

Научная статья

УДК 551.24

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_6

EDN: HGZYVJ

Проблемы геодинамики тектонических структур центрального типа островов залива Петра Великого (Японское море)

Л.А. Изосов, Е.А. Бессонова, Е.Б. Осипова, Т.А. Емельянова, Н.С. Ли✉

Леонид Александрович Изосов

доктор геолого-минералогических наук

<https://orcid.org/0000-0002-7881-4704>

Елена Александровна Бессонова

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

bessonova@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6616-5268>

Елена Борисовна Осипова

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

osipov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8499-9613>

Татьяна Андреевна Емельянова

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

emelyanova@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4790-7270>

Наталья Сергеевна Ли

научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

lee@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6658-6946>

Аннотация. Представлены крупномасштабные космогеологические карты нового поколения островов Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда, расположенных в зал. Петра Великого в Японском море. Основой для составления карт послужили оригинальные данные

по исследованию авторами геологического строения островов с привлечением современных методов – дешифрирования космофотоматериалов с высокой степенью разрешения. В результате в пределах островов были установлены многочисленные структуры центрального типа, проявленные в рельефе при распаде литосферных вихрей, возникавших в процессе сдвигообразования в пределах длительного развития мощной левосдвиговой зоны. Тектоническая активность в данной зоне началась в поздней перми, но наиболее активно проявилась в мезозое, когда формировались Восточно-Азиатская сдвиговая зона и западно-тихоокеанские окраинные моря. Литосферные вихри отражают глубинные литоциклоны и литоантициклоны – «восходящие» и «нисходящие» структуры. Первые способствуют мантийному апвеллингу, вторые – нагнетанию корового вещества и его транспортировке в нижние слои литосферы. Это подтверждается механико-математическим моделированием механизма вертикальных движений корово-мантийного вещества – в режиме «купола» и в режиме «прогиба».

Ключевые слова: космогеологические карты, структуры центрального типа, литосферные вихри, литоциклоны, литоантициклоны

Для цитирования: Изосов Л.А., Бессонова Е.А., Осипова Е.Б., Емельянова Т.А., Ли Н.С. Проблемы геодинамики тектонических структур центрального типа островов залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 5. С. 101–116. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_6.

Благодарности. Авторы благодарят К.Ю. Крамчанина и А.А. Огороднего за сбор и обработку каменного материала, а также участие в составлении геологических карт островов зал. Петра Великого.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (рег. № 121021700342-9, № 121021500053-6, № AAA-A19-119122090009-2).

Original article

Problems of geodynamics of the central type tectonic structures of the islands in Peter the Great Bay (the Sea of Japan)

L.A. Izosov, E.A. Bessonova, E.B. Osipova, T.A. Emelyanova, N.S. Lee

Leonid A. Izosov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy

<https://orcid.org/0000-0002-7881-4704>

Elena A. Bessonova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

bessonova@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6616-5268>

Elena B. Osipova

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

osipov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8499-9613>

Tatyana A. Emelyanova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

emelyanova@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4790-7270>

Natalya S. Lee

Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

lee@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6658-6946>

Abstract. The article presents large-scale cosmogeological maps of a new generation of the Russky, Popov, Reyneke and Rikord Islands located in Peter the Great Bay in the Sea of Japan. The basis for compiling the maps was the original data on the study by the authors of the geological structure of the islands using modern methods – the interpretation of cosmic photographs with a high resolution. As a result, numerous structures of the central type were established within the islands, manifested in the relief in consequence of the breakup of lithospheric vortexes that arose in the process of strike-slip formation during the long-term development of a powerful left-hand strike-slip zone. Tectonic activity in this zone began in the Late Permian, but became most active in the Mesozoic, when the East Asian strike-slip zone and the West Pacific marginal seas were formed. Lithospheric vortexes reflect deep lithocyclones and lithoanticyclones – “upward” and “downward” structures. The former contribute to mantle upwelling, the latter to the injection of crustal matter and its transportation to the lower layers of the lithosphere. This is confirmed by mechanical and mathematical modeling of the mechanism of vertical movements of the crust-mantle substance – in the “dome” mode and in the “trough” mode.

Keywords: cosmogeological maps, structures of the central type, lithospheric vortexes, lithocyclones, lithoanticyclones

For citation: Izosov L.A., Bessonova E.A., Osipova E.B., Emelyanova T.A., Lee N.S. Problems of geodynamics of the central type tectonic structures of the islands in Peter the Great Bay (the Sea of Japan). *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(5):101-116. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_6.

Acknowledgments. The authors thank K.Yu. Kramchanin and A.A. Ogorodny for the collection and processing of stone material, as well as participation in the compilation of geological maps of the islands of Peter the Great Bay.

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the POI FEB RAS (N 121021700342-9, N 121021500053-6, N AAA-A19-119122090009-2).

Введение

В зал. Петра Великого Японского моря имеются многочисленные острова, в том числе крупный о-в Русский и более мелкие острова Попова, Рейнеке и Рикорда (см. рис. 1, врезка). Первые геологические описания островов приходятся на начало XX в., а в 1960–1990-х годах Приморским геологическим управлением Мингео СССР в пределах некоторых крупных островов – Русский, Путятина и Аскольд проводилась геологическая съемка и составлены крупномасштабные (1:50 000) карты. Другие острова исследованы явно недостаточно и в лучшем случае имеют среднемасштабную (1:200 000) геологическую основу.

Авторами [1 и др.] в зал. Петра Великого и на территориях прилегающей суши были проведены геологические работы и составлена карта с элементами глубинного строения (рис. 1). Она стала базовой основой при геологических исследованиях на гряде островов Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда. Эта гряда представляет собой продолжение п-ова Муравьев-Амурский, сохраняя во многом элементы его геологического строения. В свою очередь, геология полуострова и окружающих его территорий имеет общие особенности, так как в геологическом прошлом вся эта область, представленная на приведенной карте, развивалась как единое целое.

Крупномасштабное геологическое картирование островов Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда проводилось с применением линеamentного анализа с целью создания карт нового поколения – космогеологических. Это обусловлено тем, что в связи с успешным развитием космической геологии в последние годы получены многочисленные космофотоматериалы с высокой степенью разрешения, которые позволяют с большой достоверностью выявлять структурно-тектонические особенности той или иной территории. Особое внимание в этом плане привлекают структуры центрального типа, четко отображающиеся на космофотоснимках.

Исходные материалы и методика исследований

Геологическая карта (рис. 1) наглядно демонстрирует наличие докембрийских остаточных массивов – Ханкайского (с сиалическим фундаментом) и Сергеевского (с симатическим фундаментом), а также каледонско-яньшаньской Лаоэлин-Гродековской покровно-складчатой системы с блоками докембрийского симатического фундамента (западная часть региона). Последняя отделена от Ханкайского массива Западно-Приморским тектоническим швом. Сергеевский массив, относящийся к яньшаньской Наданьхада-Сихотэ-Алинской покровно-складчатой системе, ограничен с севера зоной дизъюнктивов Северо-Янцзиньского тектонического шва, а с запада – Дунайским разломом, вероятно, также представляющим структуру подобного ранга [2, 3].

