

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АНОМАЛИЙ ПОД СИБИРСКИМ КРАТОНОМ: СВИДЕТЕЛЬСТВО МУЛЬТИСТАДИЙНОГО АНДЕРПЛЕЙТИНГА МАГМЫ НАЧИНАЯ С НЕОАРХЕЯ

Чинь Ванг¹, Н. Багдасаров², В.С. Шацкий^{3,4,5}

¹ State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210046, China

² Institute for Geosciences, University Frankfurt, Frankfurt am Main, 60438, Germany

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁴ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Несмотря на масштабное извержение в большой магматической провинции сибирских траппов 250 млн л.н., Сибирский кратон характеризуется чрезвычайно низким тепловым потоком (18—25 мВт/м²) и очень мощной литосферой (300—350 км), что делает его идеальным местом для изучения влияния мантийных плюмов на продолжительную стабильность кратонов. Сравнение с сейсмическими скоростями пород свидетельствует о том, что нижняя кора Сибирского кратона представлена главным образом мафическими гранулитам и могла быть достаточно неоднородной по составу. Очень высокие скорости v_p (> 7.2 км/с) нижней коры могут объясняться смесью гранатовых гранулитов, двупироксеновых гранулитов и гранатового габбро, вызванных подслоенностью магм. Высокоскоростная аномалия в верхней мантии ($v_p = 8.3—8.6$ км/с) может интерпретироваться как результат смеси эколгитов и шпинелевых перидотитов. В сочетании с исследованиями нижнекоровых и мантийных ксенолитов мы выявили многостадийность процесса подслоенности магмы на границе кора—мантия под Сибирским кратоном, включая неархейский рост коры и палеопротерозойское формирование Сибирского кратона под Мархинским террейном, протерозойскую коллизию вдоль Саяно-Таймырской сутурной зоны и извержение сибирских траппов в триасе под Центрально-Тунгусским бассейном. Граница Мохо является, скорее всего, границей между гранулитовой и эколгитовой фацией метаморфизма, а не химической границей, которая отделяет мафическую нижнюю кору от ультрамафитовой верхней мантии. Поэтому в результате процесса многоступенчатой подслоенности магм начиная с неархея сейсмическая граница Мохо расположена на меньшей глубине по сравнению с петрологической границей Мохо. Такие изменения состава, вызванные магматизмом, а также уменьшение содержания воды приводят к увеличению вязкости литосферной мантии и, наконец, вызывают утолщение литосферы, вызванное активностью мантийных плюмов. Следовательно, мантийные плюмы не являются ключевым фактором деструкции кратона.

Плюм, литосфера, кратоны, скорость сейсмических волн.

ORIGIN OF HIGH-VELOCITY ANOMALIES BENEATH THE SIBERIAN CRATON: A FINGERPRINT OF MULTISTAGE MAGMA UNDERPLATING SINCE THE NEOARCHEAN

Qin Wang, N. Bagdassarov, and V.S. Shatsky

Despite the violent eruption of the Siberian Traps large igneous province at ~250 Ma, the Siberian craton has an extremely low heat flow (18–25 mW/m²) and a very thick lithosphere (300–350 km), which makes it an ideal place to study the influence of mantle plumes on the long-term stability of cratons. Compared with seismic velocities of rocks, the lower crust of the Siberian craton is composed mainly of mafic granulites and could be rather heterogeneous in composition. The very high v_p (> 7.2 km/s) in the lowermost crust can be fit by a mixture of garnet granulites, two-pyroxene granulites, and garnet gabbros as a result of magma underplating. The high-velocity anomaly in the upper mantle ($v_p = 8.3–8.6$ km/s) can be interpreted by a mixture of eclogites and spinel peridotites. Combined with the study of lower crustal and mantle xenoliths, we recognized multistage magma underplating at the crust–mantle boundary beneath the Siberian craton, including the Neoproterozoic assembly of the Siberian craton beneath the Markha terrane, the Proterozoic collision along the Sayan–Taimyr suture zone, and the Triassic Siberian Trap event beneath the central Tunguska basin. The Moho becomes a metamorphism boundary of mafic rocks between granulite facies and eclogite facies rather than a chemical boundary that separates the mafic lower crust from the ultramafic upper mantle. Therefore, multistage magma underplating since the Neoproterozoic will result in a seismic Moho shallower than the petrologic Moho. Such magmatism-induced compositional change and dehydration will increase viscosity of the lithospheric mantle and finally trigger lithospheric thickening after mantle plume activity. Hence, mantle plumes are not the key factor for craton destruction.

Siberian craton, Siberian Traps, seismic velocities, eclogites, Moho

ВВЕДЕНИЕ

Кратоны — древние и стабильные ядра континентов (> 2.5 млрд лет), характеризующиеся мощным (> 180 км), холодным (40 мВт/м²), тугоплавким, плавучим и реологически прочным литосферным килем [Griffin et al., 2003; Eaton et al., 2009; Wang, 2010]. Архейская кора составляет только 7 % от общей площади существующих континентов [Prodehl et al., 2013]. Однако анализ детритовых цирконов показывает, что, по крайней мере, ~60—70 % существующей континентальной коры было образовано около 3.0 млрд л.н. [Belousova et al., 2010; Sawood et al., 2013]. Поэтому стабильность или разрушение кратонов тесно связаны с эволюцией земной коры. Мантийные плюмы образуются при высокой степени плавления мантии и способствуют формированию больших изверженных провинций, когда большие объемы (10⁶—10⁷ км³ в случае формирования провинции; > 10⁸ км³ в случае кластеров или периодов распада суперконтинентов) мафических и обычно подчиненных кислых и ультрамафических магм извергаются в течение 1—5 млн лет [Bryan, Ferrari, 2013]. Большие изверженные провинции прослеживаются в истории Земли от кайнозоя до докембрия, самая древняя датируется 3.79 млрд лет [Isley, Abbott, 1999, 2002; Ernst, Buchan, 2001].

Хотя тепловая эрозия, связанная с магматизмом, рассматривается в качестве важного механизма утонения литосферы и разрушения кратонов [Xu, 2001; Foley, 2008; Koptev et al., 2015], следует отметить, что некоторые из них, включающие большие изверженные провинции, все же сохраняют продолжительную стабильность, например, Янзцы с трапповой провинцией Эмейшань (260 млн лет), Каапвалль с бушвельдским комплексом (2055—2060 млн лет), провинция Кару (183 млн лет) и Индийский кратон с траппами Декана (66 млн лет) [Bryan, Ferrari, 2013]. Кроме того, отмечается значительное сокращение скорости поперечных волн в нижней мантии под Южной и Восточной Африкой, которая соотносится с Африканским суперплюмом, время его существования больше чем ~50 млн лет [Steinberger, Torsvik, 2010]. Таким образом, хотя мантийные плюмы могут изменять тепловое состояние и состав кратонной литосферы, они не обязательно разрушают кратоны.

Как самая большая континентальная провинция платобазальтов, сибирские траппы, излившиеся примерно ~250 млн л.н., были причиной экологического кризиса в конце перми, самым известным случаем массового вымирания, характеризующимся внезапным вымиранием > 90 % морских видов и > 70 % земных видов [Erwin, 1994; Wignall, 2001; Reichow et al., 2009]. Сибирский кратон до сих пор сохраняет достаточно мощную и стабильную литосферу, несмотря на извержение сибирских траппов, что делает его идеальным местом для изучения влияния мантийных плюмов на стабильность кратонов. В данной статье на основе сейсмических и электрических свойств пород при высоком давлении и высокой температуре мы интерпретируем сейсмическую и электрическую структуры Сибирского кратона, при этом уделяем главное внимание высокоскоростным слоям и высокой аномалии сопротивления в нижней коре и верхней мантии. Взаимосвязь между вызванным магматизмом нагревом и дегидратацией изменяет вязкость литосферы Сибирского кратона, что является ключевым моментом для его продолжительной стабильности.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Окруженный орогенными поясами Сибирский кратон состоит из четырех главных блоков [Rosen et al., 1994, 2006; Pisarevsky et al., 2008] (рис. 1). Алданская провинция на юге отделена от Анабарской провинции Ачитканским складчатым поясом протерозойского возраста. Анабарская провинция образует зону коллизии с Тунгусской провинцией на западе и Оленекской провинцией на северо-востоке вдоль Саяно-Таймырской сутурной зоны северного простирания и Биляхской сутурной зоной северо-западного простирания соответственно. Большая часть Сибирского кратона покрыта мощным (2—14 км) слоем осадков, переслаиваемых с базальтовыми лавами триасового возраста сибирских траппов. Обнажения фундамента отмечаются на Алданском и Анабарском щитах, а также на поднятиях вдоль границ кратона. Эти обнажения вместе с ксенолитами из многочисленных кимберлитовых и лампрофировых трубок, а также из щелочных базальтов позволяют проследить состав и эволюцию литосферы Сибирского кратона. Кимберлитовые трубки найдены только в Анабарской и Оленекской провинциях. Многочисленные кимберлитовые трубки Далдыно-Алакитского поля интродировали в центральной части Анабарской провинции в позднем девоне [Кинни и др., 1997; Griffin et al., 1999]. Нижнекоровые ксенолиты трубок Удачная, Ленинградская и Заполярная в основном представлены гранатовыми гранулитам с переменным процентным содержанием амфиболитов, парагнейсов, кварц-полевошпатовых гнейсов и гранат-биотитовых сланцев [Бузлукова и др., 2004; Шацкий и др., 2005; Koreschkova et al., 2009]. Гранатовые гранулиты Далдынского кимберлитового поля представляют собой фрагменты глубинных интрузий, кристаллизовавшихся в нижней коре, и характеризуются архейскими (2.97—2.75 млрд лет) и неопротерозойскими (1.24 млрд лет) модельными возрастными, что указывает на многостадийность процесса подслаивания магмы в центре Анабарской провинции начиная с неорархея [Шацкий и др., 2005].

