

УДК 551.432.7 (787)

© 2019 г. И.В. МЕЛЕКЕСЦЕВ

ИНВЕРСИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ КАЛЬДЕРНОГО КОМПЛЕКСА И ПЛЕЙСТОЦЕНОВОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ “ОТМЕНИЛИ” ОЖИДАЕМОЕ СУПЕРИЗВЕРЖЕНИЕ СУПЕРВУЛКАНА ЙЕЛЛОУСТОН (США)

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
E-mail: dirksen@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 27.06.2018

После доработки 11.10.2018

Принята к печати 18.12.2018

Проведенный автором критический анализ существующих реконструкций истории эруптивной активности Йеллоустонского кальдерного комплекса (ЙКК) в США показал, что будущего “суперизвержения супервулкана Йеллоустон” в ближайшие сотни — тысячи лет там не случится. Во-первых, из-за ослабления в течение 2 млн. лет активной жизни ЙКК вулканического потенциала источника его магматического питания, который по своим характеристикам является фронтальной лопастью магматического суперпотока, а не мантийным плюмом. Во-вторых, из-за неоднократного оледенения территории в последние 640 тыс. лет. И, наконец, в связи с тем, что энергетический и весовой эквивалент суперизвержения уже случился, закончившись около 70 тыс. л. н., а ЙКК перешел после него из вулканической стадии развития в гидротермальную.

Ключевые слова: супервулкан Йеллоустон, суперизвержение, кальдера, гидротермальная система, плейстоценовое оледенение.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019218-36>

THE EXPECTED FUTURE SUPER-ERUPTION OF THE YELLOWSTONE SUPERVOLCANO (USA) IS “CANCELLED” BY THE PLEISTOCENE GLACIATION AND BY THE INVERSION OF CALDERA COMPLEX DEVELOPMENT

I.V. MELEKESTSEV

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
E-mail: dirksen@kscnet.ru*

Received 27.06.2018

Revised 11.10.2018

Accepted 18.12.2018

The review of the reconstructions of the eruptive activity of the Yellowstone Caldera Complex (YCC) in the USA allows to suggest three groups of arguments supporting that the “volcanic super-eruption of Yellowstone” is not likely to occur in the coming hundreds or thousands of years. First is the gradual weakening of the volcanic potential of the magmatic source (which is the frontal lobe of the magmatic super-flow, and not the mantle plume) during the last 2 million years. Second is the impact of the repeated occurrence of ice sheets in the YCC area during the past 640 thousand years. Finally, the equivalent super-eruption, in terms of energy released and the mass of exploded material, had already occurred at about 70 thousand years ago, and since that time, the YCC has passed from the volcanic to the hydrothermal evolutionary stage.

Keywords: super volcano Yellowstone, supervolcanic eruption, caldera, hydrothermal structure, ice sheet.

Введение

В конце XX — начале XXI вв. один из самых посещаемых туристических объектов в мире — Йеллоустонский национальный парк (ЙНП) в США — стал привлекать пристальное внимание мировой общественности как потенциальный источник глобальной опасности. “Вулкан, который нас убьет... Однажды он проснется, и жизнь на планете Земля закончится”, — писали в научно-популярных журналах [1, с. 99]. И далее: американский “супервулкан Йеллоустон” выбросит тысячи кубических километров пепла, который покроет мощным слоем большую часть территории США, а попавший в стратосферу тонкий пепел приведет к глобальному похолоданию — аналогу ядерной зимы. Из-за всеобщей загрязненности атмосферы перестанут летать самолеты, а из-за холода погибнут урожаи. И эта вселенская катастрофа вот-вот случится.

Не исключено, что подобная проблема “тревожного ожидания катастрофы” возникла из-за неожиданных и непредсказанных катастрофических эксплозивных извержений вулканов Сент-Хеленс (1980 г., США), Пинатубо (1991 г., Филиппины), Хадсон (1991 г., Чили). В качестве доказательства реальности такого “суперизвержения” вулкана Йеллоустон приводятся следующие аргументы. Во-первых, установлено, что подобные извержения с катастрофическими последствиями здесь уже трижды происходили с периодичностью в 0.7 млн. лет (около 2.0, 1.3 и 0.64 млн. л. н.) [2], а со времени последнего события прошло >0.64 млн. лет. Во-вторых, в пределах ЙНП с 1923 г. наблюдались и измерялись интенсивные деформации земной поверхности и сильные (M 5.5–7.5) землетрясения [3–5]; есть сведения и о том, что крупные животные уже покидают этот район. По словам сотрудника ЙНП Х. Хисслера [1], наблюдения и измерения подтверждают следующие признаки приближающейся катастрофы: появление новых гейзеров, подъем земной поверхности, рост сейсмичности. Кроме того, там же приводится и еще один тревожный сигнал: по данным сейсмической томографии под кальдерой обнаружен частично расплавленный гигантский магматический очаг объемом ~4000 км³ (уточнение А. Уитце [1]).

На основании приведенных данных многими делается вывод, что период покоя в ЙКК заканчивается, и начинается подготовка следующего извержения. Животные, якобы, почувствовав опасность, первыми стали отсюда уходить, за ними последовали и некоторые люди. На первый взгляд, приведенные доводы в пользу предстоящего скорого суперизвержения выглядят довольно убедительными, однако, если учитывать и другие факторы, они не столь однозначны. Чтобы разобраться в сложившейся ситуации, автор статьи на основе собственного анализа материалов американских геологов и вулканологов района ЙНП и его окрестностей провел новое исследование этой проблемы.

Опираясь на собственный опыт и результаты многолетних работ [6–9 и др.] Лаборатории динамической вулканологии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по долгосрочному прогнозу будущих катастрофических эксплозивных извержений, автор критически проанализировал материалы и аргументацию американских вулканологов. Прежде всего, необходимо было ответить на два вопроса: состоится ли такое извержение и, если да, то когда? Требовалось установить, что собой представляет Йеллоустон: его структурную приуроченность, происхождение, источник питания, тип кальдерообразования. Какова его геологическая, геоморфологическая, вулканическая история развития с момента возникновения. При решении перечисленных задач пришлось пересмотреть ряд представлений и выводов американских ученых, а от некоторых отказаться вовсе. Наше исследование показало, что дальнейшее развитие событий в ЙКК может произойти по другому сценарию, без обязательного катастрофического эксплозивного суперизвержения.

Что такое Йеллоустон?

Район истока р. Йеллоустон (правый приток р. Миссури), как природный феномен с большим количеством гейзеров и горячих источников, стал известен трапперам с начала XIX в. В 1872 г. по результатам исследования этих уникальных объектов Ф. В. Хайденом [10] здесь был создан первый в мире национальный парк площадью ~9100 км². В конце XIX — начале XX вв. этот регион стал уже хорошо изученным: была восстановлена его геологическая история, определены примерный возраст изверженных пород, происхождение термальных вод, описаны геология, петрография и палеонтология геологических образований [11–13].

В 1960 г. Йеллоустон (синонимы Yellowstone Plateau, Yellowstone Basin) был помещен в каталог активных вулканов Мира [14] как гидротермальный район без современной вулканической активности, послеледниковых лавовых потоков и пирокластических образований. Слагающие его риолитовые лавовые потоки, брекчии и туфы отнесены к плиоцену и к миоцену. Проведены химические анализы вулканических пород кислого состава (SiO₂ от 70.92 до 77.65%), изучена их петрография. Измерена площадь распространения спекшихся туфов (1560 км²), оценена их средняя мощность (около 150 м), описан типичный разрез. Выявлены редкие небольшие базальтовые лавовые потоки, внедренные в толщу риолитов; причем объем лав не превышал 1% от объема толщи. Однако в целом, на конец 50-х гг. XX в. изучение проблем вулканологии в ЙНП находилось еще на начальном этапе: список цитированных научных работ включал всего 9 названий, из которых две публикации были посвящены горячим источникам и термальным водам. Ни о каких суперизвержениях и супервулкане вопрос не возникал.

Ситуация кардинально изменилась после проведения там детальных геологических полевых работ и разномасштабного (1:62 500–1:500 000) геологического картирования в 1970–1980-х гг. [3], выполнявшихся Ф. Р. Бойдом (F. R. Void), В. Хэмилтоном (W. Hamilton), Р. Л. Кристиансеном (R. L. Christiansen), Х. Р. Бланком младшим (H. R. Blanc, Jr.), В. Хилдретом (Wes Hildreth). Ими в ЙНП выявлены и детально исследованы три огромные кальдеры и коррелятные им вулканы, закартированы многие десятки других эруптивных центров разного типа и возраста (рис. 1). Для определения вещественного состава пород использовались самые современные аналитические методы, а для выяснения возраста — K/Ar-, ⁴⁰Ar/³⁹Ar- и ¹⁴C-датировки. Глубинное строение ЙНП и его окрестностей всесторонне было изучено геофизическими методами: проводились площадные гравиметрическая и магнитная съемки, измерялись тепловой поток и деформации земной поверхности, фиксировались сейсмические проявления. Детально реконструирована здесь и история кайнозойской вулканической активности. В результате, к настоящему времени этот регион

