

**ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И КЛЮЧЕВЫЕ ПРИМЕРЫ
В ОБЛАСТИ ГЕОДИНАМИКИ, ПЕТРОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ**

Н.Л. Добрецов^{1,2}, А.В. Соболев^{3,4}, Н.В. Соболев^{5,2}, С.В. Соболев⁶, Ж.Л.Р. Туре⁷

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

⁴Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Université Grenoble Alpes-CNRS, Maison des Géosciences, 1381 rue de la Piscine, BP 53,
38041 Grenoble Cedex 9, France

⁵Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

⁶Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

⁷121, Rue de la Réunion, 75020 Paris, France

Тематический спецвыпуск журнала «Геология и геофизика» посвящен памяти академика Владимира Степановича Соболева и использованию его идей в современных работах. Эти работы можно сгруппировать в два раздела, названных в заголовке статьи. Кроме 12 статей, помещенных в спецвыпуск, еще одна статья [Гийо и др., 2019] опубликована раньше в этом же журнале, и она тоже будет упомянута в нашем обзоре.

Общие проблемы в области геодинамики и петрологии обсуждаются в шести статьях. Они открываются статьей *Н.Л. Добрецова* «Взаимодействие тектоники плит и тектоники плюмов: вероятные модели и важнейшие примеры». В этой обзорной статье рассмотрены особенности взаимодействия плит и тектоники плюмов, включая проблемы, рассмотренные и обсужденные на Международном симпозиуме по мантийным плюмам в сентябре 2019 г. в Томске (сопредседатели Р. Эрнст, В.В. Ярмолюк, Н.Л. Добрецов).

В начале статьи приведены сейсмотомографические данные по слою D_2 [Добрецов, 2020 и ссылки в ней], показывающие, какие из плюмов, проявленных на поверхности, имеют ясно различимые корни на границе мантия—ядро. Эти 20 мантийных плюмов, объединенных в тип 1 «первичные и ясно различимые плюмы», концентрируются в двух полях с отрицательными значениями ($\delta v_s/v_s$ [French, Romanovich, 2015]). Первое поле может быть названо Африканским, как впервые было обозначено в работах [Зоненштайн, Кузьмин, 1983, 1993] или Tuzo в работе [Torsvik, Cocks, 2017]. Оно включает Исландский плюм на севере; Афар, Танзания, Канарский и Зеленого Мыса в Африке; через Африку протягивается к плюму Кергулен в Индийском океане. Другое поле — Тихоокеанское (или Jason в работе [Torsvik, Cocks, 2017] располагается в центральной и юго-западной частях Тихого океана и включает Гавайский плюм на севере и Питкарм, Самоа, Гаити, Мак-Дональд, Марквесс южнее. В этих полях видны также кольцевые структуры, отражающие конвективную структуру в слое D_2 .

Другие плюмы, часто трактуемые как нижнемантийные, находятся вблизи срединно-океанических хребтов и потеряли частично (Галапагос, Тристан, Св. Елены) или полностью (Буве, Крозет) связи с нижней мантией, возможно по причине их интенсивного смешивания с поднимающейся астеносферной струей. Другая возможная причина — трансформация части нижнемантийных плюмов на границе верхняя—нижняя мантия или на нижней границе астеносферы. Одна из задач дальнейших исследований — выяснить, где и как это происходит, в том числе при вероятной модификации (смещении) карбонатитовых расплавов, поднимающихся из нижней мантии.

Приведены также другие признаки связи мантийных плюмов с границей — ядро—мантия—высокое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$, максимальное в Гавайском, Исландском, Реюньонском плюмах (см. рис. 3 в статье [Добрецов, 2020]), высокое содержание платиноидов и изотопов O_s [Hansky et al., 2004; Изох и др., 2016], отрицательная корреляция интенсивности мантийных плюмов с числом инверсий магнитно-

