

**СТРУКТУРА ВЕРХНЕЙ МАНТИИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ  
РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ**

**А.В. Яковлев, Н.А. Бушенкова, И.Ю. Кулаков, Н.Л. Добрецов**

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

На основании обработки данных глобального каталога Международного сейсмологического центра (ISC) с использованием алгоритма сейсмической томографии впервые получена модель неоднородностей скоростей  $P$ -волн в верхней мантии под Арктическим регионом. В работе использованы времена пробега сейсмических волн от землетрясений, расположенных в изучаемом регионе и зарегистрированных станциями мировой сети, а также данные местных станций, регистрирующих мировую сейсмичность. Наблюдаемые в полученной модели мантии сейсмические аномалии явно соотносятся с основными структурными единицами литосферы Арктического бассейна. Высокоскоростные аномалии на глубинах до 250—300 км в плане соответствуют положению мощных докембрийских литосферных плит, таких как Восточно-Европейская платформа с сопряженной шельфовой областью, Сибирская плита, Канадский щит и Гренландия. При этом под центральной частью Гренландии наблюдается участок резкого утонения литосферы, который можно объяснить влиянием Исландского плюма, который прошел под Гренландией 50—60 млн лет назад. Напротив, под Чукоткой, Якутией и Аляской наблюдаются низкоскоростные аномалии, проявляя относительно тонкую, реологически ослабленную и сильнодеформированную литосферу. Некоторые из этих низкоскоростных областей совпадают с проявлениями кайнозойского вулканизма. Под Чукоткой на глубинах 500—700 км наблюдается высокоскоростная аномалия, которая может быть проявлением реликтовой зоны субдукции, проходившей здесь около 100 млн лет назад. В океанической части региона полученная модель чрезвычайно неоднородна. В северной части Атлантики прослеживается интенсивная низкоскоростная аномалия, которая демонстрирует значительное влияние Исландского плюма и активного рифтинга в раскрытии океанического бассейна. Напротив, под центральной частью Северного Ледовитого океана значительных аномалий не наблюдается, что подразумевает пассивный характер рифтинга.

*Арктический регион, сейсмическая томография, структура верхней мантии.*

**STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE IN THE CIRCUM-ARCTIC REGION  
FROM REGIONAL SEISMIC TOMOGRAPHY**

**A.V. Jakovlev, N.A. Bushenkova, I.Yu. Koulakov, and N.L. Dobretsov**

We present a new three-dimensional model of  $P$ -velocity anomalies in the upper mantle beneath the Circum-Arctic region based on tomographic inversion of global data from the catalogues of the International Seismological Centre (ISC, 2007). We used travel times of seismic waves from events located in the study area which were recorded by the worldwide network, as well as data from remote events registered by stations in the study region. The obtained mantle seismic anomalies clearly correlate with the main lithosphere structures in the Circum-Arctic region. High-velocity anomalies down to 250–300 km depth correspond to Precambrian thick lithosphere plates, such as the East European Platform with the adjacent shelf areas, Siberian Plate, Canadian Shield, and Greenland. It should be noted that lithosphere beneath the central part of Greenland appears to be strongly thinned, which can be explained by the effect of the Iceland plume which passed under Greenland 50–60 million years ago. Beneath Chukotka, Yakutia, and Alaska we observe low-velocity anomalies which represent weak and relatively thin actively deformed lithosphere. Some of these low-velocity areas coincide with manifestations of Cenozoic volcanism. A high-velocity anomaly at a depth of 500–700 km beneath Chukotka might be a relic of the zone of subduction which occurred here about 100 million years ago. In the oceanic areas, the tomography results are strongly inhomogeneous. Beneath the North Atlantic, we observe very strong low-velocity anomalies, which indicate an important role of the Iceland plume and active rifting in the opening of the ocean basin. On the contrary, beneath the central part of the Arctic Ocean, no significant anomalies are observed, which implies a passive character of rifting.