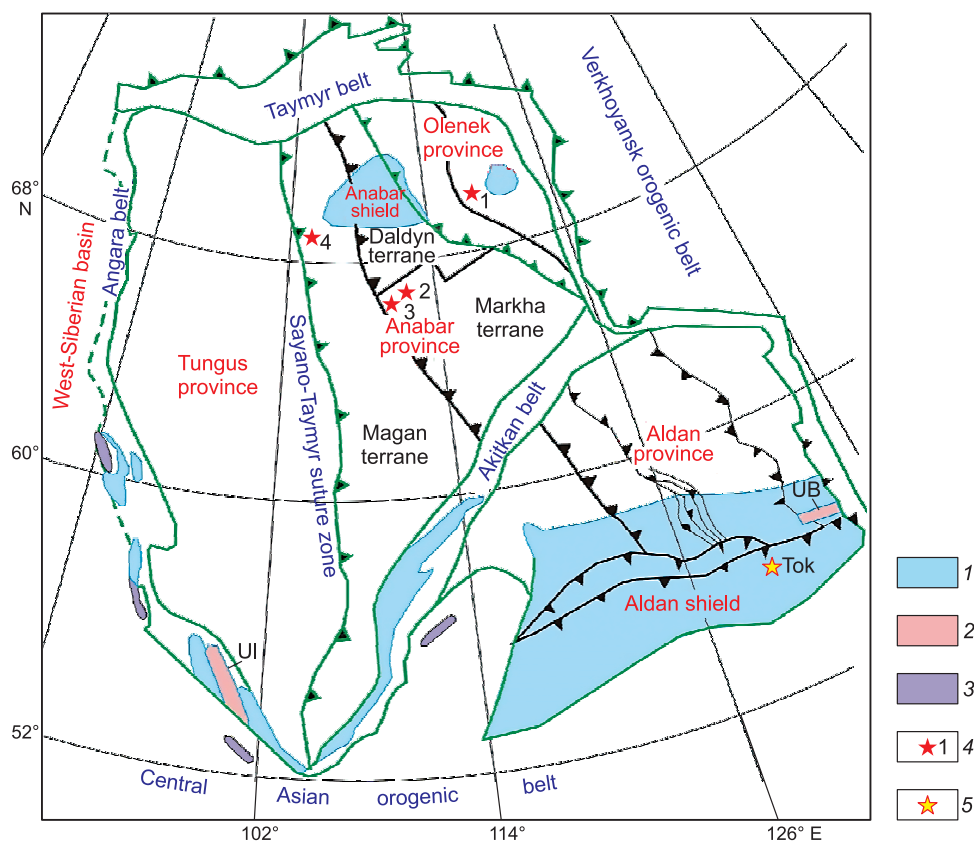


Рис. 1. Геологическая схема Сибирского кратона, по [Rosen et al., 1994; Gladkochub et al., 2006] с изменениями.

Зелеными линиями показаны границы Сибирского кратона и его главных структур. 1 — выход архейского и палеозойского фундамента; 2 — палеопротерозойские внутрикратонные рифтовые зоны; 3 — неопротерозойские островодужные комплексы; 4 — кимберлитовые поля: 1 — Куойское (тр. Обнаженная), 2 — Далдынское (тр. Удачная, Ленинградская и Зарница), 3 — Алакитское (тр. Комсомольская), 4 — Харамайское; 5 — базальтовое поле Токинский Становик (Ток). UB — Улькано-Билликчанский грабен, UI — Урик-Ийский грабен.

Ксенолиты гранатовых гранулитов из кимберлитовых трубок Удачная и Комсомольская были сформированы ~3.0 млрд л.н. и метаморфизованы 1.9—1.8 млрд л.н. [Koreshkova et al., 2009, 2011]. Для нижней коры на юге Сибирского кратона типична многостадийная магматическая и метаморфическая эволюция с возрастом цирконов, варьирующим от архейского (3.4 и 2.6 млрд лет) до палеопротерозойского (2.0, 1.88, 1.85 млрд лет) [Poller и др., 2005]. Последнее событие характеризует заключительную стабилизацию Сибирского кратона, произошедшую около 1.9—1.8 млрд лет, когда образовались большие объемы коллизионных гранитов в Тунгусской провинции, Ангарском складчатом поясе и коллизионных зонах между главными террейнами [Nutman et al., 1992; Rosen et al., 1994; Jahn et al., 1998; Zhao et al., 2002].

Архейские Re-Os возраста были получены только для нескольких мегакристаллических дунитов и эклогитов из кимберлитовой тр. Удачная [Pearson et al., 1995a,b]. Однако последние Re-Os датировки, а также Hf модельные и изохронные возраста деплетированных перидотитовых ксенолитов кимберлитовой тр. Удачная (центральная часть Анабарской провинции) и кимберлитовой тр. Обнаженная (центральная часть Оленекской провинции) указывают, что субконтинентальная литосферная мантия (SCLM) под центральной частью Сибирского кратона была сформирована, по крайней мере, в два периода: в позднем архее (≥ 2.8 млрд лет) и палеопротерозое (~2.0 млрд лет) [Doucet et al., 2015; Ionov et al., 2015a,b]. Эти последние датировки перидотитовых ксенолитов согласуются с возрастными по цирконам (1.94—1.81 млрд лет) из гранулитовых ксенолитов кимберлитовой тр. Удачная [Koreshkova et al., 2009]. Данный факт указывает на то, что окончательное формирование Сибирского кратона сопровождалось высокой степенью плавления верхней мантии и гранулитовой фацией метаморфизма нижней коры. Кроме того, шпинелевые перидотиты из вулканического поля Токинский Становик Алданского щита опробуют самую верхнюю, сильнопереработанную часть мантии юго-восточной части Сибирского кратона, которая была сформирована в мезопротерозое [Ionov et al., 2005].

Начиная с 1.8 млрд лет Сибирский кратон испытал несколько событий растяжения, в результате которых были сформированы внутрикратонные осадочные бассейны, включая Улькан-Билликчанский грабен, образованный ~1.73—1.68 млрд л.н. [Larin et al., 1997], и Урик-Ийский грабен, интродуцированный гранитами 1.53 млрд л.н. [Гладкочуб и др., 2002]. Осадочные разрезы рифейского возраста, накопленные в бассейнах, постепенно утолщаются к краям кратона, где они перекрыты мощным фанерозойским чехлом. Сибирские траппы, переслаиваемые с базальтами и туфами, занимают на Сибирском кратоне территорию, равную $\sim 2.5 \cdot 10^6$ км², а также большую область погребенных срезов в Западно-Сибирском бассейне [Reichow et al., 2009]. Возраст извержения сибирских траппов, определенный ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом по полевому шпату и биотиту, составляет 250.3 ± 1 млн лет [Reichow et al., 2009].