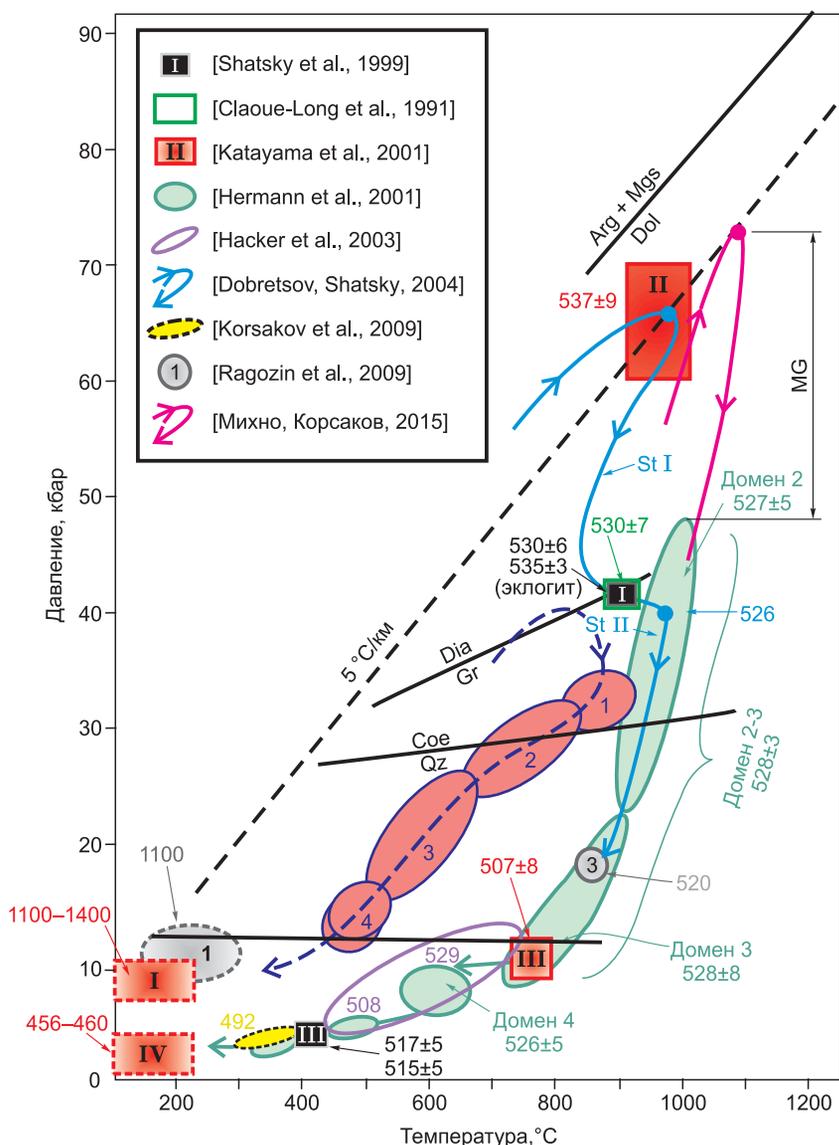


Рис. 1. Сопоставление *PT*-кривых, характеризующих эксгумацию магматических пород из Кочетавской палеозоны субдукции по данным работ [Dobretsov, Shatsky, 2004; Schertl, Sobolev, 2013; Добрецов и др., 2015; Михно, Корсаков, 2015], и сравнение с этапами метаморфизма в максютовском комплексе — красные овалы 1—4.

Источник данных: [Соболев и др., 2015] с дополнениями.

го поля Земли [Larson, Olsen, 1991; Добрецов, Кирдяшкин, 1994; Добрецов и др., 2001]. Проблема корреляции с числом инверсий имеет важное значение для понимания природы магнитного поля и роли плюмов в ускорении движения литосферных плит. В период максимального объема плюмового магматизма (около или более 1 млн км³ мантийных излияний за 1 млн лет) скорость движения плит возрастает от 2—4 до 20—25 см/год. Эти же периоды по 20—40 млн лет длительностью (84—124 млн лет; 263—233 млн лет) означают неперегретость ядра, спокойную конвекцию в жидком ядре, спокойный безынверсионный режим активности магнитного поля. По последним данным [Vazhenov et al., 2016; Левашова и др., 2020] выделяются еще два режима активности магнитного поля: с редкими инверсиями 1—4 за 1 млн лет (последние 5—15 млн лет) до 6 инверсий за 1 млн лет и периоды гиперактивности с числом инверсии 10—16 за 1 млн лет, установленные в позднем и раннем кембрии.

В статье представлено краткое содержание авторской модели образования нижнемантийных плюмов, развиваемой в работах [Добрецов, Кирдяшкин, 1994; Добрецов и др., 2001; Добрецов, 2011]. Показаны три этапа развития плюмовой активности и зависимость размера плюмовой изверженной актив-

ности от мощности плюмов (до 12—20 млн км² при мощности плюма 1.2—1.5 10⁹ кВт как для сибирских траппов), вытекающие из той части модели [Добрецов и др., 2001], которая связана с формированием грибообразной головки плюма. Показано соответствие полученной модели фактическим данным по Гавайскому плюму, сибирским траппам и другим ключевым объектам. На примере северо-западной части Тихого океана и прилегающей части Арктики сделана попытка сопоставить интенсивность плюмов и скорость движения Тихоокеанских плит за последние 150 млн лет. Отмечается, что корреляции, полученные в этом и других разделах статьи, являются только первым приближением, так как не приведена корреляция в масштабе всей Земли, не построены модели разогрева астеносферы и ускорения движения плит за счет растворения части горячих плюмов в астеносфере.

В заключительной части статьи рассмотрены крупнейшие провинции плюмовых мантийных магм на континентах, в том числе Сибирская трапповая провинция и связанные с ней месторождения [Соболев, 1936; Борисенко и др., 2006; Добрецов и др., 2010]. По мнению А.Н. Заварицкого, одного из учителей В.С. Соболева по Горному институту, изложенному в качестве краткого предисловия к его книге [Соболев, 1936], опубликованной, когда ее автору было 28 лет «Работа В.С. Соболева представляет собой обстоятельную монографию группы пород, имеющих большое значение в геологии обширной территории нашей страны и, кроме того, интересных для решения некоторых теоретических вопросов петрологии вообще. Имея непосредственной своей задачей изучение сибирских траппов, автор затронул также проблему аналогичных пород в разных странах земного шара и при этом не ограничился простой компиляцией чужих высказываний и мнений, но дал критический обзор литературы вопроса, что несомненно, представляет большую ценность. Значительное внимание автором было уделено вопросам кристаллизации и дифференциации магмы траппов» [Соболев, 1936, с. 6]. Для сибирских траппов рассмотрена модель, построенная в работе [Соболев и др., 2009]. Рассчитанные в ней геотермы 1600 и 1500 °С ограничивают линзу устойчивости расплава, очень сходную с линзой расплава в голове плюма авторской модели [Добрецов и др., 2001]. В то же время в авторской модели расплав накапливается в линзе из струи расплава и только дифференцировался в камере в результате конвекции и остывания. В модели [Соболев и др., 2009] предполагается более сложный вариант с выносом мантийной струей карбонатсодержащего эклогита из древней зоны субдукции. Но сама модель реакционного взаимодействия плюмовых расплавов и перидотитов (или эклогитов) метасоматизированной литосферной мантии заслуживает внимания.

