ОГТ (определение положения подошвы осадочного чехла и внутреннего строения осадочных бассейнов); скоростные модели ГСЗ (общего тренда нарастания плотности с глубиной). Для уточнения петроплотностных характеристик верхней части разреза была использована Петроплотностная карта Северо-Востока Азии [4]. Корректировка стартовой модели выполнялась в программном модуле GM-SYS (Geosoft, Oasis Montaj) при аппроксимации вертикально-градиентной модели тонкослойной моделью с перепадом плотности между слоями – $0,02 \text{ г/см}^3$.

Разрез (фрагмент плотностного разреза опорного композиционного профиля 3-ДВ–2-ДВ протяженностью 4000 км) мощностью 80 км представляет гетерогенно-градиентную модель с выделением трех глобальных сред (осадочный чехол, консолидированная земная кора, верхняя мантия) с принципиально различным законом распределения плотностных неоднородностей и удовлетворяет

современным требованиям к глубинным плотностным разрезам:

– среднеквадратичное отклонение от наблюдаемого поля Δg (ред. Буге, с $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$) – менее 4 мГл;

– демонстрирует градиентное нарастание плотности с глубиной в соответствии с изменениями скорости V_p и повышении плотностной гетерогенности вверх по разрезу;

– средняя плотность консолидированной земной коры для блоков протяженностью более 200 км – $2,85 \pm 0,03 \text{ г/см}^3$ и плотность верхней мантии – $3,35 \pm 0,03 \text{ г/см}^3$ (при изменении мощности оцениваемого слоя порядка 35–55 км), что удовлетворяет параметрам глобальной модели Земли [32].

Основные особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии. Комплект карт (рис. 2) и опорные геолого-геофизические разрезы (рис. 3) отражают основные особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии.

Наиболее контрастно выделяется область центральной части *Евразийского бассейна* с аномально высоким положением границы М (менее 8–10 км) и относительной малой мощностью осадочного чехла, что является типичными параметрами океанической земной коры [11, 36].

Пассивная (арктическая) континентальная окраина, обрамляющая эту область, характеризуется широким диапазоном изменения мощности консолидированной земной коры 14–40 км и значительными вариациями мощности осадочного чехла – 0–16 км. Строение шельфовой зоны западной части Арктического сектора (Баренцевоморская и Северо-Карская плиты) отличается от восточной (Новосибирско-Чукотская и Восточно-Арктическая плиты). Это обусловлено различным возрастом тектонических блоков фундамента шельфовых плит, а также временем их последней проработки, более древним для западных частей и более молодым (позднемезозойским) – для восточных.

Активная Тихоокеанская окраина, занимающая восточную часть, в целом характеризуется более высоким положением границы М 12–36 км при незначительных изменениях мощности осадочного чехла 0–8 км. Характерной особенностью этой области является цепочка задуговых бассейнов (Япономорский, Южно-Курильский, Беренговоморский) с аномально малой мощностью (менее 10 км) консолидированной земной коры, отнесенная к переходному типу [11].

В пределах рассматриваемой части Евразийского континента по глубинному строению обособляются три крупных области, разделенные относительно узкими зонами. Выделенные области соответствуют крупным региональным структурам – Западно-Сибирской плите, Сибирской платформе, Верхояно-Колымской складчатой области (СО) в совокупности с Чукотской складчатой системой (СС). Особое положение занимает совокупность южных складчатых областей, включающая Алтае-Саяно-Монгольскую, Селенгино-Становую, Байкальскую и Амурскую СО.

Западно-Сибирская плита (молодая платформа) характеризуется наиболее высоким положением поверхности границы М 34–40 км при наименьших глубинах кровли мантии в центральной и северо-восточной частях плиты. Мощность осадочного чех-

ла в целом меняется от 3 до 5 км, резко возрастая до 10 км к северо-северо-восточной части. Широкий диапазон изменения мощности консолидированной земной коры 25–38 км связан как со сложным строением гетерогенного фундамента плиты, обусловленного наличием под ее чехлом различных блоков – окружающих ее складчатых сооружений и древних срединных массивов, так и с процессами растяжения земной коры на доплитном этапе ее развития.