*Circum-Arctic region, seismic tomography, upper-mantle structure*

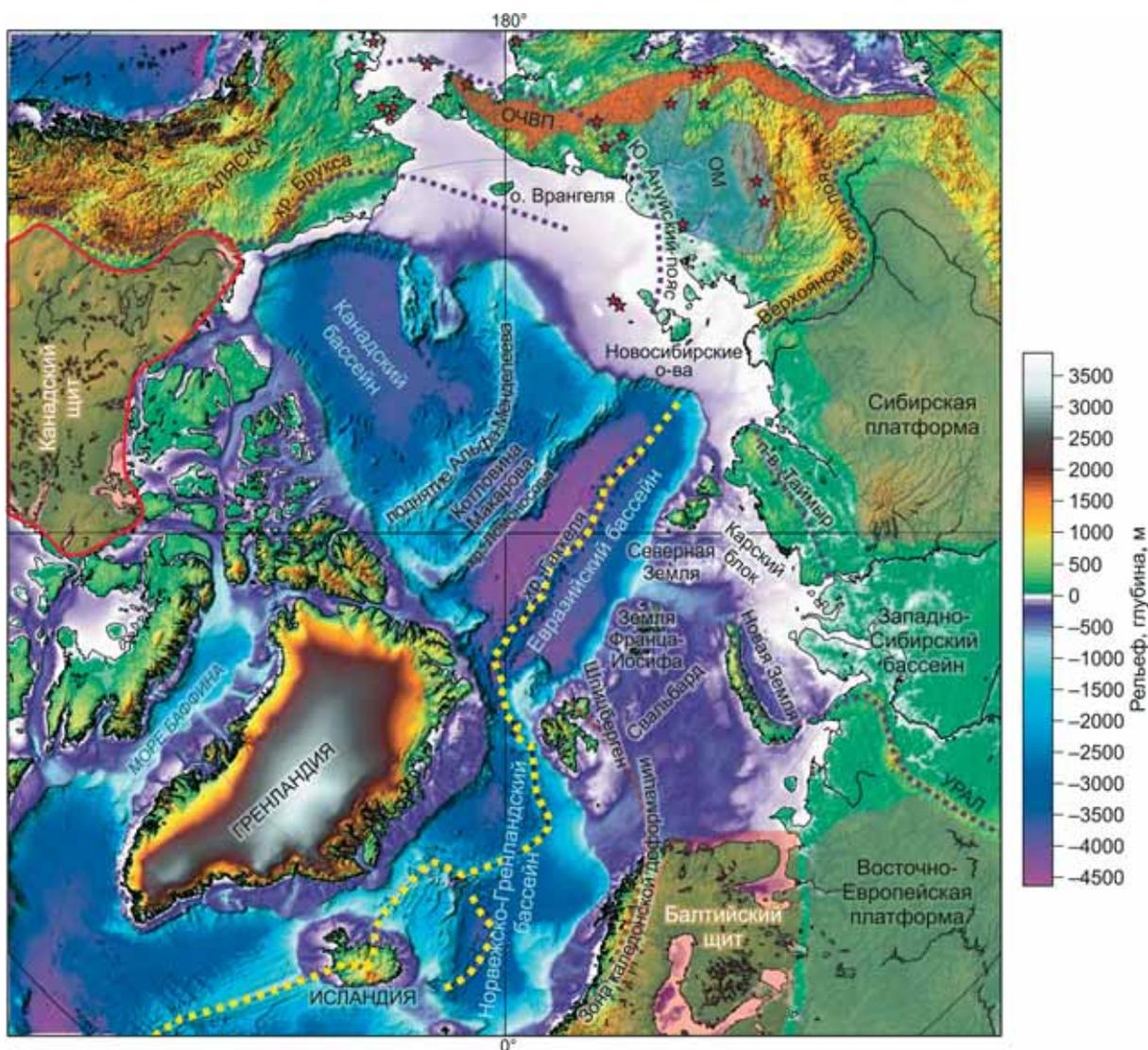
## ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление и уменьшение ледового покрытия Северного Ледовитого океана делают возможной добычу полезных ископаемых в бассейнах Арктики, что, в свою очередь, требует разномасштабного и междисциплинарного изучения геологических процессов этого региона. Понимание геологических закономерностей и восстановление этапов эволюции литосферы и коры Арктики требует информации о глубинной структуре. К сожалению, по объективным и субъективным причинам мы не можем располагать плотными системами наблюдения в Арктике, что существенно ограничивает возможности геофизических исследований. Попытки оценить мощность литосферы Арктики предпринимались уже с конца семидесятых годов, на базе комплексного анализа измерений гравитационного поля, теплового потока и сейсмических данных (см. напр., [Sacks et al., 1979; Jaurpart et al., 1998]). Одной из первых попыток получить количественные оценки параметров глубинных структур Арктики является работа [Artemieva, Mooney, 2001], в которой представлена глобальная компиляция данных о мощности литосферы и форме основных ее докембрийских блоков. Глобальная модель вариаций скорости поперечных сейсмических волн [Lebedev et al., 2009], построенная на базе данных о поверхностных волнах и включающая территорию Арктики, демонстрирует четко выделяющиеся участки толстой литосферы в районах Канадского и Балтийских щитов, Гренландии и Сибирского кратона. Региональные структуры скоростей *S*-волн под Канадским и Балтийским щитами исследовались в работах [Bruneton et al., 2004; Shapiro et al., 2005] также на базе данных о поверхностных волнах. Следует отметить, что данные по объемным сейсмическим *P*-волнам, которые обычно обеспечивают более высокое латеральное разрешение, чем поверхностные волны, для изучения глубинной структуры Арктического региона ранее не использовались. В последние десятилетия появилось несколько исследовательских сейсмических профилей через территории Баренцева и Карского морей с использованием активных источников, что дало большой объем данных (главным образом для нефтяной отрасли). Однако эти данные имеют весьма локальный характер и не позволяют изучать мантийные глубины. Кроме того, большая часть этой информации закрыта для исследовательских целей.

Карта топографии/батиметрии Арктического региона (рис. 1) отражает сложное блочное строение его коры и литосферы. Можно видеть, что примерно половина площади дна акватории Северного Ледовитого океана представлена шельфовыми участками с предположительно континентальным типом коры. Глубинные участки дна разделяются на отдельные бассейны. Норвежско-Гренландский бассейн является порождением спрединговых процессов в северной части Атлантического океана и на переходе к Северному Ледовитому океану. Следует отметить, что наиболее выраженные глубоководные участки этого бассейна (со стороны Европы) не совпадают с основной осью спрединга Атлантического океана, проходящего через Исландию. По-видимому, это связано с тем, что утолщение и укрепление литосферы вдоль оси спрединга за счет дополнительного вещества, поставляемого Исландским плюмом, привело к расширению зоны спрединга в поисках альтернативных более ослабленных областей для вскрытия океанической литосферы.

На территории Северного Ледовитого океана на батиметрической карте явно выделяются три глубоководных бассейна (см. рис. 1): примерно равные по размерам Канадский и Евразийский бассейны и более мелкая котловина Макарова, расположенная между ними. Эти бассейны четко отделяются друг от друга хребтами Ломоносова и поднятием Альфа-Менделеева. Евразийский бассейн является прямым продолжением Норвежско-Гренландского океанического сегмента со срединно-океаническим хребтом Геккеля и линейными магнитными аномалиями [Circum-Arctic..., 2010], по которым можно оценить скорость раздвижения океанического дна. В двух других депрессиях, в Канадском бассейне и котловине Макарова, процесс спрединга не наблюдается: ни хребта, ни линейных магнитных аномалий не прослеживается. Происхождение этих бассейнов является объектом оживленных дискуссий. Они интерпретируются и как реликтовые океанические бассейны, и как области с континентальной корой, но подвергнутые интенсивному растяжению. Однако реально действовавшие механизмы их генезиса остаются не выясненными из-за отсутствия каких-либо данных о глубинной структуре этих областей.