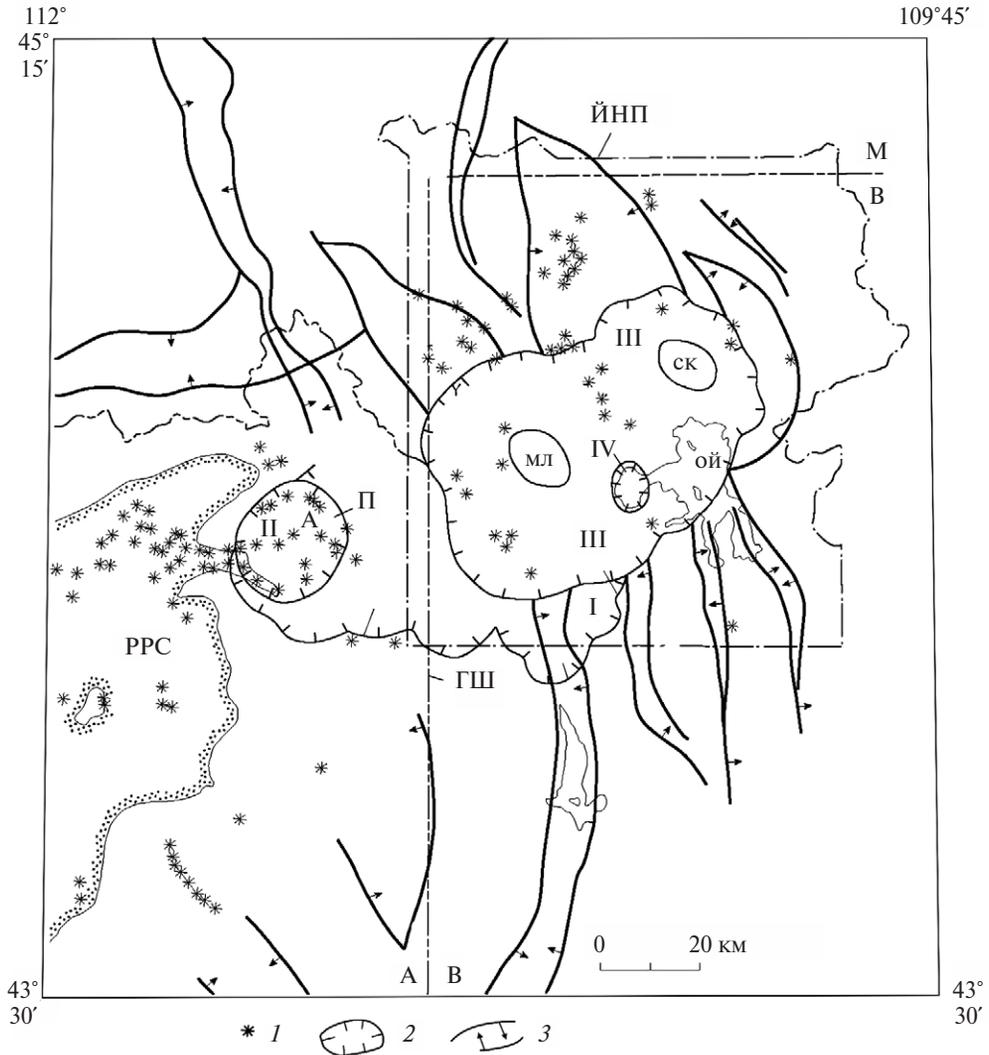


Рис. 1. Эруптивные центры и разрывные нарушения района Йеллоустонского кальдерного комплекса (по [3] с изменениями)

1 — эруптивные центры разных типов и возраста; 2 — бровки уступов кальдер (I (безымянной) — 2.053 ± 0.06 млн. лет, II Хенрис Форк (Айленд Парк) — 1.292 ± 0.005 млн. лет, III Йеллоустон — 0.64 ± 0.002 млн. лет, IV Вест Там — 0.162 ± 0.002 млн. лет); 3 — главные разрывные нарушения позднего миоцена (стрелки показывают опущенные блоки).

МЛ и СК — резургентные купола Маллард Лейк и Соу Крик; ОЙ — оз. Йеллоустон; РРС — равнина р. Снейк (линия с точками оконтуривает распространение базальтовых лав); ЙНП — граница Йеллоустонского национального парка; ГШ — граница штатов Айдахо (А), Вайоминг (В), Монтана (М); АП — Айленд Парк

в геологическом, геоморфологическом, геофизическом, геодезическом и палеовулканологическом отношении оказался одним из самых изученных в мире. Ему посвящены более 1000 научных публикаций, включая монографии. Но вулканической опасности здесь до начала 80-х гг. XX в. внимания почти не уделялось.

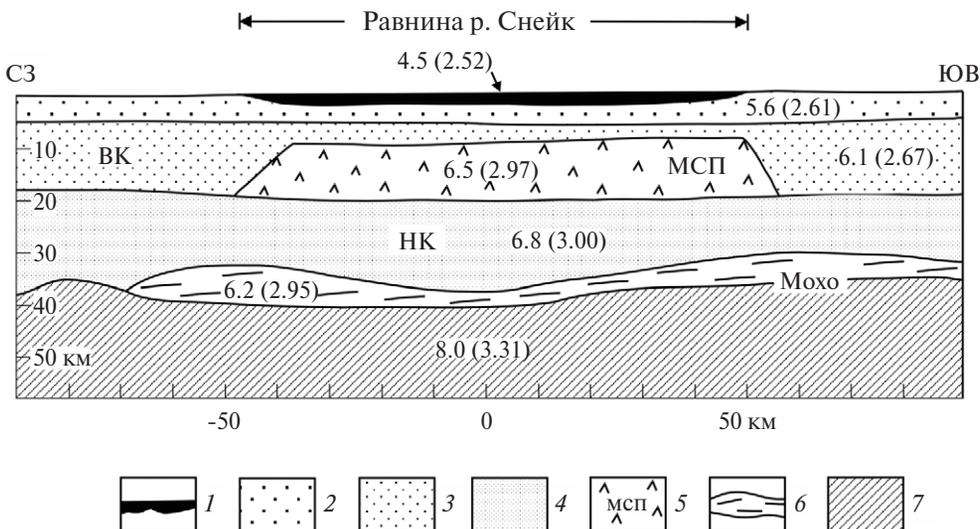


Рис. 2. Геофизический поперечный профиль через восточную часть Равнины р. Снейк (по [16, 28, 29] с изменениями)

1 — базальты (мощность ~1 км) и подстилающие риолиты (до 2–3 км) плиоцена-плейстоцена; 2 — палеозойско-мезозойские породы; коровый слой: 3 — верхний (БК), 4 — нижний (НК); 5 — породы магматического суперпотока (МСП — по И. В. Мелекесцеву); 6 — астеносферный слой; 7 — мантия. Цифрами обозначены: V_p (км/с), в скобках — плотность, г/см³

Впервые предположение об извержении “...по порядку магнитуды больше, чем извержение вулкана Мазама” в ЙНП было высказано в 1984 г. на 27-м Международном Геологическом конгрессе [2, с. 84]. Очередной этап повышенного внимания к подобному извержению наступил сейчас, когда это стало широко обсуждаться в средствах массовой информации.

Рельеф ЙНП — высокогорный, доминируют абс. отметки 2500–2900 м, отдельные вершины достигают 4000 м. Геологическое строение, структурная приуроченность и геодинамика района парка отличаются большой сложностью и в некоторых аспектах исследованы недостаточно. Лучше других изучены геоморфология, геология и геофизика Йеллоустонского кальдерного комплекса, а также восточной части Равнины р. Снейк (РРС — Eastern Snake River Plain). Древнейшие здесь — породы докембрийского кратона (1.9–3.3 млрд лет [15]), которые участвуют в строении архейской гранитной коры — верхней (V_p — сейсмическая скорость распространения продольных волн — 6.1 км/с, плотность 2.67 г/см³) и нижней (V_p 6.8 км/с, плотность 3 г/см³). Граница между ними предполагается на глубине ~18 км под Равниной р. Снейк и ~14 км — под кальдерой Йеллоустон. Вдоль осевой зоны РРС по геофизическим данным выделен (рис. 2) и промежуточный слой с V_p 6.8 км/с и плотностью 2.87 г/см³ [16, 17]. Выше залегают сложно построенные палеозойско-мезойские толщи. Дотретичные кристаллические и осадочные породы, а также третичные андезитовые вулканиты слагают горные гряды и массивы по периметру ЙКК. Нижняя часть разреза отложений СВ фрагмента РРС на границе с ЙНП представлена позднемiocеновыми и плиоценовыми риолитами мощностью 3–4 км, а верхняя — вулканитами основного состава (с доминированием базальтов) возрастом от 5 млн. до 14 тыс. лет и мощностью до 1–1.2 км [16].

Горные массивы Йеллоустона и прилегающих территорий разбиты на сложно построенную систему горстов и грабенов густой сеткой разрывных нарушений субширотных, субмеридиональных и СЗ простираний. Вулканические образования ЙНП

и СВ окончания РРС по отношению к этим структурам — более молодые и имеют наложенный характер. Огромные кальдеры и генетически связанные с ними иные вулканические формы ЙНП и Айленд парка объединены автором статьи в единый долгоживущий вулканический центр — Йеллоустонский кальдерный комплекс, который обладает своей системой вулкано-тектонических разрывных нарушений и структур, связанных с кальдерообразованием и ростом резургентных¹ куполов. В максимальной степени это относится к раньше всех возникшей кальдере I (типа Вэллес — по классификации А. МакБернея и Х. Вильямса — см. [18]). Самые уникальные вулкано-тектонические структуры в кальдере III — появившиеся ~0.5 млн. л. н., осложненные многочисленными разрывными нарушениями выраженные в рельефе резургентные купола Маллард Лейк (Mallard Lake, размер основания 14.5×10 км) и Соу Крик (Sou Creek, 13×9 км) [3, 5].

Доминирующие элементы геоморфологии ЙКК — 4 разновозрастные кальдеры: I (безымянная) — 2.053±0.06, II — Хенрис Форк (Henris Fork) или Айленд парк (Island Park) — 1.292±0.005, III — Йеллоустон — 0.64±0.002 и IV — Вест Там (West Thumb) — 0.162±0.002 млн. лет. Их размеры по бровкам уступов, соответственно, — 100×63 (и 55), 24×21, 73×52 (и 45) и 10.5×7.5 км, а площади — около 4200, 400, 2800 и 64 км² (измерения автора по рис. 5 и 36 в [3]). Кальдеры окружены коррелятными им пирокластическими покровами — туфами Хаклберри Ридж (Huckleberry Ridge Tuff), Меца Фолс (Mesa Falls Tuff), Лава Крик (Lava Creek Tuff), Блаф Пойнт (Tuff of Bluff Point). Обширные площади заняты мощными лавовыми потоками риолитов, а в ЮЗ части — базальтов. В настоящее время площадь плато Йеллоустон ~6500 км². По реконструкции [3], ранее она составляла ~17000 км².

По результатам детальных геофизических исследований и проведенного бурения составлены несколько моделей глубинного строения кальдеры Йеллоустон и всего комплекса, определены физические параметры пород внутрикальдерного заполнения, измерены температуры и их изменение с глубиной. Составлена карта гравитационных аномалий кальдеры и сопредельных участков с минимальными значениями аномалий (до 250 мгал) внутри самой кальдеры [3, 19 и др.].