Сибирская древняя платформа выделяется пониженным положением поверхности М (глубже 38 км). Диапазон изменения мощности земной коры платформы в целом лежит в тех же пределах, что и для других древних платформ мира, и составляет в среднем 36–44 км, увеличиваясь до 50–54 км. Приподнятым положением границы М (менее 38 км) характеризуются участки платформы, примыкающие к шельфу северных морей, и Вилюйская синеклиза, сформировавшаяся над среднепалеозойским Вилюйско-Патомским рифтом [13]. Увеличение глубины поверхности М до 50–54 км отмечается в юго-восточной и центральной частях платформы. Наибольшая изрезанность рельефа и наличие линейных форм характерны для южных районов, соседствующих с молодыми складчатыми поясами.

Сибирская платформа характеризуется широким диапазоном изменения мощности и осадочного чехла – от нулевых значений в районах щитов до 12–14 км в Вилюйской и Тунгусской синеклизах. Кроме того, эти две крупнейшие синеклизы платформы имеют принципиально различную мощность консолидированной земной коры (рис. 2, в), что отражает существенные различия в истории формирования этих структур. Резко пониженная мощность консолидированной коры до 22–24 км контрастно выделяет области развития разновозрастных внутриплатформенных и окраинно-платформенных рифтовых зон.

Верхояно-Колымская СО и Чукотская СС, входящие в состав Тихоокеанского пояса, в целом характеризуются умеренными глубинами поверхности М 36–48 км и делятся на две существенно разные области. Приподнятым положением кровли мантии 34–38 км характеризуется северная часть (Джартадак-Олойская впадина и Ляховско-Анюйская, частично Чукотская СС) при умеренно погруженном и дифференцированном – 40–48 км положении границы М для основной (большей) части территории. Уменьшение мощности консолидированной земной коры отмечается как в направлении к пассивной, так и активной окраинам континента.

Южные СО. Алтае-Саяно-Монгольская, Селенгино-Становая, Байкальская, Амурская СО отличаются широким диапазоном изменения мощности земной коры 36–54 км, линейными формами рельефа поверхности М и значительной обратной корреляцией с рельефом дневной поверхности при общем тренде повышения уровня кровли мантии на восток. Максимальные глубины границы М 50–54 км отмечены в районе горных систем Алтае-Саяно-Монгольской складчатой области, минимальные – в районе Сихотэ-Алиньской системы 36–38 км. Под межгорными впадинами поверхность Мохо существенно воздымается (максимальная амплитуда – 6–8 км). Срединные массивы складчатых областей отражаются умеренными значениями мощности земной коры 40–42 км.

Рассматривая глубинное строение сухопутной части континента, нельзя не обратить внимание на три относительно узкие субмеридиональные зоны, разделяющие крупнейшие тектонические структуры континента. Зоны выделяются повышенной до аномально высокой мощностью земной коры 50–60 км и широким развитием в их пределах «коро-мантийной смеси» [11]. Самая западная из них соответствует Уральской СО, центральная включает Енисейскую и Турухано-Норильскую СС, восточная – Сетте-Дабанскую СС и самую западную часть Яно-Колымской СС. Специфика строения этих зон выявлена серией глубинных опорных профилей [5, 33], включая приведенный на рис. 3 композиционный опорный профиль 3-ДВ–2-ДВ.

Различия в глубинном строении земной коры и верхней мантии восточной окраины Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области отчетливо фиксируются как на сейсмическом, так и плотностном разрезах, но наибольший интерес представляет зона их сочленения (рис. 3, а, б). Край Сибирского кратона, особенно эффектно визуализируемый на высокоразрешающем сейсмическом разрезе 1600–1700 км по профилю, имеет выраженную каплевидную форму, продолжающуюся под складчато-надвиговой зоной Сетте-Дабана на 180 км, при этом восточный край кратона фиксируется на глубине порядка 15–18 км. Таким образом, фактические данные подтверждают высказанный ранее [28] тезис о продолжении в восточном направлении фундамента Сибирской платформы под складчато-надвиговую систему почти на 200–250 км от современного расположения фронта надвигов.

