

УДК:551.2, 550.34

DOI: 10.31343/1029-7812-2026-20-2-17-28

И.Ю. Кулаков^{1,2}

1. Сколковский институт науки и технологий
(Сколтех), Москва

2. ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука,
Новосибирск

E-mail: i.kulakov@skoltech.ru

ГЛУБИННЫЕ ИСТОЧНИКИ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КАМЧАТКИ И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ: ОТ ГИПОТЕЗ АКАДЕМИКА Н.Л. ДОБРЕЦОВА К СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается развитие идей академика Н.Л. Добрецова о глубинном строении и питании вулканов в зонах субдукции на примере Курило-Камчатской дуги. На основе данных сейсмической томографии, полученных в ходе полевых экспериментов 2012–2026 гг., показано, что форма и кинематика слэба определяют доминирующие механизмы субдукции (слэб тянет под Камчаткой, плита толкает под южными Курилами). Выявлено окно между Камчатским и Алеутским сегментами Тихоокеанской плиты, через которое горячая астеносфера питает Ключевскую группу вулканов. В коре под вулканами Ключевской, Безымянный и Толбачик обнаружены три типа питающих систем. На более локальном масштабе под вулканом Безымянный зафиксированы магматический и газовый резервуары перед взрывным извержением 20.12.2017. На примере Эбеко (о. Парамушир) и Мутновского геотермального поля показаны возможности сейсмической томографии для разведки геотермальных ресурсов.

Ключевые слова: сейсмическая томография, зоны субдукции, Курило-Камчатская дуга, вулканизм, геотермальные ресурсы, Н.Л. Добрецов.

ABSTRACT

The paper discusses the development of the ideas of Academician Nikolai Dobretsov on the deep structure and magma supply of volcanoes in subduction zones, using the Kuril-Kamchatka arc as an example. Based on seismic tomography data obtained during field experiments in 2012–2026, it is

shown that the shape and kinematics of the slab determine the dominant subduction mechanisms (Pull beneath Kamchatka, Push beneath the southern Kuriles). A slab window between the Kamchatka and Aleutian segments of the Pacific plate has been identified, through which hot asthenosphere feeds the Klyuchevskoy group of volcanoes. Three types of feeding systems have been detected in the crust beneath Bezymianny, Klyuchevskoy and Tolbachik volcanoes. On a local scale, beneath Bezymianny volcano, magmatic and gas reservoirs were tomographically imaged before its explosive eruption on December 20, 2017. Using the examples of Ebeko volcano (Paramushir Island) and the Mutnovsky geothermal field, the capabilities of seismic tomography for geothermal exploration are demonstrated.

Keywords: seismic tomography, subduction zones, Kuril-Kamchatka arc, volcanism, geothermal resources, Nikolai Dobretsov.



Рис. 1. Н.Л. Добрецов в базовом лагере возле горячего лавового потока на вулкане Толбачик. 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

В 2026 году исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося геолога, петролога и академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова (рис. 1). Его научное наследие охватывает все масштабы геологических исследований – от петрологии метаморфических пород (глаукофановые сланцы, жадеиты) и металлогении отдельных месторождений до изучения офиолитов и геодинамики складчатых поясов, а в более поздний период – до глобальных проблем глубинных процессов в мантии, плюмового и субдукционного вулканизма (Добрецов, 2005; Добрецов, 2011; Добрецов, Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2001; Добрецов, Борисенко, Изох, 2010; Добрецов, Кирдяшкин,

1997). Эти сложные многокомпонентные системы, в которых сосуществуют и взаимодействуют разномасштабные механические, термические и химические процессы, требуют междисциплинарного подхода, объединяющего геофизику, петрологию, геохимию и термодинамику – что Н.Л. Добрецов неоднократно подчеркивал.

На основе анализа большого объема геолого-геофизических данных он сформулировал концепцию многоуровневой системы магматического питания вулканов в зонах субдукции (рис. 2), обосновал наличие дискретных групп вулканов за счет образования отдельных струй вещества – так называемых «пальцев» (Добрецов, Кирдяшкин, 1997; Добрецов, Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2009). Эти представления во многом определили направление дальнейших исследований, в том числе сейсмотомографических работ на Камчатке и Курильских островах, которые активно развивались при непосредственной поддержке академика.

Цель настоящей статьи – показать, как идеи Н.Л. Добрецова о глубинном питании вулканов и роли флюидов в зонах субдукции нашли подтверждение и дальнейшее развитие в сейсмических томографических исследованиях, проведенных за последние полтора десятилетия (Кулаков, 2022). В статье кратко излагаются ключевые положения научного наследия Добрецова, описывается методика и масштаб полевых экспериментов на Камчатке и Курилах (2012–2026 гг.), а затем на конкретных примерах демонстрируется, как томографические модели позволили «увидеть» глубинные струи из слэба, картировать коровые магматические и газовые резервуары и обосновать связь вулканической активности с аномальными зонами в астеносфере. Особое внимание уделяется прикладному аспекту – использованию сейсмической томографии для поиска геотермальных ресурсов, что полностью соответствует взглядам Добрецова на необходимость связи фундаментальной науки с практическими задачами.