Позднепермские вулканоплутонические формации зал. Петра Великого участвуют в строении Южного звена окраинно-континентального Западно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса и фиксируют палеозону перехода континент–океан [2–4].

В геологическом строении островов зал. Петра Великого участвуют позднепермские магматические породы [5, 6 и др.], входящие в состав: 1) владивостокской, барабашской и чандалазской свит (основные, средние и кислые вулканиты), 2) муравьевского и седанкинского интрузивных комплексов основного и среднего состава соответственно [7].

Кольцевые купольные морфоструктуры в этом регионе впервые выявлены С.М. Тащи в процессе проведения крупномасштабной геологической съемки (Н.Г. Мельников, А.А. Матияш и др., 1991 г.) и выделены на трансформированном магнитном поле (аэромагнитная карта масштаба 1:50 000; А.В. Жуковская, 1988 г.). По данным плотностного моделирования [8], на островах Русский, Рикорда и п-ове Муравьев-Амурский на глубинах 1–2 км установлены интрузивные массивы основного состава, которые рассматриваются [1, 9] как интрузивные купола. По результатам магниторазведки выделены наиболее крупные купола:

1) о-ва Русский, 2) Седанкинский и 3) Лянчихинский, которые фиксируются сложно построенными кольцевыми положительными магнитными аномалиями высокой интенсивности, обусловленными проявленными здесь интрузивными образованиями муравьевского и седанкинского комплексов [10, 11].

Структуры центрального типа на островах зал. Петра Великого описаны также с привлечением геоморфологических и геолого-геофизических материалов [12, 13 и др.]. Было показано, что они представляют собой реликты вулканоплутонических купольных структур позднепермского возраста и, несмотря на инверсии тектонического режима, сохранили свое морфотектоническое значение до настоящего времени.

Для выявления структур центрального типа, характерных для позднепермских вулканоплутонических образований, на космофотоснимках авторами проведен линеаментный анализ, который представляет собой комплекс геоморфологических, геологических, геофизических и других дистанционных методов геологического картирования [14–16 и др.]. При этом были использованы также данные геофизических исследований.

Главным классификационным признаком линеаментов является их приуроченность к разрывным структурам земной коры. Ранее под термином «линеамент» понимались линейно вытянутые элементы рельефа и геологической структуры. Начиная с 1960-х годов [17] и до настоящего времени линеаменты стали рассматриваться как крупнейшие линейные или дугообразные элементы рельефа, отражающие глубинные разрывные структуры фундамента.

Следует подчеркнуть, что данные геологического дешифрирования космофотоснимков представляют собой независимую информацию и отражают глубинную структуру той или иной территории, поэтому они, на наш взгляд, являются необходимым дополнением к геологическим картам. Данная методика успешно использована при разработке модели механизма формирования геологических структур центрального типа, в том числе окраинных морей Западно-Тихоокеанской зоны перехода континент–океан.

Результаты работ

На основе геологического дешифрирования крупномасштабных космогеологических снимков зал. Петра Великого (Google Maps) нами были выявлены многочисленные структуры центрального типа различного генезиса (вулканотектонические депрессии, интрузивные купола и др.), а также установлены их взаимоотношения с вмещающими образованиями [1 и др.] и с разломами северо-восточного простирания повышенной глубинности – Береговым и Муравьевским (рис. 1), которые представляют собой левосторонние сдвиги [18]. Поэтому данная сдвиговая зона была подвергнута воздействию вращательных деформаций, в результате чего стала местом формирования литосферных вихрей. Например, морфоструктура о-ва Русский на рис. 2 вполне уверенно может рассматриваться как вихрь, закрученный по часовой стрелке.

Однако здесь наиболее ярко выделяются кольцевые структуры, вероятно, представляющие собой конечный этап развития вихревых образований, на что в свое время указывал академик Н.С. Шило [19]. Действительно, структуры центрального типа, как более выгодные по энергетике, могут представлять собой распад

тектонических вихрей, когда благодаря турбулентным процессам в спиральях их ядра обособляются. В рассматриваемом случае линеаменты вихревых структур можно наметить на геологических картах, схемах геологического дешифрирования космofотоснимков и магнитного поля некоторых островов (рис. 2, 3).

Касаясь рассматриваемой сдвиговой зоны, прежде всего необходимо отметить то, что она имеет длительную историю развития, описанную в работе [20]. Сдвиговые деформации, начавшиеся еще в поздней перми, наиболее активно проявились в мезозое, когда формировались Восточно-Азиатская глобальная сдвиговая зона и западно-тихоокеанские окраинные моря. Впадины данных морей образовались как вихревые структуры в зоне неустойчивости, вызванной движением Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит относительно друг друга [21]. При этом в вихревое движение были вовлечены прилегающие части континента и океана (блоки литосферы) и оформились структуры литосферных вихрей. При скручивании тектонических масс и возникновении вихрей фрагменты океанической коры проникали в континентальную, и наоборот, что привело к своеобразному перемешиванию вещества в зоне взаимодействия плит.

Позднепермские структуры центрального типа имеют сложную иерархию: помимо ярко выраженных интрузивных куполов в регионе могут быть намечены также вулканотектонические депрессии, т.е. устанавливаются структуры как восходящего, так и нисходящего типов. Они фиксируются следующими признаками: 1) характером размещения элементов залегания слоистости в верхнепермских и триасовых отложениях, 2) кольцевыми разломами и дайками, 3) зонами дробления

ярус): базальты, известняки, аргиллиты, андезиты, песчаники, алевролиты, риолиты, дациты; чандалазская свита: конгломераты, алевролиты, известняки, андезиты, риолиты, песчаники); 10 – нижний триас: конгломераты, песчаники, алевролиты, ракушняки, каменные угли; 11 – средний триас: песчаники, алевролиты; 12, 13 – нижний–средний триас (12 – конгломераты, алевролиты, песчаники, гравелиты, ракушняки, 13 – толща кремней, известняков, алевролитов, песчаников, базальтов, туфоконгломератов); 14 – верхний триас: угли, алевролиты, гравелиты; 15 – нижняя–средняя юра. Бонивуровская свита: песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты; 16 – верхняя юра. Чигановская свита: песчаники, алевролиты, сланцы, известняки; 17 – нижний мел. Готерив–альб. Сучанская серия: песчаники, алевролиты, каменные угли. Никанская серия: песчаники, алевролиты, каменные угли; 18 – нижний–верхний мел. Альб–сеноман. Коркинская серия: туфопесчаники, алевролиты, конгломераты, андезиты; 19 – мезозой: предположительно олистостромовый комплекс; 20, 21 – раннепротерозойские интрузивные образования (20 – гаккелевский комплекс: габбро-гнейсы, диоритогнейсы, амфиболиты, плагиограниты и плагиомигматиты, 21 – сергеевский комплекс: метагабброиды); 22 – раннепалеозойские артемовские (а) и таудеминские (т) комплексы: граниты, гранодиориты; 23 – позднепермский гамовский комплекс: гранодиориты, лейкограниты, диориты, кварцевые диориты, пегматиты, аплиты; 24 – позднепермский муравьевский комплекс: габбро, гранодиориты, граниты (γ); 25 – позднепермский седанкинский комплекс: граниты, риолиты; 26 – позднетриасовый тальминский комплекс: риолиты, риодациты; 27 – раннеюрский гвоздевский комплекс: граниты, пегматиты; 28 – позднемеловой синанчинский комплекс: диориты; 29 – геологические границы установленные и предполагаемые; 30 – разломы; 31 – надвиги установленные и предполагаемые; 32 – тектонические швы (ЗП – Западно-Приморский и СЯ – Северо-Янцзиньский); цифрами в кружках обозначены разломы повышенной глубинности, выделенные по геофизическим данным в акватории зал. Петра Великого (1 – Уссурийский, 2 – Надеждинский, 3 – Береговой, 4 – Муравьевский, 5 – Шкотовский, 6 – Дунайский); 33 – вулканогенно-интрузивные купола, выделенные по геофизическим данным (среднего–основного состава: I – Лянчихинский, II – Седанкинский, III – о-в Русский, VI – о-в Аскольд, VIII – Южный; кислого состава: IV – о-ва Попова; VII – Гамова; основного состава: V – о-в Рикорда)