Опорная геолого-геофизическая модель демонстрирует в вертикальном сечении зону сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой области, дополняя комплект карт глубинного строения. Это позволяет оценить морфологию глубинных структурных элементов, характеризующих особенности строения зоны сочленения двух крупных тектонических областей. Сетте-Дабанская СС (рис. 3, в) представляет сложнопостроенный пакет надвиговых пластин, состоящих из повторяющихся в стратиграфическом отношении нижнепалеозойских толщ. Поверхности сместителей наклонены к востоку под углом 45°–65° и далее выволаживаются до глубины 15–18 км. Их морфология в большей степени соответствует листрическим сбросам, которые, по имеющимся данным [28], были заложены в допалеозойское время и активированы как надвиги при мезозойском тектогенезе. В целом опорная геолого-геофизическая модель показывает, что Сетте-Дабан является верхнекоровой структурой, сформировавшейся на консолидированной коре Сибирского кратона, под которую в западном направлении погружена расчлененная нижняя кора Верхоянья.

В свою очередь на палеозойские комплексы Сетте-Дабана надвинуты мезозойские Яно-Колымской СС. В пределах этой системы по комплексу различных показателей и характеру волнового поля кристаллической коры выделяются блоки, не всегда совпадающие с подразделениями, выделенными согласно тектонической схеме геолого-структурного районирования территории России (рис. 3, в). Это связано, прежде всего, с отчетливо проявленным на опорной геолого-геофизической модели наличием двух структурных ярусов – верхнего, включающего

складчатые мезозойские комплексы, и нижнего, представленного метаморфическими комплексами кристаллической коры. Структурный план двух ярусов может существенно различаться, что и приводит к отмеченным особенностям, выявляемым при районировании. Показанные на разрезах границы блоков иногда носят весьма условный характер. Они отождествляются с глубинными зонами, трассируемыми на всю мощность коры. Относить эти зоны к дизъюнктивным элементам нет оснований, хотя в геологическом прошлом они, возможно, были таковыми. В настоящее время их можно представить как зоны резкого изменения параметров среды (изотропная – анизотропная и т. д.).

В восточной части опорной геолого-геофизической модели отражена глубинная структура столкновения двух жестких блоков земной коры в системе островная дуга – континент (по Магаданскому фрагменту профиля 2-ДВ и фрагменту залива Шелехова). Фрагменты модели демонстрируют в разных сечениях результаты субдукционного взаимодействия в пределах пограничной области Кони-Тайгоносской островодужной и Яно-Колымской складчатой систем. Глубинная граница блоков, скорее всего, маркирует шов столкновения Кони-Тайгоносской островодужной системы с аккреционной окраиной Евразии [29]. Столкновение имело место в доальбское время при закрытии задугового бассейна в результате субдукции под континент в конце юры – раннем мелу. Индикаторами этого события являются раннемеловые вулканоструктуры и тела гранитоидов к северу от рассматриваемой зоны, относимые к Удско-Мургаляскому окраинно-континентальному поясу.

Заключение. Выполненные за прошедшие 20 лет в России работы по созданию современной Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей в совокупности с ретроспективными данными по системе региональных профилей ГСЗ позволили создать на северо-восток Евразии комплект сводных специализированных карт глубинного строения. Впервые в мировой практике представлены карты глубинного строения столь высокой детальности на весьма обширный и значимый в геологическом отношении регион мира общей площадью свыше 15 млн км². Карты свидетельствуют о существенной неоднородности глубинного строения как для региона в целом, так и в пределах отдельных региональных структур. Высокая детальность карт не только демонстрирует общий тренд закономерного уменьшения мощности земной коры от центральной части Евразии к ее арктической и тихоокеанской окраинам, но и локальные особенности рельефа подошвы земной коры, особенно в узких областях внутриконтинентальных шовных зон.