Несмотря на хорошую геологическую и геофизическую изученность региона, обилие гипотез о происхождении и механизме магматического питания ЙКК, единой и общепризнанной точки зрения по этим проблемам до настоящего времени нет. Дискуссионным остается и вопрос о том, смещается ли Йеллоустон или стоит на месте. Правда, в последние десятилетия стала побеждать концепция, по которой Йеллоустон — неподвижный мантийный плюм [20, 21], а Северо-Американская плита перемещается над ним в западном направлении, причем за последние 16 млн. лет — на 800 км со средней скоростью 4.5 см/год [5]. В качестве доказательств приводятся следующие соображения. Первое: по геофизическим данным под Йеллоустоном предполагается низкоскоростное (V_p на 10% меньше, чем в окружающих породах) тело, уходящее в мантию на глубину до 100 км — на 55 км ниже границы Мохо [22]. Но мантийности Йеллоустонского плюма противоречит скорость выноса им глубинного ювенильного вещества: ~8000 км³ за 2 млн. лет [3, 5]. Это в 25–30 раз меньше, например, чем у Гавайского плюма. Второе: “анорогенный” тип риолитов с необычно высокой (830–1050 °С) магматической температурой, а также специфическим минеральным, химическим и изотопным составом [23]. Третье: увеличивающийся изотопный возраст изверженных пород кислого состава по мере удаления от Йеллоустона: от 0.07–0.64 млн. лет (кальдера Йеллоустон) до 15.1–16 млн. лет — кальдера Макдермитт (McDermitt). Все они сомнений не вызывают, так как подкреплены большим фактическим материалом. Но последнее соображение можно сформулировать и по-другому: уменьшающийся изотопный возраст пород по мере приближения к Йеллоустону, что автору статьи представляется более правильным.

¹ Куполовидное поднятие дна кальдеры под давлением внедрившейся снизу новой магмы.

Интерпретация приведенных данных, в целом, и полученные выводы тоже не однозначные. Непонятно, например, почему последнее, по геологическим меркам, 800-километровое горизонтальное перемещение Северо-Американской плиты за последние 16 млн. лет не сопровождалось в зоне сочленения (40–45° с. ш.) материковой и океанской плит возникновением выраженной зоны субдукции с глубоководным желобом. Не поддаются логическому объяснению и еще два момента. Во-первых, почему геоморфология Равнины р. Снейк, трассировавшей направление движения плиты, резко отлична на СВ и на ЮЗ. На СВ она — единая полоса шириной 80–90 км, а ЮЗ — разделена на две ветви: СЗ (Snake River rift) и ЗЮЗ — от эруптивного центра Брюно-Джарбридж (Bruneau-Jarbridge) до кальдеры Макдермитт (см. рис. 1 в [20]). Во-вторых, не согласуется современное расположение стационарного Йеллоустонского горячего пятна с наличием разнонаправленных, неодинаковой длины, но разновозрастных путей миграции кислого вулканизма на юго-западе — в 800 км от него.

По авторской концептуальной модели, логичнее выглядит другой вариант происхождения Йеллоустонского горячего пятна, обусловленный его приуроченностью к фронтальному окончанию предполагаемого [24] магматического суперпотока (МСП) Равнины р. Снейк. Его исток находился в районе дайкового комплекса Стинс (Steens Dikes) на юге Колумбийского базальтового плато. Именно здесь установлена [25] самая высокая скорость накопления базальтов (1500 м за 50 тыс. лет) во время активности этого вулканического центра в позднем миоцене. И именно оттуда 17–16 млн. л. н. после завершения (19–18 млн. л. н.) главной фазы формирования этого плато началось движение МСП во все стороны. Первоначально вблизи истока извергались смешанные (от базальтов до риолитов) комплексы пород. В работе [26] в разрезах пород возраст базальтов — 16.7–14.3 млн. лет, дацитов — 16.5–14.9 млн. лет. Эта толща вулкаников несогласно и с перерывом залегает на разновозрастных (35–220 млн. лет) и разнотипных (вулканиды, гранитоиды, метаморфизованные осадки) породах.

Движение МСП происходило субсинхронно до района кальдеры Макдермитт (16–15.1 млн. лет) на юге (~100 км) и до вулканического центра Ньюберри (40-километровая в диаметре кальдера с возрастом 0.6 млн. лет и действующий вулканом объемом 450 км³ внутри) на ЗСЗ (~500 км). На ВСВ и СВ движение шло от кальдеры Макдермитт вдоль Равнины р. Снейк до ЙКК (около 800 км — 2.2–0.07 млн. лет). Это хорошо видно на рис. 1 в [20]. Еще раньше перемещение “неподвижного” Йеллоустонского пятна вдоль Равнины р. Снейк было продемонстрировано на палеогеодинамических (15, 10, 5 млн. л. н.) и геодинамической картах в [27]. Мы предполагаем, что МСП двигался по границе между верхней и нижней корой под Равниной р. Снейк на глубине от 18–20 (подошва) до 9 км (кровля) (см. рис. 2), его мощность составляла 8–10 км. В работе [28] МСП изображен в виде переходного слоя с V_p 6.5 км/с и плотностью пород 2.87 г/см³. Одна из возможных причин остановки МСП в районе современного ЙКК — пересечение им проходящей здесь осевой зоны региональной тектонической структуры — Кордильерской миогеосинклинали (см. рис. 1 в [20]). Примерная ширина фронтальной лопасти МСП в районе ЙКК, судя по размещению эруптивных центров, — 95–100 км, по эпицентрам землетрясений — 100–110 км, по выходам термальных вод — 90–100 км (см. рис. 3, 5, 29 в [3]).

Обобщая материалы американских исследователей и изложенные выше представления автора статьи, можно сформулировать, что представляет собой ЙКК на современном этапе развития. Это — единый по происхождению, долгоживущий, сложно построенный вулканический центр. Его главные элементы — три типа вулканических аппаратов и ассоциирующихся с их деятельностью построек: 1) *гигантские кальдеры и обширные пирокластические покровы*, возникшие в результате массового выброса ювенильных продуктов риолитового состава в ходе эксплозивных суперизвержений; 2) *риолитовое плато и комплексные базальтовые лавовые равнины* — продукт многоцентровых сближенных лавовых излияний; 3) *многие десятки одноактных, рассредоточенных лавовых образований различного состава* (от базальто-

вых до риолитовых). Все эти формы возникли в интервале от 2.2–2.1 до 0.07 млн. л. н. Территориально и генетически с перечисленными вулканическими образованиями связаны разнообразные гидротермальные проявления последних 70 тыс. лет. Источник питания ЙКК (магматический очаг), его вулканической и гидротермальной деятельности — окончание магматического суперпотока Равнины р. Снейк, исток которого находится в районе Колумбийского базальтового плато. Предполагаемая площадь фронтальной лопасти МСП под кальдерным комплексом превышает 10 тыс. км², а мощность пород — порядка 10 км.

Особенности истории эруптивной активности и вулканической продуктивности Йеллоустонского кальдерного комплекса как перспектива для долгосрочного прогноза типа и параметров предполагаемого будущего суперизвержения

Эруптивная история ЙКК началась 2.2–2.1 млн. л. н. (рис. 3) после горизонтального перемещения примерно на 100 км фронтальной части магматического суперпотока Равнины р. Снейк из-под вулканического поля Хейз (Heise), расположенного на ЮЗ, под уже тогда высокогорный и сильно расчлененный денудационными процессами район современного ЙНП. Возраст докальдерных вулканитов: $>1.99 \pm 0.02$ млн. лет — риолиты Снейк Ривер Бьют (Snake River Butte), 2.16 ± 0.4 и 2.01 ± 0.5 млн. лет — базальтовые лавы горы Эвертс (Everts) [3]. Возраст I суперизвержения, его кальдеры и пирокластики Хаклберри Ридж Тафф (ХРТ) — 2.053 ± 0.06 млн. лет. Объем последней (по [5]) около 2500 км³, по [3] — 2450 км³. В составе толщи выделены три самостоятельные секции (А, В, С), приуроченные к трем центрам извержения (см. рис. 36 в [3]): А — площадь (S) 6280 км² и объем (V) 820 км³; В — соответственно 15400 км² и 1340 км³; С — 3690 км² и >290 км³. Везде преобладали отложения пирокластических потоков длиной до 100 км и разная по крупности *тефра ближнего* (в радиусе 50–100 км от эруптивных центров) *разноса (ТБР)*. Первичная мощность отложений крупнейших пирокластических потоков до литификации превышала 150–200 м. *Тефры дальнего* (>100 км) и *сверхдальнего* (>1000 км) *разноса (ТДР и ТДСР, соответственно)* при подсчете объемов всех единиц не учитывались. Химический состав ювенильной пирокластики секций А и В риолитовый: А — SiO₂ 74.24–76.79%, Na₂O 3.43–4.12%,

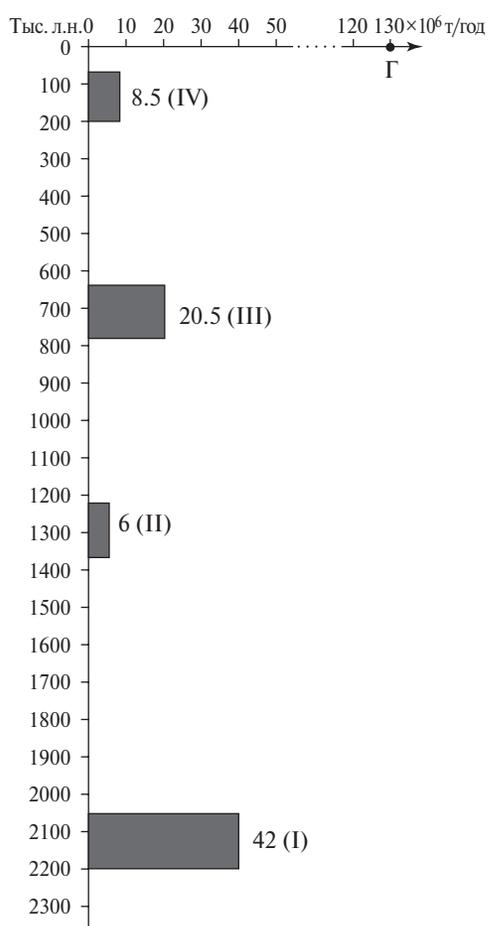


Рис. 3. Вынос вещества и тепловой энергии вулканами и гидротермами ЙКК за 2.2 млн. лет (по материалам [3] и др.)