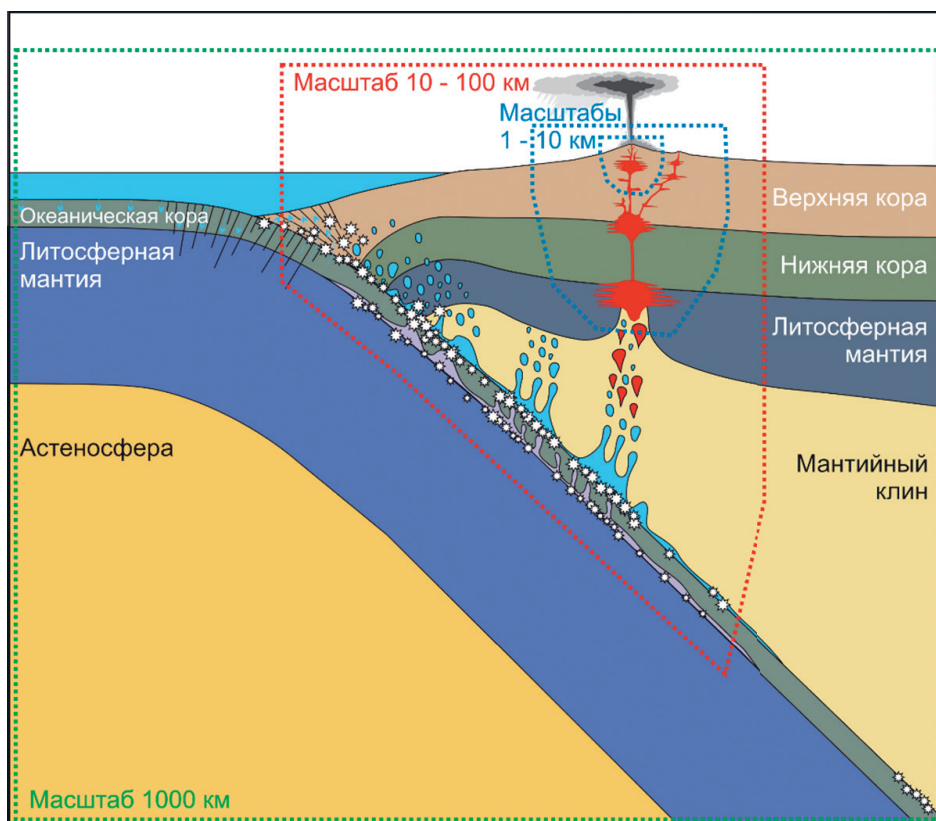


Рис. 2. Схема строения зоны субдукции и связанных с ней многоуровневых источников магматизма. Пунктирные линии различного цвета показывают области для выполнения разномасштабных сейсмотомографических исследований по различным системам наблюдений.

2. НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ Н.Л. ДОБРЕЦОВА: КЛЮЧЕВЫЕ ИДЕИ О ВУЛКАНИЗМЕ ЗОН СУБДУКЦИИ

Прежде чем перейти к сейсмическим результатам, необходимо кратко напомнить основные положения концепции Н.Л. Добрецова, касающиеся питания вулканов в зонах субдукции. Именно эти идеи служили отправной точкой для планирования томографических экспериментов и интерпретации полученных моделей (Добрецов, Кулаков, Литасов, 2015).

2.1. Многоуровневая система питания

Согласно представлениям Добрецова, формирование вулканической системы в зоне субдукции не сводится к простому вертикальному подъему расплавов из астеносферы. Это **многоуровневый процесс**, в котором можно выделить четыре главных этапа, различающихся физико-химическими условиями и механизмами переноса вещества (Добрецов, Кулаков, Литасов, 2012).

Первый, глубоинный уровень — это погружающаяся океаническая плита (слэб), которая прослеживается сейсмическими методами на глубины до 600–1000 км. Форма слэба (угол наклона, наличие разрывов и изгибов, скорость погружения) определяет геометрию всей вулканической дуги, распределение напряжений и, в конечном счете, положение вулканических центров на поверхности (Добрецов, Кулаков, Полянский, 2013). На глубинах 80–150 км происходит дегидратация слэба — высвобождение воды, содержащейся в морских осадках и гидротизированных породах океанической коры. Эта вода служит главным агентом, вызывающим плавление мантийного клина (Добрецов, Симонов, Кулаков и др., 2017).

Второй уровень — мантийный клин между слэбом и подошвой континентальной коры (глубины примерно 30–80 км). Вода, поступающая из дегидратирующего слэба, понижает температуру плавления мантийных перидотитов, вызывая их частичное плавление и зарождение первичных базальтовых магм. Здесь происходит дифференциация расплавов и флюидов, их взаимодействие с вмещающими породами, а также объединение или, напротив, разделение отдельных струй. На этом уровне формируются основные объемы магматического материала, которые затем поступают в кору.

Третий, коровый уровень (глубины 5–30 км) — зона промежуточных магматических очагов. Расплавы могут задерживаться здесь на длительное время, фракционировать, смешиваться с коровым материалом, насыщаться газами (Там же). Именно на этом уровне во многом определяется будущий химический состав лав и их взрывной потенциал.

Четвертый, приповерхностный уровень (глубины 0–5 км) — зона малоглубинных магматических очагов и их взаимодействия с гидротермальными системами. Здесь могут находиться небольшие камеры, из которых магма поступает непосредственно к кратеру, определяя характер текущих извержений. В эту же зону проникают метеорные воды (= атмосферные осадки), которые циркулируют по трещинам, нагреваются магматическим теплом и формируют гидротермальные системы. На поверхности эти процессы проявляются в виде геотермальных полей, фумарол, гейзеров, а при резком вскипании подземных вод могут происходить фреатические взрывы. Этот уровень наиболее важен для прикладных задач — поиска геотермальных ресурсов и мониторинга вулканической опасности, но одновременно и наиболее сложен для сейсмических методов из-за сильной неоднородности и высокого затухания сигнала.

2.2. «Пальцы»: дискретные струи из слэба

Одна из наиболее оригинальных гипотез Добрецова (в соавторстве с А.Г. Кирдяшкиным) состояла в том, что дегидратация слэба и связанный с ней магмо- и флюидогенез происходят не равномерно вдоль всей дуги, а локализованно, формируя **отдельные струи** — так называемые «пальцы» (fingers) (Добрецов, Кирдяшкин, 1997; Добрецов Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2009). Каждая такая струя выходит на поверхность в виде группы вулканов, что объясняет дискретный характер вулканических дуг — не сплошную линию, а отдельные кусты и центры извержений.

Моделирование показало, что положение и интенсивность этих струй определяются термомеханическими параметрами субдукции: углом наклона слэба, скоростью его погружения, температурным режимом в мантийном клине. Взаимодействие струй между собой может приводить к их слиянию или, напротив, обособлению, что сказывается на составе и продуктивности вулканов.