Опорная геолого-геофизическая модель дополняет комплект карт глубинного строения детальной информацией о строении глубинных геологических структур в вертикальном сечении, что позволяет определять их морфологию, взаимоотношения и ориентировку в пространстве. Это дает возможность анализировать представленные в рамках модели разрезы со структурно-геологических позиций, выявляя характерные для определенных тектонических режимов структурные ансамбли. В конечном счете опорная геолого-геофизическая модель и карты глубинного строения являются единственной

возможностью оценить вне лабораторных условиях реальные результаты длительных и сложных взаимодействий различных тектонических структур как на уровне хрупкого состояния вещества в верхней коре, так и на уровне пластичных деформаций, свойственных нижней коре и верхней мантии.

Рассматриваемая совокупность карт и разрезов позволяет выявить особенности строения сложных многоярусных районов, где наблюдается несоответствие структурного плана верхнего складчатого этажа и кристаллического или консолидированного основания (Яно-Колымская СО).

Созданный комплект карт глубинного строения и опорная геолого-геофизическая модель могут являться основой для принципиально нового структурно-тектонического районирования Северо-Восточной Евразии с учетом особенностей строения земной коры и верхней мантии как самих региональных структур, так и зон их сочленения. Последнее может представлять особый интерес для прогнозно-минерагенических построений.

1. Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. — М.: ИФЗ РАН, 2013. — 412 с.

2. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. [Электронное издание]. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. — 94 с. — URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic> (дата обращения 06.10.2017).

3. Атлас карт глубинного строения земной коры и верхней мантии территории СССР / под ред. В.Ю. Зайченко, В.А. Ерхова. — М.: ВНИИГеофизика, 1989. — 84 с.

4. Ващиллов Ю.Я., Зимникова Т.П., Шило Н.А. Петрофизика поверхностных и глубинных образований Северо-Востока Азии. — М.: Наука, 1982. — 164 с.

5. Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа — Урал — Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / под ред. С.Н. Кашубина. — Екатеринбург, 2002. — 312 с.

6. Деменицкая Р.М. Кора и мантия Земли. — М.: Недра, 1967. — 280 с.

7. Дружинин В.С., Егоркин А.В., Кашубин С.Н. Новые данные о глубинной структуре Урала и прилегающих к нему областей по данным ГСЗ // ДАН СССР. Т. 315. № 5. 1990. — С. 1086—1090.

8. Золотов Е.Е., Костюченко С.Л., Ракитов В.А. Томографические разрезы литосферы Восточно-Европейской платформы // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренцевский регион / под ред. Ф.П. Митрофанова, Н.В. Шарова. — Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. — С. 71—79.

9. Кашубин С.Н. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин — основа глубинного 3D-картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа / С.Н. Кашубин, Е.Д. Мильштейн, И.Ю. Винокуров, Ю.М. Эринчек, Р.Б. Сержантов, В.Ю. Татаринцов // Регион. геология и металлогения. 2016. № 67. — С. 43—48.

10. Кашубин С.Н. Карта мощности земной коры Циркумполярной Арктики / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.А. Андросов, А.Ф. Морозов, В.Д. Каминский, В.А. Поселов // Регион. геология и металлогения. 2011. № 46. — С. 5—13.

11. Кашубин С.Н. Типы земной коры Центральной и Северо-Восточной Азии, дальневосточной и арктической областей перехода континент—океан / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн, Е.А. Андросов,

И.Ю. Винокуров, С.П. Шокальский // Регион. геология и металлогения. 2018. № 73. — С. 6—18.

12. Козловский Е.А. Комплексная программа глубинного изучения земных недр // Сов. геология. 1982. № 9. — С. 3—12.

13. Короновский Н.В. Геология России и сопредельных территорий. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 240 с.

14. Костюченко С.Л., Морозов А.Ф. Геолого-геофизические образы земной коры и верхней мантии территории России в картах и моделях // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. науч.-практич. семинара / Роснедра, ВСЕГЕИ. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. — С. 82—85.

15. Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия. — Киев: Наукова думка, 1989. — 248 с.

16. Красовский С.С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. — Киев: Наукова думка, 1981. — 112 с.

17. Кременецкий А.А. Геохимическое картирование Циркумполярной Арктики: Научная парадигма, технология, предварительные результаты / А.А. Кременецкий, А.Ф. Морозов, А.Г. Пилицин, С.М. Бескин, Т.Н. Полякова, Е.Д. Мильштейн // Разведка и охрана недр. 2015. № 6. — С. 8—21.