Существуют модели тектонической эволюции Арктического региона, полученные на основе комплексных геологических исследований с использованием результатов палеореконструкций [Ziegler, 1988; Кабаньков и др., 2004; Косько, 2007; Сорохтин и др., 2010; Верниковский и др., 2010]. Причем в некоторых из них приведены результаты, подтверждающие существование реликтов древней платформы в Северном Ледовитом океане, изменявшей форму под влиянием тектонических процессов. Одним из останков этой древней платформы (названной в ранних исследованиях, например в работах [Пушаровский, 1960, 1976; Шатский, 1963], «Гиперборейской платформой») считается область Центрально-Арктических поднятий с сохранившимися палеозойскими и мезозойскими толщами. Так, согласно исследованиям [Хаин, 2001; Филятова, Хаин, 2007], кора областей хребтов Ломоносова, Альфа-Менделеева и Чукотского плато представлена породами континентального типа. Причем эти фрагменты имеют харак-



**Рис. 1. Топография/батиметрия и основные тектонические/географические элементы изучаемого региона.**

Желтый пунктир — положение океанических хребтов; синий пунктир — границы основных складчатых поясов. Красными звездочками обозначены проявления современного кайнозойского вулканизма на Чукотке, Якутии и Аляске. ОЧВП — Охотско-Чукотский вулканический пояс; ОМ — Оломонский массив.

теристики, сходные с наблюдаемыми в пределах Северо-Американского, Восточно-Европейского и Сибирского кратонов, и являются, как полагают, осколками суперконтинента Родиния, распавшегося в позднем протерозое 950—830 млн лет тому назад [Metelkin et al., 2011].

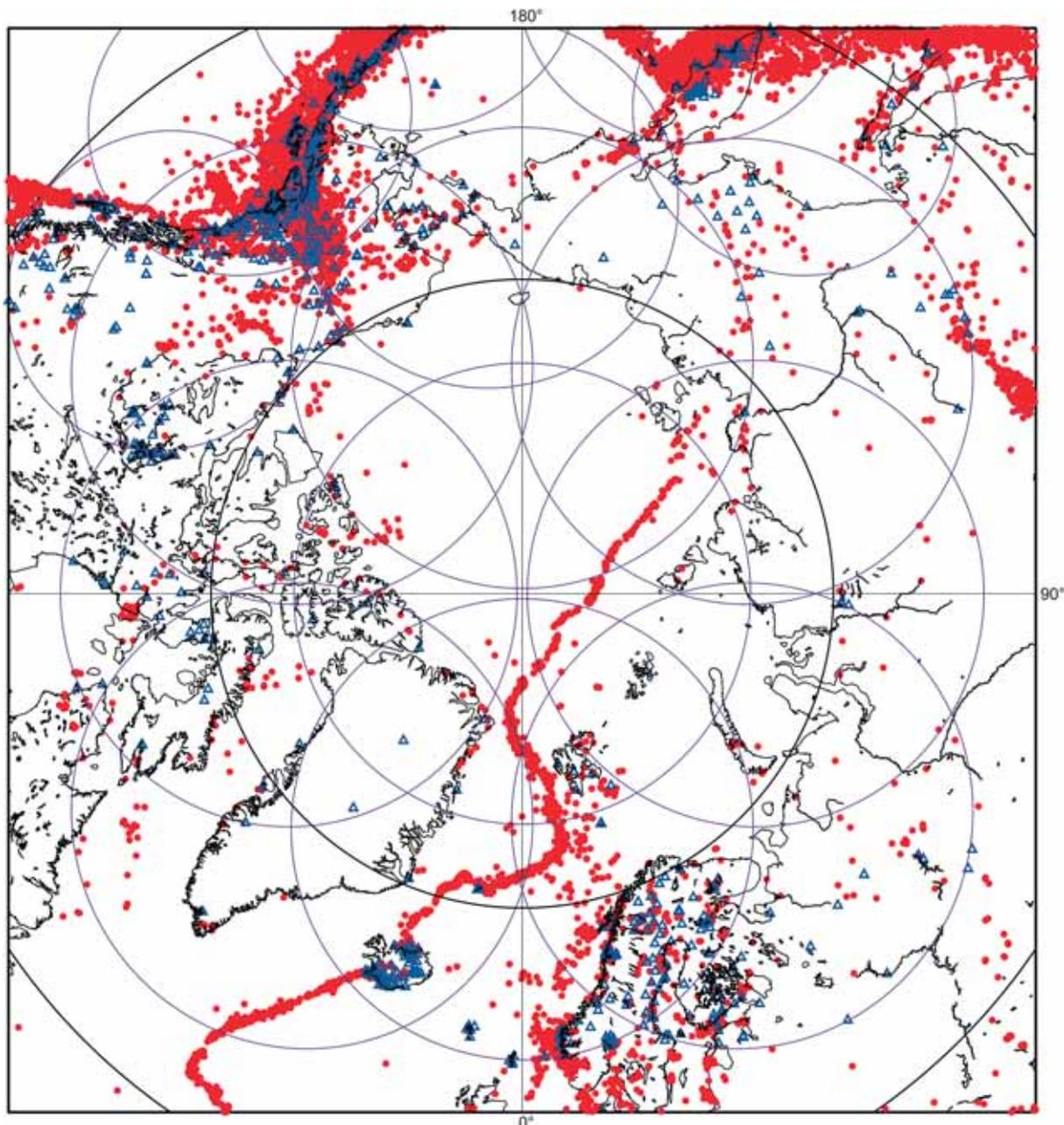
Анализ геологического развития и современной тектоники Арктического региона приводит к выводу, что явного продолжения оси спрединга вдоль хр. Гаккеля далее на территорию Азии не наблюдается и граница между Сибирской и Северо-Американской плитами с раннемелового времени является диффузной [Богданов, 1998], представленной сложной мозаикой микроблоков и террейнов на обширной территории [Stein, Sella, 2002]. Тектоническое развитие Арктической области в меловое время протекало уже изолированно от Тихоокеанского и Атлантического сегментов Земли. В кайнозое Северный Ледовитый океан уже представлял собой связующее звено между главными океанами Западного и Восточного полушарий нашей планеты.