2.3. Механизмы субдукции: Push и Pull

На основе региональной томографии, выполненной нашей группой (Кулаков, Добрецов, Бушенкова и др., 2011), Добрецов предложил два альтернативных механизма, приводящих в движение процесс субдукции в Курило–Камчатском регионе. **Push** («толкание») связан с гравитационным воздействием со стороны срединно–океанического хребта, который, разрастаясь, «выталкивает» литосферную плиту в сторону желоба, заставляя ее погружаться под островную дугу. **Pull** («тяга») обусловлен отрицательной плавучестью холодной, плотной плиты, которая под действием силы тяжести опускается в астеносферу, увлекая за собой следующие за ней участки океанической литосферы. Томографические данные показали, что в разных сегментах Курило–Камчатской дуги могут доминировать разные механизмы, что важно для понимания энергетики всей системы.

Таким образом, к началу наших масштабных сейсмических экспериментов на Камчатке (с 2014 г.) уже существовал ряд ключевых положений, которые требовали проверки и дальнейшего развития:

- субдукция создает условия для выплавки магм за счет дегидратации слэба;
- питание вулканов осуществляется по системе дискретных струй – «пальцев»;
- внутри мантийного клина и коры происходит сложная дифференциация, определяющая стиль извержения;
- аномальные зоны (разрывы слэба, горячая астеносфера) могут радикально менять режим вулканизма.

Задача многомасштабной сейсмической томографии состояла в том, чтобы наполнить эти гипотезы конкретными образами: показать струи на томограммах, измерить скоростные аномалии и отношение V_p/V_s в реальных магматических камерах, зафиксировать разрывы в слэбе. Следующие разделы статьи как раз об этом – о том, что удалось увидеть, и как это соотносится с идеями Н.Л. Добрецова.

3. МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ И КУРИЛАХ

Для проверки гипотез Н.Л. Добрецова необходимы были методы, позволяющие «увидеть» структуру недр на разных глубинах — от сотен километров в мантии до первых километров в приповерхностной зоне (рис. 2). Таким методом стала сейсмическая томография.

Томографические модели строятся на основе измерений времен пробега продольных (P) и поперечных (S) волн от землетрясений (Koulakov, 2009). Отклонения скоростей от фоновых значений (V_p и V_s) позволяют выявлять зоны аномального состава, температуры или флюидонасыщения. Особое значение имеет отношение V_p/V_s : его повышение (до 1,9–2,0) указывает на наличие частичного расплава или водных флюидов, а понижение (до 1,5–1,6) – на присутствие свободного газа. Дополнительную информацию дает шумовая томография, использующая не землетрясения, а микросейсмический фон (океанические волны, техногенные вибрации), что особенно эффективно для изучения верхних 5–10 км коры (Koulakov, Maksotova, Jaxybulatov et al., 2016).

Постоянные сейсмические станции Камчатского филиала Геофизической службы образуют надежную основу, но их плотность недостаточна для детального картирования локальных структур (магматических очагов, каналов питания, зон флюидной насыщенности). Для этого необходимы временные сети с шагом станций 5–15 км, устанавливаемые непосредственно над изучаемым объектом на один–два полевых сезона. На Камчатке и Курилах это сопряжено с огромными логистическими трудностями — от заброски тяжелого оборудования вертолетами до работы в условиях сложного рельефа и неустойчивой погоды.

Начиная с 2012 года, нашей группой (часто в сотрудничестве с российскими и международными партнерами) был развернут целый ряд временных сетей, охвативших практически все значимые вулканические центры Камчатки и северных Курил (Кулаков, 2022). Ключевые эксперименты включали:

- **2014–2015:** Толбачик (19 станций) — исследование после трещинного извержения 2012–2013 гг., в которых лично участвовал Н.Л. Добрецов.

- **2015–2016:** Международная сеть KISS (более 100 станций) — Северная группа вулканов (Ключевской, Шивелуч, Кизимен).
- **2017–2018:** Безымянный (10 станций) — работы, позволившие зафиксировать состояние вулкана непосредственно перед мощным взрывным извержением 20.12.2017.
- **2021–2022:** Остров Парамушир, вулкан Эбеко (21 станция) — первый крупный курильский эксперимент.
- **2023–2024:** Мутновское геотермальное поле (более 50 станций) — совместно с группой «Зарубежнефть» для целей геотермальной разведки.
- **2024–2025:** Остров Кунашир (20 станций).

Объединенный массив данных включает записи нескольких тысяч локальных землетрясений, десятки тысяч вступлений Р и S волн, а также непрерывные записи для шумовой томографии.

Николай Леонтьевич не просто вдохновлял эти работы, но и активно участвовал в их планировании и проведении. Он настоял на включении Толбачика в программу исследований после извержения 2012–2013 гг., привлекал международных партнеров, а в возрасте 80 лет выезжал в поле — на Ичинский вулкан (Срединный хребет) и на Толбачинский дол, где собирал образцы свежих лавовых потоков. Его умение формулировать задачи на стыке дисциплин и видеть в томографических аномалиях геологический смысл во многом определило успех интерпретации полученных моделей.

4.1. Глубинные источники: струи из слэба, разрывы и астеносферные потоки

Первый и второй уровни модели Добрецова (слэб и мантийный клин) — наиболее труднодоступны для прямых наблюдений, но именно там закладываются основные параметры вулканической системы: сколько магмы поступает, из каких глубин, с каким составом.

4.1.1. Форма слэба под Курило–Камчатской дугой

Региональная сейсмическая томография (Кулаков, Добрецов, Бушенкова и др., 2011) позволила впервые построить детальную трехмерную модель погружающейся Тихоокеанской плиты под всей Курило–Камчатской дугой на глубинах до 700 км (рис. 3). Модель показала, что слэб прослеживается как устойчивая высокоскоростная аномалия, но его форма и толщина закономерно меняются вдоль дуги. Под Камчаткой слэб утоняется и погружается более круто, что свидетельствует о большей скорости его движения по сравнению с океанической плитой, — это указывает на доминирование механизма **Pull**, когда холодная плотная плита «тонет» в астеносфере под действием силы тяжести. Под южными Курилами, напротив, толщина слэба удваивается, а угол погружения становится более пологим, что может быть признаком преобладания механизма **Push**, когда разрастающийся срединно-океанический хребет выталкивает литосферную плиту в сторону желоба. Таким образом, в разных сегментах Курило–Камчатской дуги могут доминировать разные механизмы субдукции, что важно для понимания энергетики всей системы.

