

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.21

**СИСТЕМА МАГМАТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ
ВУЛКАНОВ (КАМЧАТКА)**

Академик РАН Е.И. Гордеев^{1,2}, чл.-корр. РАН И.Ю. Кулаков^{1,3}, Н.М. Шапиро^{2,4}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: gordeev@kscnet.ru*

² *Институт физики Земли Российской академии наук, Москва*

³ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения наук Российской академии наук, Новосибирск*

⁴ *Институт физики Земли, Париж, Франция*

По результатам наблюдений широкомасштабной сети сейсмических станций построена сейсмотомографическая модель аномалий скоростей продольных (P-wave) и поперечных (S-wave) сейсмических волн под Ключевской группой вулканов. Размеры наблюдательной сети (около 150 км) и количество сейсмических станций (около 200) позволило определить скоростную структуру среды до глубин в 150 км. Низкоскоростная аномалия существует практически под всеми вулканами Ключевской группы на глубине 50 км. Под вулканом Шивелуч в районе исчезновения субдукционной плиты аномалия прослеживается до глубин в 150 км. Скорее всего в этой зоне существует канал проникновения магматических расплавов к поверхности вдоль границы окончания погружающейся Тихоокеанской плиты. Косвенным подтверждением этого является наличие мантийного плюма до глубин в 1000 км полученного по предыдущим сейсмотомографическим построениям и аномальный тепловой поток в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Ключевые слова: сейсмическая томография, магматические источники, Ключевская группа вулканов, субдукция.

**MAGMA FEEDING SYSTEM OF THE KLYUCHEVSKAYA GROUP OF VOLCANOES
(KAMCHATKA)**

Academician E.I. Gordeev^{1,2}, Corresponding member of RAS I.Yu. Koulakov^{1,3}, N.M. Shapiro^{2,4}

¹ *Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, e-mail: gordeev@kscnet.ru*

² *Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

⁴ *Institut de Physique du Globe de Paris, France*

Using observations from a large-scale network of seismic stations, we performed seismic travel-time tomography to find a velocity anomalies model for longitudinal (P-wave) and transverse (S-wave) seismic waves under the Klyuchevskaya group of volcanoes. The coverage of the observational network (about 150 km) and the number of seismic stations (about 200) made it possible to determine the velocity structure to depths of 150 km. A low-speed anomaly is observed almost under all volcanoes in the Klyuchevskaya group at a depth of 50 km. Under Shiveluch volcano, in the region where the subduction plate discontinues, an anomaly can be detected to depths of 150 km. Most likely, in this zone there is a channel for the penetration of magmatic melts to the surface along the boundary end of the submerging Pacific plate. Previous seismic tomography studies showed an indirect confirmation of this that comes from the presence of a mantle plume to a depth of 1000 km and an anomalous heat flow at the junction of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs.

Key words: Seismic tomography, magmatic source, Klyuchevskaya group of volcanoes, subduction

Вулканизм в зонах субдукции имеет сложный механизм магматического питания, включающий многоуровневую систему магматических очагов в коре и в верхней мантии. Для Ключевской группы вулканов в предыдущих исследованиях получено детальное строение среды до глубин в 30 км. [1-4]. Для Ключевского вулкана было определено несколько магматических очагов на разных уровнях в коре. На границе кора-мантия, на глубине 30-35 км выявлен значительный объём магматических расплавов, который является основным источником питания для вулканов Ключевской и Безымянный. В этой зоне по долговременным наблюдениям отмечается повышенная сейсмическая активность. Это связано с воздействием магматических расплавов и флюидов на окружающую твердую среду. Для Ключевского вулкана система питания представляет вертикальный канал, в то время, как для Безымянного вулкана определён близповерхностный

долгоживущий магматический объём [3], где, скорее всего, происходит дифференциация магматических расплавов, с последующими извержениями более легких андезитовых магм. Сейсмотомографические модели строения среды под Ключевской группой вулканов в предыдущих исследованиях были получены по записям землетрясений на локальных сейсмических сетях. Изучение структур на больших глубинах, соответствующих участкам коры и мантии между погружающимся слэбом и поверхностью Земли, было ограничено отсутствием наблюдений на плотных сейсмических сетях с большой апертурой. К настоящему времени, в районе Ключевской группы вулканов проведен широкомасштабный эксперимент по регистрации сейсмических событий на временных сетях сейсмических станций общим числом более 100 и размерами сети до 150 км. [5] (рис. 1).