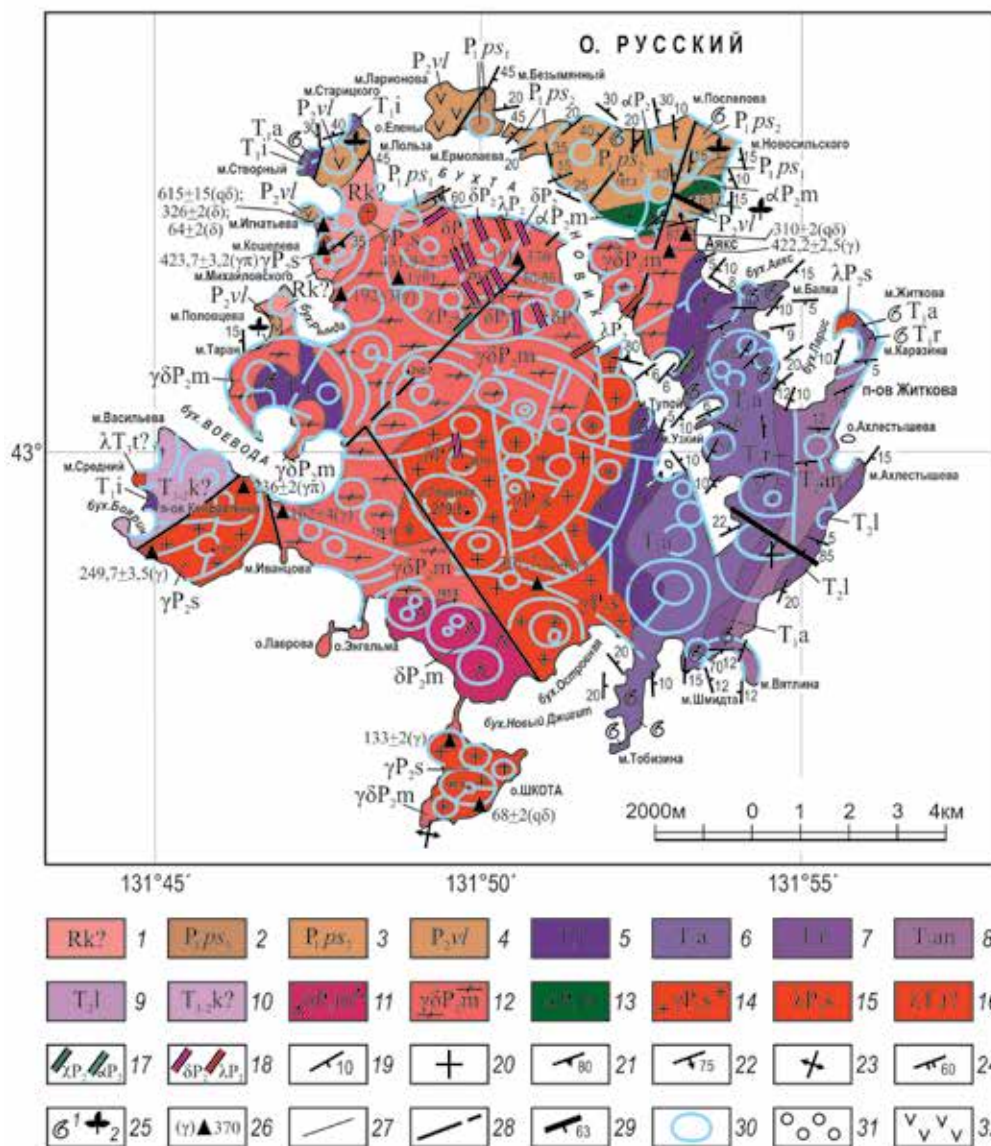


Рис. 2. Геологическая карта о-ва Русский с данными дешифрирования крупномасштабных космofотоснимков (Google Maps) [1]. 1 – верхний рифей? Кубанский комплекс: амфиболиты, кристаллические сланцы; 2–4 – пермская система. Нижний–средний отделы (2, 3). Болорский–кубергандинский ярусы. Поспеловская свита: нижняя подсвита (2): песчаники, алевролиты, сланцы; верхняя подсвита (3): туфопесчаники, сланцы, базальты, андезиты, риолиты. Верхний отдел (4). Мургабский ярус. Владивостокская свита: андезиты, спилиты, базальты, дациты, риолиты, песчаники, алевролиты; 5–10 – триасовая система. 5 – индский ярус: конгломераты, песчаники, ракушники. 6, 7 – оленекский ярус: 6 – аякский подъярус (*Hedenstroemia bosphorensis* Zone – *Anasibirites nevolini* Zone – *Trolites amphistephanites* Zone): песчаники, алевролиты, ракушники; 7 – русский подъярус (*Neocolumbites insignis* Zone – *Subcolumbites multiformis* Zone): аргиллиты, песчаники. 8 – анизийский ярус (*Ussuriphyllites amuriensis* Zone – *Leiophyllites pradyumna* Zone): аргиллиты, песчаники, ракушники. 9 – ладинский ярус, верхний подъярус: алевролиты, песчаники, туфопесчаники. 10 – нижний–средний триас нерасчлененный: толща кремней, известняков, алевролитов, песчаников, базальтов, туфоконгломератов; 11–13 – позднепермский муравьевский комплекс: диориты (11), гранодиориты (12), андезитовые порфиры (13); 14, 15 – седанкинский комплекс: граниты, сиениты (14) и риолиты (15); 16 – тальминский субвулканический комплекс: граниты, риолиты; 17, 18 – позднепермские дайки: 17 – спессартиты (χP_2) и андезитовые порфиры (αP_2), 18 – диоритовые порфиры