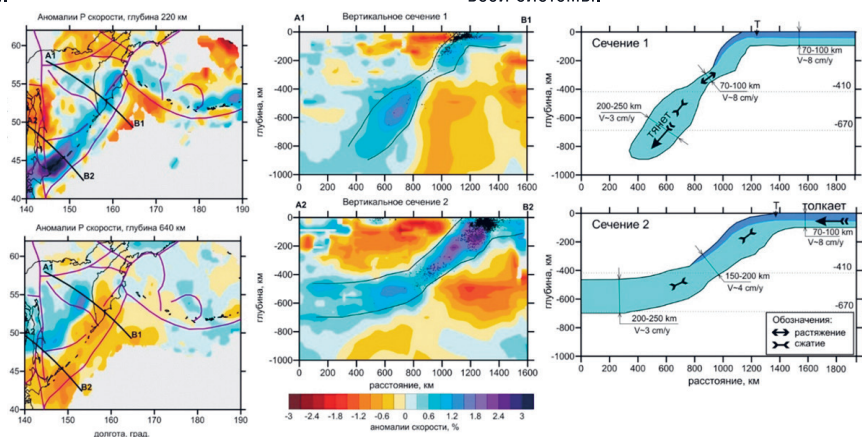


Рис. 3. Результаты региональной томографии для Курило–Камчатской области и их интерпретация. А, Б — аномалии скорости Р-волн на горизонтальных (А) и вертикальных (Б) сечениях соответственно; В — схематическое изображение слэба на двух вертикальных сечениях, В — даны примерные оценки толщины слэба и его скорости в указанном сечении. Стрелка с буквой Т обозначает положение желоба (Кулаков, Добрецов, Бушенкова и др., 2011).

Кроме того, региональная томография выявила окно между Камчатским и Алеутским сегментами Тихоокеанской плиты – зону, где высокоскоростная аномалия слэба отсутствует. Вулкан Шивелуч расположен на краю этого окна, что, как будет показано ниже, определяет его аномальную активность и играет ключевую роль в питании всей Ключевской группы вулканов.

4.1.2. Единый источник Ключевской группы: окно в слэбе под Шивелучем

Ключевская группа вулканов (КГВ) – уникальный объект, где на небольшом расстоянии соседствуют несколько активно действующих вулканов с разными

стилями извержений и составами лав. Сеть KISS (2015–2016, Shapiro, Sens-Schönfelder, Lühr et al., 2017), объединенная с данными Толбачинской сети (2014–2015) и постоянными станциями, позволила построить томографические модели с беспрецедентным разрешением (Koulakov, Shapiro et al., 2020).

Результаты показали, что через выявленное окно между Камчатским и Алеутским сегментами слэба в мантийный клин проникает аномально горячая астеносфера из-под плиты. Именно она, взаимодействуя с флюидами, выделяющимися при дегидратации краев окна, создает избыточный тепловой и флюидный поток, который питает всю Ключевскую группу.

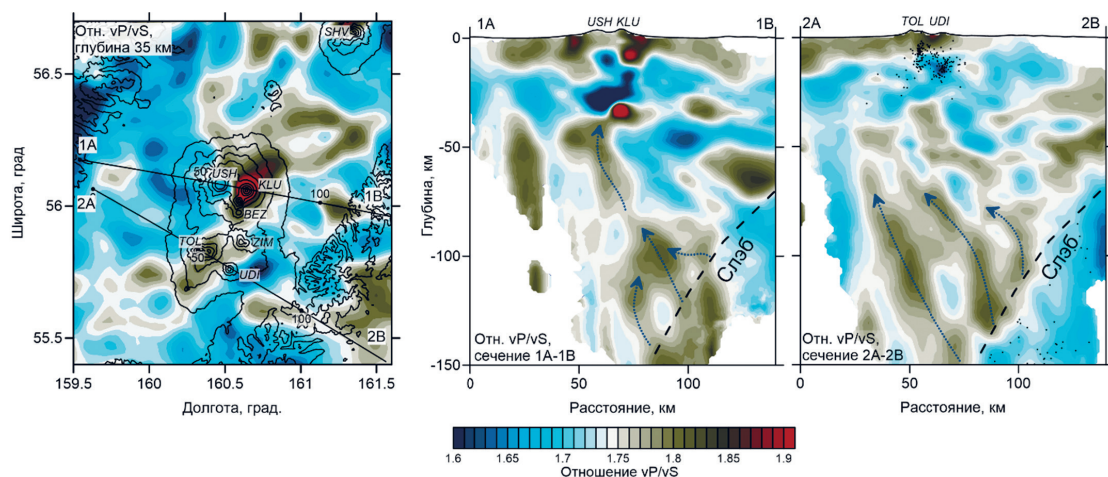


Рис. 4. Распределение отношения V_p/V_s из работы (Koulakov, Shapiro et al., 2020) на глубине 35 км и двух вертикальных сечениях. Точки на профилях показывают проекции гипоцентров землетрясений. Стрелки указывают на возможные пути миграции глубинных флюидов в мантийном клине.

На глубинах 100, 120 и 150 км, в зоне контакта слэба с мантийным клином, были выделены три отдельные зоны повышенного отношения V_p/V_s (рис. 4), которые маркируют этапы дегидратации слэба по мере его погружения, что согласуется с оценками, полученными на основании данных петрологии. Под вулканом Ключевской (Сечение 1А–1В на рис. 4) все три зоны объединяются в единую крупную аномалию на подошве коры (глубина около 30–40 км), формируя общий мантийный очаг. Под Толбачиком (Сечение 2А–2В на рис. 4), напротив, струи не объединяются; они подходят к подошве коры раздельно, и материал, по-видимому, мигрирует вдоль границы кора–мантия от Ключевского к Толбачику. Такое различие объясняет, почему соседние вулканы при общем глубинном источнике демонстрируют разные составы лав и стили извержений.

4.2. Коровые процессы: от «трубы» до газового резервуара

Третий и четвертый уровни модели Добрецова (кора и приповерхностная зона) определяют, каким именно магматический материал выйдет на поверхность – спокойно или взрывно, в виде жидких лав или пепловых колонн. Здесь, на глубинах от 0 до 30–40 км, происходит окончательная дифференциация расплавов, их взаимодействие с вмещающими породами и насыщение газами. Томографические исследования позволили заглянуть в этот «черный ящик» и увидеть, как устроены коровые магматические системы под разными вулканами.