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИБИРСКОГО КРАТОНА

Авторы работы [Cherepanova et al., 2013] представили цифровую модель SibCrust коровой структуры Сибирского кратона и Западно-Сибирского бассейна, используя сейсмические профили, полученные начиная с 1960 г. и опробованные с номинальным интервалом в 50 км. Эта модель представляет коровые скорости *P*-волн (*v_p*) пяти слоев (осадки, верхняя, средняя, нижняя и самая нижняя кора) и скорость *P_n* верхней мантии. Мощность осадочной толщи варьирует от 0—3 км для стабильных территорий до 10—20 км в районах, подвергшихся растяжению. Глубина залегания границы Мохо изменяется

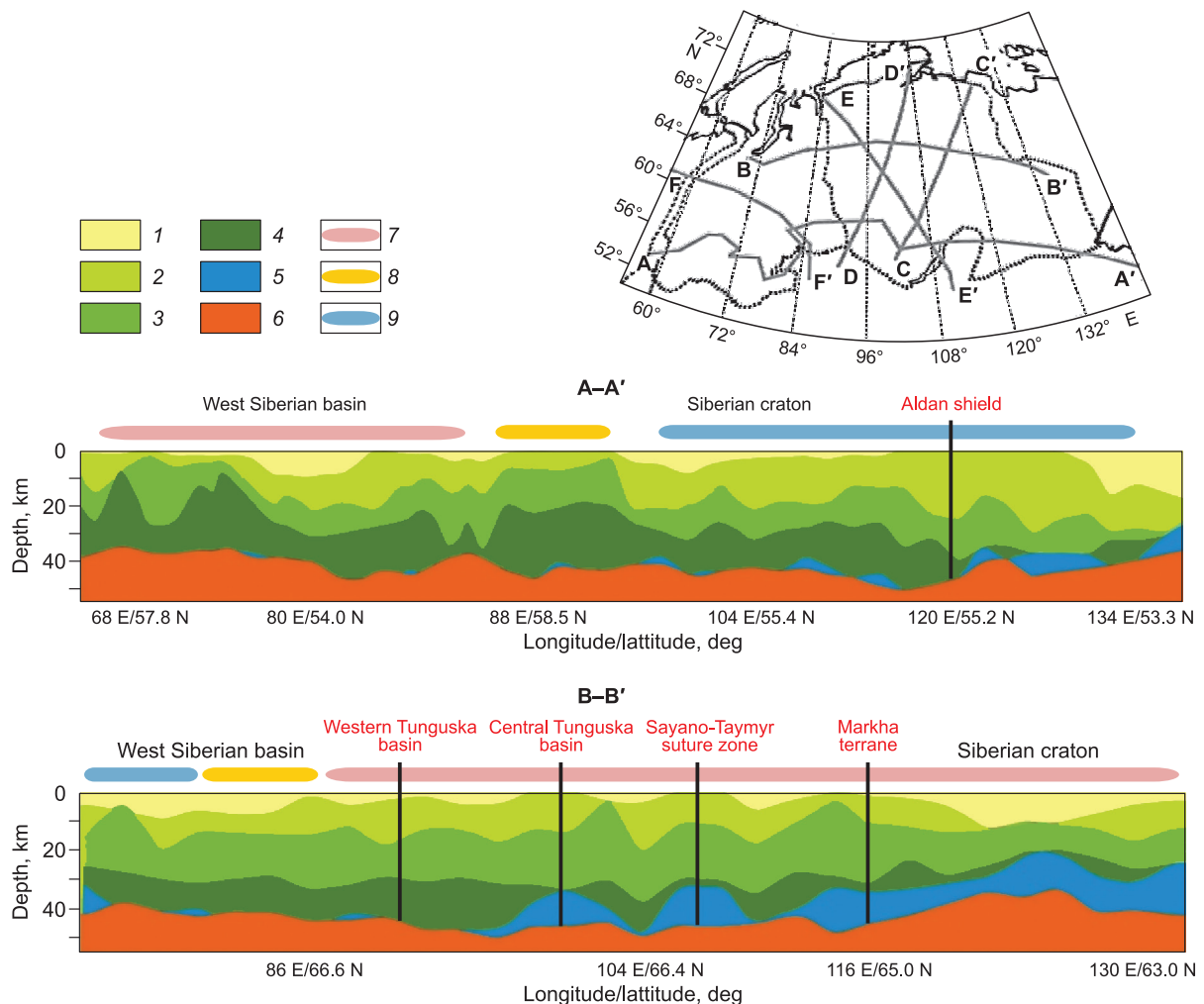


Рис. 2. Разрезы коры, полученные с использованием новой модели SibCrust, по [Cherepanova et al., 2013] с изменениями.

1—6 — скоростная модель: 1 — осадки (< 5.7 км/с), 2 — верхняя кора (5.8—6.4 км/с), 3 — средняя кора (6.4—6.8 км/с), 4 — нижняя кора (6.8—7.2 км/с), 5 — самая нижняя кора (7.2—7.8 км/с), 6 — верхняя мантия (> 7.8 км/с); 7—9 — возраст: 7 — архей (> 2500 млн лет), 8 — протерозой (542—2500 млн лет), 9 — палеозой (251—542 млн лет). Черными линиями показано положение 1D скоростной структуры различных тектонических единиц на рис. 3. На врезке показаны разрезы сейсмических профилей.

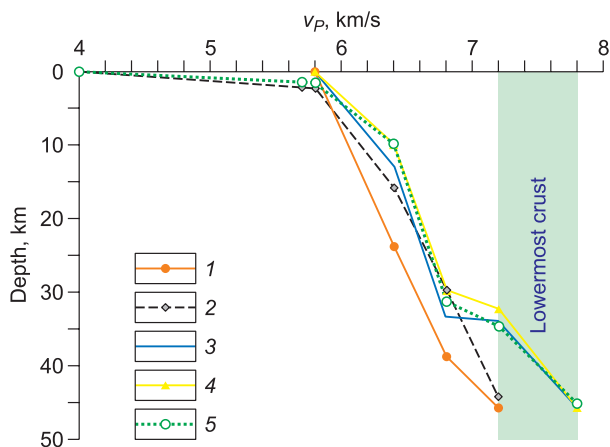


Рис. 3. 1D скоростная структура главных тектонических единиц Сибирского кратона, показывающая локально сохраненные предельно высокие v_p (7.2—7.8 км/с) в самой нижней коре.

1 — Алданский щит, 2 — Западно-Тунгусский бассейн, 3 — Центрально-Тунгусский бассейн, 4 — Саяно-Таймырская сutura, 5 — Мархинский террейн. Предполагается, что для Западно-Тунгусского бассейна и Мархинского террейна скорость P -волн осадков составляет 4.0—5.7 км/с. Для других областей с обнажениями коренных пород и базальтов осадочный слой отсутствует, скорость верхней коры изменяется в пределах 5.8—6.4 км/с.

от 44—48 км в архейско-палеопротерозойской коре до 54 км на Анабарском щите, 40—42 км в протерозойских орогенах и 35—38 км в кратонной коре, подвергшейся растяжению, 38—42 км в Западно-Сибирском бассейне (рис. 2). Очевидно, что глубина залегания границы Мохо контролируется тектонической обстановкой, т. е. стабильные области характеризуются более мощной корой, чем орогены и бассейны, испытавшие растяжение. Следует отметить, что очень высокие $v_p > 7.2$ км/с наблюдаются локально в самой нижней коре, которая могла быть сформирована подслаиванием магмы в основании коры [Бузлукова и др., 2004; Шацкий и др., 2005; Thybo, Artemieva, 2013].

Скорость P_n верхней мантии под Сибирским кратоном изменяется от 7.9 до 8.8 км/с [Cherepanova et al., 2013]. Аномально высокие величины P_n до 8.8 км/с наблюдаются вокруг кимберлитовых полей [Nielsen et al., 1999; Suvorov et al., 2006], что намного выше, чем средняя скорость $P_n = 8.13 \pm 0.19$ км/с для щитов и стабильных платформ мира [Christensen, Mooney, 1995].

Беря за основу новую коровую модель SibCrust [Cherepanova et al., 2013] (см. рис. 2), мы установили 1D скоростную структуру под главными структурными единицами Сибирского кратона (рис. 3). Поскольку считается, что граничная скорость P -волны между осадочными породами и основанием равна 5.8 км/с, то базальтовые траппы и подстилающие метаосадочные породы, характеризующиеся высокой скоростью ($v_p > 6.1$ км/с), могут рассматриваться как часть кристаллического фундамента. Алданский щит расположен на юге Сибирского кратона и состоит из гранит-зеленокаменных и гнейсовых террейнов высокой степени метаморфизма [Rosen et al., 1994; Jahn et al., 1998].

Кора Алданского щита может быть разделена на три слоя — с мощной верхней корой (18—28 км), нормальной средней (~15 км) и относительно тонкой нижней. Высокоскоростной слой $v_p > 7.2$ км/с на западе Алданского щита характеризуется переменной мощностью (см. рис. 2). Здесь мы принимаем нормальную скоростную модель для Магочинского блока на западе Алданского щита (см. рис. 3).