Статья братьев А.В. и С.В. Соболевых [2009] — продолжение семейной традиции. В.С. Соболев вместе с другим своим сыном Н.В. Соболевым первым определил главную формулу дифференциации Земли — океаническая кора образуется из верхнемантийных расплавов в срединно-океанических хребтах, а континентальная — в зонах субдукции путем переплавления эклогитизированной океанической коры [Соболев, Соболев, 1975]. Владимир Степанович впервые высказал гипотезу об участии глубинных углеводородов и CO₂ в образовании алмазов [Соболев, 1960]. В.С. Соболев с одним из старших сыновей Е.В. Соболевым показал, что по содержанию азота алмазы из первого найденного ксенолита алмазоносного эклогита [Бобриевич и др., 1959] не отличаются от алмазов из кимберлитов трубки «Мир» [Соболев и др., 1966]. Эти и другие идеи служили путеводными звездами ученикам В.С. Соболева.

Появление суперконтинентов является уникальными эпизодами и особенностью эволюции Земли после архея, как справедливо отмечено в статье *Жака Туре* и *Яна Хайзенга* [Touret, Huizenga, 2007]. В этой обзорной работе показано, что амальгамация суперконтинентов после архея и до эокембрия (позднего докембрия), особенно в Гондване и Родинии, происходит через образование высокотемпературных мобильных поясов, часто содержащих ультравысокотемпературные гранулитовые ассоциации. Во время финальных стадий амальгамации нижняя континентальная кора нагревается до магматических температур (от 900 до более 1000 °С) за разные временные интервалы от 10 млн лет в недавних, короткоживущих орогенах до более 150 млн лет в эокембрийских (Гондвана) и неопротерозойских (Родиния) долгоживущих орогенах.

Ультравысокотемпературные гранулиты во всех случаях содержат те же типы флюидных включений, а именно, включения плотного CO₂, а также высококонцентрированные водные рассолы. Большое количество флюидов на пике метаморфизма подтверждается обилием сохранившихся флюидных включений, особенно плотного CO₂, и широким распространением вторичных эффектов, когда флюиды ушли в вышележащие породы с проявлением региональной фельдшпатизации, альбитизации и скаполитизации и широким распространением зон дробления с кварц-карбонатными (окисленными) и графитовыми (восстановленными) жилами. С некоторыми оговорками, обусловленными локальными влияниями, большинство включений плотного CO₂ и концентрированных рассолов произошли из карбонатных расплавов, которые образовались при плавлении метасоматизированной мантии.

Этот же вопрос — об образовании и распаде суперконтинентов был рассмотрен и в первой анонсированной статье [Добрецов, 2020], где было продемонстрировано в полном соответствии со многими предыдущими работами, что по крайней мере распад континентов Родинии и Пангеи происходил с

участием мантийных плюмов, из которых сформировались не только щелочно-базальтовые, но и карбонатитовые расплавы. В этой же работе в разделе, посвященном коллизии (амальгамации) Индии и Евразии, важная роль отводится плюмовому магматизму, в том числе щелочному в Южном и Восточном Тибете с возрастом 26—10 млн лет [Gao et al., 2007; Lai et al., 2014; Гийо и др., 2019], включая карбонатиты в Сычуане с возрастом 40—31 млн лет [Xu et al., 2003] и в поясе Чилин с возрастом 23—7 млн лет [Xu et al., 2014]. Анализируя этот магматизм, в докладе на симпозиуме памяти В.С. Соболева, опубликованном ранее также в журнале «Геология и геофизика», авторы [Гийо и др., 2019] отмечают, что карбонатиты наиболее часто связаны с плюмами, как Олдойно Ленгаи в Танзании или Кайзерштуль в Германии. Карбонатиты в ассоциации с ультракалийевыми камафугитами Чилин однозначно интерпретируются как проявления мантийных плюмов [Ernst, Buchan, 2002]. Однако для сычуанских карбонатитов более вероятно плавление в литосферной мантии интенсивно метаморфизованных и метасоматизированных осадков [Гийо и др., 2019].

Таким образом, нагрев нижней коры с образованием высокотемпературных гранулитов, обусловленный внедрением карбонатитовой магмы при образовании (амальгамации) суперконтинентов, может быть обусловлен взаимодействием с нижнемантийными плюмами, но этот вопрос решается в разных статьях по-разному [Dobretsov et al., 1996; Ernst, Buchan, 2002; Гийо и др., 2019; Туре, Хайзенга, 2020] и будет еще предметом длительных дискуссий.

Еще в одной статье первого раздела обсуждается глубинный метаморфизм высоких давлений, связанных с зонами субдукции [Федькин, 2020], на примере эклогитов максютковского комплекса. Зонам метаморфизма высоких давлений В.С. Соболев уделял особое внимание. Они впервые выделены в большом масштабе на карте метаморфизма СССР [Sobolev et al., 1967] и Европы. Используя минералогические термометры и барометры, В.В. Федькин выделил четыре эпизода прогрессивных метаморфических преобразований максютковского комплекса: 1) $T = 800\text{—}910\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 2.5\text{—}3.5\text{ ГПа}$ с возможным возрастом 533 млн лет; 2) $T = 540\text{—}790\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 2.0\text{—}3.5\text{ ГПа}$ с возможным возрастом 385—393 млн лет; 3) $T = 410\text{—}680\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1.1\text{—}2.5\text{ ГПа}$ с возрастом 345—370 млн лет; 4) $T = 410\text{—}550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1.0\text{—}1.2\text{ ГПа}$ с возрастом 315—335 млн лет. Они образуют единый PT -тренд, показанный на рис. 1 в сравнении с аналогичным трендом пород ультравысоких давлений Кокчетавского пояса (Казахстан).

Оценки возрастных рубежей этих эпизодов сделаны на основе обзора опубликованных данных (более 10 статей с 1997 до 2015 г.), сопоставленных с термомеханическим моделированием, подтверждающим несколько этапов эксгумации.