В настоящем обзоре показано, что литосфера Арктического региона имеет весьма сложную структуру и неочевидную историю развития, которая не может быть однозначно определена на основании только лишь поверхностных наблюдений. Для выяснения некоторых вышеупомянутых вопросов о строении и эволюции Арктического региона мы прибегли к сейсмической томографии как одному из наибо-

лее мощных геофизических подходов для выяснения современной глубинной структуры и представляем здесь полученную нами модель верхней мантии региона, детальность которой сопоставима с масштабами региональных геологических структур.

### ДАННЫЕ И АЛГОРИТМ

В настоящем исследовании были использованы глобальные данные времен пробега объемных *P*-волн из каталога Международного сейсмологического центра (ISC) за период времени 1964 по 2007 год. Задействованы все данные, соответствующие сейсмическим лучам, траектории которых, хотя бы частично, прошли в мантии исследуемого региона. В первую очередь использованы данные от землетрясений в изучаемой области, которые были зарегистрированы станциями мировой сети (красные точки на рис. 2). Также были включены данные о мировой сейсмичности, зарегистрированные станциями, размещенными в изучаемом регионе (синие треугольники на рис. 2). Для Арктики вклад второй группы



**Рис. 2. Исходные данные настоящего исследования.**

Красные точки — землетрясения из каталога ISC; синие треугольники — сейсмические станции. Фиолетовые окружности показывают области, в которых производилась независимая инверсия.

существенно меньший, чем первой. Всего было использовано около 5 млн времен пробега  $P$ -волн, соответствующих почти 200 тыс. землетрясений из каталога ISC.

Следует отметить, что качество данных каталога ISC оставляет желать лучшего. В связи с большим количеством бракованной информации и устаревшими схемами локализации источников, данные этого каталога требуют предварительной обработки. Все землетрясения ISC-каталога были переопределены на базе алгоритма локализации, описанного в [Koulakov, Sobolev, 2006], который позволяет выявлять и отбрасывать бракованные данные. Для выполнения томографической инверсии в данной работе мы применили подход, разработанный в [Koulakov et al., 2002] и апробированный в различных регионах, например Сибири [Кулаков, 2008], Курило-Камчатской дуги [Кулаков и др., 2011], юга Европы [Koulakov et al., 2009] и коллизионных зон Азии [Koulakov, 2011]. В качестве базовой модели для выполнения использована одномерная сферическая модель AK135 [Kennett et al., 1995]. При этом во времена пробега были внесены поправки за эллиптичность Земли, высоту станции над уровнем моря и за толщину коры, согласно глобальной модели CRUST2.0 [Bassin et al., 2000].

Алгоритм томографической инверсии основан на линеаризованном подходе: инверсия производится на базе лучей, построенных в референтной модели в рамках одной итерации. Узлы параметризационной сетки распределялись в соответствии с плотностью лучей по глубине вплоть до 670 км на 10 уровнях (50, 100, 150, 220, 290, 360, 430, 500, 570 и 640 км). Минимальное расстояние между узлами составляет 50 км. Чтобы минимизировать артефакты, связанные с ориентацией сетки, независимо рассчитывались модели для сеток с различным наклоном базовых линий (например, на сетках с ориентациями  $0^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $67^\circ$ ), которые затем осреднялись в суммарную модель.