Тунгусский бассейн покрыт мощным слоем базальтов и туфов сибирских траппов, который залегает на ~8-километровой толще более древних осадочных пород венд-раннекарбонového возраста [Nikishin et al., 2010]. Западно-Тунгусский бассейн перекрыт отложениями более молодого возраста и имеет нормальную четырехслойную структуру коры (см. рис. 3). В противоположность, центрально-осевая часть Тунгусского бассейна подстилается высокоскоростным слоем самой нижней коры и слоем верхней мантии со скоростью $P_n = 8.3—8.5$ км/с [Cherepanova et al., 2013]. Подобная скоростная структура коры наблюдается под Саяно-Таймырской сутурной зоной протерозойского возраста и под Мархинским террейном Анабарской провинции (см. рис. 2).

Структура верхней мантии Сибирского кратона широко изучалась с помощью профилей большой протяженности, при использовании данных мирных ядерных исследований, например, профиль Кратон, полученный вдоль ~65° с.ш. в направлении восток—запад для Западно-Сибирского бассейна и Сибирского кратона [Nielsen et al., 1999; Pavlenkova, Pavlenkova, 2006; Nielson, Thybo, 2006]. Авторы работы [Melnik et al., 2015] предположили трехслойную модель для верхней мантии вдоль профиля Кратон, характеризующейся следующими v_p скоростями: 8.0—8.5 км/с для слоя 1, 8.6—8.7 км/с для слоя 2 и ~8.5 км/с для слоя 3. Вариации скоростей продольных волн отражают гетерогенность мантии в главных тектонических структурах кратона. Слой 1 коррелирует с нормальной верхней мантией под Западно-Сибирским бассейном. Слой 2 является высокоскоростной аномалией на глубине 100—200 км под Тунгусским бассейном и интерпретируется как «эклогитовый слой», связанный с сибирскими траппами. Необходимо отметить, что местоположение слоя 2 совпадает с чрезвычайно высокой скоростью в самой нижней коре и верхней мантии, о чем было упомянуто выше. В то же время слой 3 коррелирует с высокой P_n скоростью верхней мантии под Якутской кимберлитовой провинцией.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВЫСОКОЙ v_p АНОМАЛИИ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

Происхождение высокой v_p аномалии в нижней коре

Как было суммировано в работе [Wang et al., 2013], сейсмические свойства пород являются функцией состава, структуры, давления и температуры. Измерения скорости в лабораторных условиях для пород Сибирского кратона пока очень ограничены. Только три перидотита и два эклогита из кимберлитовой тр. Удачная были измерены при ограничении давлений до 600 МПа [Kobussen et al., 2006], а также четыре перидотита Витимского вулканического плато — при всестороннем давлении до 600 МПа и температурах до 600 °С [Kern et al., 1996]. Кроме того, были оценены сейсмические скорости и анизотропия ксенолитов перидотитов, пироксенитов и эклогитов из тр. Удачная и вулканического поля Токинский Становик с использованием измеренной с помощью дифракции в обратнорассеянных электронах (EBSD) предпочтительной ориентации минералов (Tommasi et al., 2008; Vascou et al., 2011).

Сейсмические скорости пород обычно повышаются с увеличением давления и уменьшаются с увеличением температуры. Для интерпретации высокоскоростной аномалии в самой нижней коре и верхней мантии, мы суммировали v_p и плотность пород, используя обновленную базу данных сейсмических свойств минералов, пород и руд [Ji et al., 2002; Wang et al., 2013]. Мафические гранулиты подразделены на две группы: двухпироксеновые гранатовые гранулиты и двухпироксеновые гранулиты, имеющие парагенезис Pl + Crx + Orx ± Hbl. Глиноземистые гранулиты — это метапелиты гранулитовой фации, характеризующиеся дегидратацией мусковита и присутствием в значительной степени безводных минералов, таких как силлиманит, кордиерит, гранат, кварц, калиевый полевой шпат и гиперстен. Хотя глиноземистые гранулиты широко проявлены в разрезах нижней коры в горах Серре и зоне Иврия в Италии [Fountain, 1976; Kern, Schenk, 1985], они очень редки в ксенолитах Сибирского кратона. Гранатовое габбро может быть образовано при магматическом андерплейтинге в основании коры дуги, например, дуга Талкитна [Hacker et al., 2008] при температурах 900—1000 °С и давлении ~1 ГПа и дуга Кохистан [Yamamoto, 1993] при 700—950 °С и > 1 ГПа. Гранатовые габбро на границе палеоМохо в

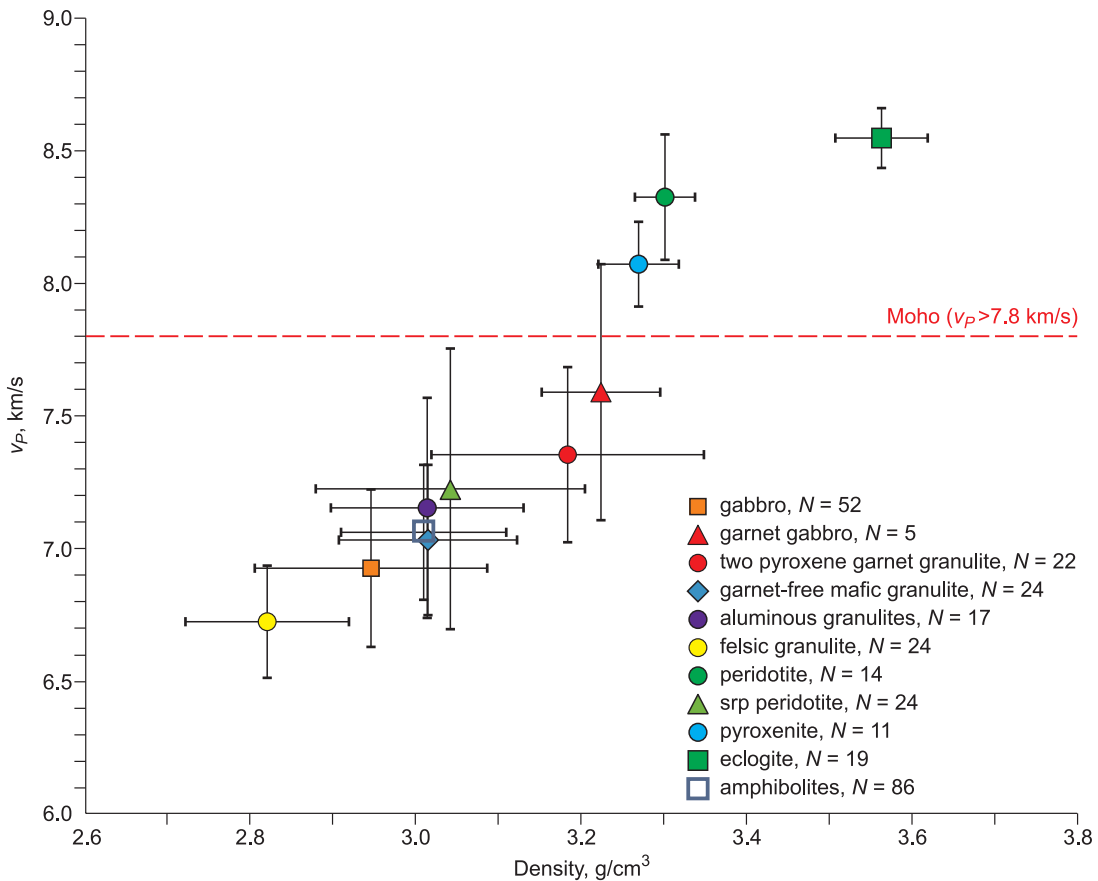


Рис. 4. Статистические результаты скорости P -волн и плотность пород, обычно присутствующих вблизи границы Мохо.

N — число образцов, планки погрешностей указывают величину стандартного отклонения.

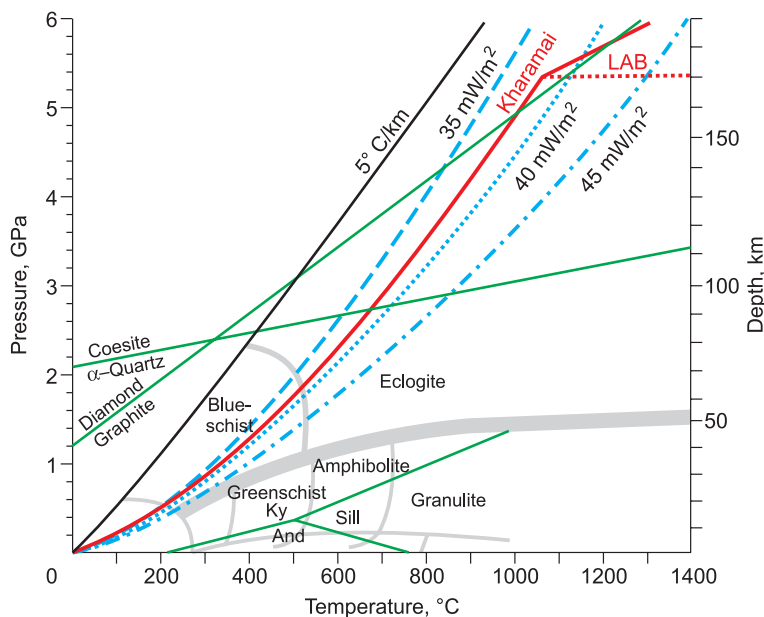


Рис. 5. Диаграмма температура—давление, показывающая метаморфические фации мафических пород.