18. Кунин Н.Я., Гончарова Н.В., Семенова Г.И. и др. Карта рельефа поверхности мантии Евразии. — М.: ИФЗ АН СССР, Мингео РСФСР, 1987.

19. Липилин А.В., Аккуратов О.С., Келлер М.Б., Шуклин Ю.К. Создание государственной сети опорных геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. — С. 7—11.

20. Липилин А.В. Глубинные сейсмические исследования в России: результаты и проблемы / А.В. Липилин, О.В. Петров, А.Л. Анискин, Ф.В. Мясников, С.Н. Кашубин, Ю.М. Эринчек // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. науч.-практич. семинара. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. — С. 85—90.

21. Мильштейн Е.Д., Петров Б.В. и др. Развитие методологических основ и технологий геологической интерпретации глубинных геофизических данных на опорных и региональных профилях с созданием специализированной геолого-картографической продукции и переоценкой минерагенического потенциала территорий // Известия ВСЕГЕИ. Т. 7 (55). — СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. — С. 135—155.

22. Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. науч.-практич. семинара. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. — 245 с.

23. Петров О.В. Российская научная школа геологической картографии в создании нового поколения государственных геологических карт территории Российской Федерации, ее континентального шельфа и глубоководных окраин Евразии и Циркумполярной Арктики / О.В. Петров, А.Ф. Морозов, Т.Н. Зубова, М.А. Шишкин, С.Н. Кашубин, С.П. Шокальский, В.В. Шатов, Т.Ю. Толмачева, Ю.Г. Леонов, М.А. Федонкин, А.И. Ханчук // Регион. геология и металлогения. 2016. № 67. — С. 6—18.

24. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга третья. Земная кора и мантия / под ред. Н.Б. Дортман. — М.: Недра, 1992. — 286 с.

25. Сержантов Р.Б. Глубинное геолого-геофизическое изучение недр России: современное состояние и основные задачи / Р.Б. Сержантов, С.Н. Кашубин, Ю.М. Эринчек, В.Ю. Татаринцов, Е.Д. Мильштейн // Регион. геология и металлогения, 2013. № 53. — С. 26—31.

26. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE / под ред. А.Ф. Морозова, Н.В. Межеловского, Н.И. Павленковой. Вып. 2. — М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. — 735 с.

27. Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным / под

ред. А.С. Сальникова. – Новосибирск: Наука, 2007. – 173 с.

28. Худoley А.К. Континентальный рифтогенез и пассивные окраины: тектоника и эволюция осадочных бассейнов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 84 с.

29. Шпикерман В.И., Фельдман Л.Л. Глубинный след зоны конвергенции в Северном Приохотье // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Третьей Всерос. конф. с международным участием (Владивосток, 20–23 сентября 2016 г.). – Владивосток: Дальнаука, 2016. – С. 109–112.

30. Эринчек Ю.М., Липилин А.В., Сержантов Р.Б. и др. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск 8–13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 282–288.

31. Christensen N.I., Mooney W.D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // *Journal of Geophysical Research*, 1995. Vol. 100. N B6. – P. 9761–9788.

32. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. Vol. 25. – P. 297–356

33. Egorkin A.V., Zaganov S.K., Pavlenkova N.A., Chemyshv N.M. Results of lithospheric studies from long-range profiles in Siberia // *Tectonophysics*. 1987. Vol. 140. – P. 29–47.

34. International project. Atlas of geological maps of Asia and adjacent areas / Eds. O.V. Petrov, Dong Shuwen, E.A. Kiselev, A.F. Morozov. – St. Petersburg: VSEGEI Publishing House. 2016. – 48 p.

35. Milshtein E.D., Petrov O.V., Serzhantov R.B. et al. Deep Structure Maps of Northern, Central and Eastern Asia. 35th International Geological Congress, 27 August – 4 September 2016: abstracts. – Cape Town: South Africa, 2016

36. Mooney W.D. Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure. Treatise on Geophysics. Vol. 1: Seismology and Structure of the Earth / Eds. B. Romanowicz & A. Dziewonski. – Elsevier, 2007. – P. 361–417.