В статье подчеркивается, что важнейшими критериями ультравысокого давления при метаморфизме максютковского комплекса послужили псевдоморфозы кварца по коэситу, описанные в работах [Чесноков, Попов, 1965; Добрецов, Добрецова, 1988], дополненные позже находками кубоидов графита по алмазу и микровключений алмаза в гранате [Leech, Ernst, 1998], которые фиксируют PT -параметры на ранней стадии минералообразования $P = 2.7\text{—}3.5\text{ ГПа}$ и $T = 600\text{—}700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти данные подтверждены данными В.В. Федькина по эклогитам из районов Шубино, Новосимбирка и Караяново. Максимальные параметры получены в образцах 219 и 271, где они достигают $660\text{—}945\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 3.6 ГПа и $600\text{—}845\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 3.5 ГПа. Указанные максимальные оценки температуры автор признает завышенными, поскольку в максютковском комплексе нет признаков плавления. Более правдоподобными выглядят температуры $660\text{—}730\text{ }^{\circ}\text{C}$, называемые также в работе.

Условным является и возраст 533 млн лет, который сами авторы [Dobretsov et al., 1996] относили к возрасту протолитов. Этот возраст более надежно определен для эклогитов и алмазоносных пород Кокчетавского пояса, где также показано, что Кокчетавский пояс представляет собой тектонический меланж из чешуй и блоков, извлеченный в процессе эксгумации из разных участков зоны субдукции, причем каждый участок (Барчи, Кумды-Куль, Энбек-Берлык, Кулет) имеет и разную PT -историю [Claoue Long et al., 1991; Shatsky et al., 1999; Schertl, Sobolev, 2013]. Сводная кривая эволюции кокчетавских пород сопоставлена с кривой PT -эволюции максютковского комплекса и показывает многие общие особенности.

Главная особенность в обоих комплексах — многоэтапность метаморфизма, отражающая как разные и разновозрастные участки зоны субдукции, из которых извлечены чешуи метаморфических пород, так и многоэтапный путь извлечения этих чешуй.

Общие проблемы эволюции и происхождения магм в срединно-океанических хребтах рассмотрены в статье Л.Я. Арановича с соавторами [2020] на примере циркона как петрогенетического индикатора процессов, происходящих в нижней части океанической коры. Показано, что кристаллизация магматического циркона в океанических габбро не является одномоментной, а происходит на фоне дифференциации материнских расплавов и эволюции тектонической обстановки срединно-океанического хребта. Это отражается в разнообразии морфологических особенностей циркона и закономерных вариациях его химического состава. Главным геохимическим индикатором процесса кристаллизационной дифференциации на фоне остывания расплава является увеличение к краям зерен содержания Hf,

которое часто сопровождается повышением концентрацией (U + Th) и (Y + P). [Аранович и др., 2020 и ссылки в ней]. Авторы рекомендуют геотермометр, основанный на распределении Zr и Hf между цирконом и породой.

Эта тенденция, хотя и менее ярко, проявлена в магматических цирконах из океанических плагиогранитов, что связано с более узким температурным интервалом кристаллизации цирконов в плагиогранитах. Эти цирконы обеднены REE по сравнению с цирконами из габбро, что подтверждает гипотезу образования плагиогранитов в результате частичного плавления габбро при участии концентрированного водно-солевого флюида-деривата морской воды [Аранович и др., 2020].

Авторы отмечают перекристаллизацию циркона в результате растворения — переотложения. В перекристаллизованных участках присутствуют микровключения ксенотима, оксидов или силикатов U и Th и бадделеита ZrO_2 . Они связывают это с воздействием восстановленного и щелочного флюида. Но надо иметь в виду невозможность кристаллизации циркона в присутствии оливина [Добрецов и др., 2019]. Поэтому надо поддержать тезис о малой вероятности кристаллизации циркона на ранней стадии кристаллизации и возможность его образования только в дифференцированных безоливиновых габбро.

Среди других петрологических статей две работы связаны с проблемами магматизма. Важное значение для понимания процессов субдукционного магматизма имеет статья *А.Л. Перчука с коллегами* [2020]. В ней экспериментально исследовано плавление вещества, близкого к среднему составу осадка GLOSS, затягиваемого в зону субдукции, при условиях, близких к реальным зонам плавления — $T = 750\text{—}900\text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 2.9$ ГП. В первой серии экспериментов применялись ампулы без верхней крышки, во второй — закрытые (герметичные) ампулы. В продуктах обеих серий присутствуют гранат, карбонат, кианит, фазы SiO_2 и фенгит. Однако во всех опытах серии с открытыми ампулами широко развит омфацил, а в серии с закрытыми ампулами омфацил присутствует только при субсолидусных условиях (при $750\text{ }^\circ\text{C}$).

Термодинамическое моделирование для смеси ($H_2O + GLOSS$), выполненное для условий закрытой системы, хорошо воспроизводит экспериментальные данные в субсолидусной области, показывая сокращение содержания омфацила при появлении расплава, что соответствует эффекту, связанному с повышением давления водного флюида в закрытых ампулах. Термодинамическое моделирование также показывает полное разложение карбонатов в слэбе при условиях «горячей» субдукции, что соответствует природным данным и не соответствует экспериментальным результатам авторов.

Другое отличие от природных наблюдений еще более важное: единственным водным минералом в опытах авторов является фенгит, но в кислых вулканитах зон субдукции он неизвестен, здесь преобладают биотит и амфибол [Добрецов, 2010; Van Keken et al., 2011], что отмечено и авторами статьи.

По мнению авторов, связано это с тем, что биотит и амфибол кристаллизуются при давлениях ниже 2.5 ГПа, что подтверждено в опытах [Hermann, Spandler, 2008]. Отсутствие вкрапленников фенгита в кислых островодужных магмах может объясняться, по мнению авторов [Перчук и др., 2020], тремя вариантами: 1) магмогенерация происходила при давлении менее 2.5 ГПа; 2) вкрапленники фенгита растворялись в поднимающейся магме; 3) фенгит растворялся в поднимающейся магме при взаимодействии с перидотитами или смешении с другими расплавами.