PT-границы различных метаморфических фаций точно не определены. Синие линии — геотермы с различным тепловым потоком, красная — *PT*-оценки для гранатовых ксенокристаллов из кимберлитов Харамайского поля [Griffin et al., 2005]. Глубина вычислена, используя литостатическое давление $P = \rho g z$, где средние плотности пород (ρ) принимаются равными 2.85 и 3.30 г/см³ для коры мощностью 35 км и верхней мантии соответственно. And — андалузит, Ky — кианит, Sill — силлиманит, LAB — граница астеносфера—литосфера.

хистан в Северном Пакистане [Miller, Christensen, 1994], характеризуются высокой плотностью, высокой скоростью, полнокристаллическими и адкумулативными структурами и процентным объемом граната до 50%. Обнаруженные здесь эклогиты — неизменные, крупнозернистые, сложены $Ompr + Grt \pm Rt$ парагенезисом, т. е. являются эклогитами первого типа, согласно [Wang et al., 2005, 2013]. Поскольку при давлениях выше 300—400 МПа, сейсмические скорости для большинства пород незначительно увеличиваются линейно с давлением и температурой и производные сейсмических скоростей очень небольшие, то v_p скорость при давлении 1000 МПа и комнатной температуре может представлять скорость пород *in situ* в нижней коре и верхней мантии.

Как показано на рис. 4, амфиболиты имеют плотность и v_p скорость, сравнимую с двупироксеновыми гранулитам. Нижняя кора Сибирского кратона с $v_p = 6.8—7.2$ км/с может быть представлена мафическими гранулитами, габбро, амфиболитами и незначительной долей кислых гранулитов/гнейсов. Присутствие только двупироксеновых гранулитов не может объяснить чрезмерно высокие скорости ($v_p > 7.2$ км/с) самой нижней коры, которые могут быть достигнуты присутствием как гранатовых гранулитов, так и гранатовых габбро. Кроме того, если v_p больше, чем 7.4 км/с, гранатовые габбро и эклогиты, которые характеризуются высокой скоростью и высокой плотностью, являются лучшими кандидатами присутствия в основании коры вместе с гранулитами. Однако, так как крупнозернистые эклогиты имеют самую высокую плотность ~ 3.5 г/см³, их наличие приводит к гравитационной аномалии. Двухмерная модель плотности верхней мантии в Северной Евразии показывает, что плотность нижней коры равна 2.95 г/см³ [Yegorova, Pavlenkova, 2014]. Поэтому доля эклогитов в самой нижней коре должна быть относительно низкой под Сибирским кратоном, что согласуется с преобладанием двупироксен-гранатовых ксенолитов из кимберлитовых трубок [Бузлукова и др., 2004; Шацкий и др., 2005; Koreshkova et al., 2011]. Кроме того, для метаморфизма эклогитовой фации базальтовых или габброидных пород требуется давление выше 1.2 ГПа и температура выше 500 °С, что соответствует глубине, по крайней мере, ниже 40 км (рис. 5). Для Сибирского кратона предполагаемая температура на глубине 50 км ниже 500 °С [Artemieva, Mooney, 2001], что препятствует эклогитовому метаморфизму вблизи границы Мохо.

Происхождение высокой аномалии v_p в верхней мантии

Кимберлиты Харамайского поля террейна Маган сформировались вскоре после образования Сибирской трапповой провинции (см. рис. 1). На рис. 5 показаны геотермические профили, смоделированные с использованием значения теплового потока, варьирующего от 45 до 35 мВт/м², а также *PT*-значения для гранатовых ксенокристов кимберлитового Харамайского поля [Griffin et al., 2005]. Расчетная геотерма гранатовых ксенокристов вблизи 38 мВт/м² в кондуктивной модели простирается до глубины 170 км, где основание деплетированной литосферы определяется по заметному росту метасоматизма, связанного с плавлением и по изгибу геотермы. По сравнению с субконтинентальной литосферной мантией (SCLM), опробованной девонскими (до образования сибирских траппов) кимберлитами из того же и соседних террейнов, SCLM под кимберлитовым Харамайским полем в триасе была немного теплее,

чем геотерма 35 мВт/м² в девоне (до образования сибирских траппов), и начала постепенно охлаждаться [Griffin et al., 2005]. Учитывая оценки PT -условий, эклогиты не могли формироваться на глубине менее 60 км и сразу же после извержения сибирских траппов.

Используя стационарное уравнение теплопроводности и данные теплового потока, авторы работы [Artemieva, Mooney, 2001] получили тепловую структуру докембрийской литосферы. По сравнению с тепловым потоком, равным 30—50 мВт/м², и мощной горячей литосферой (200—220 км) для Индийского, Южно-Африканского и Западно-Австралийского кратонов Сибирский кратон характеризуется очень низким тепловым потоком (18—25 мВт/м²) на большинстве территории и мощной термальной литосферой (300—350 км). Таким образом, современная геотерма Сибирского кратона должна быть близка к 5 °С/км, что отражает непрерывное охлаждение после извержения сибирских траппов. При такой геотерме эклогиты могут быть стабильными длительное время. Алмазоносные ксенолиты эклогитов были обнаружены в кимберлитовой тр. Удачная [Jacob et al., 1994; Sobolev et al., 1994; Соболев и др., 1998; Misra et al., 2004; Shatsky et al., 2008], что свидетельствует о сосуществовании эклогитов и перидотитов на больших глубинах. Высокая v_p аномалия (8.3—8.6 км/с) верхней мантии может интерпретироваться как результат смещения эклогитов с гранатовыми перидотитами, вероятно, на глубине до 200 км (т. е. слой 2 в модели верхней мантии, по [Melnik et al., 2015]). Однако максимальная скорость $P_n = 8.8$ км/с превышает v_p эклогитов, что может объясняться сейсмической анизотропией перидотитов [Bascou et al., 2011].

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОД СИБИРСКИМ КРАТОНОМ

Электропроводность минералов определяется из уравнения Аррениуса:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-\Delta H}{kT}\right), \quad (1)$$

где T — температура (К), k — постоянная Больцмана (эВ/К), σ_0 — предэкспоненциальный множитель (См/м) и ΔH — энтальпия активации (эВ). Следовательно, электропроводность нижнекоровых и мантийных пород главным образом контролируется температурой, летучестью кислорода, но слабо зависит от давления. Предыдущие исследования показывают, что даже небольшое количество водорода может значительно увеличить электропроводность оливина, пироксена, граната и полевого шпата [Yoshino, 2010; Yang, 2011; Wang et al., 2013]. Поэтому глубина электрической границы Мохо изменяется в зависимости от температуры и содержания воды на границе кора—мантия.

Мы оценили электропроводность под Сибирским кратоном, используя данные по мощности верхней, средней, нижней и самой нижней коры различных регионов (см. рис. 2). Геотермы были рассчитаны, принимая тепловые свойства типичных пород, составляющих кору, таким образом, их электропроводность вычислялась как сумма электропроводности отдельных минералов [Wang et al., 2013]. Рисунок 6 представляет верхнюю границу Хашии—Штрикман расчетной проводимости как функцию глубины. В осадках электропроводность (σ) была оценена из зависимости проводимости воды от температуры [Henry, 1997]:

$$\sigma = 2.8 + 0.1 T (\text{°C}) \Omega^{-1} (\text{м}^{-1}) \quad (2)$$

и по экспоненциально уменьшающей пористости отложений в зависимости от глубины. Фактор формирования в законе Арчи был принят в форме $F = 1.24 \cdot \varphi^{-2.31}$ [Henry, 1997].