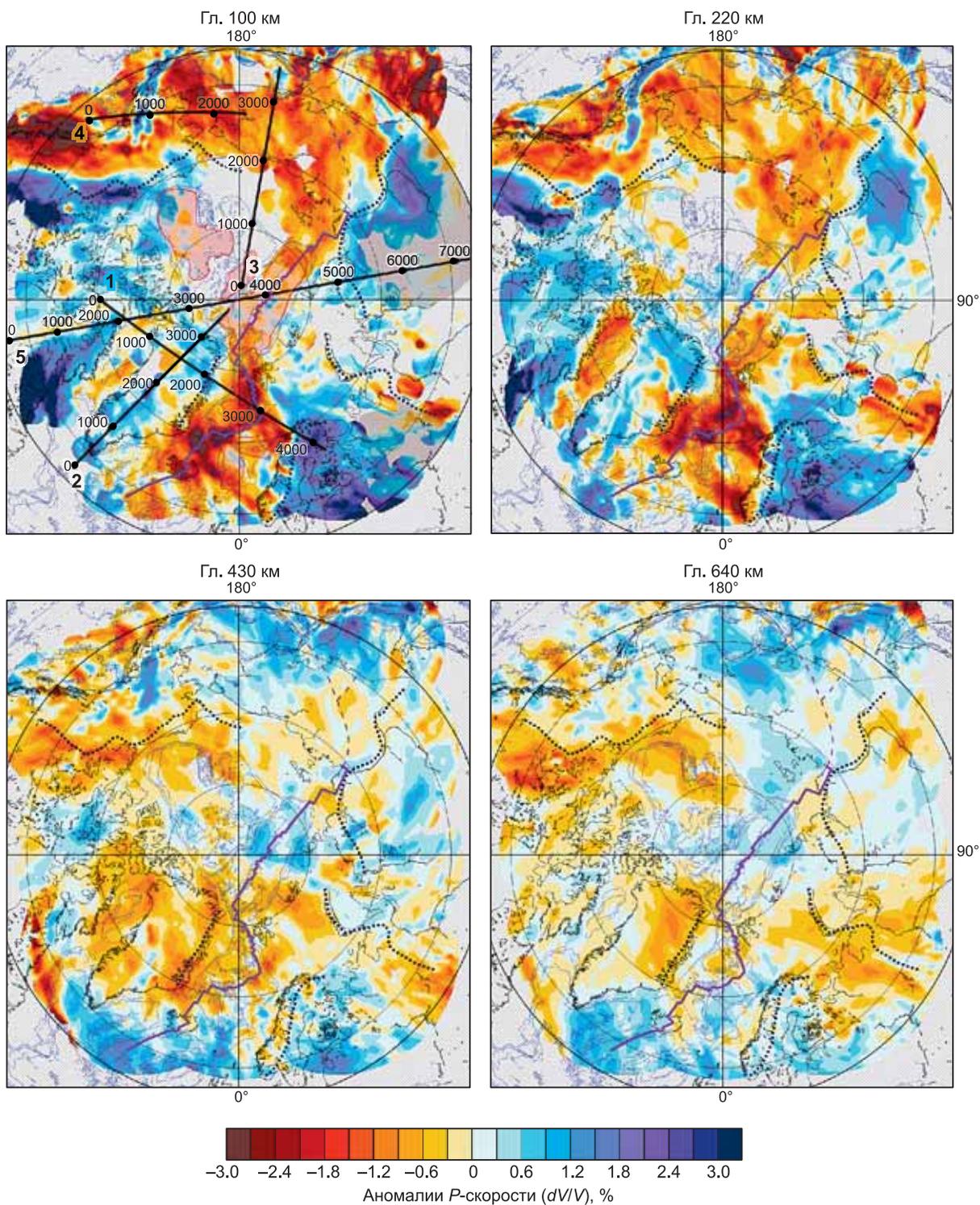
Восстановление скоростей осуществлялось путем инверсии матрицы первых производных. Помимо распределения скоростей  $P$ -волн, матрица включает в себя распределение скоростей  $S$ -волн (не рассматриваются в данной работе из-за малого их количества для Арктики), а также элементы, ответственные за коррекцию координат источника и времени начала события в нем, и стационарные поправки. Сглаживание решения осуществлялось как с помощью амплитудной регуляризации Тихонова, так и подавления градиента скоростей (регуляризация Лапласа). Инверсия матрицы осуществлена методом LSQR [Paige, Saunders, 1982; van der Sluis, van der Vorst, 1987].

Томографическая инверсия проводилась независимо в пятнадцати взаимно пересекающихся круговых областях радиусом  $10\text{--}15^\circ$  (фиолетовые круги на рис. 2), покрывающих изучаемую область. Результаты, полученные по отдельным областям, объединялись путем осреднения в единую модель, которая представляет главный результат настоящего исследования. Следует отметить неравномерное распределение станций и событий на изучаемой территории (см. рис. 2). Региональная томографическая схема может работать и без использования данных с региональных станций, только на базе данных о землетрясениях в изучаемом регионе, зарегистрированных станциями мировой сети. Вместе с тем наличие региональных сетей повышает точность локализации источников и улучшает качество модели. Таким образом, интерпретация результатов для центральной части Арктики, где нет сейсмических станций, требует особой осторожности. В тех местах, где данных недостаточно, результаты инверсии не показаны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ

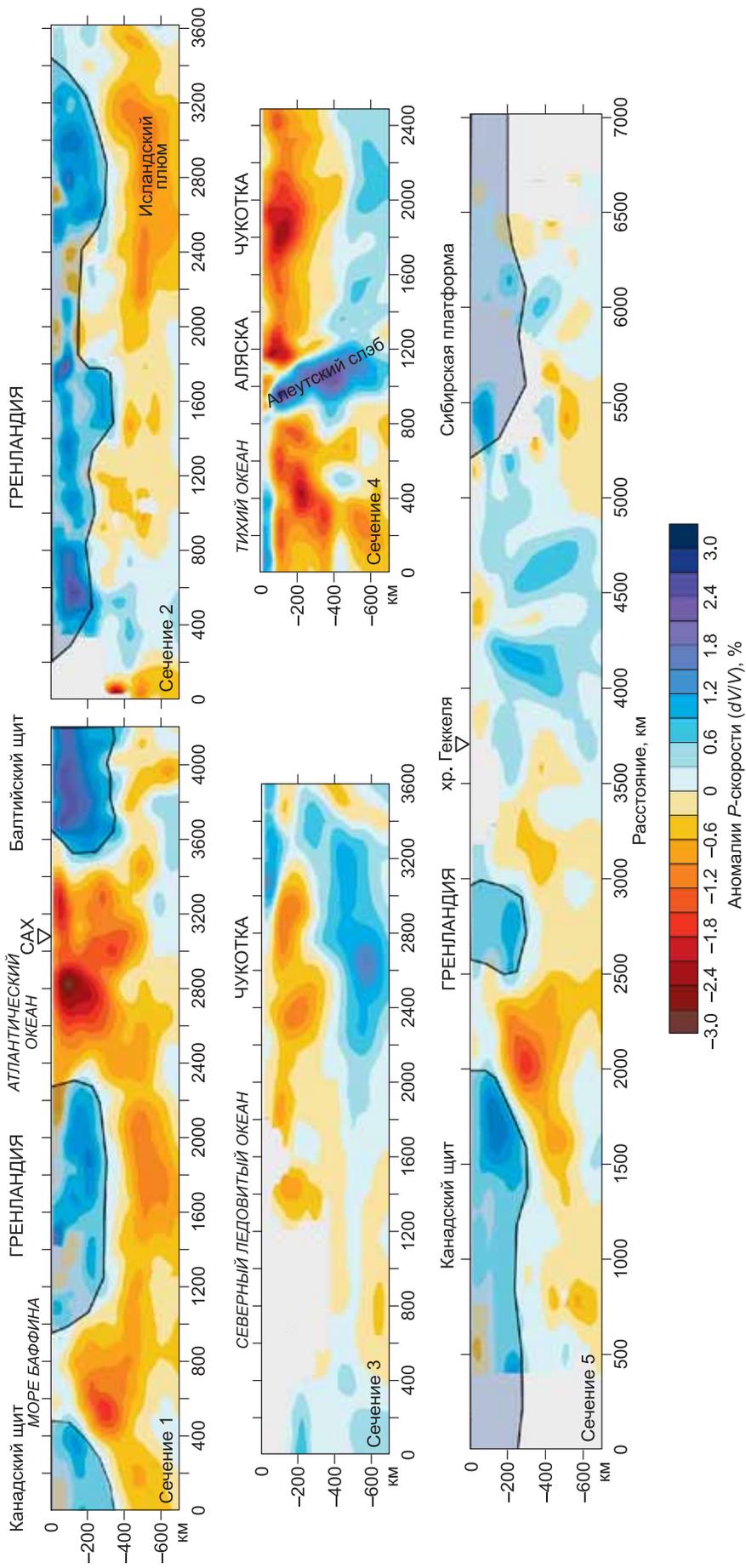
Полученная итоговая 3D модель верхнемантийных аномалий сейсмической скорости  $P$ -волн под Арктическим регионом представлена на четырех срезах по глубине (рис. 3) и пяти вертикальных сечениях (рис. 4). Результаты показаны только в тех местах, где плотность лучей достаточна для выполнения томографической инверсии. Например, на двух верхних горизонтальных срезах и на вертикальных сечениях 2 и 5 есть обширные области, где отсутствует результат моделирования. С увеличением глубины такие области исчезают, поскольку лучи распределяются более равномерно.