4.2.1. Три типа питающих систем под вулканами Ключевской группы

Локальная томография под тремя соседними вулканами КГВ (Koulakov, Abkadyrov, Al Arifi et al., 2017) – Ключевским, Безымянным и Толбачиком (рис. 5) – выявила принципиально разные коровые структуры, несмотря на их близкое расположение (расстояния между вулканами составляют всего 20–40 км).

Под Ключевским (КЛЮ) была обнаружена почти вертикальная «труба», прослеживающаяся по распределению сейсмичности от подошвы коры (глубины около 30 км) практически до поверхности. Это указывает на быстрый подъем базальтовых расплавов без существенных промежуточных остановок. Именно этим объясняется высокая продуктивность Ключевского – он «прокачивает» огромные объемы магмы из мантийного очага прямо к кратеру.

Под Безымянным (БЕЗ) картина иная. На глубинах 10–20 км выявлена крупная зона пониженных скоростей, интерпретированная как область частичного плавления. В отличие от Ключевского, расплавы задерживаются здесь на длительное время, фракционируются и насыщаются газами, что и обуславливает взрывной характер извержений Безымянного.

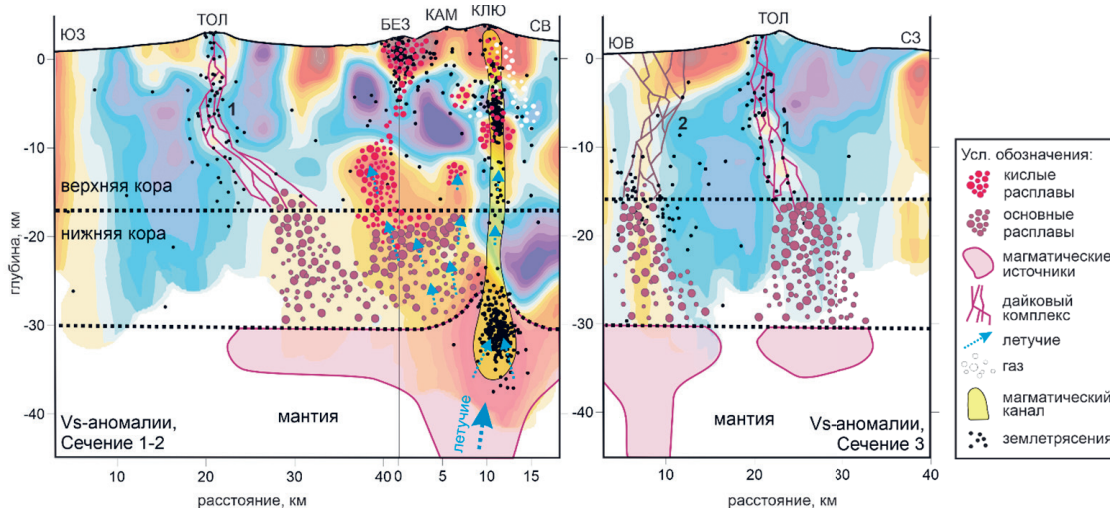


Рис. 5. Интерпретация сейсмической модели на вертикальных сечениях вкост вулканов Толбачик, Безымянный и Ключевской. На фоне показано распределение аномалий скорости S-волн. Черными точками обозначены землетрясения.

Под Толбачиком (ТОЛ) томография показала не единый очаг, а серию вертикальных зон пониженных скоростей, которые интерпретируются как дайки — система трещин, по которым базальты поднимаются из мантии к поверхности. Эти дайки пространственно приурочены к зонам региональных разломов, что объясняет «рассредоточенный» характер питания Толбачика и его склонность к трещинным извержениям.

Этот результат важен тем, что он показывает: один и тот же мантийный источник может реализовываться в принципиально разных коровых системах в зависимости от локальной тектоники и состава коры

— что полностью соответствует идее Добрецова о многоуровневости.

4.2.2. Безымянный перед взрывом 20.12.2017: магматический и газовый резервуары

Особого внимания заслуживает история вулкана Безымянный, которая стала примером того, как томография может фиксировать состояние вулкана непосредственно перед извержением. Временная сеть из 10 станций была установлена вокруг Безымянного в 2017 году. 20 декабря 2017 года произошло мощное эксплозивное извержение: столб пепла за 13 минут достиг высоты 15 км.

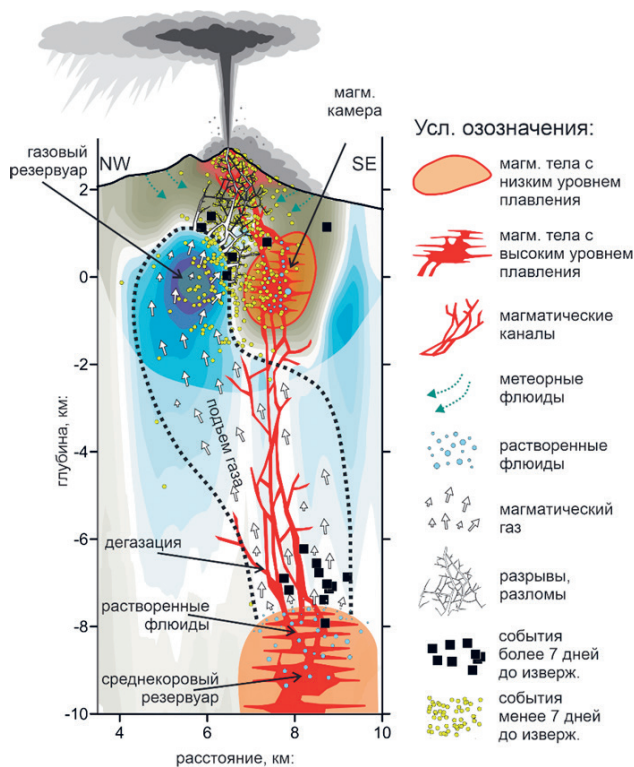


Рис. 6. Схематическое изображение сценария подготовки взрывного извержения влк. Безымянный 20 декабря 2017 г. по результатам томографии из работы (Koulakov, Plechov, Mania et al., 2021).