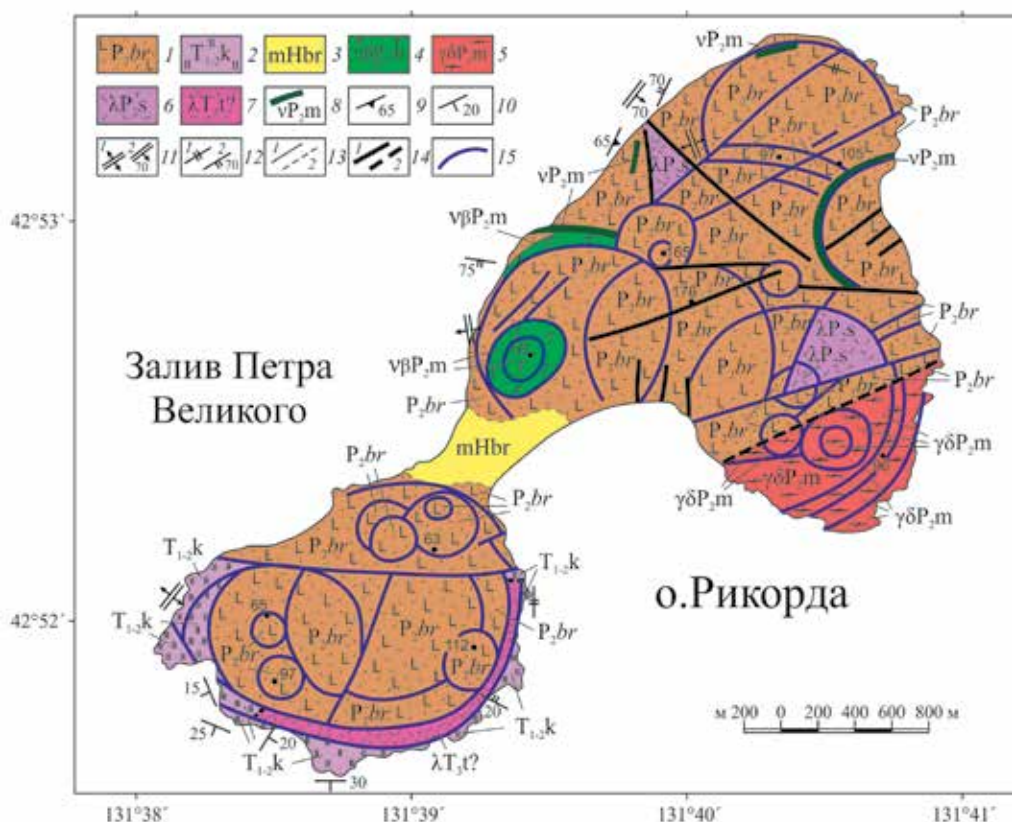


Рис. 3. Геологическая карта о-ва Рикорда с данными дешифрирования крупномасштабных космофотоснимков (Google Maps) [1].

1 – верхнепермская система, верхний отдел, чандалазский горизонт. Барабашская свита: базальты, долериты; 2 – триасовая система. Нижний–средний отделы нерасчлененные: толща кремней, известняков, алевролитов, песчаников, базальтов, туфоконгломератов; 3 – четвертичная система. Голцен. Южноприморский горизонт: барабашевские слои (атлантический период). Морские образования прибрежной зоны шельфа: галечники, пески, глины, алевроиты, торф; 4, 5 – муравьевский интрузивный комплекс (4 – габбро, 5 – гранодиориты и граниты позднепермские); 6 – седанкинский субвулканический комплекс: риолиты позднепермские; 7 – тальминский субвулканический комплекс: риолиты и гранит-порфиры – субвулканы и интрузии поздне триасовые (?); 8 – дайки габбро-долеритов позднепермские с неустановленными элементами залегания; 9 – элементы залегания флюидалности; 10 – элементы залегания пластов: наклонное залегание; 11 – элементы залегания зон дробления и милонитизации (1 – вертикальных, 2 – наклонных); 12 – элементы залегания зон интенсивной параллельной трещиноватости (1 – вертикальных, 2 – наклонных); 13 – геологические границы (1 – установленные, 2 – предполагаемые); 14 – разломы (1 – установленные, 2 – предполагаемые); 15 – линсаменты, отдешифрированные на крупномасштабных космофотоснимках (Google Maps)

(δP₂) и риолиты (λP₂); 19–24 – элементы залегания: пластов – наклонное (19) и горизонтальное (20); полосчатости (21), интрузивных контактов – наклонное (22) и вертикальное (23), повышенной параллельной трещиноватости (24); 25 – места находок фауны (1) и флоры (2); 26 – данные определения абсолютного возраста пород (породы: қδ – кварцевые диориты, δ – диориты, γ – граниты, γп – гранит-порфиры); 27 – геологические границы установленные; 28 – разломы установленные и предполагаемые; 29 – разломы с установленным направлением падения поверхности сместителя; 30 – линсаменты, отдешифрированные на крупномасштабных космофотоснимках (Google Maps); 31 – конгломераты; 32 – андезиты

и повышенной параллельной трещиноватости пород [1 и др.]. Рассматриваемые образования четко проявляются в рельефе, отражаются на космофотоснимках и представляют собой типичные кольцевые, а возможно, и реликты вихревых морфоструктур. В этом плане примечательно, что И.В. Мелекесцев [22], анализируя гипсометрические, геоморфологические и геологические карты, а также космические снимки, выдвинул вихревую вулканическую гипотезу, согласно которой литосферные вихри, проявленные в рельефе, отражают глубинные «циклоны» и «антициклоны» (структуры всасывания и нагнетания). Вероятно, «восходящие» вихри являются структурами растяжения – в них затягиваются и выводятся на поверхность мантийные массы; в «нисходящих» вихрях происходит сжатие – скручивание и нагнетание корового вещества, которое транспортируется в нижние слои литосферы.

Как считает Н.А. Шилов [19], для геологических процессов весьма характерны вихри и спирали. С момента возникновения Земли в ней, по-видимому, происходила плотностная конвекция мантийного вещества [23, 24], а в связи с вращением планеты могли формироваться спиральные вихри – «циклонические» в зонах восходящих потоков и «антициклонические» в зонах нисходящих.

Таким образом, в генезисе рассматриваемых структур участвуют как вертикальные, так и горизонтальные тектонические движения. Ярким примером данных образований являются описанные нами так называемые комбинированные структуры [2, 3], которые возникли в результате сочетания сдвиговых дислокаций, вулканотектонических проседаний (cauldron subsidence) и поднятий. К подобным вихревым (спиралевидным) структурам относится Южно-Синегорская тектоносферная воронка с телескопированным строением и многофазным развитием магматизма. Она близка к типу вихревых структур или структур вращения, выделенных Ли-Сы-гуаном [25] в Северо-Западном Китае.