Как показано на рис. 6, профили электропроводности различных областей сильно зависят от температуры на границе Мохо (T_{Moho}). Имеются существенные различия между электропроводностью на границе литосфера—астеносфера для Алданского щита и Западно-Тунгусского бассейна, с одной стороны, и Центрально-Тунгусским бассейном и Саяно-Таймырской сутурой, с другой. Первые две области соответствуют немного более горячей геотерме с температурой на границе $T_{\text{Moho}} \approx 575\text{—}550$ °С и тепловым потоком на поверхности ~ 45 мВт/м². Напротив, две последние области характеризуются $T_{\text{Moho}} \approx 470\text{—}450$ °С и тепловым потоком на поверхности ~ 37 мВт/м². Смоделированная проводимость верхней коры нереалистично высока, так как только вода в минералах принималась во внимание для оценки проводимости пород. По сравнению с данными магнитотеллурического зондирования [Bubnov et al., 2007] и термохимической структурой литосферной мантии под Сибирским кратоном [Kuskov, 2014] вариации электрической структуры SCLM главным образом зависят от температуры ниже различных тектонических блоков коры.

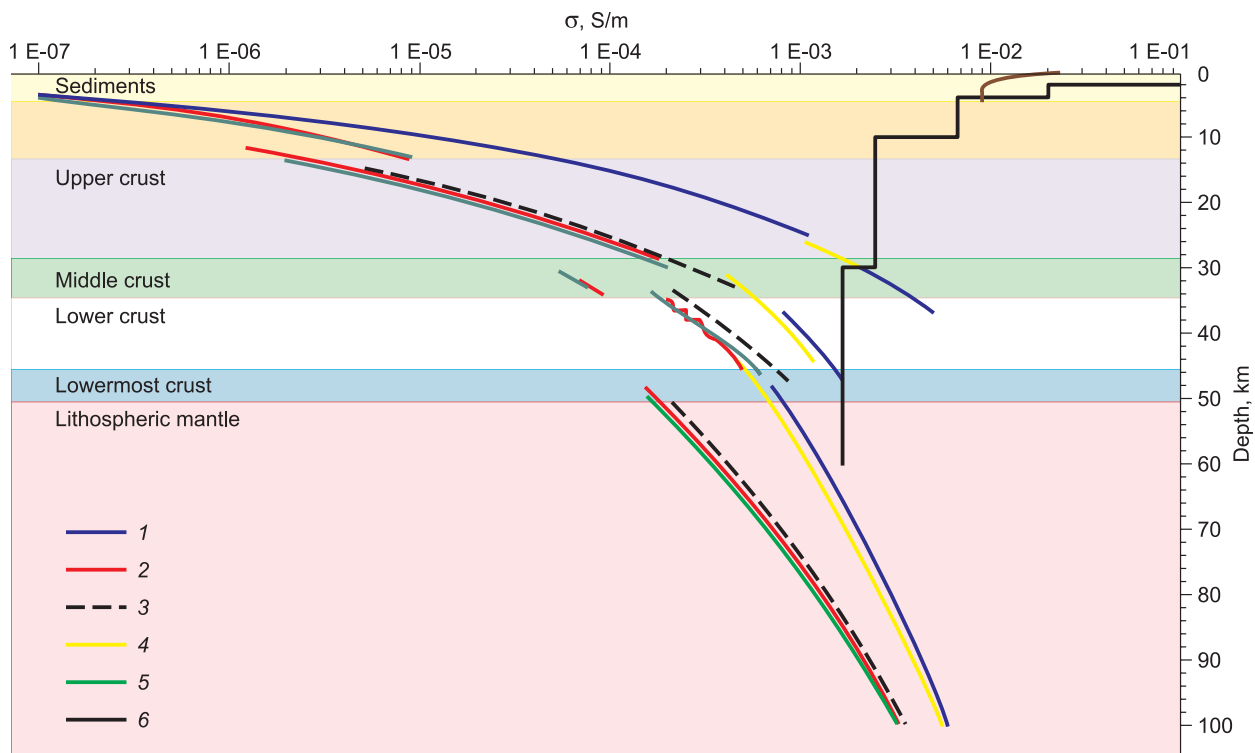


Рис. 6. Оценки электрической структуры под различными частями Сибирского кратона.

Электрическая проводимость составляющих минералов в различных слоях коры вычислена с использованием верхней и нижней границы Хашин—Штрикман (более детально см. [Wang et al., 2014]). Мощность верхней, средней и нижней коры оценена по рис. 2. 1 — Алданский щит, 2 — Мархинский террейн, 3 — Центрально-Тунгусский бассейн, 4 — Западно-Тунгусский бассейн, 5 — Саяно-Таймырская сукура, 6 — магнитотеллуromетрические данные, по [Bubnov et al., 2007].

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно сейсмической структуре литосферы Сибирского кратона и сейсмическим свойствам пород, нижняя кора представлена главным образом породами гранулитовой фации и должна быть очень неоднородна по составу. Самая нижняя кора Сибирского кратона состоит из двупроксеновых гранатовых гранулитов и гранатового габбро, которые представляют мафические породы гранулитовой фации и продукты подслаивания магмы, начиная с формирования основания Сибирского кратона. Эклогиты, встречающиеся в верхней мантии вместе с перидотитами, вероятно, локально аккумуляровались под центром извержения Сибирского кратона как «ископаемые» магматические камеры в верхней мантии. Такая картина предполагает, что поверхность Мохоровичича, которая определена как глобальная сейсмическая граница с $v_p > 7.8$ км/с, не обязательно соответствует химической границе, отделяющей мафическую нижнюю кору от ультрамафитовой верхней мантии. Учитывая очень низкую температуру на границе Мохо под Сибирским кратоном, граница Мохо под самой нижней корой, характеризующаяся очень высокой сейсмической скоростью ($v_p > 7.2$ км/с), отражает границу метаморфизма мафических пород гранулитовой и эклогитовой фаций, которая, скорее всего, связана с многофазным процессом подслаивания магм начиная с неогархея, поскольку эклогитовые и гранатовые гранулиты имеют архейский или палеопротерозойский возраст, и U-Pb и Hf изотопные системы цирконов из коровых ксенолитов не показывают влияния триасовых сибирских траппов [Jacob et al., 1994; Jacob, Foley, 1999; Шацкий и др., 2005; Koreshkova et al., 2009, 2011]. Подслаивание магмы, связанное с извержением сибирских траппов, может быть локализовано под Центрально-Тунгусским бассейном. Поскольку глубина метаморфической трансформации может меняться в зависимости от локального теплового состояния, отражательная способность границы Мохо будет менее отчетливой. Этапы крупномасштабного плавления мантии могут вызвать ритмы роста континентальной коры в истории Земли [Pearson, 2007]. Количество нижней коры будет недооценено из-за скрытого высокоскоростного слоя, расположенного вблизи границы Мохо.

С другой стороны, вода в форме водорода, включенного в состав дефектов решетки номинально безводных минералов, может значительно уменьшать температуру плавления и вязкость верхней ман-

тии [Hirth, Kohlstedt, 1996, 2003; Hirschmann, 2006; Karato, 2010; Wang, 2010]. Поскольку коэффициент распределения водорода между перидотитом и расплавом $D_H^{peridotite/melt}$ составляет только 0.005—0.013, дегидратационное плавление номинально безводной мантии может привести к извлечению воды из перидотитов и изменению распределения воды в верхней мантии [Hirschmann et al., 2009]. Сравнение данных магнитотеллурического зондирования и данных *in situ* электропроводности мантийных пород Северо-Китайского кратона указывает, что литосфера, имеющая высокое сопротивление, соответствует деплетированным, очень сухим перидотитовым реститам, которые могли образоваться в результате позднемелового гигантского магматического события во время разрушения кратона [Wang et al., 2014]. Таким же образом многостадийный процесс подслаивания магмы, возможно, привел к образованию деплетированной и в дальнейшем дегидратированной SCLM Сибирского кратона. Такой процесс дегидратации, вызванный магматизмом, увеличивает прочность литосферной мантии, останавливает утонение литосферы и запускает механизм ее утолщения. Хотя данные об электрической структуре Сибирского кратона, по результатам магнитотеллурического зондирования, все еще ограничены, она может иметь значительные латеральные вариации. Измерения содержания воды в мантийных ксенолитах из кимберлитов и базальтов дадут важные ограничения, касающиеся реологической эволюции Сибирского кратона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сейсмических свойств пород и термального состояния Сибирского кратона мы интерпретировали высокоскоростную аномалию в сейсмических профилях кратона. Очень высокая скорость ($v_p > 7.2$ км/с) самой нижней коры может объясняться присутствием гранатовых гранулитов и гранатовых габбро, в то время как высокая скорость в верхней мантии отражает присутствие эклогитов. Аномально высокая скорость, наблюдаемая в нижней коре и верхней мантии под центральным Тунгусским бассейном, а также многочисленные обнажения базальтов и туфов указывают на их корреляцию с сибирскими траппами. Однако подслаивание магмы приводит к образованию самой нижней коры с $v_p > 7.2$ км/с под Саяно-Таймырской сутурой во время протерозойской коллизии и под Мархинским террейном во время неоархейского роста коры и палеопротерозойского формирования Сибирского кратона.