Томографическая модель (Koulakov, Plechov, Mania et al., 2021), построенная по данным, записанным до извержения, выявила три резко различающиеся аномалии (рис. 6). На малых глубинах (0–5 км) зафиксировано повышенное отношение V_p/V_s , связанное с насыщением метеорными водами верхней части вулканического конуса. На глубине около 2 км от поверхности (справа на рис. 6) расположена зона с высокой скоростью P , низкой скоростью S и очень высоким V_p/V_s (более 1,9), которая интерпретируется как магматический резервуар с частичным плавлением. На такой же глубине, но в левой части профиля выделяется область с низкой скоростью P , высокой скоростью S и очень низким V_p/V_s (менее 1,6), маркирующая газовой резервуар, скопление свободного газа (в основном H_2O , CO_2 , SO_2), отделившегося от магмы.

На основе этих данных, а также анализа деформаций поверхности, видео-наблюдений и петрологических исследований образцов, была предложена следующая динамическая картина. В средней коре (глубины 10–15 км) существует резервуар, в котором постепенно накапливаются флюиды.

Примерно за 40 дней до извержения произошел выброс флюидов из этого среднекорового резервуара и их миграция вверх. В приповерхностных горизонтах (глубины 0–5 км) формируется малоглубинный газовой резервуар, который отчетливо прослеживается на томограммах как аномалия с низким отношением V_p/V_s . Постепенное накопление газа в этом резервуаре приводит к достижению критического давления. Когда давление превышает прочность перекрывающих пород, происходит вскрытие газового резервуара, и расширяющийся газ разрушает окружающие породы, выбрасывая их в атмосферу. Сама магма при этом извержении не мигрировала – взрыв был обусловлен исключительно высвобождением накопленного газа.

Этот результат важен не только как удачный пример комплексного мониторинга. Он показывает, что разделение флюидной и магматической фаз – не абстрактная модель, а реальность, которую можно измерить с помощью сейсмической томографии. Именно это различие всегда подчеркивал Н.Л. Добрецов: флюиды могут опережать расплавы, создавая условия для взрывов.

4.3. Геотермальные системы: от фундаментальной науки к практике

Четвертый, приповерхностный уровень модели Н.Л. Добрецова – это зона непосредственного взаимодействия магматического тепла с гидротермальными системами. Именно здесь формируются геотермальные ресурсы, которые могут быть использованы для производства тепла и электроэнергии. Камчатка и Курильские острова обладают огромным геотермальным потенциалом, но его разведка традиционными методами (бурение) дорога и часто неэффективна без предварительного геофизического обоснования. Сейсмическая томография, особенно шумовая, позволяет картировать зоны повышенной трещиноватости и флюидонасыщения на глубинах до нескольких километров, что делает ее мощным инструментом для поиска геотермальных полей.

4.3.1. Вулкан Эбеко (о. Парамушир): газовый режим и глубокий очаг

Остров Парамушир (северные Курилы) обладает значительным геотермальным потенциалом. Город Северо-Курильск расположен всего в 7 км от кратера активно действующего вулкана Эбеко – потенциального источника пара и тепла. Однако до сих пор город обеспечивается электроэнергией исключительно за счет традиционных дизельных источников. В 1990-х годах предпринимались попытки разведки геотермальных ресурсов: была пробурена скважина глубиной 2,4 км, которая, однако, оказалась сухой и бесперспективной. С целью выяснения причин и картирования глубинных источников тепла в 2021–2022 гг. была развернута временная сеть из 21 сейсмической станции вокруг вулкана Эбеко (Koulakov, Komzeleva, Medved et al., 2024).

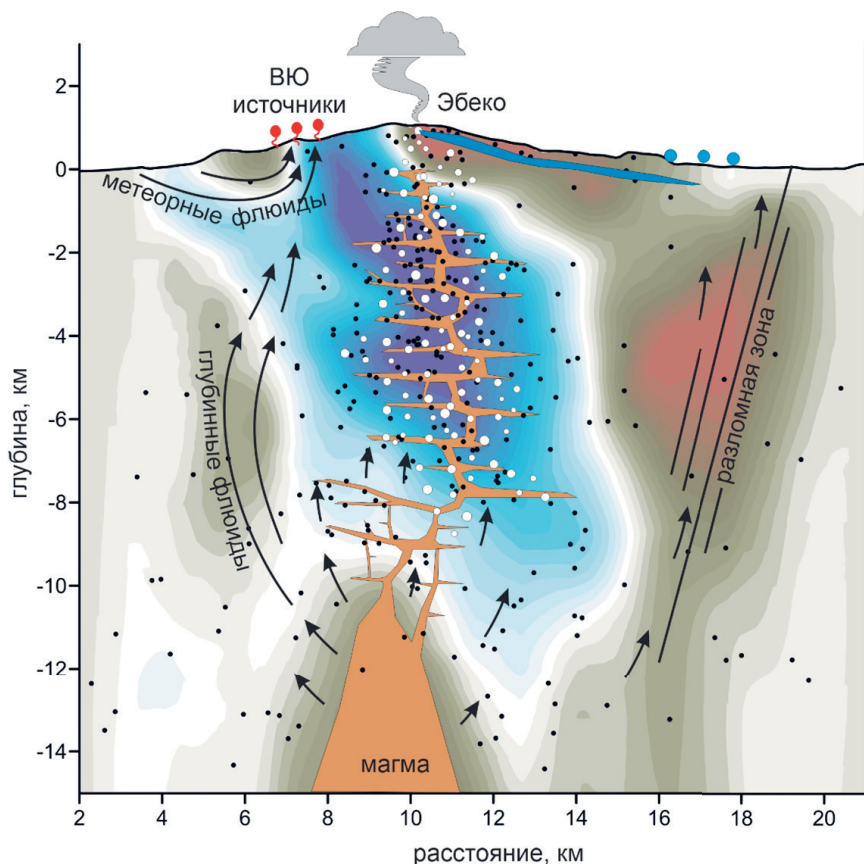


Рис. 7. Схематическая интерпретация распределения отношения V_p/V_s на вертикальном сечении через вулкан Эбеко на о. Парамушир. Черными точками показаны проекции землетрясений. Черными стрелками схематически обозначены потоки флюидов. Коричневым показано предполагаемое положение магматических источников и силлового комплекса. Сплошными линиями под восточным склоном обозначено возможное положение зоны разлома. Белыми кружками показаны зоны дегазации под вулканом Эбеко.
ВЮ – Верхне-Юрьевские горячие источники.