I–IV — вынос магматического вещества по циклам, $n \times 10^6$ т/год. Г — вулканический эквивалент ($n \times 10^6$ т/год) современной тепловой гидротермальной активности района ЙКК

K_2O 4.65–5.42%; В — SiO_2 74.24–76.51%, Na_2O 3.43–3.60%, K_2O 4.65–5.24% [3]. Площадь кальдеры I ЙКК, измеренная нами по рис. 36 в [3], ~ 4200 км².

Пирокластика суперизвержения литифицирована (туф), ее объемный вес — 2.0–2.2 г/см³, а общий вес материала всех секций — $4900 \div 5390 \times 10^9$ т (2450 км³ \times 2.0–2.2 т/м³). К полученным цифрам объема и веса пород ХРТ надо добавить еще объем и вес тефры дальнего и сверхдальнего разноса, на долю которых, по наблюдениям сходных по механизму исторических извержений, приходится не менее 20–30% всего объема выброшенной пирокластики. Добавка составит 1000–1100 км³, а вес при характерном для свежевывапавшей пемзовой тефры среднем объемном весе 0.9–1.0 г/см³ — порядка 1000×10^9 т. Следовательно, суммарный объем пирокластических продуктов I суперизвержения должен быть увеличен до 3450–3550 км³, а вес — до $5900 \div 6400 \times 10^9$ т. Реконструкция зоны пеплопада для Северной Америки представлена в работе [29]. Но струйными течениями тропопаузы тефра могла разноситься по всему Северному полушарию и выпадать там в течение нескольких лет.

По данным об окончании вулканизма в поле Хейз (4.3–4.0 млн. л. н.) и о возрасте начальных вулканических проявлений в Йеллоустоне (2.2–2.1 млн. л. н.) можно считать по методике [31, 32] и продуктивность МСП Снейк Ривер, если принять его в качестве динамичного (движущегося по горизонтали) магматического очага. Для такого расчета необходим еще суммарный вес продуктов ($5900 \div 6400 \times 10^9$ т) кальдерообразующего и докальдерных извержений I цикла. О породах докальдерных извержений, кроме данных об их возрасте и составе, известно мало. Ориентировочно автором (по рис. 36 в [3]) оценены лишь площадь риолитового потока — около 200 км², и более грубо — его объем и вес: ~ 20 км³ и $\sim 46 \times 10^9$ т. Добавка веса за счет пород докальдерных извержений мало что изменит при определении средней величины вулканической продуктивности I цикла кальдерообразования — $\geq 3.3 \times 10^6$ т/год — из-за ее несоизмеримости с весом пирокластики суперизвержения. Термальный эквивалент вулканической продуктивности I цикла — около 10^{15} кал/год при i (удельном теплосодержании изверженных пород) = 300 кал/г. Все это соответствует средней вулканической продуктивности “нормального” вулкана [31, 32].

После I цикла в эруптивной истории ЙКК было еще три. Они рассмотрены по той же схеме, что и I цикл, но конспективно. Суперизвержение II цикла с кальдерой Хенрис Форк (II) произошло 1.292 ± 0.005 млн. л. н. [3]. Его продукты — Меза Фолс Тафф — объемом > 280 км³ и площадью ~ 2700 км². Главные компоненты пирокластики те же, что и в I цикле. Длина пирокластических потоков до 50–60 км. Объем ТДР и ТСДР не определялся. Пирокластика — риолитовая (SiO_2 74.90–76.30%, Na_2O 2.87–3.52%, K_2O 5.04–5.60%). Объем и вес его продуктов ~ 450 км³ и 740×10^9 т соответственно. Размер кальдеры — 20×26 км, площадь по бровке уступа ~ 390 км². В промежутке между I и II суперизвержениями выявлены и датированы 4 риолитовых потока и пачка туфов [3]. Отнесены к II циклу и близкие к нему по возрасту базальтовый поток в разрезе Нарроус (Narrows, 1.30 ± 0.35 млн. лет), 5 риолитовых куполов с суммарным объемом ~ 2 км³ и весом $\sim 4.6 \times 10^9$ т и риолитовый лавовый поток Мус Крик (Moose Creek) ($S = \sim 610$ км², $V = 90–100$ км³, возраст 1.22 ± 0.01 млн. лет). Поэтому к объему и весу пирокластики кальдерообразующего извержения добавлены 100 км³ лавы и пирокластики весом $\sim 200 \times 10^9$ т — продукты межпароксизмального и посткальдерного этапов. Для всего II цикла суммарный объем > 550 км³ при весе $> 940 \times 10^9$ т.

Вулканическая продуктивность II цикла формирования ЙКК оценена в двух вариантах лишь в грубом приближении: 1) $> 1.24 \times 10^6$ т/год ($> 940 \times 10^9$ т за 760 тыс. лет) и 2) $> 1.13 \times 10^6$ т/год ($> 940 \times 10^9$ т за 830 тыс. лет). Она могла достигать и $1.3 \div 1.4 \times 10^6$ т/год (рис. 4), если учитывать вес остальных вулканитов. Термальный эквивалент соответственно 3.7 или 3.4×10^{14} кал/год (при $i = 300$ кал/г). Таким образом, вулканическая продуктивность II цикла в 2.5–3 раза меньше таковой I цикла, поскольку кальдера II возникла практически там же, где находился и эруптивный центр в I суперизвержения, с которым уже был связан выброс 1900 км³ пирокластики весом 3400×10^9 т.

Длительность подготовки кальдерообразующего извержения Йеллоустон III около 0.58 млн. лет (1.22–0.64 млн. л. н.). В начальные 0.23 млн. лет (1.16–0.929 млн. л. н.) предкальдерного этапа III цикла вулканических проявлений не обнаружено. Ранние предкальдерные риолитовые потоки Вапити Лейк (Wapiti Lake, 1.16 ± 0.01 млн. лет, $S = 110 \text{ км}^2$), Флэт Маунтин (Flat Mountain, 0.929 ± 0.24 млн. лет, $S = 420 \text{ км}^2$), Льюис Каньон (Lewis Canyon, 0.853 ± 0.07 млн. лет, $S = 440 \text{ км}^2$) и Арлекин (Harlequin — 0.839 ± 0.008 млн. лет, $S = 150 \text{ км}^2$), а также базальты излились до возникновения резургентных куполов Маллард Лейк и Соу Крик. Мощность риолитовых потоков от 100 до 200 м, их суммарный объем равен $\sim 200 \text{ км}^3$, вес — в $460 \times 10^9 \text{ т}$, а базальтовых лав — соответственно $>12 \text{ км}^3$ и $>60 \times 10^9 \text{ т}$. В интервале 0.78–0.64 млн. лет излились 2 риолитовых потока — Биг Беа Лейк (Big Bear Lake, $>0.64 - <0.78$ млн. лет, $S = 230 \text{ км}^2$) и Маунт Хейнс (Mount Haynes, $>0.64 - <0.78$ млн. лет, $S = 130 \text{ км}^2$) и 2 базальтовых лавовых потока Ундин-Фоллс (Undine Falls) площадью 100 км^2 и 30 км^2 . Суммарный объем риолитовых потоков — 65 км^3 , вес — около $150 \times 10^9 \text{ т}$; базальтовых — соответственно $5.5\text{--}6.5 \text{ км}^3$ и около $15 \times 10^9 \text{ т}$. Средняя вулканическая продуктивность ($\sim 1.4 \times 10^6 \text{ т/год}$) межпароксизмального этапа (1160–640 тыс. л. н.) сравнима с таковым всего II цикла.

Суперизвержение Йеллоустон III произошло 0.64 ± 0.002 млн. л. н. [3]. Его пирокластика — туфы Лава Крик (отложения пирокластических потоков + ТБР с радиусами 30–50 км от эруптивных центров) — имеет объем, по [3], более 1000 км^3 . Она разделена на секции А ($S = 3240 \text{ км}^2$, $V = 510 \text{ км}^3$) и В ($S = 7300 \text{ км}^2$, $V = 490 \text{ км}^3$). Размер возникшей кальдеры по бровке уступа $85 \times 45 \text{ км}$, площадь $\sim 2800 \text{ км}^2$. Пепел покрыл большую часть США и север Мексики [5], но зона пеплопада могла охватывать и Северное полушарие к северу от $35\text{--}40^\circ \text{ с. ш.}$ Пауза между суперизвержением и самым ранним (~ 560 тыс. л. н.) посткальдерным извержением базальтов Фолс Ривер (Falls River, $\text{SiO}_2 46.54\text{--}49.61\%$, $\text{Na}_2\text{O } 2.31\text{--}2.67\%$, $\text{K}_2\text{O } 0.44\text{--}0.67\%$, $V = 20 \text{ км}^3$) — ~ 80 тыс. лет, а риолитов Бискит Бейзен (Biscuit Basin, 516 ± 7 тыс. лет, $V = \sim 25 \text{ км}^3$; $\text{Si}_2\text{O } 71.90\text{--}76.32\%$, $\text{Na}_2\text{O } 3.39\text{--}4.25\%$, $\text{K}_2\text{O } 2.95\text{--}5.31\%$) — ~ 120 тыс. лет.