1. Aktual'nost' idej G.A. Gamburceva v geofizike XXI veka [The relevance of the ideas of G.A. Gamburtsev in geophysics of the XXI century]. Moscow: IFZ RAN. 2013. 412 p.

2. Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profilyi Rossii». Glubinnye seismicheskie razrezy po profilyam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god [Atlas «Support geological and geophysical profiles of Russia». Deep seismic sections along the DSS profiles, worked out from 1972 to 1995]. Ehlektronnoe izdanie. St. Petersburg: VSEGEI. 2013. 94 p. <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic> (06.10.2017).

3. Atlas kart glubinnogo stroeniya zemnoj kory i verhnjej mantii territorii SSSR [The Atlas of maps of the deep structure of the earth's crust and the upper mantle of the territory of the USSR]. Eds. by V.Yu. Zajchenko, V.A. Erhova. Moscow: VNIIGeofizika. 1989. 84 p.

4. Vashchilov Yu.Ya., Zimnikova T.P., Shilo N.A. Petrofizika poverhnostnyh i glubinyh obrazovaniy Severo-Vostoka Azii [Petrophysics of surface and deep formations of North-East Asia]. Moscow: Nauka. 1982. 164 p.

5. Geotravers «GRANIT»: Vostochno-Evropejskaya platforma – Ural – Zapadnaya Sibir' (stroenie zemnoj kory po rezul'tatam kompleksnyh geologo-geofizicheskikh issledovaniy) [Geotravers «GRANIT»: Eastern European Platform – Ural – Western Siberia (structure of the Earth's crust based on the results of complex geological and geophysical studies)]. Ed. by S.N. Kashubina. Ekaterinburg. 2002. 312 p.

6. Demenitskaya R.M. Kora i mantiya Zemli [Earth's crust and mantle]. Moscow: Nedra. 1967.

7. Druzhinin V.S., Egorkin A.V., Kashubin S.N. New data on deep structure of the Urals and adjacent areas from DSS. *DAN SSSR*. 1990. Vol. 315. No 5, pp. 1086–1090. (In Russian).

8. Zolotov E.E., Kostyuchenko S.L., Rakitov V.A. Tomographic sections of the lithosphere of the East European Platform. *Seismological model of the lithosphere of North Europe: The Barents Region*. Eds. by F.P. Mitrofanov, N.V. Sharov. Apatity: KSC RAS. 1998. Pt. 1, pp. 71–79. (In Russian).

9. Kashubin S.N., Milshtein E.D., Vinokurov I.Yu., Erinchek Yu.M., Serzhantov R.B., Tatarinov V.Yu. State network of geological and geophysical survey base lines, parametric and superdeep wells: a base for deep 3D-mapping of the Russian Federation and its continental shelf. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2016. No 67, pp. 43–48. (In Russian).

10. Kashubin S.N., Petrov O.V., Androssov E.A., Morozov A.F., Kaminsky V.D., Poselov V.A. Map of crust thickness of the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2011. No 46, pp. 5–13. (In Russian).

11. Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D., Androssov E.A., Vinokurov I.Yu., Shokalsky S.P. Crustal types of Central and Northeast Asia, Far Eastern and Arctic regions of the continent-ocean transition. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2018. No 73, pp. 6–18. (In Russian).

12. Kozlovsky E.A. Comprehensive program of deep study of the interior of the Earth. *Sov. geologiya*. 1982. No 9, pp. 3–12. (In Russian).

13. Koronovsky N.V. Geologiya Rossii i soprodel'nyh territorij [Geology of Russia and adjacent areas]. Moscow: Academia Publishing Centre. 2011. 240 p.

14. Kostyuchenko S.L., Morozov A.F. Geological and geophysical images of the Earth's crust and upper mantle of Russia in maps and models. *Models of the Earth's crust and upper mantle from results of deep seismic profiling: Materials of the International scientific and practical seminar. Rosnedra – VSEGEI*. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. Pp. 82–85. (In Russian).