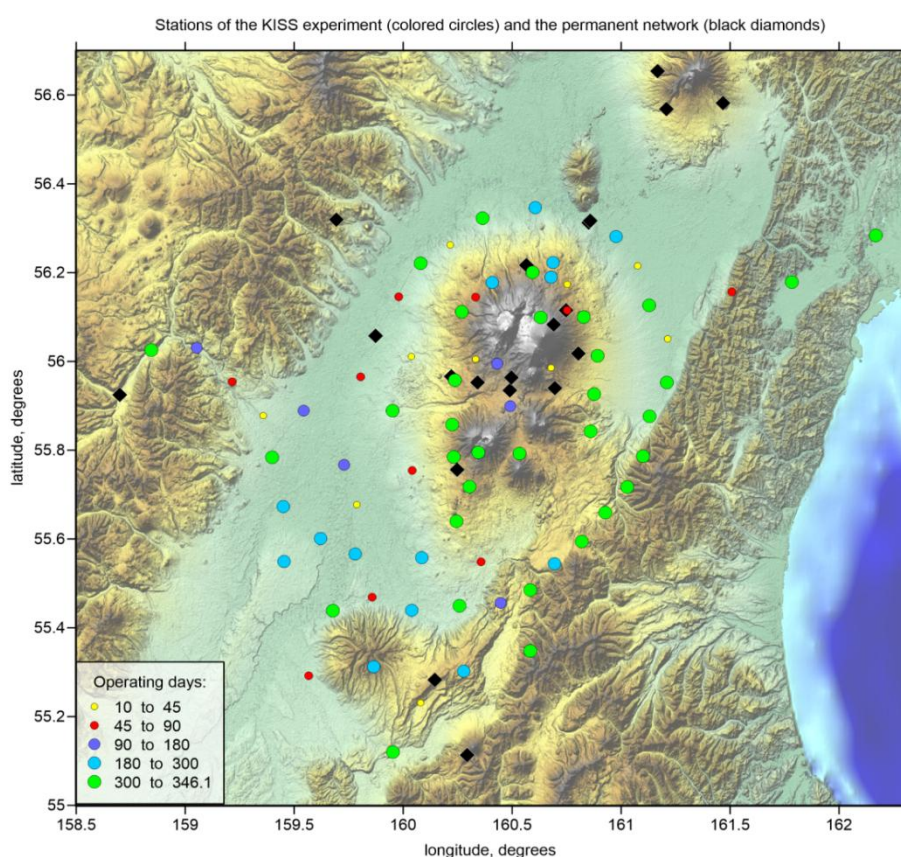


Рис.1. Положение сейсмических станций в районе Ключевской группы вулканов в период наблюдений с августа 2015 г. по июль 2016 г. Различным цветом отмечены станции с различными интервалами непрерывных наблюдений.

Кроме данных, полученных в результате этого эксперимента, для построения скоростных моделей использовались данные наблюдений на временных сейсмических станциях на вулкане Толбачик в 2014-2015 гг и данные постоянных станций сети Камчатского филиала Единой Геофизической службы РАН. Общее количество сеймостанций (временные и постоянные) составляло 208 и суммарное количество

зарегистрированных землетрясений 6609. Такой объём данных позволил получить сейстотомографическую модель до глубин в 150 км, то есть до верхних границ погружающейся субдукционной плиты.

На рис.2 (слева) представлена структура аномалий скоростей продольных сейсмических волн (P-волн) на глубине 50 км под Ключевской группой вулканов. Очевидна ярко выраженная аномалия пониженных скоростей к востоку от Ключевского вулкана. Эта аномалия практически однородна для всех вулканов Ключевской группы.