Достоверность рассчитанных аномалий можно оценить с помощью синтетического теста, приведенного на рис. 5. Синтетическая модель для этого теста была построена, исходя из конфигурации аномалий, полученных в результате инверсии реальных данных. Для представленного теста синтетические аномалии задавались в виде призм с неизменным латеральным сечением в интервале глубин от 0 до 350 км. Расчет синтетических данных осуществлялся по тому же набору лучей, что и в случае инверсии реальных данных. К рассчитанным синтетическим временам пробега добавлялся случайный шум с характерным для сейсмологических данных статистическим распределением и средним значением 0.5 с. Восстановление модели производилось на базе той же схемы и с использованием тех же независимых параметров, что и при получении главного результата на базе реальных данных. Результат восстановления на глубине 220 км (см. рис. 5) показывает, что имеющаяся система наблюдения позволяет надежно восстанавливать все структуры, обсуждаемые ниже.



**Рис. 3.** Аномалии сейсмической скорости  $P$ -волн на горизонтальных сечениях (1—5), полученные в результате инверсии реальных данных.

Фиолетовая линия — срединно-океанический хребт с возможным продолжением. Пунктиром обозначены складчатые пояса. Красными полупрозрачными областями на срезе 100 км отмечено местоположение океанических бассейнов (по батиметрии). Синие тонкие линии — уровни глубины океана через 1000 м.



**Рис. 4. Вертикальные сечения полученной модели аномалий сейсмических скоростей P-волн вдоль пяти вертикальных сечений (см. рис. 3).**

Положение континентальных литосферных блоков выделено голубыми контурами. Основные географические элементы указаны над профилями. САХ — Срединно-Атлантический хребт.



Примечательная низкоскоростная аномалия наблюдается на глубинах 100 и 220 км под центральной частью Гренландии. Эта аномалия точно совпадает с положением большой базальтовой провинцией на восточном побережье Гренландии, изверженной около 50 млн лет назад [Ziegler, 1988]. Кроме того, эта низкоскоростная область совпадает с положением зоны аномального увеличения теплового потока и повышенной скорости таяния льдов [Fahnestock et al., 2001]. Эта аномалия может быть признаком утонения литосферы, вызванного прохождением Исландского плюма под центральной частью Гренландии. Некоторые авторы прослеживают предшествующий путь этого плюма дальше, в глубь территорий Арктики. Так, в работе [Forsyth et al., 1986] предполагается, что хр. Альфа-Менделеева трассирует реликтовую траекторию перемещения этого плюма в Арктике. Существуют также предположения, что в пермотриасовом интервале Исландский плюм мог находиться под Сибирской платформой и привести к массивному излиянию сибирских траппов [Smirnov, Tarduno, 2010; Kuzmin et al., 2010].

Полученная нами сейсмическая модель отчетливо маркирует местоположение основных докембрийских континентальных блоков литосферы. Балтийский щит как продолжение Восточно-Европейской платформы выделяется высокоскоростной аномалией вплоть до глубины 300 км (см. вертикальное сечение 1 на рис. 4). Следует заметить, что северная граница щита, по данным нашего исследования, прослеживается севернее, чем принято считать, что говорит о возможности пересмотра общепринятой формы Балтийского щита. Границы высокоскоростных аномалий (в областях с достаточным разрешением), соответствующих Сибирскому кратону и Канадскому щиту, совпадают с геологическими границами. В верхней части полученной модели, между Канадским щитом и Гренландией, под морем Баффина, отчетливо прослеживается низкоскоростная аномалия, отражающая, по-видимому, активные процессы рифтинга и образование молодого океанического бассейна в этом сегменте.

Областям Якутии, Чукотки и Аляски с активными тектоническими процессами и горообразованием соответствуют низкоскоростные аномалии на верхних сечениях полученной нами томографической модели, что может отражать разуплотненную/уточенную и сильнодеформированную умеренно протекающими коллизионными процессами литосферу. Все очаги современного кайнозойского вулканизма Якутии и прилегающих шельфов [Акинин и др., 2008] хорошо совпадают с низкоскоростными аномалиями на верхних сечениях модели, что, вероятно, указывает на мантийную природу этих вулканов (перегретая мантия, проявления мантийного плюма и т.п.). В нижней части модели (ниже 400 км) под этими регионами прослеживается высокоскоростная аномалия (см. сечение 3 на рис. 4). Со стороны Аляски отчетливо выделяется субдукция Алеутского слэба, и эта высокоскоростная аномалия может отражать область накопления материала этого слэба. В то же время известно, что Алеутская зона субдукции относительно молодая, и ее возраста недостаточно для формирования столь протяженной структуры. Более вероятной гипотезой нам представляется та, что объясняет природу этого высокоскоростного тела скоплением литосферного материала, погруженного в процессе субдукции, протекавшей в районе Берингова моря и Якутии в период между 130 и 90 млн лет назад [Akinin et al., 2009; Miller et al., 2010; Лобковский и др., 2010].