15. Krasovsky S.S. Gravitacionnoe modelirovanie glubinyh struktur zemnoj kory i izostaziya [Gravitational modeling of deep crustal structures and isostasy]. Kiev: Naukova dumka. 1989. 248 p.

16. Krasovsky S.S. Otrazhenie dinamiki zemnoj kory kontinental'nogo tipa v gravitacionnom pole [Reflection of the dynamics of the continental crust in the gravitational field]. Kiev: Naukova dumka. 1981. 112 p.

17. Kremenetskiy A.A., Morozov A.F., Pilitsyn A.G., Beskin S.M., Polyakova T.N., Milshtein E.D. Geochemical mapping of Circumpolar Arctic region: scientific paradigm, technology, preliminary results. *Razvedka i ohrana nedr*. 2015. No 6, pp. 8–21. (In Russian).

18. Kunin N.Ya., Goncharova N.V., Semenova G.I. et al. Karta rel'efa poverhnosti mantii Evrazii [Map of the Eurasian mantle topography]. Moscow. 1987.

19. Lipilin A.V., Akkuratov O.S., Keller M.B., Shchukin Yu.K. Creation of the state network of geophysical survey base lines, parametric and superdeep wells. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2000. No 10, pp. 7–11. (In Russian).

20. Lipilin A.V., Petrov O.V., Aniskin A.L., Myasnikov F.V., Kashubin S.N., Erinchek Yu.M. Deep seismic studies in Russia: results and problems. *Models of the Earth's crust and upper mantle based on results of deep seismic profiling. Materials of the International scientific and practical seminar. Rosnedra – VSEGEI*. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. Pp. 85–90. (In Russian).

21. Milshtein E.D., Petrov B.V. et al. Development of methodological foundations and technologies for geological interpretation of deep geophysical data on survey base and regional lines with the creation of special geological mapping products and reassessment of the metallogenic potential of areas. *Proceedings of VSEGEI*. Vol. 7(55). St. Petersburg: VSEGEI. 2008. Pp. 135–155. (In Russian).

22. Modeli zemnoj kory i verhnjej mantii po rezul'tatam glubinnogo seismoprofilirovaniya: Materialy Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar. [Models of the Earth's crust and upper mantle based on results of deep seismic profiling: Materials of the International scientific and practical seminar]. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House. 2007. 245 p.