Вес продуктов III цикла формирования кальдерного комплекса (по нашей оценке) выглядит следующим образом. Пирокластика Лава Крик — $2200 \times 10^9 \text{ т}$ ($1000 \text{ км}^3 \times 2.2 \text{ т/м}^3$). Свежевыпавшая ТДР и ТСДР — $500 \times 10^9 \text{ т}$ ($500 \text{ км}^3 \times 1 \text{ т/м}^3$). Лавы предкальдерного этапа: риолиты — $610 \times 10^9 \text{ т}$ ($265 \text{ км}^3 \times 2.3 \text{ т/м}^3$), базальты —

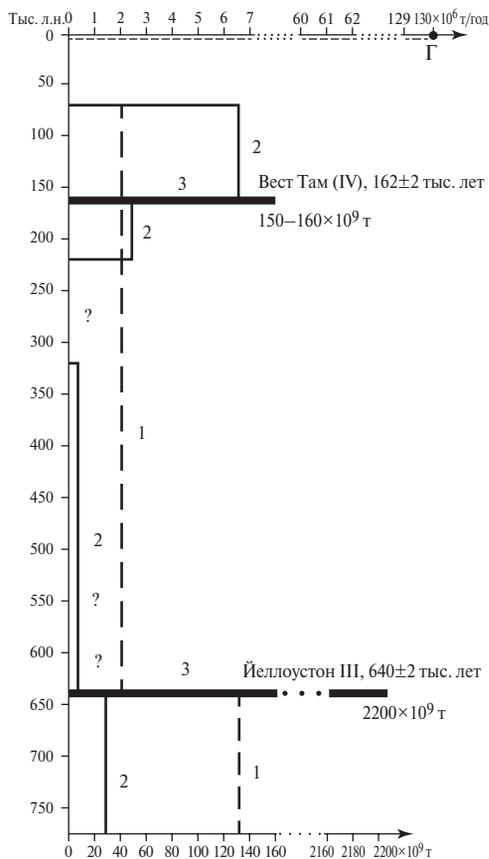


Рис. 4. Вынос вещества и тепловой энергии вулканами и гидротермами ЙКК за последние 780 тыс. лет (по материалам [3] и др.)

1 — средняя вулканическая продуктивность для III и IV циклов; 2 — величина интенсивности выноса вулканического вещества по отдельным этапам; 3 — вес изверженных продуктов кальдерообразующих извержений и их возраст. Г — см. рис. 3

$>80 \times 10^9$ т. Итого суммарно более 3390×10^9 т. Таким образом, вулканическая продуктивность этого этапа была около 6.5×10^6 т/год (см. рис. 3). Это в 2 раза выше, чем для I цикла, и в 6 раз, чем для II. Термальный аналог вулканической продуктивности $\sim 2 \times 10^{15}$ кал/год (при $i = 300$ кал/г для риолитов и 400 кал/г — для базальтов).

Четвертый цикл развития ЙКК продолжается уже 640 тыс. лет. Его эруптивная история восстановлена [3, 5 и др.]. Приведены химические составы изверженных пород, K-Ag и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст вулканитов, оценки объема пирокластики, лав, выноса тепла гидротермами. Ранние риолитовые потоки в кальдере Йеллоустон III связаны с возникновением и ростом в ней резургентных куполов Маллард Лейк (Бискит Бейзен — 516 ± 7 тыс. лет) и Соу Крик (Каньон (Canyon) — 484 ± 15 и Данрейвен Род (Dunraven Road — 486 ± 42 тыс. лет). Возраст туфа Сульфур Крик (Sulphur Creek) у купола Соу Крик — 474 ± 10 тыс. лет. По нашей оценке, основанной на данных [3], суммарный объем лавовых потоков — $12\text{--}15 \text{ км}^3$, их вес — $28 \div 35 \times 10^9$ т, а пирокластики Сульфур Крик — соответственно $>2.0\text{--}2.5 \text{ км}^3$ и $>5 \times 10^9$ т. Самый ранний за пределами кальдеры Йеллоустон III базальтовый поток Фолс Крик имеет возраст ~ 560 тыс. лет и объем пород 20 км^3 [3] весом $45 \div 50 \times 10^9$ т. Для других базальтовых лавовых потоков возраст определен только приблизительно: Свон Лейк (Swan Lake Flat Basalt) — $>320\text{--}<640$ тыс. лет; Жеод Крик (Geode Creek) — $>130\text{--}<640$ тыс. лет. Для базальта Марипоза Лейк (Mariposa Lake) возраст не установлен. Возраст риолитовых куполов Куга Крик (Cougar Creek) — 399 ± 3 тыс. лет, а Виллоу Парк (Willow Park) объемом 0.5 км^3 — 316 ± 5 тыс. лет. Таким образом, суммарный вес известных изверженных пород раннего ($640\text{--}320$ тыс. л. н.) эпизода вулканической фазы активности превышает $80 \div 90 \times 10^9$ т, а его продуктивность составляла — $0.25 \div 0.28 \times 10^6$ т/год, соответственно термальный эквивалент — около 0.8×10^{14} кал/год.

Для интервала $316 \pm 5\text{--}220 \pm 41$ тыс. л. н. сведения о вулканических проявлениях в кальдере Йеллоустон III и за ее пределами отсутствуют. Возможно, это был период относительного покоя, предвалявший очень мощный эпизод вулканической активности в районе ЙКК, начавшийся ~ 220 тыс. л. н. Первые его вулканические формы появились субсинхронно как в самой кальдере (риолитовый лавовый поток Скоп Лейк (Scarp Lake) — 198 ± 8 тыс. л. н., $S = 140 \text{ км}^2$, $V = 8\text{--}10 \text{ км}^3$), что было связано с активизацией в ней резургентного купола Маллард Лейк, так и вне ее границ: базальтовые потоки р. Ламар (Lamar River) — 220 ± 41 тыс. л. н. и Хатчери Бэт (Hatchery Batte) — 199 ± 9 тыс. л. н., риолитовый поток Обсидиан Клиф (Obsidian Cliff) — 183 ± 3 тыс. л. н. Главные вулканические события развернулись, начиная с $165\text{--}160$ тыс. л. н., когда резко увеличились как число (>40) извержений, так и объемы вулкаников — преимущественно риолитовых лав мощностью до $300\text{--}350$ м [3, 5]. Объем лав Западного Йеллоустона (West Yellowstone) и плато Пичстон (Pitchstone Plateau) достигал $40\text{--}70 \text{ км}^3$. Было и кальдерообразующее извержение Вест Там. Объем его риолитовой пирокластики Блаф Пойнт — 50 км^3 (в пересчете на плотную породу), ее вес 115×10^9 т, размер возникшей 162 ± 2 тыс. л. н. кальдеры — $10.5 \times 7.5 \text{ км}$, площадь по бровке уступа — 64 км^2 . Кальдера приурочена к кольцевому разлому у подножия уступа ЮВ сектора кальдеры Йеллоустон III и вскоре была частично погребена под риолитовыми лавовыми потоками Астер Крик (Aster Creek, 161 ± 1 тыс. лет, $V = 10 \text{ км}^3$) и Вест Там (147 ± 4 тыс. л.).

Здесь также датированы [3, 33] 17 риолитовых потоков и риолитовый купол. Самые молодые потоки плато Пичстон и Грант-Пасс (Grant Pass) возникли 71 ± 2 и 72 ± 3 тыс. л. н. Для 16 лавовых потоков и купола Гибен Хилл (Gibbon Hill) определены объемы пород [3, 33]. Суммарный объем их лав $\sim 360 \text{ км}^3$, вес $\sim 830 \times 10^9$ т. Эти формы создали риолитовое плато площадью $\sim 2900 \text{ км}^2$. Судя по мощности лав индивидуальных образований, среднюю мощность пород плато можно принять равной 150 м, а общий его объем оценить примерно в 435 км^3 . С учетом туфов ($V = 150\text{--}160 \text{ км}^3$, вес $150 \div 160 \times 10^9$ т) извержения Вест Там и тефры ($V = 40\text{--}50 \text{ км}^3$, вес $40 \div 50 \times 10^9$ т) других эруптивных центров, суммарный объем изверженных про-

дуктов всего этапа длительностью 90–95 тыс. лет (165–71 тыс. л. н.) мог теоретически достигать $>650 \text{ км}^3$, а вес — $>1000 \times 10^9 \text{ т}$, что вполне соизмеримо с таковыми эксплозивного суперизвержения Йеллоустоун III — 1500 км^3 и $2200 \times 10^9 \text{ т}$. При оценке [34], где объем пород риолитового плато равен 1000 км^3 , разница между ними станет еще меньше.

В геоморфологическом и вулканическом планах между обоими событиями, наоборот, разница принципиальная. “Мгновенный” эксплозивный эпизод вулканизма сменился продолжительным, преимущественно эффузивным, а из вынесенного вещества возникла положительная форма рельефа — риолитовое лавовое плато, а не отрицательная, как раньше (кальдера Йеллоустон III с пирокластическим покровом). Эта смена названа автором статьи *вулкано-геоморфологической инверсией* в эруптивной истории ЙКК.

Интенсивность выноса магматического вещества для этапа 165–71 тыс. л. н. — $10.5 \times 11.1 \times 10^6 \text{ т/год}$, вулканическая продуктивность — $6.4\text{--}6.8 \times 10^6 \text{ т/год}$, а ее термальный эквивалент — $1.9 \div 2.0 \times 10^{15} \text{ кал/год}$. Заключительный импульс вулканизма ЙКК и конец формирования риолитового плато — излияние объемом $>71 \text{ км}^3$ (вес $>163 \times 10^9 \text{ т}$) лав 72–71 тыс. л. н. после невулканической паузы длительностью 10–11 тыс. лет. Его вулканическая продуктивность $\sim 15.6 \times 10^6 \text{ т/год}$ (термальный эквивалент $\sim 4.7 \times 10^{15} \text{ кал/год}$).

После этих большеобъемных излияний риолитов однозначно диагностированных следов вулканических проявлений моложе 70 тыс. лет в кальдере Йеллоустон не установлено. Опубликованные [33] даты 7400 ± 1000 , 6050, 3050, 1350 гг. до н. э. по тefре, якобы, вулканических взрывов в кальдере указывают только возраст происшедших событий, но не их генезис. Взрывы, вероятно, были паровыми, характерными для гидротермальных полей, особенно типа йеллоустонских. Они наблюдались в 1989 [34] и 2008 гг. и на дне кальдеры Узон на Камчатке. Отличить выброшенные продукты фреатических и паровых взрывов, связанные с ними кратеры и воронки практически невозможно.

В настоящее время предполагаемая [36, 37] суммарная тепловая мощность Йеллоустонской гидротермальной системы (ЙГС) около $5.3 \times 10^9 \text{ W}$ ($\sim 12.6 \times 10^8 \text{ кал/с}$) эквивалентна выделению тепла за год при кристаллизации и остывании 0.1 км^3 риолитовой магмы с 900 до 500 °C [38, 39]. Это соответствует тепловой энергии слабого вулканического извержения со скоростью выноса риолитовой лавы 4.2 т/с ($\sim 13 \times 10^7 \text{ т/год}$) при $i = 300 \text{ кал/год}$.