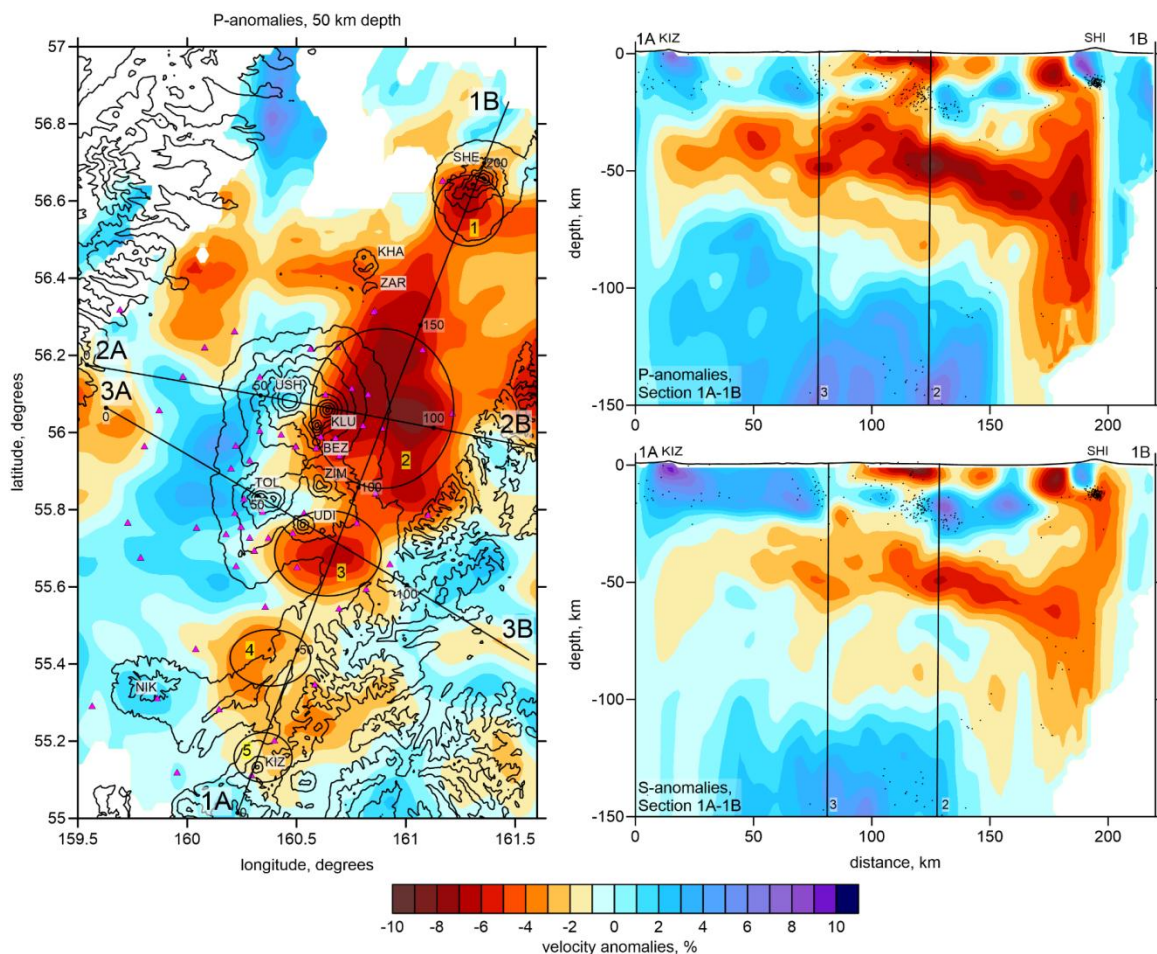