Наиболее крупный из островов рассматриваемой сдвиговой зоны – Русский (рис. 1, 2) – по существу представляет собой ярко выраженную крупную морфоструктуру центрального типа с вихревыми линеаментами. Основная его часть сложена гранитоидами муравьевского и седанкинского комплексов. В ее пределах выделяются многочисленные кольцевые линеаменты разных порядков, которые подчеркиваются залеганием магматической полосчатости, интрузивных контактов, зон повышенной параллельной трещиноватости во вмещающих породах и др. В поле развития ниже-верхнепермской поспеловской свиты на космофотоснимках также отдешифрованы кольцевые линеаменты, подчеркивающиеся элементами залегания слоистости. По-видимому, они свидетельствуют о наличии на глубине позднепермских интрузивных массивов. Примечательно, что аналогичные линеаменты установлены и в восточной части острова, где выходят пологозалегающие платформенные триасовые отложения. В данном случае мы, вероятно, имеем дело с магматогенными структурами центрального типа, «просвечивающими» сквозь чехольный комплекс. Об их присутствии на глубине говорят характерные близширотные развороты элементов залегания слоистости в триасовой толще, для которой характерно близмеридиональное простирание. Таким образом, о-в Русский является, вероятно, многофазным интрузивным куполом, частично перекрытым триасовым чехлом.

На о-ве Рикорда четко выделяются 4 морфоструктуры первого порядка и ряд локальных морфоструктур (рис. 3). Самая крупная из них представляет южную часть острова. Кольцевые линеаменты подчеркиваются дайками (в том числе

протяженными) позднепермских габбро (vP_2m), габбро-долеритов ($v\beta P_2m$), поздне-триасовых риолитов ($\lambda T_3t?$), разрывными нарушениями, зонами дробления и милонитизации, а также зонами повышенной параллельной трещиноватости пород. Для выходов позднепермских гранодиоритов ($\gamma\delta P_2m$) и габбро-долеритов ($v\beta P_2m$) характерна округлая форма. Судя по тому, что остров сложен в основном барабашской свитой, можно полагать, что кольцевые морфоструктуры здесь отражают вулканотектонические сооружения типа кальдер проседания, типичные для Западно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса [3].

Судя по рассмотренным выше геофизическим данным, в области, охватывающей п-ов Муравьев-Амурский и острова зал. Петра Великого, выделяется ряд крупных интрузивных куполов, по существу представляющих собой мигрировавшие в верхние части земной коры магматические очаги. Формирование этих структур тесно связано с заложением региональных магмоконтролирующих разломов северо-восточного (тихоокеанская система) простирания левосдвигового типа, ярко проявленных в Южном Приморье [2, 20] и фрагментарно прослеживающихся по дну зал. Петра Великого. Таким образом, можно полагать, что вся гряда островов, простирающаяся в юго-западном направлении от п-ова Муравьев-Амурский, представляет собой реликты крупных морфоструктур центрального типа.

Проведенное [26, 27] механико-математическое моделирование механизма вертикальных движений масс астеносферы – литосферных вихрей (расчет в безразмерных координатах) указывает на два возможных сценария: в режиме «купола» и в режиме «прогиба».

В табл. 1 для режима «купола» приведены максимальные и минимальные значения величин модуля скорости $|v|$, среднего давления p , МПа и напряжений τ , МПа, интенсивности напряжений T_u , МПа:

$$|v|=\sqrt{v_{\xi}^2+v_{\eta}^2},\; p=-(t_{\xi\xi}+t_{\eta\eta})/2,\; \tau=\sqrt{(t_{\xi\xi}-t_{\eta\eta})^2+2t_{\xi\eta}^2}/2,\; T_{\xi}=2\sqrt{(t_{\xi\xi}-t_{\eta\eta})^2+3t_{\xi\eta}^2}/3\quad (1)$$

где v_{μ} , v_{ξ} – компоненты скорости; $t_{\xi\xi}, t_{\eta\eta}, t_{\xi\eta}$ – компоненты тензора напряжений.

В режиме «купола» движение масс тектоносферы происходит по схеме конвекции с восходящими потоками в разуплотненной области и нисходящими –

Таблица 1

Расчетные значения параметров режима «купола»

Параметры режима	Верхний слой: –0.025 ≤ η ≤ –0.01		Средний слой: –0.075 ≤ η < –0.025		Нижний слой: –0.01 ≤ η < –0.075	
	min	max	min	max	min	max
$ v_{\xi} ^*$	0.000043	0.041887	0.00022	0.082014	0.000047	0.082010
$ v_{\mu} ^*$	0.000000	0.030866	0.00000	0.066319	0.000000	0.066319
$ v ^*$	0.001918	0.043142	0.001918	0.082198	0.005982	0.082198
p , МПа	–0.513445	0.454334	–4.433470	4.302860	–4.433470	4.302860
τ , МПа	0.046521	0.515545	0.000000	5.618020	0.000000	5.618020
T_u , МПа	0.075968	0.840851	0.000000	7.949950	0.000000	7.949950

*Значения безразмерных параметров скорости и модуля скорости следует считать с коэффициентом 10^{-7} .

у боковых границ конвективной ячейки (рис. 4, верхняя модель). Векторное поле распределения градиентов интенсивности напряжений характеризует взаимодействие среднего разуплотненного слоя с пониженной вязкостью с нижним и верхним вязкожесткими слоями. На границах раздела слоев выражена тенденция к усилению поля напряжений, градиенты интенсивности достигают максимальных значений 486.406 МПа. Всплывание разуплотненного вещества вызывает поднятие верхнего слоя («штампованная» складчатость «жесткой» коры), а также восходящий поток вещества нижнего слоя. Максимальные значения параметров напряженного состояния достигаются в среднем и нижнем слоях, но основное действие развивается в среднем слое и проявляется в верхнем слое. В среднем слое проявляется совокупное взаимодействие разуплотнения и пониженной вязкости, которое обеспечивает активный геодинамический процесс. В краевых частях конвективной ячейки происходит компенсационное оседание среды.

Максимальные и минимальные значения величин модуля скорости $|v|$, среднего давления p , МПа и напряжений τ , МПа, интенсивности напряжений T_u , МПа (1) режима «прогиба» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения параметров режима «прогиба»

Параметры режима	Верхний слой $-0.025 \leq \eta \leq -0.01$		Средний слой $-0.075 \leq \eta < -0.025$		Нижний слой $-0.01 \leq \eta < -0.075$	
	min	max	min	max	min	max
$ v_\varepsilon ^*$	0.000000	0.235865	0.000000	0.235865	0.000000	0.136993
$ v_\mu ^*$	0.002187	0.309035	0.000097	0.309035	0.000076	0.204895
$ v ^*$	0.066203	0.323179	0.041536	0.323179	0.032817	0.205662
p , МПа	-2.135140	2.055230	-9.550790	16.834200	-9.550790	16.834200
τ , МПа	0.000000	2.554460	0.000000	16.841900	0.266510	16.841900
T_u , МПа	0.000000	3.914600	0.000000	27.472700	0.376904	27.472700

*Значения безразмерных параметров скорости и модуля скорости следует считать с коэффициентом 10^{-7} .