Многостадийный процесс подслаивания магмы начиная с неоархея приводит к вертикальному росту коры и изменению глубины границы Мохо под Сибирским кратоном. Вариации температуры на границе Мохо находятся в пределах 100—150 °С. Такое изменение состава и обезвоживание, вызванные магматизмом, увеличивают вязкость литосферной мантии и запускают механизм утолщения литосферы, обусловленные деятельностью мантийных плюмов. Таким образом, мантийные плюмы могли способствовать длительной стабильности кратонов.

Авторы признательны академику М.И. Кузьмину за приглашение представить статью в специальный выпуск.

Исследования выполнены при поддержке грантов ГФЕН № 41172182 и ГФЕН-РФФИ № 41511130030.

ЛИТЕРАТУРА

Бузлукова Л.В., Шацкий В.С., Соболев Н.В. Особенности строения низов земной коры в районе кимберлитовой трубки Загадочная (Якутия) // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (8), с. 992—1007.

Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Склярков Е.В., Пономарчук В.А., Станевич А.М. Урикско-Ийский грабен Присаянского выступа Сибирского кратона: новые геохронологические данные и геодинамические следствия // ДАН, 2002, т. 386, № 1, с. 72—77.

Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Спеиус З.В. Определение U-Pb возрастов перовскитов и якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.

Соболев Н.В., Тейлор Л.А., Зуев В.М., Безбородов С.М., Снайдер Г.А., Соболев В.Н., Ефимова Э.С. Особенности эклогитового парагенезиса алмазов кимберлитовых трубок Мир и Удачная (Якутия) // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (12), с. 1667—1678.

Шацкий В.С., Бузлукова Л.В., Ягоуц Э., Козьменко О.А., Митюхин С.И. Строение и эволюция нижней коры Далдын-Алакитского района Якутской алмазонасной провинции (по данным изучения ксенолитов) // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (12), с. 1273—1289.

Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res., 2001, v. 106, p. 16387—16414.

Bascou J., Doucet L.S., Saumet S., Ionov D.A., Ashepkov I.V., Golovin A.V. Seismic velocities, anisotropy and deformation in Siberian cratonic mantle: EBSD data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite // Earth Planet. Sci. Lett., 2011, v. 304, № 1—2, p. 71—84.

- Belousova E.A., Kostitsyn Y.A., Griffin W.L., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Pearson N.J.** The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data // *Lithos*, 2010, v. 119, p. 457—466.
- Bryan S.C., Ferrari L.** Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years // *GSA Bull.*, 2013, v. 125, p. 1053—1078.
- Bubnov V.P., Yakovlev A.G., Aleksanova E.D., Yakovlev D.V., Berdichevsky M.N., Pushkarev P.Yu.** Regional magnetotelluric explorations in Russia // *Methods Geochem. Geophysics*, 2007, v. 40, p. 351—367.
- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B.** The continental record and the generation of continental crust // *GSA Bull.*, 2013, v. 125, p. 14—32.
- Cherepanova Y., Artemieva I., Thybo H., Chemia Z.** Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // *Tectonophysics*, 2013, v. 209, p. 154—183.
- Christensen N.I., Mooney W.D.** Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 100, № B6, p. 9761—9788.
- DeBari S.M., Coleman R.G.** Examination of the deep levels of an island arc: evidence from the Tonsina ultramafic-mafic assemblage, Tonsina, Alaska // *J. Geophys. Res.*, 1989, v. 94, p. 4373—4391.
- Doucet L.S., Ionov D.A., Golovin A.V.** Paleoproterozoic formation age for the Siberian cratonic mantle: Hf and Nd isotope data on refractory peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite // *Chem. Geol.*, 2015, v. 391, p. 42—55.
- Eaton D.W., Darbyshire F., Evans R.L., Grütter H., Jones A.G., Yuan X.H.** The elusive lithosphere—asthenosphere boundary (LAB) beneath cratons // *Lithos*, 2009, v. 109, p. 1—22.
- Ernst R.E., Buchan K.L.** Large mafic magmatic events through time and links to mantle-plume heads // *Mantle plumes: their identification through time* / Eds. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Amer.*, 2001, Special Paper 352, p. 483—575.
- Erwin D.H.** The Permo-Triassic extinction // *Nature*, 1994, v. 367, p. 231—236, doi: 10.1038/367231a0.
- Foley S.F.** Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere // *Nat. Geosci.*, 2008, v. 1, p. 503—510, doi:10.1038/ngeo261.
- Fountain D.M.** The Ivrea-Verbano and Strona-Ceneri zones, northern Italy: a cross section of the continental crust — new evidence from seismic velocities of rock samples // *Tectonophysics*, 1976, v. 33, p. 145—165.
- Gladkochub D., Pisarevsky S., Donskaya T., Natapov L., Mazukabzov A., Stanevich A., Sklyarov E.** The Siberian Craton and its evolution in terms of the Rodinia hypothesis // *Episodes*, 2006, v. 29, p. 169—174.
- Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., O'Reilly S.Y., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Ilupin I.P.** The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian craton // *Tectonophysics*, 1999, v. 310, p. 1—35.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Abe N., Aulbach S., Davies R.M., Pearson N.J., Doyle B.J., Kivi K.** The origin and evolution of Archean lithospheric mantle // *Precamb. Res.*, 2003, v. 127, p. 19—41.
- Griffin W.L., Natapov L.M., O'Reilly S.Y., van Achtebergh E., Cherenkova A.F., Cherenkov V.G.** The Kharamai kimberlite field, Siberia: Modification of the lithospheric mantle by the Siberian Trap event // *Lithos*, 2005, v. 81, p. 167—187.
- Hacker B.R., Mehl L., Kelemen P.B., Rioux M., Behn M.D., Luffi P.** Reconstruction of the Talkeetna intraoceanic arc of Alaska through thermobarometry // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B03204, doi:10.1029/2007JB005208.
- Henry P.** Relationship between porosity, electrical conductivity, and cation exchange capacity in Barbados wedge sediments // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results* / Eds. T.H. Shipley, Y. Ogawa, P. Blum, J.M. Bahr. 1997, v. 156, p. 137—149.
- Hirschmann M.M.** Water, melting, and the deep Earth H₂O cycle // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006, v. 34, p. 629—653.
- Hirschmann M.M., Tenner T., Aubaud C., Withers A.C.** Dehydration melting of nominally anhydrous mantle: the primacy of partitioning // *Phys. Earth Planet. Int.*, 2009, v. 176, p. 54—68.
- Hirth G., Kohlstedt D.L.** Water in the oceanic upper mantle: implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 144, p. 93—108.
- Hirth G., Kohlstedt D.L.** Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: a view from the experimentalists // *Inside the subduction factory* / Ed. J.E. Eiler. *Amer. Geophys. Union*, Washington DC, 2003, p. 83—105.
- Ionov D.A., Prikhodko V.S., Bodinier J.L., Sobolev A.V., Weis D.** Lithospheric mantle beneath the south-eastern Siberian craton: petrology of peridotite xenoliths in basalts from the Tokinsky Stanovik // *Contr. Miner. Petrol.*, 2005, v. 149, p. 647—665.

Ionov D.A., Carlson R.D., Doucet L.S., Golovin A.V., Oleinikov O.B. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2015a, v. 428, p. 108—119.

Ionov D.A., Doucet L.S., Carlson R.W., Golovin A.V., Korsakov A.V. Post-Archean formation of the lithospheric mantle in the central Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015b, v. 165, p. 466—483.

Isley A.E., Abbott D.H. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation // *J. Geophys. Res.*, 1999, v. 104, p. 15.461—15.478, doi:10.1029/1999JB900066.

Isley A.E., Abbott D.H. Implications of the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time // *J. Geol.*, 2002, v. 110, p. 141—158, doi:10.1086/338553.

Jacob D.E., Foley S.E. Evidence for Archean ocean crust with low high field strength element signature from diamondiferous eclogite xenoliths // *Lithos*, 1999, v. 48, p. 317—336.

Jacob D., Jagoutz E., Lowry D., Matthey D., Kudrjavitseva G. Diamondeiferous eclogites from Siberia: Remnants of Archean oceanic crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, v. 58, p. 5191—5207.

Jahn B.-M., Gruan G., Capdevila R., Cornichet J., Nemchin A., Pidgeon R., Rudnik V.A. Archean crustal evolution of the Aldan Shield, Siberia: geochemical and isotopic constraints // *Precamb. Res.*, 1998, v. 91, p. 333—336.