Результат томографии с использованием объемных волн от локальных землетрясений показан на рис. 7. На основании полученной модели можно заключить, что под Эбеко отсутствуют крупные высокотемпературные резервуары вблизи поверхности (Koulakov, Komzeleva, Medved et al., 2024). Магматический очаг расположен на глубине около 10 км – значительно глубже, чем, например, под вулканом Горелый на Камчатке (Kuznetsov, Koulakov, Jakovlev et al., 2017). В верхней части разреза (глубины 0–3 км) выявлены зоны пониженного отношения V_p/V_s , интерпретированные как области, насыщенные свободным газом. Это согласуется с частыми фреатическими извержениями и интенсивной фумарольной активностью Эбеко.

Одновременно была выполнена шумовая томография, которая, благодаря использованию поверхностных волн, обеспечивает более высокое вертикальное разрешение в верхней коре (Belovezhets, Berezhnev, Koulakov et al., 2023). Эта модель показала, что вулканический хребт Вернадского, на котором расположен Эбеко, перекрыт сверху высокоскоростным жестким чехлом, сложенным гранито–гранодиоритовыми породами и застывшими магматическими интрузиями. Ниже, на глубинах 4–6 км, под этим чехлом выявлены зоны пониженных скоростей, интерпретированные как магматические резервуары, питающие голоценовые извержения вдоль всего хребта. Кроме того, на восточном склоне Эбеко на глубине около 1 км обнаружен тонкий слой с пониженными скоростями, который интерпретируется как водонасыщенный горизонт. Контакт этого горизонта с горячими магматическими интрузиями приводит к образованию большого количества пара, который выбрасывается во время частых фреатических извержений Эбеко и многочисленных фумарол в вершинной области.

4.3.2. Мутновское геотермальное поле (Камчатка): картирование магматического тела

Мутновский район – крупнейший центр геотермальной энергетики на Камчатке (наряду с Паужетской ГеоЭС, работающей с 1966 года). Верхне–Мутновская ГеоЭС (12 МВт) и Мутновская ГеоЭС (50 МВт) эксплуатируются с 1999–2001 гг. В рамках стратегии по увеличению доли геотермальной энергетики в регионе в 2023–2024 гг. была развернута сеть из более чем 50 станций в районе вулканов Мутновский, Горелый и Вилучинский (совместно с группой «Зарубежнефть»). Основным методом стала шумовая томография, позволяющая изучать верхние 5–10 км коры с высоким разрешением (Belovezhets, Berezhnev, Abramnikov et al., 2026).

Результат шумовой томографии, представленный на рис. 8, показал наличие двух ключевых аномалий. На глубине 4–6 км от поверхности выявлена отчетливая низкоскоростная аномалия под Мутновским полем, интерпретированная как магматическое тело, служащее источником тепла для гидротермальной системы. Выше, на глубине около 1 км от поверхности, обнаружен слой с пониженными скоростями, отражающий зону, насыщенную флюидами, – именно этот горизонт питает существующие геотермальные скважины. Положение этих аномалий коррелирует с зонами современной геотермальной разгрузки – фумарольными полями и горячими источниками (Донное, Северо–Мутновское, Дачные и др.). Проекция продуктивных геотермальных скважин попадают в контур флюидного горизонта, а независимые температурные данные (Kiryukhin, Polyakov, Usacheva et al., 2018) подтверждают наличие аномально высоких тепловых потоков в этой зоне.

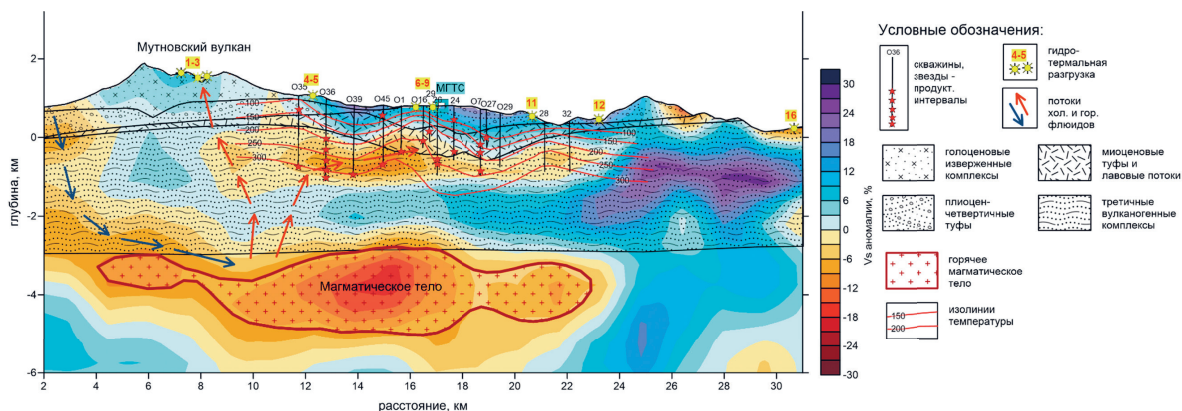


Рис. 8. Распределение скорости S -волн на вертикальном сечении, совмещенное с геологической моделью и проекциями скважин по данным Кирюхина и др. (2018). Звездами показаны интервалы забора теплоносителя в скважинах. Распределение температур оценено по данным Кирюхина и др. (2018) на основе измерений в скважинах. Положение магматического тела восстановлено по скоростной модели настоящего исследования.

Желтыми символами обозначены места гидротермальной разгрузки (фумаролы и горячие источники): (1) Активный кратер Мутновского вулкана; (2, 3) Донное и Верхнее фумарольные поля; (4, 5) Северо–Мутновские поля; (6) Новое поле (2003 г.); (7) Дачные источники; (8) Радоновые источники; (9) Медвежьи источники; (11) Пиратовские горячие источники; (12) Верхне–Жировские источники; (16) Вилучинские источники.