В режиме «прогиба» (при условии охлаждения в верхних горизонтах и изменения вязкости по глубине) разуплотненное вещество растекается под перекрывающим его более вязким верхним слоем, вызывая его утонение и проседание свободной верхней границы (рис. 4, нижняя модель). Распределение изолиний интенсивности напряжений моделирует тенденцию к проседанию границы и прилегающей части верхнего слоя. Выражена зона центрального погружения над областью максимального разуплотнения среднего слоя, которой отвечает за перераспределение напряжений. Режим «прогиба» является естественным в поле силы тяжести и происходит быстрее в масштабах геологического времени.

Тектоническая позиция данного региона определяется тем, что островные территории зал. Петра Великого, сложенные преимущественно позднепермскими магматитами, представляют собой своеобразную локальную вулканогенно-интрузивную зону Южного звена Западно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, которая заложена на границе континентального и океанического блоков земной коры [3, 4, 9] и подвергнута мощным левосдвиговым деформациям.

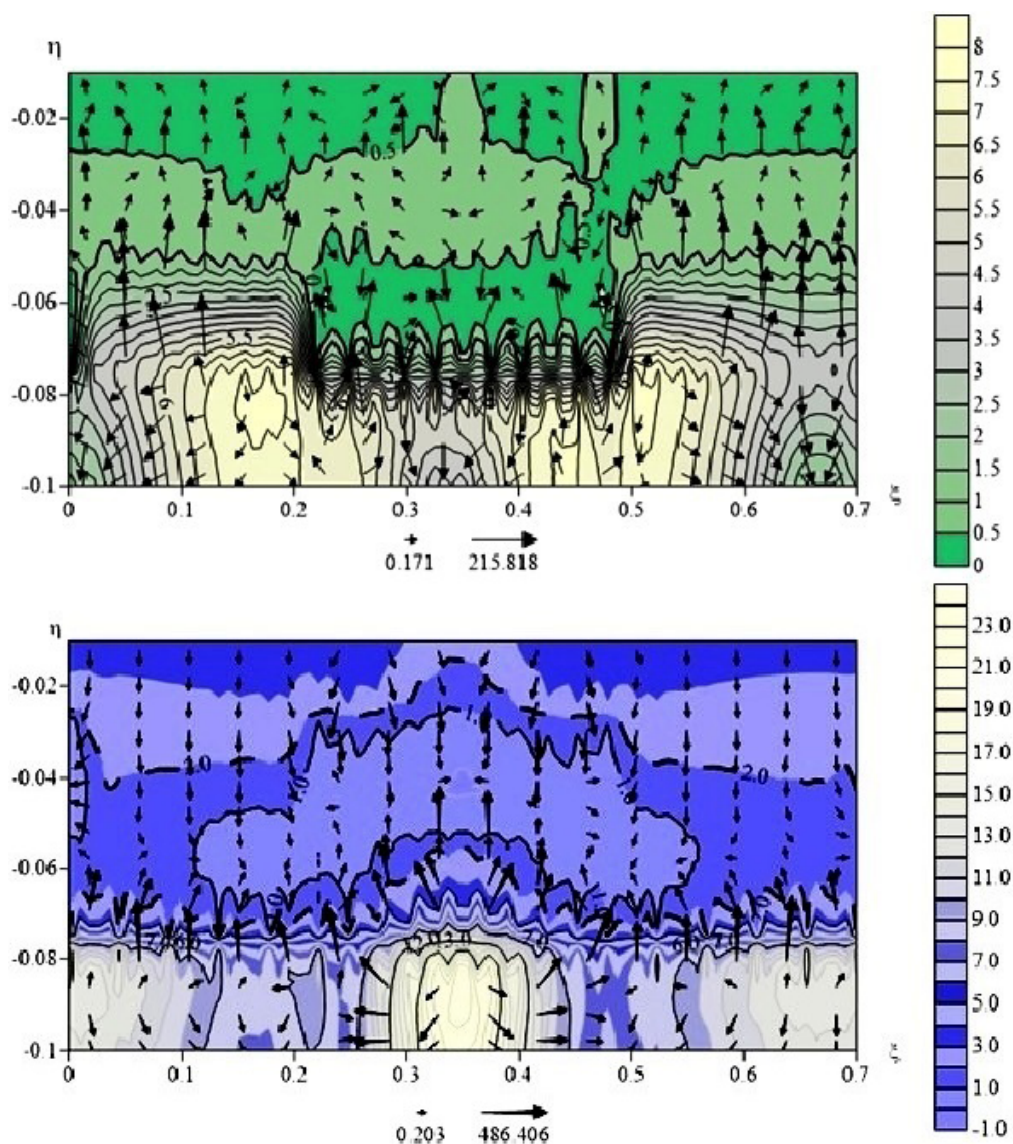


Рис. 4. Модель инверсии тектонического течения разуплотненного вещества тектоносферы Западно-Тихоокеанской зоны перехода в режимах «купола» (верхний график) и «прогиба» (нижний график) [26, 27]. Численно-графический анализ выполнен в безразмерных координатах ξ и η для прямоугольной области с размерами горизонтали 3000 км ($0 \leq \xi \leq 0.7$ (0, 3000 км)) и вертикали 420 км ($-0.01 \leq \eta \leq -0.1$ (0, 420 км)). Начиная с верхней заданные границы раздела слоев в безразмерных величинах: $\eta = -0.01$ (–42 км), $\eta = -0.025$ (–105 км), $\eta = -0.075$ (–315 км), $\eta = -0.1$ (–420 км). В режиме «купола» («подъем» вещественных масс) легенда значений и контурный график изолиний интенсивности напряжений в интервале (0.0 МПа, 8.0 МПа), векторный график распределения градиентов интенсивности напряжений в интервале (0.171 МПа, 215.818 МПа). В режиме «прогиба» («погружение» масс) легенда значений и контурный график изолиний интенсивности напряжений в интервале (–1.0 МПа, 23.0 МПа), векторный график распределения градиентов интенсивности напряжений в интервале (0.203 МПа, 486.406 МПа)

Заключение

В результате проведения авторами в зал. Петра Великого на гряде островов Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда крупномасштабного геологического картирования с применением линеаментного анализа были составлены космогеологические карты этих территорий. На основе геологического дешифрирования крупномасштабных космофотоснимков зал. Петра Великого с высокой степенью разрешения (Google Maps) выявлены многочисленные структуры центрального типа различного генезиса (вулканотектонические депрессии, интрузивные купола и др.).