Современная тепловая мощность ЙГС в 20 раз выше термального эквивалента средней вулканической продуктивности и в 12 раз выше средней интенсивности выноса магматического вещества при формировании риолитового плато ЙКК. Сравнение тепловых параметров вулканической и гидротермальной активности позволяет заключить, что около 70 тыс. л. н. произошла еще одна *инверсия в ходе эволюции ЙКК — вулкано-гидротермальная*. Вулканическая деятельность сменилась гидротермальной, продолжающейся и в настоящее время, которая оказалась по тепловой мощности минимум на порядок выше, чем предшествовавшая вулканическая (см. рис. 3).

По представлению автора статьи, одной из главных причин обеих инверсий истории эруптивной активности ЙКК после возникновения кальдеры Йеллоустон III является плейстоценовое оледенение территории: обширные ($S = 10\text{--}20 \text{ тыс. км}^2$ с объемом льда по 1000–2000 км^3 или более) ледниковые покровы 6 эпох оледенений с возрастом от 650–630 (до-иллинойс Д) до 20 тыс. лет (максимум висконсина). Их основные питающие ледоемы располагались в полости самой кальдеры, как и в вулканических районах Камчатки [8, 30]. Таяние ледников над кровлей магматического очага ЙКК и попадание туда колоссальных объемов талых вод по системе многочисленных трещин приводило к остыванию и кристаллизации пород, последовательному ослаблению его энергетического потенциала, трансформации типа и режима поверхностной активности ЙКК.

Ничего необычного в наборе, характере и интенсивности процессов, происходящих сейчас в кальдере Йеллоустон и по ее периферии, нет. Контрастные деформации земной поверхности, коровые вулcano-тектонические и вулcano-магматические землетрясения вообще типичны для такого рода молодых структур, возникших в конце плиоцена — плейстоцене: Таупо-Роторуа (Новая Зеландия), Лардерелло и Флегрейские поля (Италия), Тоба (Индонезия). Нередки там и разной силы фрегатические² и чисто паровые взрывы. Все это объясняется, включая и саму гидротермальную активность, продолжающейся жизнью существующих под кальдерами гигантских магматических очагов и высокой температурой неглубоко залегающих пород. Так, под кальдерой Йеллоунстон квазипластичные породы с температурой >350 до 450 °С находятся на глубине всего около 5 км [5, 40].

Подводя итог, необходимо отметить, что рассмотренные особенности эруптивной истории ЙКК в позднем плейстоцене-голоцене и длительная гидротермальная активность мало перспективны для будущего эксплозивного суперизвержения.

Йеллоустонский кальдерный комплекс — мнимый потенциальный объект глобальной вулканической опасности

Самый свежий долгосрочный научный прогноз вулканической активности и будущего катастрофического эксплозивного суперизвержения для района ЙНП дан в работе [3]. В ней также наиболее детально и всесторонне проанализирован имеющийся по ЙКК материал, начиная с момента возникновения комплекса и до настоящего времени, на котором этот прогноз и основан. Согласно ему вулканическая деятельность в Йеллоустоне не прекратилась и будет еще продолжаться неопределенно долго. Допускаются и равновероятны три ее варианта: 1) продолжение извержений риолитов в кальдере Йеллоустон и в северной радиальной разрывной зоне предыдущего цикла; 2) продолжение базальтовых извержений в зонах с возобновляемой активностью на окраинах риолитового плато и в кальдере Йеллоустон; 3) возобновление мощной вулканической деятельности в случае начавшегося нового цикла активности, вплоть до очередного эксплозивного кальдерообразующего суперизвержения. Суть подобного прогноза можно сформулировать кратко: что было на вулкане раньше, то и будет в дальнейшем. Такой ультраактуалистический подход к долгосрочному прогнозу будущей активности малопригоден даже для обычных вулканов из-за эволюции их эруптивной деятельности и большинства составляющих ее параметров во времени [31, 32, 40].

При создании же долгосрочного прогноза почти не было принято во внимание и то, что ЙКК не обычный вулкан, а долгоживущий вулканический центр с весьма сложной историей развития, большим количеством возникших разнообразных форм рельефа, одноактных и многоактных. Недостаточно учитывались поэтапная история вулканической активности и продуктивности ЙКК, отсутствие там достоверно установленных следов вулканических извержений за последние 70 тыс. лет.

Для таких центров долгосрочный прогноз будущей вулканической активности, включая и катастрофические эксплозивные извержения, должен быть принципиально иным, основанным на анализе большего количества достоверных фактов. Важно также не допускать слепого следования принятой большинством американских геологов и вулканологов тектонике плит. В рассматриваемом случае, ими безоговорочно принимается, например, что Йеллоустонское горячее пятно мантийного питания неподвижно, а Северо-Американская плита достаточно быстро движется над ним к западу. На наш взгляд, более реален вариант с подвижным магматическим очагом (перемещающейся на В и СВ головной частью МСП), в отличие от мантийного

² Газопаровой взрыв с выбросом неювенильных продуктов.

плюма лишенным дополнительной глубинной магматической подпитки, и с мало-подвижной Северо-Американской плитой. Это подтверждается и тем, что средняя вулканическая продуктивность ЙКК (до $6 \div 7 \times 10^6$ т/год) слишком мала для плюма — она более типична для нормального вулкана [31, 32]. Все это учтено автором статьи при рассмотрении вероятности будущего эксплозивного суперизвержения с поправкой на основные принципы долгосрочного прогноза вулканической активности, изложенные в работах [9, 31 и др.]. Наибольшее внимание нами уделено событиям и процессам IV цикла после суперизвержения Йеллоустон III ~640 тыс. л. н. [3, 5], которые заметно отличались от таковых I—III циклов, принципиально сходных друг с другом. Именно в этот период наметились тенденция и предпосылки для дальнейшего специфического проявления вулканической и гидротермальной деятельности в ЙКК в конце плейстоцена — голоцене. Непосредственным продолжением последнего периода является и современная эпоха, для которой составлен авторский долгосрочный прогноз будущей вулканической деятельности в ЙКК и вероятности эксплозивного суперизвержения Йеллоустон.

Развитие ЙКК во время циклов I—III происходило по единому шаблону: 1) разной длительности период подготовки катастрофического эксплозивного извержения со слабой вулканической продуктивностью, заканчивающийся пароксизмом с образованием кальдеры типа Вэллес; 2) резкий спад посткальдерной вулканической активности. Некоторым исключением был посткальдерный вулканизм II цикла.

Самым длительным (>2 млн. лет) и малопродуктивным был период подготовки суперизвержения I цикла, но с наибольшим весом выброшенной пироклаستي-ки ($5900 \div 6400 \times 10^9$ т) и максимальной по площади (~4200 км²) кальдерой. Средняя вулканическая продуктивность I цикла составила $>3.3 \times 10^6$ т/год, а ее термальный эквивалент — около 10^{15} кал/год. Доминировали породы риолитового состава как у лав, так и у пирокластики. Второй цикл активности ЙКК по средней вулканической продуктивности и энергетике был заметно слабее первого: $1.13 \div 1.24 \times 10^6$ т/год и $3.4 \div 3.7 \times 10^{14}$ кал/год. Состав изверженных пород не изменился, их соотношение — тоже. Разница по количеству изверженных продуктов этих суперизвержений: второе было в 8–9 раз меньше по общему объему пирокластики и в 4–5 раз — по объему пирокластики территориально совмещенных эруптивных центров В I цикла и главного II. По нашему предположению, это было связано с ослаблением вулканического потенциала магматического очага ЙКК после очень большеобъемного выброса ювенильного вещества во время суперизвержения I цикла. По полной программе вулканизм проявился только в пределах ЮЗ части ЙКК. На СВ происходили лишь относительно небольшие по объему базальтовые излияния из эруптивных центров, приуроченных к молодым разрывным нарушениям [3].

Непосредственная подготовка к суперизвержению Йеллоустон III продолжалась ~520 тыс. лет. Эруптивная история этого межпароксизмального этапа принципиально не отличалась от таковой предыдущего. Самые площадные и большеобъемные излияния риолитовых лав происходили в районе современного резургентного купола Маллард Лейк. Излияния базальтов имели транзитный характер по отношению к ЙКК: их извержения из многочисленных центров были и внутри этой структуры, и за ее пределами. Вулканическая продуктивность для всего предкальдерного этапа — $\sim 1.4 \times 10^6$ т/год. Завершающее цикл суперизвержение Йеллоустон III по масштабам ($V = \sim 1500$ км³ и вес 2700×10^9 т) занимает промежуточное положение между суперизвержениями I и II. Вулканическая продуктивность III цикла — $6.4 \div 6.8 \times 10^6$ т/год, термальный эквивалент — около $1.9 \div 2 \times 10^{15}$ кал/год; это примерно в 2 раза выше, чем для I цикла и в 5 раз выше, чем у II.

Почти стандартный ход вулканической и вулкано-тектонической эволюции ЙКК в течение I—III циклов позволяло прогнозировать и высокую вероятность завершавших циклы эксплозивных кальдерообразующих суперизвержений. Они и происходили, хотя и отличались по масштабам.

Однако этого уже нельзя было сделать после суперизвержения Йеллоустон III. Во-первых, из-за возникновения около 600 тыс. л. н. хорошо выраженных в рельефе дна кальдеры III резургентных куполов Маллард Лейк и Соу Крик, что свидетельствует о подъеме близко к поверхности большого объема в значительной мере дегазированного магматического вещества. На преобладание дегазированной магмы под куполами указывает излияние там по системе трещин четырех риолитовых лавовых потоков и следы лишь двух эксплозивных извержений. Во-вторых, начавшееся около 165 тыс. л. н. и продолжавшееся 90–95 тыс. лет массовое излияние предположительно с малой глубины объемных потоков высокотемпературной (850–1050 °С) риолитовой лавы из десятков эруптивных центров, сформировавших лавовые вулканы. Слившись основаниями, эти вулканические образования привели к возникновению риолитового плато объемом в 435 км³. Произошедшее в начале этапа (162±2 тыс. л. н.) эксплозивное кальдерообразующее извержение Вест Там было в 14–15 раз слабее, чем Йеллоустон III. Ему присвоен номер IV. Начало массовых излияний риолитовых лав и возникновение кальдеры Вест Там произошли примерно через 480 тыс. лет после суперизвержения Йеллоустон III. Столь длительный интервал сопоставим с таковыми между суперизвержениями I–II и II–III. То же относится и к весу пирокластики этих извержений и лав плато. Вес пирокластики кальдеры II (740×10⁹ т) даже меньше веса пород риолитового плато (~1000×10⁹ т), по версии [34] он составляет около 2200×10⁹ т (1000 км³×2.2 т/м³). Поэтому нами был сделан вывод, что в варианте пирокластики породы риолитового плато по времени и весу могли бы стать в других условиях и продуктами следующего (“законного”) кальдерообразующего суперизвержения, которое не произошло. Подобная ситуация, когда вместо “мгновенно” возникшей отрицательной формы вулканического рельефа — кальдеры, появилась положительная — 90–95 тыс. лет формировавшееся риолитовое плато, была названа нами *вулcano-геоморфологической инверсией в истории эволюции ЙКК*. Она и стала главным препятствием для реализации в ближайшие сотни — тысячи лет (или вообще) суперизвержения типа и масштаба Йеллоустон III.