Последние два варианта могут объяснить также отсутствие в островодужных лавах вкрапленников карбонатов, широко распространенных в продуктах выполненных опытов. Однако, по мнению авторов вводного обзора, дискуссия будет продолжаться, пока не будут найдены псевдоморфозы по вкрапленникам карбоната или фенгита или их реликты, или другие доказательства большого участия карбонатов и фенгита в образовании островодужных лав.

Другая экспериментальная работа по магматизму — статья *Э.С. Персикова*, в которой установлены новые закономерности вязкости близиквидусных водосодержащих магм кислого, среднего и основного состава в широком диапазоне термодинамических параметров и глубин земной коры (1—30 км) с использованием структурно-химической модели [Персиков, 2020] для расчета вязкости магм разного состава. Полученные закономерности подтверждают идею В.С. Соболева, П. Эскола и других о главной закономерности относительного распространения магм разного состава — высоковязкие кислые расплавы преобладают в интрузивной форме (гранитные интрузии и дацитовые экструзивные купола), а базальтовые расплавы низкой вязкости — в эффузивной форме, к ним присоединяются коматиитовые ультраосновные лавы в раннем докембрии.

Однако вязкость расплавов зависит не только от состава, но и от содержания воды, поэтому возникает одно большое исключение. В зонах субдукции, где магмообразование происходит при высоком водном давлении, преобладают андезитовые и дацитовые (а не базальтовые) лавы. Здесь наблюдается уникальное событие — газовые взрывы кислых магм с образованием горячих пепловых туч, которые перемещаются в воздухе на большие расстояния (до 1000 км), а после выпадения на Землю продолжают течь, образуя игнимбритовые потоки.

На международной конференции, посвященной 110 со дня рождения В.С. Соболева (Новосибирск, 2018), были представлены работы по исследованию включений расплава в минералах [Portnyagin et al., 2019; Sobolev et al., 2019; Тобелко и др., 2019; Миронов и др., 2020; Соболев и др., 2020]. Эта тематика была инициирована в СССР непосредственно В.С. Соболевым. Он явился основателем российской школы изучения магматических включений в минералах, которая получила широкое международное признание. Часть этих докладов приведена в настоящем номере журнала.

Статья *Н.Л. Миронова с соавторами* [2020] открывает вторую группу статей (минералогия, эксперимент) и посвящена определению давления летучих компонентов при кристаллизации островодужных магм на основе исследования включений расплава в минералах. Рассмотрен вопрос о содержании CO_2 в родоначальных расплавах. Этот вопрос может быть решен исключительно исследованием включений расплава и/или флюида во вкрапленниках ранних минералов, поскольку углекислота практически полностью дегазирует из расплавов при низких давлениях. В работе представлена новая методика определения плотности CO_2 во флюидной фазе расплавных включений на основе конфокальной спектроскопии комбинационного рассеивания (рамановской спектроскопии). Хотя метод уже прошел апробацию в ряде зарубежных публикаций [Harley et al., 2014; Aster et al., 2016], в отечественной литературе он разработан впервые. Применение этого метода позволило Н.Л. Миронову с соавторами впервые оценить условия кристаллизации родоначальных магм Карымского вулкана. Показано, что начальная стадия кристаллизации проходила при давлении более 0.7 ГПа углекислотно-водного флюида на глубинах более 25 км. Полученный результат согласуется с данными сейсмических наблюдений [Zobin et al., 2003].

В своей многогранной научной деятельности В.С. Соболев проявлял значительный интерес к процессам образования сульфидных полиметаллических месторождений норильского типа и был последовательным сторонником их магматического происхождения. На конференции и в тематическом выпуске журнала представлена работа *А.А. Арискина с соавторами* [2020]. Впервые подробно рассмотрены вопросы образования богатой элементами группы платины сульфидной минерализации троктолитов Йоко-Довыренского расслоенного массива в Северном Прибайкалье. На основе детальных данных о составе главных и примесных элементов сульфидных фаз доказана магматическая природа рудных образований и рассмотрены процессы их фракционирования и пространственного разделения по мере затвердевания троктолитовых кумулатов.

Вторая группа статей посвящена также экспериментальным исследованиям при мантийных *PT*-параметрах и всестороннему исследованию природных алмазов и их парагенезисов, которым В.С. Соболев всегда уделял пристальное внимание, будучи основателем ведущей научной школы РФ по изучению геологии и минералогии месторождений алмазов. В настоящем спецвыпуске представлены три статьи по этой тематике [Соболев и др., 2020; Баталева и др., 2020; Сокол и др., 2020].

Исследование условий устойчивости природных карбонатов, особенностей флюидного режима восстановленной мантии и соотношения алмазов и содержащихся в них минеральных и флюидных включений являются принципиальными для реконструкции глобального углеродного цикла.