23. Petrov O.V., Morozov A.F., Zubova T.N., Shishkin M.A., Kashubin S.N., Shokalsky S.P., Shatov V.V., Tolmacheva T.Yu., Leonov Yu.G., Fedonkin M.A., Khanchuk A.I. Russian scholar school of geological mapping in creating a new generation of state geological maps of the Russian Federation, its continental shelf and deep water margins of Eurasia and the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2016. No 67. Pp. 6–18. (In Russian).
24. Petrofizika: Spravochnik. V trekh knigah. Kniga tret'ya. Zemnaya kora i mantiya [Petrophysics: Handbook. In three books. Third book. Earth's crust and mantle]. Ed. by N.B. Dortman. Moscow: Nedra. 1992. 286 p.
25. Serzhantov R.B., Kashubin S.N., Erinchek Yu.M., Tatarinov V.Yu., Milshtein E.D. Deep geological and geophysical study of Russian mineral resources: the current state and main tasks. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 53, pp. 26–31. (In Russian).
26. Stroenie i dinamika litosfery Vostochnoj Evropy. Rezul'taty issledovaniy po programme EUROPROBE [Structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe. Research results for the EUROPROBE program]. Eds. by A.F. Morozov, N.V. Mezhelovsky, N.I. Pavlenkova. Iss. 2. Moscow: GEOKART. GEOS. 2006. 735 p.
27. Struktura i stroenie zemnoj kory Magadanskogo sektora Rossii po geologo-geofizicheskim dannym [Crust structure and composition in the Magadan sector of Russia from geological and geophysical data]. Ed. by A.S. Salnikov. Novosibirsk: Nauka. 2007. 173 p.
28. Hudoley A.K. Kontinental'nyj riftogenez i passivnye okrainy: tektonika i ehvoluciya osadochnyh bassejnov [Continental rifting and passive margins: tectonics and evolution of sedimentary basins]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGU. 2004. 84 p.
29. Shpikerman V.I., Feldman L.L. Deep trace of the convergence zone in the North Okhotsk Region. *Geological processes in the lithospheric plates' subduction, collision, and slide environments: Materials of the 3rd Scientific conference with international participation. Vladivostok, September 20–23, 2016*. Vladivostok: Dal'nauka. 2016. Pp. 109–112. (In Russian).
30. Erinchek Yu.M., Lipilin A.V., Serzhantov R.B. et al. State network of geological and geophysical survey base lines, parametric and superdeep wells. *Geophysical methods of crust studies: proceedings of the Russian conference, dedicated to the 100th anniversary of Academician N.N. Puzyrev (Novosibirsk, December 8–13, 2014)*. Novosibirsk: IPGG SB RAS Publishing House. 2014. P. 282–288. (In Russian).
31. Christensen, N.I., Mooney, W.D. 1995: Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 100. Iss. 7. 9761–9788.
32. Dziewonski, A.M., Anderson, D.L. 1981: Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter*. Vol. 25. 297–356.
33. Egorokin, A.V., Zuganov, S.K., Pavlenkova, N.A., Chemyshv, N.M. 1987: Results of lithospheric studies from long-range profiles in Siberia. *Tectonophysics*. 140. P. 29–47.
34. Petrov, O.V., Shuwen, Dong, Kiselev, E.A., Morozov, A.F. (eds.) 2016: International project. Atlas of geological maps of Asia and adjacent areas. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House. 48.
35. Milshtein, E.D., Petrov, O.V., Serzhantov, R.B., Androsov, E.A., Kashubin, S.N., Erinchek, Yu.M. 2016: Deep Structure Maps of Northern, Central and Eastern Asia. 35th International Geological Congress, 27 August – 4 September: abstracts. Cape Town. South Africa.
36. Mooney, W.D. 2007: Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure. In Romanowicz, B., Dziewonski, A. (eds.): *Treatise on Geophysics. Vol. 1: Seismology and Structure of the Earth*. Elsevier. 361–417.

Кашубин Сергей Николаевич – доктор геол.-минерал. наук, профессор, зам. ген. директора, VSEGEI¹. <sergey_kashubin@vsegei.ru>

Петров Олег Владимирович – доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Мильштейн Евгения Дововна – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом VSEGEI¹. <evgenia_milshtein@vsegei.ru>

Кудрявцев Иван Вячеславович – директор, Центр глубинной геофизики VSEGEI¹. <Ivan_Kudryavtsev@vsegei.ru>

Андросов Евгений Александрович – вед. геофизик, VSEGEI¹. <evgeiy_androsov@vsegei.ru>

Винокуров Илья Юрьевич – канд. геол.-минерал. наук, зам. зав. отделом, VSEGEI¹. <ilya_vinokurov@vsegei.ru>

Тарасова Ольга Александровна – геофизик, VSEGEI¹. <Olga_Tarasova@vsegei.ru>

Эринчек Юрий Маркович – канд. геол.-минерал. наук, консультант по региональным геофизическим работам, VSEGEI¹. <Yuri_Erinchek@vsegei.ru>

Kashubin Sergey Nikolaevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director General, VSEGEI¹. <sergey_kashubin@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Milshtein Evgenia Dovovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the entire department, VSEGEI¹. <evgenia_milshtein@vsegei.ru>

Kudryavtsev Ivan Vacheslavovich – Director of Deep Geophysics Center, VSEGEI¹. <Ivan_Kudryavtsev@vsegei.ru>

Androsov Evgeniy Aleksandrovich – Leading geophysicist, VSEGEI¹. <evgeiy_androsov@vsegei.ru>

Vinokurov Ilya Yurievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head of the entire department, VSEGEI¹. <ilya_vinokurov@vsegei.ru>

Tarasova Olga Aleksandrovna – Geophysics, VSEGEI¹. <Olga_Tarasova@vsegei.ru>

Erinchek Yuri Markovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Consultant for regional geophysical works, VSEGEI¹. <Yuri_Erinchek@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (VSEGEI). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.