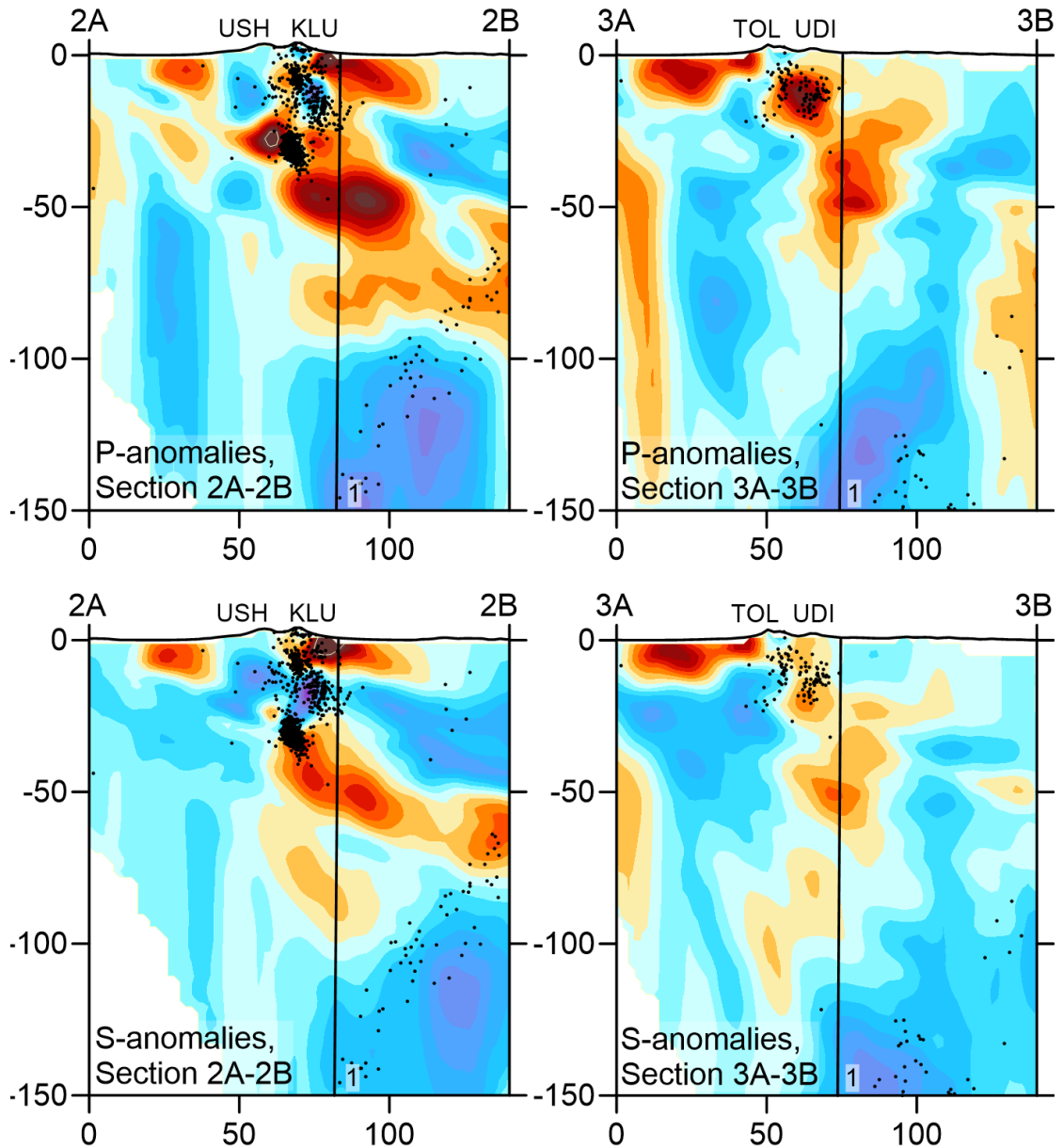