Ориентация 76 минеральных включений, представленных оливином, пиропом и магнезиохромитом измерена в 16 образцах алмазов из главных коренных месторождений алмазов Якутии [Соболев и др., 2020]. Новизна проведенных исследований заключается в специальном подходе к выбору образцов, содержащих не только самые распространенные включения оливина, но и наиболее типичные минеральные включения (пироп и магнезиохромит) преобладающего перидотитового парагенезиса почти во всех известных кимберлитах. Как в настоящем эксперименте, так и в соответствующих исследованиях, проведенных в 2014—2019 гг., не обнаружено ни одного включения, ориентировка которого отвечала бы эпитаксиальному критерию. Только отдельные включения магнезиохромита в трех алмазах демонстрируют ориентировку, близкую к закономерной. Значимая корреляция значений изотопного состава углерода и состава минеральных включений алмазов перидотитового и эклогитового парагенезисов при полном отсутствии корреляции с другими свойствами может рассматриваться в качестве одной из геохимических особенностей. В то же время, учитывая многочисленные данные, демонстрирующие сложную ростовую историю алмазов и в ряде случаев широкие колебания состава минеральных включений в разных зонах, высказывается мнение о возможности сосуществования сингенетических и протогенетических включений в одном и том же алмазе. Это также подтверждается находками ксенолитов алмазоносных перидотитов и эклогитов в кимберлитах, в которых выявлены алмазы, полностью включенные в гранат либо в оливин. Отмечается постоянное наличие тяжелых углеводородов (отн. %) от пентана (C_5H_{10}) до гексадекана ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}$), доминирующих во флюидных включениях в алмазах кимберлитов и россыпей, а также в пиропе и оливине ксенолитов алмазоносных перидотитов [Соболев и др., 2018; Sobolev et al., 2019].

Впервые *Ю.В. Баталевой с коллегами* [2020] проведено экспериментальное моделирование реакций декарбонатизации при мантийно-коровых взаимодействиях, сопряженных с образованием Mg-Fe

гранатов и CO_2 -флюида в широком PT -интервале верхней мантии. В экспериментах, выполненных на многопуансонном аппарате высокого давления «разрезная сфера» (БАРС), использована специально сконструированная буферированная ячейка высокого давления с гематитовым контейнером, предотвращающим диффузию водорода в платиновых ампулах. Экспериментально установлено, что в системе $\text{MgCO}_3\text{—SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ декарбонатизация происходит при 1100 ± 20 °С (3.0 ГПа), 1150 ± 20 °С (6.3 ГПа) и 1400 ± 20 °С (7.5 ГПа), а в системе $(\text{Mg, Fe})\text{CO}_3\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ — при 1000 ± 20 °С (3.0 ГПа), 1150 ± 20 °С (6.3 ГПа) и 1400 ± 20 °С (7.5 ГПа). Установлено, что экспериментально воспроизведенные линии реакций с образованием ассоциаций пироп + CO_2 или пироп-альмандин + CO_2 сдвинуты в область более низких температур на 50—150 °С относительно расчетных. Установлено, что на глубинах 90—190 км Mg, Fe-карбонаты вступают в реакции с оксидами в интервале температур 1000—1250 °С, а на глубинах ~225 км — при 1400 °С.

В обзорной статье *А.Г. Сокола и др.* [2020] суммируются результаты исследования флюидного режима восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах. Статья сопровождается обширным списком цитированной литературы, в котором абсолютное большинство ссылок принадлежит работам, датированным 2010—2019 гг. Обобщение данных экспериментального изучения модельных систем и результатов исследования углеводородных включений в природных алмазах рассматривается в качестве существенного шага в понимании флюидного режима верхней мантии. Предполагается, что сложный комплекс различных, преимущественно легких, алканов и кислородсодержащих углеводородов (УВ) мог бы образоваться в мантии из неорганических веществ. Важную роль в таких флюидах играли азот-, сера- и хлорсодержащие компоненты. Карбоновые кислоты и другие кислородсодержащие УВ могут быть стабильными в преимущественно водно-азотно-углекислом флюиде и даже в равновесии с карбонатизированным перидотитом. Актуальным направлением экспериментальных исследований в будущем, очевидно, является изучение трендов изменения компонентного состава флюида во включениях при транспортировке к поверхности и выявление причин различий в относительном вкладе метана, легких алканов, кислородсодержащих УВ и воды в исследованных системах.

Широко известна высокая репутация В.С. Соболева в области диагностики породобразующих, редких и уникальных минеральных фаз. В тематическом сборнике представлена работа *И.В. Пекова с соавторами* [2020], описывающая уникальную минерализацию фумарольных систем влк. Толбачик (Камчатка). Показано, что необычное для природных условий сочетание высокой температуры, низкого давления, высокой летучести кислорода и специфического химического состава вулканических газов обусловило исключительное разнообразие 350 описанных минеральных видов, 123 из которых установлены впервые именно на этом объекте.

ЛИТЕРАТУРА

Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Борисов А.А. Океанический циркон как петрогенетический индикатор // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 685—700.

Арискин А.А., Данюшевский Л.В., Фиорентини М., Николаев Г.С., Кислов Е.В., Пшеницын И.В., Япаскурт В.О., Соболев С.Н. Петрология, геохимия и происхождение сульфидоносных и ЭПГ-минерализованных троктолитов из зоны Конникова в Йоко-Довыренском интрузиве // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 748—773.

Баталева Ю.В., Новоселов И.Д., Крук А.Н., Фурман О.В., Реутский В.Н., Пальянов Ю.Н. Экспериментальное моделирование реакций декарбонатизации, сопряженных с образованием Mg, Fe-гранатов и CO_2 -флюида при мантийных P , T -параметрах // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 794—809.

Бобривич А.П., Смирнов Г.И., Соболев В.С. Ксенолит эклогита с алмазами // Докл. АН СССР, 1959, т. 126, № 3, с. 637—640.

Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связи с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 166—182.

Гийо С., Гуссен Ф., Эраги Л., Реплюмаз А., де Сигуайе Ж., Кордые С. Как и когда росло Тибетское плато // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (9), с. 1207—1230 (на англ.).

Добрецов Н.Л. Петрологические и геохимические особенности субдукционного магматизма // Петрология, 2010, т. 18, № 1, с. 1—24.

Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2011, 492 с.

Добрецов Н.Л. Взаимодействие тектоники плит и тектоники плюмов: вероятные модели и типичные примеры // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 617—647.