Исследованные острова располагаются в пределах мощной левосдвиговой зоны с длительной историей развития, охватывающей позднепермский и мезозойский этапы. В ней четко выделяются структуры центрального типа, которые, вероятно, являются переработанными многократными тектоническими движениями вихревыми образованиями и представляют собой результат распада тектонических вихрей. Линеаменты вихревых структур отмечаются на геологических картах, схемах геологического дешифрирования космофотоснимков и аномально-го магнитного поля островов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Изосов Л.А., Крамчанин К.Ю., Ли Н.С., Огородний А.А. Позднепермские кольцевые структуры островов залива Петра Великого (Японское море) // *Отечествен. геология*. 2017. № 2. С. 51–58.
2. Изосов Л.А., Коновалов Ю.И., Емельянова Т.А. Проблемы геологии и алмазоносности зоны перехода континент–океан. Япономорский и Желтоморский регионы. Владивосток: Дальнаука, 2000. 325 с.
3. Изосов Л.А., Коновалов Ю.И. Западно-Сихотэ-Алинский окраинно-континентальный вулканический пояс и его тектоническая позиция в Западно-Тихоокеанской зоне перехода континент–океан. Владивосток: Дальнаука, 2005. 315 с.
4. Изосов Л.А., Бессонова Е.А., Ли Н.С., Огородний А.А., Зверев С.А. Кайнозойские формации залива Петра Великого (Японское море) и его побережья: индикаторы полигенной зоны перехода континент–океан // *Вулканология и сейсмология*. 2015. № 5. С. 23–35.
5. Назаренко Л.Ф., Бажанов В.А. Геология Приморского края. Ч. II. Интрузивные образования. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 28 с. (Препринт).
6. Назаренко Л.Ф., Бажанов В.А. Геология Приморского края. Ч. III. Основные черты тектоники и история развития. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 60 с. (Препринт).
7. Ферштатер Г.Б. Петрология главных магматических ассоциаций. М.: Наука, 1987. 232 с.
8. Валитов М.Г., Кононец С.Н., Кулинич Р.Г. Структурно-плотностные модели земной коры зоны сочленения Центральной котловины с прилегающим континентом // *Дальневосточные моря России*. Кн. 3: Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 53–60.
9. Изосов Л.А., Чупрынин В.И., Ли Н.С., Крамчанин К.Ю., Огородний А.А. Вулканогенные полициклические окраинно-континентальные пояса Япономорского региона: палеозоны перехода континент–океан // *Отечествен. геология*. 2015. № 1. С. 74–81.
10. Бессонова Е.А., Никифоров В.М., Залищак В.Б., Зверев С.А., Емельянова Т.А. Природа магнитных аномалий островов Попова, Рикорда, Рейнеке (залив Петра Великого, Японское море) // *Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря*. М.: ГЕОС, 2008. С. 340–355.
11. Никифоров В.М., Бессонова Е.А. Опыт применения магниторазведки для обнаружения ферромагнитных объектов на акватории залива Петра Великого // *Подвод. исслед. и робототехника*. 2007. № 1 (3). С. 58–65.
12. Gavrilov A.A., Bessonova E.A. The Islands of Peter the Great Bay (the Sea of Japan) as testing area for the integrated geomorphologic and geology-geophysical investigations // *Regularities of the Structure and Evolution of Geospheres – VII: Proc. of VII Internet. Interdisc. Symp. Vladivostok*, 2005. P. 110–115.
13. Гаврилов А.А., Гвоздев В.И. Геологическое строение, развитие и рудная минерализация ряда островов залива Петра Великого (Южное Приморье) // *Отечествен. геология*. 2011. № 3. С. 61–70.

14. Анализ космических снимков при тектономагматических и металлогенических исследованиях / под ред. И.Н. Томсона. М.: Наука, 1979. 164 с.
15. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.
16. Кац Я.Г., Тевелев А.В., Полетаев А.И. Основы космической геологии. М.: Недра, 1988. 236 с.
17. Связь магматизма и эндогенной минерализации с блоковой тектоникой. М.: Недра, 1969. 264 с.
18. Уткин В.П., Неволин П.Л., Митрохин А.Н. Позднепалеозойский и мезозойский планы деформаций Юго-Западного Приморья // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 3–21.
19. Шилов Н.А. О механизме образования Солнечной системы // Тихоокеан. геология. 1982. № 6. С. 20–27.
20. Уткин В.П. Восточно-Азиатская глобальная сдвиговая система, вулканический пояс и окраинные моря // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240, № 2. С. 400–403.
21. Изосов Л.А., Чупрынин В.И., Петрищевский А.М., Емельянова Т.А., Мельниченко Ю.И., Васильева М.А., Ли Н.С. Формирование окраинных морей Тихого океана: следствие сдвиговой неустойчивости и астеносферного диапиризма // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2 (46). С. 85–101. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-85-101.
22. Мелекесцев И.В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125–155.
23. Артюшков Е.В. Дифференциация по плотности вещества Земли и связанные с ней явления // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 5. С. 18–30.
24. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.
25. Ли Сы-гуан. Вихревые и другие проблемы, относящиеся к сочетанию геотектонических систем северо-западного Китая. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 131 с.
26. Осипова Е.Б. Моделирование процесса структурообразования в зонах дифференциации вещества тектоносферы // ГИАБ: Нефть и газ. 2015. Спец. вып. 36. С. 104–113.
27. Osipova E.B., Melnichenko Yu.I., S'edin V.T. Volcanotectonic Deformations and Japan Sea Basin Geodynamics // The 5th PEACE International Ocean Workshop. Sept. 11–12, 2010. Gangneung. Korea: Gangneung-Wonju National University, 2010. P. 227–234.

REFERENCES

1. Izosov L.A., Kramchanin K.Yu., Lee N.S., Ogorodny A.A. Pozdnepermские kol'cevye struktury ostrovov zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more) = [Late Permian ring structures of Peter the Great Bay islands (Sea of Japan)]. *Otechestvennaya Geologiya*. 2017;(2):51-58. (In Russ.).
2. Izosov L.A., Kononov Yu.I., Emelyanova T.A. Problemy geologii i almazonosnosti zony perekhoda kontinent-ocean. Yaponomorskij i Zheltomorskij regiony = [Problems of geology and diamond potential of the continent-ocean transition zone. Regions of the Japan and Yellow Seas]. Vladivostok: Dalnauka; 2000. 325 s. (In Russ.).
3. Izosov L.A., Kononov Yu.I. Zapadno-Sihote-Alinskij okrainno-kontinental'nyj vulkanicheskij pojas i ego tektonicheskaya poziciya v Zapadno-Tihookeanskoj zone perekhoda kontinent-ocean = [West Sikhote-Alin marginal continental volcanic belt and its tectonic position in the West Pacific continent-ocean transition zone]. Vladivostok: Dalnauka; 2005. 315 s. (In Russ.).
4. Izosov L.A., Bessonova E.A., Li N.S., Ogorodnii A.A., Zverev S.A. The Cenozoic Formations in the Peter the Great Gulf, Japan Sea and on its Shores: Indicators of a Polygenic Continentframe – Ocean Transition Zone. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2015;9(5):307-318. DOI: 10.1134/S074204631505005X.
5. Nazarenko L.F., Bazhanov V.A. Geologiya Primorskogo kraya. Ch. II. Intruzivnye obrazovaniya = [The Geology of Primorsky Krai. Part II. Intrusive Features]. Preprint. Vladivostok: DVNTs, 1987. 28 s. (In Russ.).
6. Nazarenko L.F., Bazhanov V.A. Geologiya Primorskogo kraya. Ch. III. Osnovnye cherty tektoniki i istoriya razvitiya = [The Geology of Primorsky Krai. Part III. Basic Tectonics and Evolution]. Preprint. Vladivostok: DVNTs; 1987. 60 s. (In Russ.).
7. Fershtater G.B. Petrologiya glavnyh magmaticheskikh asociacij = [Petrology of the main intrusive associations]. М.: Nauka; 1987. 232 s. (In Russ.).
8. Valitov M.G., Kononets S.N., Kulinich R.G. Strukturno-plotnostnye modeli zemnoj kory zony sochleneniya Central'noj kotloviny s prilgayushchim kontinentom = [Density models of the Earth's crust