Рис.2. На левом рисунке показана структура аномалий скоростей P-волн под Ключевской группой вулканов на глубине 50 км. Справа скоростные аномалии продольных (P-волн) и поперечных (S-волн) по глубинному разрезу на профиле 1A-1B (влк. Кизимен - влк. Шивелуч). Точками отмечены гипоцентры землетрясений под вулканами и в зоне субдукции.

На поперечных разрезах по профилю 2A - 2B (рис.3) прослеживается система питания Ключевского вулкана с верхней границы субдукционной плиты. На разрезе по профилю 3A - 3B (рис.3) система питания для вулкана Толбачик также имеет связь с субдукционной плитой.

При рассмотрении аномальных структур по профилю 1А - 1В (Кизимен - Шивелуч) (рис.2) очевидно существование единого аномального тела в диапазоне глубин 30-70 км. Эта аномалия ориентирована параллельно субдукционной плите. В районе вулкана Шивелуч аномалия погружается вдоль границы исчезающего слэба до глубин в 150 км. К сожалению, данные, полученные на широкоапертурной сети сейсмических станций в районе Ключевской группы вулканов не позволяют построить скоростную модель для больших глубин с хорошим разрешением. Тем не менее, по предыдущим исследованиям при использовании данных регистрации землетрясений на мировых сейсмических сетях и



на всех

Рис.3. Структура аномалий продольных (P-волн) и поперечных (S-волн) под Ключевской группой вулканов по разрезам 2А-2В и 3А-3В из рис.2. Точками отмечены гипоцентры землетрясений под вулканами и в зоне субдукции.

сейсмических станциях Геофизической службы РАН по наблюдениям за 1955-1997 годы для зоны стыка Алеутской и Курило-Камчатской вулканических дуг была построена сейсмотомографическая скоростная модель, по которой прослеживается низкоскоростная субвертикальная аномалия до глубин в 1000 км. [6]. Этот мантийный плюм вполне может быть источником магматических расплавов, которые проникают к поверхности в зоне разрыва, вызванного окончанием погружающейся Тихоокеанской плиты. Косвенным подтверждением такого предположения является существование аномального теплового потока на морском дне в районе стыка Алеутской и Курило-Камчатской вулканических дуг [7].

Таким образом, сейсмотомографическая модель скоростной структуры под Ключевской группой вулканов, построенная по широкоапертурной сейсмической сети представляет систему магматических объёмов и питающих каналов в нижней коре и верхней мантии. Очевидно наличие мантийного источника питания под вулканом Шивелуч. Эта система питания, скорее всего, образовалась из-за исчезновения слэба на северном окончании субдуцирующей океанической плиты. Горячая астеносфера с летучими компонентами поступает вдоль границы субдуцирующей плиты и обеспечивает высокую активность Ключевской группы вулканов. На Рис.4 представлена томографическая модель построенная по региональным данным для зоны стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на глубине 150 км [8]. Явно прослеживается положение холодной погружающейся плиты и ее окончание в районе зоны стыка, где присутствует разогретая астеносфера.

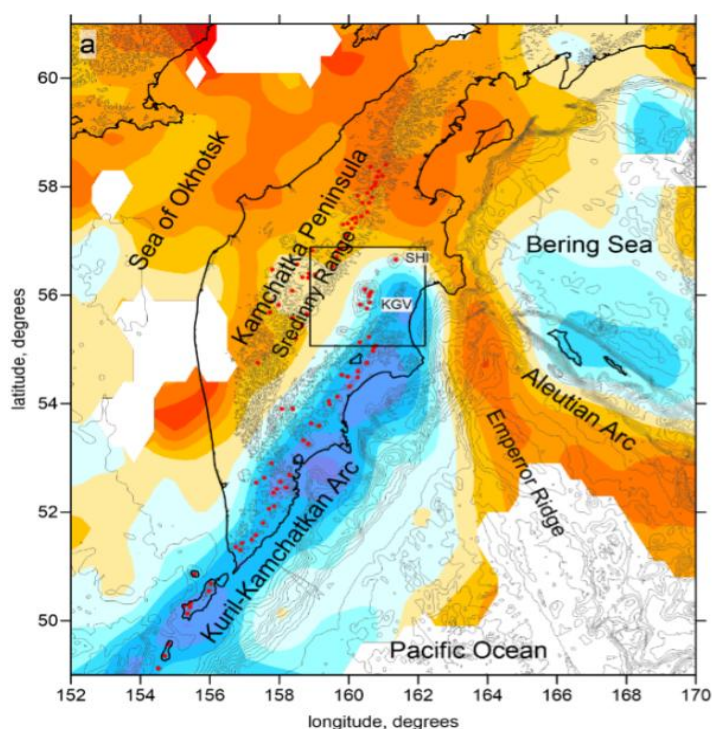


Рис.4. Структура аномалий скоростей продольных волн (P-wave) в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на горизонтальной плоскости на глубине 150 км по модели региональной томографии из работы [8].