- Добрецов Н.Л., Добрецова Л.В.** Новые данные по минералогии эклогит-глаукофансланцевого максютовского комплекса (Южный Урал) // Докл. АН СССР, 1988, т. 300, № 1, с. 195—200.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1994, 300 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика, Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001, 409 с.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.** Термохимическая модель пермотриасовых пломов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкоземельных месторождений // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1159—1187.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Е.В.** Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмографии для комплексной оценки субдукционных процессов // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 21—55.
- Добрецов Н.Л., Чепуров А.В., Сонин В.М., Жимулев Е.И.** Устойчивость циркона в системе $MgO-SiO_2-H_2O$ при 2.5 ГПа // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (4), с. 527—536.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.** Внутриплитный магматизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника, 1983, № 1, с. 29—45.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.** Палеогеодинамика. М., Наука, 1993, 192 с.
- Изох А.Э., Медведев А.Я., Федосеев Г.С., Поляков Г.В., Николаева И.В., Палесский С.В.** Распределение элементов платиновой группы в пермотриасовых базальтах Сибирской крупной изверженной провинции // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 1028—1042.
- Левашова Н.М., Голованова И.В., Рудько С.В., Данукалов К.Н., Рудько Д.В., Сальманова Р.Ю.** Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики // Материалы ЛП тектонического совещания, 2020, с. 25—29.
- Миرون Н.Л., Тобелко Д.П., Смирнов Н.З., Портнягин М.В., Крашенинников С.П.** Оценка содержания CO_2 в газовой фазе расплавных включений с использованием рамановской спектроскопии (на примере включений в оливине Карымского вулкана, Камчатка) // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 734—747.
- Михно А.О., Корсаков А.В.** Карбонатитовый, силикатный и сульфидный расплавы: гетерогенность минералообразующей среды в породах сверхвысоких давлений Кокчетавского массива // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 110—132.
- Пеков И.В., Агаханов А.А., Зубкова Н.В., Кошлякова Н.Н., Щипалкина Н.В., Сандалов Ф.Д., Япаскурт В.О., Турчкова А.Г., Сидоров Е.Г.** Фумарольные системы окислительного типа на вулкане Толбачик — минералогический и геохимический уникум // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 826—843.
- Персиков Э.Е.** Взаимосвязь относительной распространенности в земной коре интрузивных и эффузивных пород в ряду кислые—основные с закономерностями вязкости магм // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 725—733.
- Перчук А.Л., Сердюк А.А., Зиновьева Н.Г., Шур М.Ю.** Плавление и минеральные парагенезисы глобального субдукционного осадка, обогащенного водой, в условиях закрытой и открытой систем: эксперимент и термодинамическое моделирование // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 701—724.
- Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г.** Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимбердитами // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1293—1334.
- Соболев В.С.** Петрология траппов Сибирской платформы. Л., Изд-во ГУ «Совморпуть», 1936, 224 с. (Тр. Арктического института, т. 18).
- Соболев В.С.** Условия образования месторождений алмазов // Геология и геофизика, 1960 (1), с. 7—22.
- Соболев В.С., Соболев Н.В.** Проблема двухэтапного образования земной коры // Докл. АН СССР, 1975, т. 221, № 2, с. 435—438.
- Соболев Е.В., Ленская С.В., Лисойван В.И., Самсоненко Н.Д., Соболев В.С.** Некоторые физические свойства алмазов из якутского эклогита // Докл. АН СССР, 1966, т. 168, № 5, с. 1151—1153.
- Соболев Н.В., Добрецов Н.Л., Отани Э., Тэйлор Л.А., Шертл Г.-П., Пальянов Ю.Н., Литасов К.Д.** Проблемы, связанные с кристаллогенезисом и глубинным циклом углерода // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 5—20.
- Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А., Кузьмин Д.В., Граханов С.А., Батанова В.Г., Логвинова А.М., Бульбак Т.А., Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Федорова Е.Н., Анастасенко Г.Ф.,**