Не свидетельствует в пользу возможного будущего эксплозивного суперизвержения и длительный (≥70 тыс. лет) период отсутствия достоверных вулканических проявлений в кальдере Йеллоустон III с заменой их гидротермальной деятельностью как в самой кальдере, так и вне ее. Необходимо еще раз напомнить, что эта деятельность по тепловой мощности больше чем на порядок превышает термальный эквивалент вулканической продуктивности на всех рассматриваемых этапах эволюции ЙКК. То есть реализовалась и вторая препятствующая будущему суперизвержению (как минимум, на ближайшие сотни и тысячи лет), *инверсия эволюционного развития ЙКК — вулcano-гидротермальная*. Поэтому энергии на продолжение вулканической активности кальдерному комплексу уже, вероятно, и не хватает. Не исключено, что произошедшая смена может носить и необратимый характер. Следовательно, не только предполагаемое эксплозивное кальдерообразующее суперизвержение, но и вообще, сильные вулканические проявления в будущем здесь маловероятны из-за прогрессирующего истощения непополняемой энергетики магматического очага (фронтальной лопасти МСП) под ЙКК за счет затратной по выносу тепла мощной и длительной гидротермальной деятельности. Но здесь высока вероятность паровых взрывов разной силы, не исключаются и редкие фреатические взрывы, излияние небольших лавовых потоков, возникновение лавовых куполов.

Заключение

В настоящее время ЙКК изучен американскими исследователями всеми доступными современными методами. Поэтому он может служить эталонным объектом для составления надежных долгосрочных прогнозов по широкому спектру природ-

ных процессов и явлений, включая вулканическую деятельность и вероятность катастрофических извержений не только в США. Представленный в статье анализ этих данных по реконструкции эруптивной истории ЙКК с использованием авторских представлений о долгосрочном прогнозе будущей активности действующих вулканов и длительно существующих вулканических центров, а также более вероятной природе магматического очага ЙКК, позволяют сделать вывод о невозможности там в ближайшие сотни и тысячи лет нового эксплозивного кальдерообразующего суперизвержения. Оказавшееся нереальным будущее суперизвержение Йеллоустон — всего лишь частный случай. И это не снимает ответственности с вулканологов за поиск других потенциально опасных мест в молодых вулканических областях, где подобные опасные суперизвержения реальны: они были в прошлом и, несомненно, произойдут и в будущем. Для их выявления и диагностики должны быть задействованы самые современные геолого-геоморфологические, вулканологические, геофизические и аэрокосмические методы исследований, проводимых под руководством РАН РФ.

Благодарности. Автор благодарен своим коллегам Л. И. Базановой, И. Ф. Делемению, Т. П. Кирсановой — за обсуждение представлений и выводов этой публикации, Д. В. Мельникову — за помощь в подборе материалов к ней, Р. Р. Курмашовой — за ее оформление.

Acknowledgements. The author is grateful to his colleagues L. I. Bazanova, I. F. Delemen, T. P. Kirsanova — for the discussion of this publication; to D. V. Melnikov — for his help in the selection of materials, to R. R. Kurmashova — for the assistance in preparing the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шебалин П. Н.* Пепел Йеллоустона // Вокруг света. 2015. № 5. С. 98–102.
2. *Тиллинг Р. И., Байлей Р. А.* Программа изучения вулканической опасности в США // 27-й междунар. геол. конгресс. Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. Коллоквиум 06. Доклады. М.: Наука, 1984. Т. 6. С. 82–91.
3. *Christiansen R. L.* The Quaternary and Pliocene Yellowstone Plateau Volcanic field of Wyoming, Idaho and Montana. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2001. P. 61–145.
4. *Dzurisin D. and Yamashita K. M.* Vertical surface displacements at Yellowstone caldera, Wyoming, 1976–1986 // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 13753–13766.
5. *Smith R. B. and Braile L. W.* Topographic signature, space-time evolution, and physical properties of the Yellowstone-Snake River Plain volcanic system: the Yellowstone hotspot // Geology of Wyoming: Geological Survey of Wyoming Memoir. 1993. No. 5. P. 694–754.
6. *Базанова Л. И., Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Пузанков М. Ю.* Потенциальная опасность от извержений Авачинского вулкана // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 390–407.
7. *Брайцева О. А., Мелекесцев И. В.* Вулкан Карымский: история формирования, динамика активности, долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 14–31.
8. *Мелекесцев И. В.* Особенности оледенения вулканических районов // Камчатка, Курильские и Командорские острова // Под ред. Лучицкого И. В. М.: Наука, 1974. С. 418–421.
9. *Мелекесцев И. В., Пономарева В. В.* Новейший (N_2-Q_4) вулканизм Камчатки // Новейший и современный вулканизм на территории России // Под ред. Лаверова Н. П. М.: Наука, 2005. С. 107–232.
10. *Hayden F. V.* Preliminary reports of the United States Geological Survey of Montana and portions of adjacent territories // U. S. Geological and Geographical of the Territories Fifth Annual Report (for 1871). 1872. P. 13–165.
11. *Hague A.* Geological history of Yellowstone National Park // American Institute of Mining Engineers Transactions. 1888. Vol. 16. P. 783–803.
12. *Hague A.* Age of the igneous rocks of the Yellowstone Park // American J. of Science. 1896. Vol. 151. P. 445–457.

13. *Hague A., Iddings J. P., Weed W. H., Wallcot C. D., Girty G. H., Stanton T. W., and Knowlton F. H.* Descriptive geology, petrography, and paleontology. Pt. 2 of Geological Survey Monograph. 1899. Vol. 32. 893 p.
14. *Howard A. D.* Hydrothermal phenomena of the Yellowstone National Park // Catalogue of the active volcanoes of the World. 1960. Part IX. P. 61–68.
15. *Leeman W. P., Oldow J. S., and Hart W. K.* Lithosphere-scale thrusting in the Western U.S. Cordillera as constrained by Sr and Nd isotope transitions in Neogene volcanic rocks // *Geology*. 1992. Vol. 20. P. 63–66.
16. *McCurry M., Hayden K. P., Morse L. H., and Mertzman S.* Genesis of post-hotspot, A-type rhyolite of the Eastern Snake River Plain volcanic field by extreme fractional crystallization of olivine tholeiite // *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 361–384.
17. *Meertens C. M., Smith R. B., and Vasco D. M.* Crustal deformation of the Yellowstone caldera from first GPS measurements: 1987–1989 // *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 18. P. 1763–1766.
18. Эрлих Э. Н. Проблема кальдер на Международном симпозиуме “Корни вулканов” (Оксфорд, 7–13 ноября 1969 г.) // *Бюл. вулканол. станций*. 1971. № 47. С. 83–87.
19. *Lehman J. A., Smith R. B., Schill M. M., and Braille L. W.* Upper crustal structure of the Yellowstone caldera from delay time analyses and gravity correlations // *J. of Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 2713–2730.
20. *Branney M. J., Bonnicksen B., Andrews G. D. M., Ellis B., Barry T. L., and McCurry M.* Snake River (SR) — type volcanism at the Yellowstone hotspot track: distinctive products from unusual, high-temperature silic super-eruptions // *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 293–314.
21. *Christiansen R. L., Foulger G. E., and Evans J. R.* Upper-mantle origin of the Yellowstone Hotspot // *Geol. Amer. Bull.* 2002. Vol. 114. P. 1245–1256.
22. *Eaton G. P., Christiansen R. L., Iyer H. M., Pitt A. M., Mabey D. R., Blank H. R., and Gettings M. E.* Magma beneath Yellowstone National Park // *Science*. 1975. Vol. 188. P. 787–796.
23. *Christiansen R. L. and McCurry M.* Contrasting origins of Cenozoic silicic volcanic rocks from the western Cordillera of the United States // *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 251–268.
24. Мелекесцев И. В., Слезин Ю. Б. Магматические суперпотоки. Часть I А. Беринговоморские магматические суперпотоки: природная модель, геолого-геоморфологические признаки // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 1. С. 3–16.
25. *Watkins N. D. and Gunn B. M.* Major and trace element variation in seventy successive Miocene lavas from southeastern Oregon, U.S.A. // *Intern. Assn. Volcanology and Chem. Earth's Interior, Symposium on Volcanoes and Their Roots, Oxford Univ. Abstracts vol.* 1969. P. 276.
26. *Brueseke M. E., Hart W. K., and Heizler M. T.* Diverse mid-Miocene silicicy Volcanism associated with the Yellowstone-Newberry thermal anomaly // *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 343–360.
27. *Magill J. and Cox A.* Post-Oligocene tectonic rotation of the Oregon western Cascade Range and the Klamath Mountains // *Geology*. 1981. Vol. 9. P. 27–131.
28. *Peng X. and Humphreys E. D.* Crustal velocity structure across the eastern Snake River Plain and the Yellowstone Swell // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 7171–7186.
29. *Sparlin M. A., Braille L. W., and Smith R. B.* Crustal structure of the eastern Snake River Plain determined from ray-trace modeling of seismic refraction data // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 2619–2633.
30. *Smith R. B. and Bruhn R. L.* Intra plate extensional tectonics of the western U.S. Cordillera: inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics and thermal-mechanical models of brittle-ductile deformation // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. P. 5733–5762.
31. Мелекесцев И. В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
32. Поляк Б. Г., Мелекесцев И. В. Продуктивность вулканов // *Вулканология и сейсмология*. 1990. № 5. С. 22–37.
33. *Volcanoes of the World. 3rd / Eds. Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* Smithsonian Institution. University of California Press. 2010. 551 p.
34. *Christiansen R. L.* Yellowstone Plateau // *Volcanoes of North America. United States and Canada / Eds. Wood Ch. A., Kienle J.* Cambridge University Press. 1991. P. 263–266.
35. Карпов Г. А., Фазлуллин С. М., Надежная Т. Б. Расплав самородной серы на дне термального озера в кальдере Узон (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 1996. № 2. С. 34–47.
36. *White D. E.* Thermal waters of volcanic origin // *Geol. Soc. of America Bull.* 1957. Vol. 68. P. 1637–1658.