Для вулканов Ключевской группы существует также система питания непосредственно с верхней границы погружающейся океанической плиты (см.рис.3). Генерация магматических расплавов, связанная с частичным плавлением погружающейся плиты в зонах субдукции, является общепринятой. Понижение температуры плавления океанической коры, из которой состоит погружающаяся плита на глубинах около 100 км из-за процессов дегитратации приводит к возникновению расплавов. По всей видимости, основные вулканы Восточного вулканического пояса Камчатки имеют такой механизм образования магматических расплавов. Если считать, что вулканы Ключевской группы получают магматические расплавы только из погружающейся плиты, то их продуктивность должна быть сравнима со всеми вулканами вдоль зоны субдукции. Мы провели сравнение извергнутых вулканических продуктов для всех голоценовых вулканов для Ключевской группы вулканов и для Восточного вулканического пояса Камчатки.

Таблица. Сравнение объемов вулканических построек для голоценовых вулканов Ключевской группы и Восточного вулканического пояса

Группы вулканов	Общий объем, км ³	Объем на единицу площади плиты, км ³	Соотношение
Ключевская группа вулканов	1750	32	11
Вулканы Восточного вулканического пояса	1280	2.9	1

Сравнение проводилось по объемам вулканических построек. Конечно этот метод не является совсем корректным, так как не учитываются взрывные продукты извержений, но сравнительные характеристики оценить можно. В Ключевской группе оценивались объемы для 15 вулканических построек, в Восточном вулканическом поясе для 53 построек. Так вот, продуктивность Ключевской группы вулканов в 11 раз выше, чем продуктивность всех остальных голоценовых вулканов Восточного пояса. Это можно объяснить только наличием дополнительных источников магматических расплавов.

Работа выполнена при поддержке Мегагранта № 14.W03.31.0033 Минобрнауки России.

Список литературы

1. Koulakov, I., E. I. Gordeev, N. L. Dobretsov, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38, L09305, doi:10.1029/2011GL046957.
2. Ivan Koulakov., Ekaterina Kukarina, Evgeny Gordeev et al. *Geology and Geophysics*, 2016, 57(1), 82-94, DOI: 10.1016/j.rgg.2016.01.006
3. A.I. Ivanov, I.Yu. Koulakov, M. West, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.
4. Koulakov I., I. Abkadyrov, N. Al Arifi et al. *J. Geophys.Res. Solid Earth*, 2017, 122, doi:10.1002/2017JB014082.
5. Н.М. Шапиро, Е.И. Гордеев, И.Ф. Абкадыров и др. *Вестник ДВО РАН*, 2017, №1, 75-78.
6. A. Gorbato, Y. Fukao, S. Widiyantoro and E. Gordeev. *Geophys. J. Int.*, 2001, 146, 282-288.
7. Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., *Вулканология и сейсмология*, 1980, № 1, 16-31.
8. Koulakov, I. Y., N. L. Dobretsov, N. A. Bushenkova, and A. V. Yakovlev, *Russian Geol. Geophys.*, 2011, 52, 650–667.



Информация об авторах

Гордеев Евгений Ильич, академик РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

E-mail: gordeev@kscnet.ru

тел: 89841622540

Gordeev Evgeny Ilich

Кулаков Иван Юрьевич, чл.-корр. РАН, доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г.
Новосибирск

ivan.science@gmail.com

Koulakov Ivan Yurevich

Шапиро Николай Михайлович, PhD, профессор РАН, Институт физики Земли, Париж,
Франция

nshapiroirgpr@gmail.com

Shapiro Nikolai Mikhailovich

Переписку вести с Е.И. Гордеевым

E-mail: gordeev@kscnet.ru

Тел: 89841622540