Для многих участков территории Северного Ледовитого океана количество данных слишком мало и детальность результатов снижена. Тем не менее мы можем утверждать, что под хр. Гаккеля не выделяется четких низкоскоростных аномалий, подобных выделенным в Северной Атлантике. В данном случае можно предположить, что образование океанических бассейнов Арктики происходит не за счет регионального восходящего течения под областями раздвижения дна, а связано с глобальными перемещениями литосферных континентальных блоков Евразии и Америки, движущие механизмы которых расположены за пределами Арктики. Спрединг вдоль хр. Гаккеля приводит к локальному вздыманию астеносферного слоя, что отражается слабыми низкоскоростными аномалиями, однако к общему прогреву мантии, как в случае Северной Атлантики, это не приводит.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании предложена модель распределения скоростей *P*-волн в верхней мантии под Арктическим регионом, основанная на анализе времен пробега объемных сейсмических волн. Детальность нашей модели соответствует масштабу основных тектонических структур региона. Достоверность построений подтверждается результатами синтетических тестов и согласованностью с ранее опубликованными результатами других авторов, использовавших другие данные и подходы. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

- Докембрийские платформы (Балтийский и Канадские щиты, Сибирский кратон и Гренландия) представляют собой участки прочной континентальной литосферы с толщиной более 200 км.
- Под центральной частью Гренландии выделена низкоскоростная аномалия, которая, возможно, отражает литосферу, частично разрушенную Исландским плюмом, проходившим под Гренландией 50—60 млн лет назад.

• Под Чукоткой, Якутией и Аляской выделены низкоскоростные аномалии, которые, вероятно, представляют относительно тонкую пластичную литосферу, которая активно деформируется в результате тектонических перемещений. Также эти аномалии совпадают с распределением современного базальтового вулканизма, имеющего предположительно мантийную природу.

• В Северной Атлантике наблюдается большая низкоскоростная аномалия, которая, вероятно, отражает активную природу рифтинга. В противоположность этому под Северным Ледовитым океаном явных низкоскоростных аномалий не выделено, что может указывать на пассивную природу рифтинга.

• Под Чукоткой на глубинах ниже 400 км выделена высокоскоростная аномалия, которая, вероятно, отражает реликтовую зону субдукции, протекавшей в области Берингова моря и Якутии в период 130—90 млн лет назад.

Весьма низкое разрешение в большей части изучаемого региона связано с недостаточной плотностью имеющихся данных. Частично эту проблему можно решить путем использования отраженных от земной поверхности *PP*-лучей. В работах [Bushenkova et al., 2002; Koulakov, Bushenkova, 2010] показано, что использование таких данных позволяет изучать области без локальных станций и источников. Предварительные оценки показывают, что для Арктики имеется достаточно хорошее распределение отраженных *PP*-лучей, привлечение которых на следующем этапе позволит получить результаты в областях, для которых в настоящем исследовании они отсутствуют и повысить детальность модели.

Кроме того, в дальнейшем для изучаемой территории планируется расчет математической модели тепловой конвекции в верхней мантии с учетом расположения участков утолщенной литосферы (кратонов), что позволит провести количественную геодинамическую интерпретацию.

Работа выполнена при частичной поддержке ИП СО РАН № 11, проекта ОНЗ РАН № 7.3 и гранта РФФИ 11-05-12058-офи-м-2011.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту и Л.И. Лобковскому за полезные замечания и комментарии.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Акинин В.В., Евдокимов А.Н., Кораго Е.А., Ступак Ф.М.** Новейший вулканизм арктической окраины Северной Евразии // Изменение окружающей среды и климата; природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. II. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М., ИГЕМ РАН, 2008, с. 41—80.

**Богданов Н.А.** Проблема раздела Евразийской и Северо-Американской литосферных плит в Восточной Арктике // Геотектоника, 1998, № 2, с. 4—16.

**Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Каминский В.Д., Лобковский Л.И., Шипилов Э.В.** Геодинамика Центральной и Восточной Арктики // Материалы совместного заседания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН и Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики, 31 марта—2 апреля 2010 г., Архангельск—Екатеринбург, 2010, с. 41—58.

**Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н., Петрова В.И.** О геотектонической природе системы Центрально-Арктических морфоструктур и геологическое значение донных осадков в ее определении // Геотектоника, 2004, № 6, с. 33—48.

**Косько М.К.** Террейны Восточно-Арктического шельфа России // Докл. РАН, 2007, т. 413, № 1, с. 71—74.

**Кулаков И.Ю.** Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (3), с. 248—261.

**Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В.** Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 830—851.

**Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Вержбицкий В.Е., Котелкин В.Д.** Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая эволюция Арктического региона в мезокайнозое // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. М., ГЕОС, 2010, с. 8—40.

**Пушаровский Ю.М.** Некоторые общие проблемы тектоники Арктики // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1960, № 9, с. 15—28.

**Пушаровский Ю.М.** Тектоника Северного Ледовитого океана // Геотектоника, 1976, № 2, с. 3—14.

**Сорохтин Н.О., Козлов Н.Е., Глазнев В.Н., Чикирёв И.В.** Потенциальная нефтегазоносность западной части Арктического шельфа России и прогнозные критерии поиска УВ сырья в прибрежной зоне Кольского полуострова // Вестник МГТУ, т. 13, № 4/1, 2010, с. 736—750.