37. White D. E. Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada // U. S. Geological Survey Professional Paper 458-V. 1968. 109 p.
38. Fournier R. O. and Pitt A. M. The Yellowstone magmatic — hydrothermal system, U.S.A. // Geothermal Resources Council Intern/Symp. on Geothermal Energy, Intern. Vol. 1985. P. 319—327.
39. Fournier R. O., White D. E., and Truesdell A. H. Convective heat flow in Yellowstone National Park // 2-nd United Nations Symp. on Development and Use of Geothermal Resources Proceedings. 1976. P. 731—739.
40. Sibson R. H. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of United States // Bull. Seism. Soc. of America. 1982. Vol. 72. P. 151—164.
41. Мелекесцев И. В. Типы и возрасты действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 10—17.

REFERENCES

1. Shebalin P. N. Ash of the Yellowstone. *Vokrug sveta*. 2015. No. 5. P. 98—102. (in Russ.)
2. Tilling R. I. and Bailey R. I. The program studies of volcano hazards in USA, in *Zemletryaseniya i preduprezhdenie stihiynykh bedstviy* (The earthquakes and mitigation of cataclysms. XXVII International Geological Congress. Colloquium 06. Reports). Vol. 6. Moscow, 4—14 August 1984. P. 82—91.
3. Christiansen R. L. The Quaternary and Pliocene Yellowstone Plateau Volcanic field of Wyoming, Idaho and Montana. *U. S. Geological Survey*, Reston, Virginia: 2001. P. 61—145.
4. Dzurisin D. and Yamashita K. M. Vertical Surface displacements at Yellowstone caldera, Wyoming, 1976—1986. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 13753—13766.
5. Smith R. B. and Braile L. W. Topographic signature, space-time evolution, and physical properties of the Yellowstone-Snake River Plain Volcanic system: the Yellowstone hotspot. *Geology of Wyoming: Geological Survey of Wyoming Memoir*. 1993. No. 5. P. 694—754.
6. Bazanova L. I., Braitseva O. A., Melekestsev I. V., and Puzankov M. Yu. The potential hazard at eruptiones Avachinsky volcano, in *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoy ostrovoduzhnoy sistemy* (Geodynamics and volcanism of Kurile-Kamchatka Island Arc system). Petropavlovsk-Kamchatsky, 2001. P. 390—407.
7. Braitseva O. A. and Melekestsev I. V. Karymsky volcano: Origin, Eruptive History and long-range. *Vulkan. Seismol.* 1989. No. 2. P. 14—31. (in Russ.)
8. Melekestsev I. V. The specifics of glaciation of volcanic regions, in *Kamchatka, Kurily i Komandorskie ostrova* (Kamchatka, Kurile and Komandorsky Islands). I. V. Luchitsky. Ed. Moscow: Nauka (Publ.), 1974. P. 418—421.
9. Melekestsev I. V. and Ponomareva V. V. Modern (N_2-Q_4) volcanism in Russia, in *Noveyshiyy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii* (Newest and modern volcanism within the territory of Russia). N. P. Laverov. Ed. Moscow: Nauka (Publ.), 2005. P. 107—232.
10. Hayden F. V. Preliminary reports of the United States Geological Survey of Montana and Portions of Adjacent Territories. *U. S. Geological and Geographical of the Territories*. Fifth Annual Report (for 1871). 1872. P. 13—165.
11. Hague A. Geological history of Yellowstone National Park. *American Institute of Mining Engineers Transactions*. 1888. Vol. 16. P. 783—803.
12. Hague A. Age of the igneous rocks of the Yellowstone Park. *American Journal of Science*. 1896. Vol. 151. P. 445—457.
13. Hague A., Iddings J. P., Weed W. H., Wallcot C. D., Girty G. H., Stanton T. W., and Knowlton F. H. Descriptive geology, petrography, and paleontology. Pt. 2 of *Geological Survey Monograph*. 1899. Vol. 32. 893 p.
14. Howard A. D. Hydrothermal Phenomena of the Yellowstone National Park. *Catalogue of the active volcanoes of the World*. Part IX. 1960. P. 61—68.
15. Leeman W. P., Oldow J. S., and Hart W. K. Lithosphere-scale thrusting in the Western U. S. Cordillera as constrained by Sr and Nd isotope transitions in Neogene volcanic rocks. *Geology*. 1992. Vol. 20. P. 63—66.
16. McCurry M., Hayden K. P., Morse L. H., and Mertzman S. Genesis of post-hotspot, A-type rhyolite of the Eastern Snake River Plain volcanic field by extreme fractional crystallization of olivine tholeiite. *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 361—384.

17. Meertens C. M., Smith R. B., and Vasco D. M. Crustal deformation of the Yellowstone caldera from first GPS measurements: 1987–1989. *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 18. P. 1763–1766.
18. Erlich E. N. The problem of calderas on Internatiol symposium “The roots of volcanoes” (Oxford, 7–13 November 1969). *Bull. Volkan. Stan.* 1971. No. 147. P. 83–87. (in Russ.)
19. Lehman J. A., Smith R. B., Schill M. M., and Braile L. W. Upper crustal structure of the Yellowstone caldera from delay time analyses and gravity correlations. *J. of Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 2713–2730.
20. Branney M. J., Bonnicksen B., Andrews G. D. M., Ellis B., Barry T. L., and McCurry M. Snake River (SR) — type volcanism at the Yellowstone hotspot track: distinctive products from unusual, high-temperature silic super-eruptions. *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 293–314.
21. Christiansen R. L., Foulger G. E., and Evans J. R. Upper-mantle origin of the Yellowstone Hotspot. *Geol. Amer. Bull.* 2002. Vol. 114. P. 1245–1256.
22. Eaton G. P., Christiansen R. L., Iyer H. M., Pitt A. M., Mabey D. R., Blank H. R., and Gettangs M. E. Magma beneath Yellowstone National Park. *Science.* 1975. Vol. 188. P. 787–796.
23. Christiansen R. L. and McCurry M. Contrasting origins of Cenozoic silicic volcanic rocks from the western Cordillera of the United States. *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 251–268.
24. Melekestsev I. V. and Slezin Yu. B. Magma superflows in the Bering Sea. Partla. The model and the Geological and Geomorphologic features. *Volcanol. Seismol.* 2017. No. 1. P. 3–16. (in Russ.)
25. Watkins N. D. and Gunn B. M. Major and trace element variation in seventy successive Miocene lavas from southeastern Oregon, U. S. A. *Intern. Assn. Volcanology and Chem. Earth's Interior*, Symposium on Volcanoes and Their Roots, Oxford Univ. Abstracts vol. 1969. 276 p.
26. Brueseke M. E., Hart W. K., and Heizler M. T. Diverse mid-Miocene silicicy volcanism associated with the Yellowstone-Newberry thermal anomaly. *Bull. Volcanol.* 2008. Vol. 70. No. 3. P. 343–360.
27. Magill J. and Cox A. Post-Oligocene tectonic rotation of the Oregon western Cascade Range and the Klamath Mountains. *Geology.* 1981. Vol. 9. P. 27–131.
28. Peng X. and Humphreys E. D. Crustal velocity structure across the eastern Snake River Plain and the Yellowstone Swell. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 7171–7186.
29. Sparlin M. A., Braile L. W., and Smith R. B. Crustal structure of the eastern Snake River Plain determined from ray-trace modeling of seismic refraction data. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 2619–2633.
30. Smith R. B. and Bruhn R. L. Intra plate extensional tectonics of the western U. S. Cordillera: inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics and thermal-mechanical models of brittle-ductile deformation. *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. P. 5733–5762.
31. Melekestsev I. V. *Vulkanizm i rel'efoobrazovanie* (Volcanism and relief-formation). Moscow: Nauka (Publ.), 1980. 212 p.
32. Polyak B. G. and Melekestsev I. V. Productivity of volcanic apparatuses. *Volcanol. Seismol.* 1981. No. 5. P. 22–37. (in Russ.)
33. Volcanoes of the World. Siebert L., Simkin T., Kimberly P. Eds. *Smithsonian Institution*. University of California Press. 2010. 551 p.
34. Christiansen R. L. Yellowstone Plateau. *Volcanoes of North America. United States and Canada*. Wood Ch. A., Kienle J. Eds. Cambridge University Press. 1991. P. 263–266.
35. Karpov G. A., Fazlullin S. M., and Nadeznaya T. B. Liquid sulfur at the bottom of a thermal lake in the Uzon, caldera, Kamchatka. *Volconol. Seismol.* 1996. No. 2. P. 34–47. (in Russ.)
36. White D. E. Thermal waters of volcanic origin. *Geol. Soc. of America Bull.* 1957. Vol. 68. P. 1637–1658.
37. White D. E. Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 458-V. 1968. 109 p.
38. Fournier R. O. and Pitt A. M. The Yellowstone magmatic — hydrothermal system, U. S. A. *Geothermal Resources Council International Symposium on Geothermal Energy*, International Volume. 1985. P. 319–327.
39. Fournier R. O., White D. E., and Truesdell A. H. Convective heat flow in Yellowstone National Park. *Second United Nations Symposium on Development and Use of Geothermal Resources Proceedings.* 1976. P. 731–739.
40. Sibson R. H. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of United States. *Bull. Seism. Soc. of America.* 1982. Vol. 72. P. 151–164.
41. Melekestsev I. V. The types and ages actives volcanoes in Kamchatka. *Bull. Volcanol. Stan.* 1973. No. 49. P. 10–17. (in Russ.)