Ji S.C., Wang Q., Xia B. Handbook of seismic properties of minerals, rocks and ores. Montreal, Canada, Polytechnic International Press, 2002, 630 p.

Karato S. Rheology of the deep upper mantle and its implications for the preservation of the continental roots: a review // *Tectonophysics*, 2010, v. 481, p. 82—98.

Kern H., Schenk V. Elastic wave velocities in rocks from a lower crustal section in southern Calabria (Italy) // *Phys. Earth Planet. Int.*, 1985, v. 40, p. 147—160.

Kern H., Burlini L., Ashchepkov I.V. Fabric-related seismic anisotropy in upper-mantle xenoliths: evidence from measurements and calculations // *Phys. Earth Planet. Int.*, 1996, v. 95, p. 195—209.

Kobussen A.F., Christensen N.I., Thybo H. Constraints on seismic velocity anomalies beneath the Siberian craton from xenoliths and petrophysics // *Tectonophysics*, 2006, v. 425, p. 123—135.

Koptev A., Calais E., Burov E., Leroy S., Gerya T. Dual continental rift systems generated by plume-lithosphere interaction // *Nat. Geosci.*, 2015, v. 8, p. 388—392, doi: 10.1038/NGEO2401.

Koreshkova M.Yu., Downs H., Nikitina L., Vladykin N.V., Larionov A.N., Sergeev S.A. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia // *Precamb. Res.*, 2009, v. 168, p. 197—212.

Koreshkova M.Yu., Downs H., Levsky L.K., Vladykin N.V. Petrology and geochemistry of granulite xenoliths from Udachnaya and Komsomolskaya Kimberlite Pipes, Siberia // *J. Petrol.*, 2011, v. 52, p. 1857—1885.

Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokofyev A.A., Pavlenkova N.I. Thermo-chemical structure of the lithospheric mantle underneath the Siberian craton inferred from long-range seismic profiles // *Tectonophysics*, 2014, v. 615—616, p. 154—166.

Larin A.M., Amelin Yu.V., Neymark L.A., Krymsky R.Sh. The origin of the 1.73—1.70 Ga anorogenic Ulkan volcano-plutonic complex, Siberian Platform, Russia: inferences from geochronological, geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic data // *Ann. Acad. Brasiliiana Ciencias*, 1997, v. 69, p. 295—312.

Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V., Mishenkina Z.R. Seismic and density heterogeneities of lithosphere beneath Siberia: Evidence from the Craton long-range seismic profile // *Polar Sci.*, 2015, v. 9, p. 119—129.

Miller D.J., Christensen N.I. Seismic signature and geochemistry of an island arc: a multidisciplinary study of the Kohistan accreted terrane, northern Pakistan // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, p. 11623—11642.

Misra K.C., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V. Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // *Contr. Miner. Petrol.*, 2004, v. 146, p. 696—714.

Nielsen L., Thybo H. Identification of crustal and upper mantle heterogeneity by modeling of controlled-source seismic data // *Tectonophysics*, 2006, v. 416, p. 209—228.

Nielsen L., Thybo H., Solodilov L. Seismic tomographic inversion of Russian PNE data along profile Craton // *Geophys. Res. Lett.*, 1999, v. 26, p. 3413—3416.

Nikishin A.M., Sobornov K.O., Prokopiev A.V., Frolov S.V. Tectonic evolution of the Siberian Platform during the Vendian and Phanerozoic // *Moscow University Geology Bull.*, 2010, v. 65, № 1, p. 1—16.

Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan Shield of Siberia, USSR: the age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the mid-Proterozoic // *Precamb. Res.*, 1992, v. 54, № 2—4, p. 195—210.

- Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I.** Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // *Tectonophysics*, 2006, v. 416, p. 33—52.
- Pearson D.G., Shirey S.B., Carlson R.W., Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Shimizu N.** Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr isotope evidence for thick Archaean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multi-stage metasomatism // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995a, v. 59, № 5, p. 959—977.
- Pearson D.G., Snyder G., Shirey S., Taylor L., Carlson R., Sobolev N.** Archaean Re-Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics // *Nature*, 1995b, v. 374, p. 711—713.
- Pearson D.G., Parman S.W., Nowell G.M.** A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes // *Nature*, 2007, v. 449, p. 202—205.
- Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Vernikovskiy V.A.** Proterozoic Siberia: A promontory of Rodinia // *Precamb. Res.*, 2008, v. 160, p. 66—76.
- Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Sklyarov E., Todt W.** Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Palaeoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS // *Precamb. Res.*, 2005, v. 136, p. 353—368.
- Prodehl C., Kennett B., Artemieva I.M., Thybo H.** 100 years of seismic research on the Moho // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 9—44.
- Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D.** The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 277, p. 9—20.
- Rosen O.M., Condie K.C., Natapov L.M., Nozhkin A.D.** Paleoproterozoic evolution of the Siberian craton: a preliminary assessment // *Archean crustal evolution* / Ed. K.C. Condie. Amsterdam, Elsevier, 1994, p. 411—459.
- Rosen O.M., Levskii L.K., Zhuravlev D.Z., Rotman A.Ya., Spetsius Z.V., Makeev A.F., Zinchuk N.N., Manakov A.V., Serenko V.P.** Palaeoproterozoic accretion in the northeast Siberian craton: isotopic dating of the Anabar collision system // *Stratigr. Geol. Correl.*, 2006, v. 14, p. 581—601.
- Shatsky V., Ragozin A., Zedgenizov D., Mityukhin S.** Evidence for multistage evolution in a xenolith of diamond-bearing eclogite from the Udachnaya kimberlite pipe // *Lithos*, 2008, v. 105, p. 289—300.
- Sobolev V.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Sobolev N.V.** Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // *Int. Geol. Rev.*, 1994, v. 36, p. 42—46.
- Steinberger B., Torsvik T.H.** Toward an explanation for the present and past locations of the poles // *Geochem. Geophys. Geosystems*, 2010, v. 11, № Q06W06, doi:10.1029/2009GC002889.
- Suvorov V.D., Melnik E.A., Thybo H., Perchuc E., Parasotka B.S.** Seismic velocity model of the crust and uppermost mantle around the Mirnyi kimberlite field in Siberia // *Tectonophysics*, 2006, v. 420, p. 167—185.
- Thybo H., Artemieva I.M.** Moho and magmatic underplating in continental lithosphere // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 605—619.
- Tommasi A., Vauchex A., Ionov D.A.** Deformation, static recrystallization, and reactive melt transport in shallow subcontinental mantle xenoliths (Tok Cenozoic volcanic field, SE Siberia) // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, v. 272, p. 65—77.
- Wang Q.** A review of water contents and ductile deformation mechanisms of olivine: implications for the lithosphere—asthenosphere boundary of continents // *Lithos*, 2010, v. 120, p. 30—41.
- Wang Q., Ji S.C., Salisbury M., Pan M., Xia B., Xu Z.Q.** Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections // *Tectonophysics*, 2005, v. 398, p. 67—99.
- Wang Q., Bagdassarov N., Ji S.** The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 395—422.
- Wang Q., Bagdassarov N., Xia Q., Zhu B.** Water contents and electrical conductivity of peridotite xenoliths from the North China Craton: Implications for water distribution in the upper mantle // *Lithos*, 2014, v. 189, p. 105—126.
- Wignall P.B.** Large igneous provinces and mass extinctions // *Earth Sci. Rev.*, 2001, v. 53, p. 1—33, doi: 10.1016/S0012-8252(00)00037-4.
- Winter J.D.** An introduction to igneous and metamorphic petrology. New Jersey, Prentice-Hall Inc., 697 p.
- Xu Y.G.** Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: evidence timing and mechanism // *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, v. 26, p. 747—757.

Yamamoto H. Contrasting metamorphic *P-T*-time paths of the Kohistan granulites and tectonics of the western Himalayas // *J. Geol. Soc. (London, U.K.)*, 1993, v. 150, p. 843—856.

Yang X.Z. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: A review // *Surv. Geophys.*, 2011, v. 32, p. 875—903.

Yegorova T., Pavlenkova G. Structure of the upper mantle of Northern Eurasia from 2D density modeling on seismic profiles with peaceful nuclear explosions // *Tectonophysics*, 2014, v. 627, p. 57—71.

Yoshino T. Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals // *Surv. Geophys.*, 2010, v. 31, p. 163—206.

Zhao G., Cawood P.A., Wilde S.A., Sun M. Review of global 2.1—1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent // *Earth Sci. Rev.*, 2002, v. 59, p. 125—162.

*Поступила в редакцию
28 декабря 2015 г.*