- Филатова Н.И., Хаин В.Е.** Тектоника Восточной Арктики // Геотектоника, 2007, № 3, с. 3—29.
- Хаин В.Е.** Тектоника континентов и океанов. М., Научный мир, 2001, 606 с.
- Шатский Н.С.** О тектонике Арктики // Избр. труды. Т. 1. М., АН СССР, 1963, с. 426—444.
- Akinin V.V., Miller E.L., Wooden J.** 2009, Petrology and geochronology of crustal xenoliths from the Bering Strait region: linking deep and shallow processes in extending continental crust / Eds. R.B. Miller and A.W. Snoke. Crustal cross-sections from the western North America Cordillera and elsewhere: implications for tectonic and petrologic processes // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 456, p. 39—68.
- Artemieva I.M., Mooney W.D.** Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study // GJR, 2001, v. 106, № B8, p. 16387—16414.
- Bassin C., Laske G., Masters G.** The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS, Trans. Amer. Geophys. Un., 2000, v. 81, F897.
- Bijwaard H., Spakman W.** Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland // Earth Planet. Sci. Lett., 1999, v. 166, p. 121—126.
- Bruneton M., Pedersen H.A., Farra V., Arndt N.T., Vacher P., Seismic tomography working group.** Complex lithospheric structure under the central Baltic Shield from surface wave tomography // J. Geophys. Res., 2004, v. 109, B10303, doi:10.1029/2003JB002947.
- Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I.** Tomography on *PP*-*P* waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia // Tectonophysics, 2002, v. 358, p. 57—76.
- Circum-Arctic Mapping Project:** new magnetic anomaly map linked to the geology of the Arctic. Scale 1:5000000. Stereographic North Pole projection. Standart parallel 70°N coordinate system WGS 1984 // 2010. www.congrex.nl/09c24/S2\_Posters/S2\_P13\_Gaina\_paper.pdf
- Fahnestock M., Abdalati W., Joughin I., Brozna J., Gogineni P.** High geothermal heat flow, basal melt, and origin of rapid ice flow in central Greenland // Science, 2001, v. 294, p. 2338—2342.
- Forsyth D.A., Morel-à-P'huissier P., Asudsen I., Green A.G.** Alpha Ridge and Iceland: products of the same plume? // J. Geodyn., 1986, v. 6, p. 197—214.
- Jaupart C., Mareschal J.C., Guillou-Frottier L., Davaille A.** Heat flow and thickness of the lithosphere in the Canadian Shield // J. Geophys. Res., 1998, 103(B7), 15,269—15,286, doi:10.1029/98JB01395.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophys. J. Int., 1995, v. 122, p. 108—124.
- Koulakov I.** High-frequency *P* and *S* velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltimes data // J. Geophys. Res., 2011, v. 116, B04301, doi:10.1029/2010JB007938.
- Koulakov I., Sobolev S.V.** A Tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir Hindu Kush Region // Geophys. J. Int., 2006, v. 164, p. 425—440.
- Koulakov I., Bushenkova N.** Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on regional tomographic inversion of *P* and *PP* travel times // Tectonophysics, 2010, v. 486, p. 81—100.
- Koulakov I., Tychkov S., Bushenkova N., Vasilevskiy A.** Structure and dynamics of the upper mantle beneath the Alpine-Himalayan orogenic belt from teleseismic tomography // Tectonophysics, 2002, v. 358, p. 77—96.
- Koulakov I., Kaban M.K., Tesauro M., Cloetingh S.** *P* and *S* velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data // Geophys. J. Int., 2009, v. 179, № 1, p. 345—366.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A.** Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth-Science Reviews, v. 102, № 1—2, September 2010, p. 29—59.
- Lebedev S., Boonen J., Trampert J.** Seismic structure of Precambrian lithosphere: new constraints from broadband surface-wave dispersion // Lithos, 2009, v. 109, p. 96—111.
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Y.** Siberia — from Rodinia to Eurasia // Tectonics, 2011, p. 103—136.
- Miller E.L., Gehrels G.E., Pease V., Sokolov S.** Paleozoic and Mesozoic stratigraphy and U-Pb detrital zircon geochronology of Wrangel Island, Russia: constraints on paleogeography and paleocontinental reconstructions of the Arctic // AAPG Bull., 2010, v. 94, p. 665—692.
- Paige C.C., Saunders M.A.** LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // ACM Trans. Math. Soft., 1982, v. 8, p. 43—71.
- Sacks I.S., Snoke J.A., Huesbey E.S.** Lithosphere thickness beneath the Baltic shield // Tectonophysics, 1979, v. 56, p. 101—110.
- Shapiro N.M., Ritzwoller M.H., Mareschal J.C., Jaupart C.** Lithospheric structure of the Canadian Shield inferred from inversion of surface-wave dispersion with thermodynamic a priori constraints, Geol.

Soc. Lond. Spec. Publ., Geological Prior Information: Informing Science and Engineering / Eds. R. Wood and A. Curtis. The Geological Society of London, 2005, p. 239, v. 175—194, 186239-171-8/04/\$15.00.

**Smirnov A.V., Tarduno J.A.** Co-location of eruption sites of the Siberian Traps and North Atlantic Igneous Province: implications for the nature of hotspots and mantle plumes // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, v. 297, p. 687—690.

**Stein S., Sella F.** Plate boundary zones: concept and approaches // Plate boundary zones / Eds. S. Stein and J. Freymueller. Geodynamics Series 30, AGU, Washington, D.C. 2002, p. 1—26.

**van der Sluis A., van der Vorst H.A.** Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems // Seismic tomography, Dordrecht, 1987, p. 49—83.

**Ziegler P.A.** Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys: American Association of Petroleum Geologists Memoir 43, 1988, Tulsa, 198 p.

*Рекомендована к печати 23 марта 2012 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
22 июля 2011 г.*