- of the transition zone between the Japan Basin and neighboring continent]. In: *Dal'nevostochnye morya Rossii. Kn. 3: Geologicheskie i geofizicheskie issledovaniya*. M.: Nauka; 2007. S. 53-60. (In Russ.).
9. Izosov L.A., Chuprynin V.I., Lee N.S., Kramchanin K.Yu., Ogorodny A.A. Vulkanogennyye policiklicheskie okrainno-kontinental'nye poyasa Yaponomorskogo regiona: paleozony perekhoda continent-ocean = [Volcanogenic polycyclic Margin-Continental Belts of Japan Sea Region: Continent-Ocean paleozones]. *Otechestvennaya Geologiya*. 2015;(1):74-81. (In Russ.).
10. Bessonova E.A., Nikiforov V.M., Zalishchak V.B., Zverev S.A., Emelyanova T.A. Priroda magnitnykh anomalij ostrovov Popova, Rikorda, Rejneke (zaliv Petra Velikogo, Yaponskoe more) = [The nature of magnetic anomalies of Popov Island, Rikord Island, Reineke Island (Peter the Great Bay, Sea of Japan)]. In: *Sovremennoe sostoyanie i tendencii izmeneniya prirodnoy sredy zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya*. M.: GEOS; 2008. S. 340-355. (In Russ.).
11. Nikiforov V.M., Bessonova E.A. Opyt primeneniya magnitorazvedki dlya obnaruzheniya ferromagnitnykh ob'ektov na akvatorii zaliva Petra Velikogo = [The use of magnetic prospecting objects in the Peter the Great Gulf]. *Podvodnye Issledovaniya i Robototekhnika*. 2007;1(3):58-65. (In Russ.).
12. Gavrilov A.A., Bessonova E.A. The Islands of Peter the Great Bay (the Sea of Japan) as testing area for the integrated geomorphologic and geology-geophysical investigations. In: *Regularities of the Structure and Evolution of Geospheres – VII. Proceedings of VII Internet. Interdisc. Symp.* Vladivostok; 2005. P. 110-115.
13. Gavrilov A.A., Gvozdev V.I. Geologicheskoe stroenie, razvitie i rudnaya mineralizatsiya ryada ostrovov zaliva Petra Velikogo (Yuzhnoe Primor'ye) = [The geological structure, development and ore mineralization of a number islands of the Peter the Great Bay (South Primorye)]. *Otechestvennaya Geologiya*. 2011;(3):61-70. (In Russ.).
14. Thomson I.N. (ed.). Analiz kosmicheskikh snimkov pri tektonomagmatischeskikh i metallogenicheskikh issledovaniyakh = [Analysis of satellite images during tectonomagmatic and metallogenetic studies]. M.: Nauka; 1979. 164 s. (In Russ.).
15. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Osnovy lineamentnoy tektoniki = [Fundamentals of Lineament Tectonics]. Moskva: Nedra; 1986. 144 s. (In Russ.).
16. Kats Ya.G., Tevelev A.V., Poletaev A.I. Osnovy kosmicheskoy geologii = [Fundamentals of Space Geology]. Moskva: Nedra; 1988. 236 s. (In Russ.).
17. Svyaz' magmatizma i endogennoj mineralizatsii s blokovoy tektonikoy = [The relationship of magmatism and endogenous minerageny with block tectonics]. M.: Nedra; 1969. 264 s. (In Russ.).
18. Utkin V.P., Nevolin P.L., Mitrokhin A.N. Late Paleozoic and Mesozoic Deformations in the Southwestern Primorye Region. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2007;1(4):307-323.
19. Shilo N.A. O mekhanizme obrazovaniya Solnechnoy sistemy = [On the mechanism of the Solar System formation]. *Tihoookeanskaya geologiya*. 1982;6:20-27. (In Russ.).
20. Utkin V.P. Vostochno-Aziatskaya global'naya sdvigovaya sistema, vulkanicheskij poyas i okrainnye morya = [East Asian global shear zone, volcanic belt, and marginal seas]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1978;240(2):400-403. (In Russ.).
21. Izosov L.A., Chuprynin V.I., Petrishchevsky A.M., Emelyanova T.A., Melnichenko Yu.I., Vasilyeva M.A., Lee N.S. Formirovanie okrainnykh morej Tihogo okeana: sledstvie sdvigovoy neustojchivosti i astenosfernogo diapirizma = [Formation of marginal seas of the Pacific Ocean: a consequence of shear instability and asthenospheric diapirism]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2020;2(46):85-101. (In Russ.).
22. Melekestsev I.V. Vihrevaya vulkanicheskaya gipoteza i nekotorye perspektivy eyo primeneniya = [Vortex volcanic hypothesis and some prospects of its application]. In: *Problemy glubinnogo vulkanizma*. M.: Nauka; 1979. S. 125-155. (In Russ.).
23. Artyushkov E.V. Differenciatsiya po plotnosti veshchestva Zemli i svyazannyye s nej yavleniya = [Earth's matter density differentiation and the associated phenomena]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*. 1970;5:18-30. (In Russ.).
24. Sorohtin O.G. Global'naya evolyutsiya Zemli = [Global evolution of the Earth]. M.: Nauka; 1974. 184 s. (In Russ.).
25. Li Siguang. Vihrevye i drugie problemy, otnosyashchiesya k sochetaniyu geotektonicheskikh sistem severo-zapadnogo Kitaya = [Vortex and other problems related to the combination of geotectonic systems of northwestern China]. Moskva: Gosgeoltekhizdat; 1958. 131 s. (In Russ.).
26. Osipova E.B. Modelirovanie processa strukturoobrazovaniya v zonakh differentsiatsii veshchestva tektonosfery = [Modeling the structure of structure formation in the differentiation zones of the substance of the Tektonosphere]. *GLAB: Neft' i Gaz*. 2015;Spets.vyp. 36:104-113. (In Russ.).
27. Osipova E.B., Melnichenko Yu.I., S'edin V.T. Volcanotectonic Deformations and Japan Sea Basin Geodynamics. In: *The 5th PEACE International Ocean Workshop*. Sept. 11–12, 2010. Gangneung, Korea: Gangneung-Wonju National University; 2010. P. 227-234.