- Николенко Е.И., Толстов А.В., Реутский В.Н.** Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в северо-восточной части Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1701—1719.
- Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М., Павлушин А.Д., Угапьева С.С.** Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности минеральных включений в алмазах // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 774—793.
- Сокол А.Г., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Сокол И.А., Заикин П.А., Соболев Н.В.** Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 810—825.
- Тобелко Д.П., Портнягин М.В., Крашенинников С.П., Гриб Е.Н., Плечов П.Ю.** Состав и условия образования примитивных магм Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавленных включений и микроэлементной термобарометрии // Петрология, 2019, т. 27, № 3, с. 258—282.
- Туре Ж.Л.Р., Хайзинга Д.М.** Крупномасштабные переносы флюида между мантией и корой во время амальгамации и распада суперконтинентов // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 648—665.
- Чесноков Б., Попов А.** Увеличение объема зерен кварца в эколитах Южного Урала // Докл. АН СССР, 1965, т. 162, с. 176—178.
- Федькин В.В.** Четыре эпизода термальной эволюции эколитов максютовского комплекса (Южный Урал) // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (5—6), с. 666—684.
- Aster E.M., Wallace P.J., Moore L.R., Watkins J., Gazel E., Bodnar R.J.** Reconstructing CO₂ concentrations in basaltic melt inclusions using Raman analysis of vapor bubbles // J. Volcan. Geotherm. Res., 2016, v. 323, p. 148—162.
- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M.** Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for magnetic field hyperactivity? // Earth Planet. Sci. Lett., 2016, v. 435, p. 124—135.
- Claoue-Long J.C., Sobolev N.V., Shatsky V.S., Sobolev A.V.** Zircon response to diamond-pressure metamorphism in the Kokchetav massif, USSR // Geology, 1991, v. 19, p. 710—713.
- Dobretsov N.L., Shatsky V.S.** Exhumation of high-pressure rocks of the Kokchetav massif: facts and models // Lithos, 2004, v. 78, p. 307—318.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D.** Meso- and Cenozoic tectonics of the central mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes // Int. Geol. Rev., 1996, v. 38, p. 430—466.
- Ernst R.L., Buchan K.I.** Maximum size and distribution in time and space of mantle the plumes: evidence from large igneous provinces // J. Geodyn., 2002, v. 34, № 2, p. 309—342.
- French S.W., Romanovich B.** Broad plumes rooted of the base of the Earth's mantle beneath major hotspots // Nature, 2015, v. 525, p. 95—99.
- Gao Y., Hou Z., Kamber B.S., Wei R., Meng X., Zhao R.** Adakite-like porphyries from the South Tibet collisional zone: evidence for slab melt metasomatism // Contrib. Mineral. Petrol., 2007, v. 153 (1), p. 105—120.
- Hacker B.R., Calvert A., Zhang R.Y., Ernst W.G., Liou J.G.** Ultrarapid exhumation of ultrahigh-pressure diamond-bearing metasedimentary rocks of the Kokchetav Massif, Kazakhstan // Lithos, 2003, v. 70, p. 61—75.
- Hanski E., Walker R.J., Huhma H., Polyakov G.V., Balykin P.A., Hoa T.T., Phuong, N.T.** Origin of the Permian—Triassic komatiites, northwestern Vietnam // Contrib. Mineral. Petrol., 2004, v. 147, p. 453—469.
- Hartley M.E., Maclennan J., Edmonds M., Thordarson T.** Reconstructing the deep CO₂ degassing behaviour of large basaltic fissure eruptions // Earth Planet. Sci. Lett., 2014, v. 393, p. 120—131.
- Hermann J., Spandler C.J.** Sediment melts of sub-arc depths: an experimental study // J. Petrol., 2008, p. 717—740.
- Hermann J., Rubatto A., Korsakov A., Shatsky V.S.** Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) // Contrib. Mineral. Petrol., 2001, v. 141, p. 66—82.
- Katayama I., Maruyama S., Parkinson C.D., Terado K., Sano Y.** Ion microprobe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan // Earth Planet. Sci. Lett., 2001, v. 188, p. 185—198.
- Korsakov A.V., Travin A.V., Yudin D.S., Marshall H.R.** ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of tourmaline from metamorphic rocks of the Kokchetav Massif, Kazakhstan // Dokl. Earth Sci., 2009, v. 424, p. 168—170.
- Lai S.C., Qin J.F., Khan J.** The carbonated source region of Cenozoic mafic and ultramafic lavas from West Gningling // Gondwana Res., 2014, p. 1501—1516.
- Larson R.L., Olson P.** Mantle plumes control magnetic reversal frequency // Earth Planet. Sci. Lett., 1991, v. 107, p. 437—447.

- Leech M., Ernst W.G.** Graphite pseudomorphs after diamond from the Maksutov complex, S. Urals, Russia // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, v. 62, p. 2143—2154.
- Liu C.Z., Wu F.Y., Chung S.L., Zhao Z.D.** Fragments of hot and metasomatized mantle lithosphere in Midde Miocene ultrapotassic lavas, southern Tibet // *Geology*, 2011, v. 39 (10), p. 923—926.
- Portnyagin M., Mironov N., Botcharnikov R., Gurenko A., Almeev R.R., Luft C., Holtz F.** Dehydration of melt inclusions in olivine and implications for the origin of silica-undersaturated island-arc melts // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2019, v. 517, p. 95—105.
- Ragozin A.L., Liou J.G., Shatsky V.S., Sobolev N.V.** The timing of the retrograde partial melting in the Kumdy-Kol region (Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan) // *Lithos*, 2009, v. 109 (3—4), p. 274—284.
- Schertl H.-P., Sobolev N.V.** The Kokchetav Massif, Kazakhstan: «Type locality» of diamond-bearing UHP metamorphic rocks // *J. Asian Earth Sci.*, 2013, v. 63, p. 5—38.
- Shatsky V.S., Jagoutz E., Sobolev N.V., Kozmenko O.A., Parkhomenko V.S., Troesch M.** Geochemistry and age of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan) // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1999, v. 137, p. 185—205.
- Sobolev A.V., Asafov E.V., Gurenko A.A., Arndt N.T., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Garbe-Schönberg D., Wilson A.H., Byerly G.R.** Deep hydrous mantle reservoir provides evidence for crustal recycling before 3.3 Gyr ago // *Nature*, 2019, v. 571, p. 555—559.
- Sobolev V.S., Dobretsov N.L., Reverdatto V.V., Sobolev N.V., Ushakova E.N.** Metamorphic facies and series of facies in the USSR // *Dansk Geologisk Forening Meddelelser*, 1967, v. 17, № 4, p. 458—472.
- Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Logvinova A.M.** Composition of hydrocarbons in diamonds, garnet, and olivine from diamondiferous peridotites from the Udachnaya Pipe in Yakutia, Russia // *Engineering*, 2019, v. 5, p. 471—478.
- Torsvik T.H., Cocks L.R.** *Earth history and paleogeography*. Cambridge University Press, 2017, 316 p.
- Van Keken P.E., Hacker B.R., Syracuse E.M., Abers G.A.** Subduction factory: Depth-dependent flux H₂O from subduction slabs worldwide // *J. Geophys. Res.*, 2011, v. 116, Article B01401.
- Xu C., Chakhmouradian A., Taylor R., Kynicky J., Li W., Song W., Fletcher P.** Origin of carbonates in the South Qinling orogeny // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2014, v. 143, p. 189—206.
- Zobin V.M., Levina V.I., Maguskin M.A.** Seismicity and crustal deformation preceding the January 1996 eruptions at Karymsky Volcanic Center, Kamchatka // *Bull. Volcanol.*, 2003, v. 65, p. 477—485.

*Поступила в редакцию
10 апреля 2020 г.*