Эти работы – пример того, как фундаментальные сейсмические исследования могут непосредственно поддерживать практические задачи геотермальной разведки, что полностью соответствует взглядам Н.Л. Добрецова на необходимость связи науки с реальным сектором экономики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные за последние полтора десятилетия сейсмотомографические исследования на Камчатке и Курильских островах убедительно подтвердили и развили ключевые идеи Н.Л. Добрецова о многоуровневом строении вулканических систем в зонах субдукции.

На глубинном уровне (слэб и мантийный клин) томография показала существование окна между Камчатским и Алеутским сегментами Тихоокеанской плиты, через которое горячая астеносфера питает Ключевскую группу вулканов, и выявила различия в поведении флюидных струй под разными вулканами. На коровом уровне томография выявила три типа питающих систем под соседними вулканами Ключевской группы: прямую «трубу» под Ключевским, промежуточный очаг под Безымянным и систему даек под Толбачиком. Отдельное исследование верхней коры, посвященное Безымянному, позволило получить прямое томографическое свидетельство существования малоглубинных магматического и газового резервуаров перед его взрывным извержением 20.12.2017. На приповерхностном уровне работы на Эбеко и Мутновском

поле продемонстрировали возможности сейсмической томографии как эффективного инструмента для геотермальной разведки, что полностью соответствует взглядам Добрецова на необходимость связи фундаментальной науки с практическими задачами.

Важно подчеркнуть, что все эти результаты стали возможны благодаря развертыванию плотных временных сетей сейсмических станций, которые позволили получить томографические модели с беспрецедентным разрешением. Организация этих экспериментов и интерпретация полученных данных проводились при непосредственном участии и поддержке Н.Л. Добрецова, который до последних лет сохранял живой интерес к полевым работам и глубокое понимание того, как геофизические измерения должны быть связаны с петрологическими и геохимическими данными.

Развитие сейсмической томографии на Камчатке и Курилах продолжается. В ближайшие годы планируется обработка данных новых сетей (Кунашир, Авачинский вулкан), а также интеграция всех накопленных материалов в единую региональную модель. Это позволит не только уточнить представления о глубинном строении дуги, но и дать практические рекомендации для поиска новых геотермальных месторождений — в духе того научного наследия, которое оставил нам Николай Леонтьевич Добрецов.

Настоящая работа поддержана грантом Российского научного фонда № 26–17–00179.

ЛИТЕРАТУРА

- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Моделирование процессов субдукции // *Геология и геофизика*. 1997. Т. 38. № 5. С. 846-856.
- Добрецов Н.Л. Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): сибирские и эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды // *Геология и геофизика*. 2005. Т. 46. № 9. С. 870-890.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН; филиал «Гео», 2001. 409 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Геодинамическая и тепловая модели зоны субдукции // *Физическая мезомеханика*. 2009. Т. 12. № 1. С. 5-16.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно-и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159-1187.
- Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011. 488. [3] с.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 12. С. 1633-1661.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О. П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 4. С. 469-499.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д., Кукарина Е.В. Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмотомографии для комплексной оценки субдукционных процессов // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 1-2. С. 21-55.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 5. С. 701-722.
- 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.
- Кулаков И.Ю. Сейсмическая томография вулканов Камчатки // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 11. С. 1455-1499. DOI: 10.15372/GIG2021151.
- Belovezhets N., Berezhnev Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abramnikov S., Smirnov S.Z. and Abkadyrov I. Magma and hydrothermal sources below the northern part of Paramushir Island (Kuril Arc) inferred from ambient noise tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. Vol. 443. 107931. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107931>
- Belovezhets N., Berezhnev Y., Abramnikov S., Abkadyrov I., Dergach P., Khmarin E., Chebrov D., and Koulakov I. Crustal sources of geothermal and magmatic activity in the area of Mutnovsky-Gorely Volcanic Complex (Kamchatka) inferred from ambient noise tomography // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2026. T. 131. e2025JB032025. DOI: 10.1029/2025JB032025.
- Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2018. Vol. 356. P. 36-55.
- Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. Vol. 99. No. 1. P. 194-214. DOI:10.1785/0120080013.
- Koulakov I., Maksotova G., Jaxybulatov K., Kasatkina E., Shapiro N., Luehr B.-G., El Khrepy S., and Al-Arifi N. Structure of magma reservoirs beneath Merapi and surrounding volcanic centers of Central Java modeled from ambient noise tomography // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2016. Vol. 17. N 10. P. 4195-4211. DOI: 10.1002/2016GC006442.
- Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Drozhina S., Gordeev E. I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R. I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezmyanny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // *Journal Geophysical Research: Solid Earth*. 2017. Vol. 122. DOI:10.1002/2017JB014082.
- Koulakov I., Shapiro N., Sens-Schönfelder C., Gordeev E.I., Jakovlev A.V., Abkadyrov I., Chebrov D., Bushenkova N., Drozhina S., Senyukov S., Novgorodova A., Stupina T. Mantle sources of magmatic activity in the Northern group of volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // *Journal Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. Vol. 125. N 10. DOI:10.1029/2020JB020097.
- Koulakov I., Plechov P.Yu., Mania R., Walter T.R., Smirnov S.Z., Abkadyrov I., Jakovlev A., Davydova V., Senyukov S.L., Bushenkova N.A., Novgorodova A.M., Stupina T.A., Drozhina S. Ya. Anatomy of the Bezmyanny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017 // *Sci. Rep*. 2021. Vol. 11. N 1. P. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81498-9>.
- Koulakov I., Komzeleva V., Medved I., Stupina T., and Novgorodova A. Seismic structure beneath Ebeko Volcano and surrounding areas of Paramushir Island (Kuril Arc) inferred from local earthquake tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2024. Vol. 455. 108201. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108201>.
- Kuznetsov P.Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abkadyrov I., Deev E., Gordeev E.I., Senyukov S., El Khrepy S., Al Arifi N. Structure of volatile conduits beneath Gorely Volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. N 111 :0.3390/geosciences7040111.
- Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko I., Saltykov V.A. Understanding Kamchatka's extraordinary volcano cluster // *EOS*. 2017. Vol. 98. N 7. P. 12-17. <https://doi.org/10.1029/2017EO071351>.