

УДК 502/504+624.131

КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МАССИВОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

© 2024 г. В. А. Королев^{1,*}, Ю. В. Фролова^{1,**}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: va-korolev@bk.ru

**E-mail: ju_frolova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к печати 10.10.2024 г.

Выявлены основные особенности широко распространенных в вулканических областях Земли континентальных эколого-геологических систем (ЭГС) массивов гидротермальных грунтов локального уровня на примере одного из термальных полей юга Камчатского полуострова – Восточно-Паужетского геотермального поля. Проанализированы абиотические и биотические компоненты данных ЭГС. Установлены специфические черты литотопов рассматриваемых ЭГС, представленных массивами гидротермально-метасоматических грунтов с определенным рельефом и характерным гидротопом, а также развитыми в их пределах геохимическими, геодинамическими и геофизическими полями. Литотопы в свою очередь обуславливают специфические эдафотопы на их поверхности, а также развитие своеобразных биоценозов: термофильных микробиоценозов, сообществ характерных растений и животных термофилов. Для ЭГС массивов гидротермальных грунтов характерна горизонтальная зональность, проявляющаяся во всех их компонентах и обусловленная, прежде всего, наличием зональности температурной аномалии в рассматриваемых гидротермах. Основным определяющим фактором формирования специфических особенностей данной ЭГС является своеобразие ее литотопа, представленного массивом гидротермально-метасоматических грунтов, обладающего вертикальной и горизонтальной зональностью. Выявленные особенности в составе и структуры анализируемой ЭГС необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и инженерно-экологических изысканиях на аналогичных объектах.

Ключевые слова: эколого-геологическая система, термальное поле, литотоп, эдафотоп, микробиоценоз, фитоценоз, зооценоз, гидротермальные грунты, метасоматоз, термофилы

DOI: 10.31857/S0869780924060013 EDN: AMGJYS

ВВЕДЕНИЕ

Гидротермы, т.е. горячие водные растворы, мигрирующие в земной коре, широко распространены на Земле как в океанических, так и в континентальных областях. Первые формируют аквальные гидротермальные экосистемы, а вторые образуют континентальные (или сухопутные) экосистемы. Массивы континентальных гидротермальных грунтов приурочены к районам активного вулканизма и представляют собой сложно построенные толщи, формирующиеся в пределах гидротермальных систем (ГТС) под воздействием флюидов с температурой до 400°C. Они широко распространены как в нашей стране (Камчатка, Курилы, Сахалин, Чукотка, Кавказ, Прибайкалье, Приморье и др.), так и зарубежом (Исландия, Эфиопия, Новая Зеландия, США, Япония, Индонезия, Китай, Турция, Италия и др.) [12].

Гидротермальные системы, как правило, приурочены к вулкано-тектоническим депрессиям или склонам вулканических массивов, сложенным вулканогенными и вулканогенно-осадочными

отложениями. Интенсивно трещиноватые, хорошо проницаемые породы являются вмещающим подземных вод, которые нагреваются аномально высоким тепловым потоком. В качестве источников тепла рассматриваются остывающие интрузивные и субвулканические тела, магматические очаги, зоны разломов и иные [2]. Согласно современным представлениям, ГТС представляют собой конвективные ячейки, в пределах которых циркулируют воды метеорного происхождения. Проникая по порам и трещинам на значительные глубины, они нагреваются, смешиваются с магматическими эманациями (CO₂, CH₄, NH₃, H₂S, В, Hg, парами HCl и др.) и поднимаются к поверхности, взаимодействуя на своем пути с вмещающими их породами. Эти процессы кардинально меняют облик материнских пород как в недрах, так и на поверхности в зонах разгрузки гидротерм и приводят к формированию гидротермально-метасоматических пород.

Характерной особенностью гидротермально измененных толщ является вертикальная

зональность, распространяющаяся от поверхности до глубины первых километров. Ее формирование обусловлено сменой термодинамических условий и дифференциацией гидротерм по мере их подъема к поверхности [13]. Обобщенная схема включает следующие зоны (снизу вверх): 1) вторичных кварцитов (кварц, серицит); 2) пропилитизации (альбит, хлорит, кальцит, серицит, эпидот); 3) фельдшпатизации (кварц, адуляр, серицит); 4) цеолитизации (ломонтит, хлорит, корренсит, кварц и др.); 5) аргиллизации (смектиты, высококремнистые цеолиты); 6) сернокислотного выщелачивания (опал, каолинит, алуниит, гидроксиды железа). Наряду с этим формируется и широтная зональность (в плане), которая, однако, изучена в меньшей степени [23].

Указанные особенности гидротермальных массивов приводят к тому, что на их поверхности формируются специфические эколого-геологические системы (ЭГС), существенно отличающиеся от окружающих. Их основными компонентами являются эдафотопы (представленные термоземами), микробоценозы (состоящие из микроорганизмов-термофилов), а также термальные фито- и зооценозы. При этом литогенной основой такой ЭГС являются литотопы массивов гидротермальных метасоматических грунтов.

Несмотря на то, что опубликовано множество работ по геологии термальных полей, по характеристике их почв, микробных сообществ, растительности и животного мира, обобщающие работы по оценке их экосистем или эколого-геологических систем отсутствуют.

Цель настоящей статьи — выявление общих особенностей континентальных (сухопутных) эколого-геологических систем элементарного иерархического уровня массивов гидротермальных грунтов.

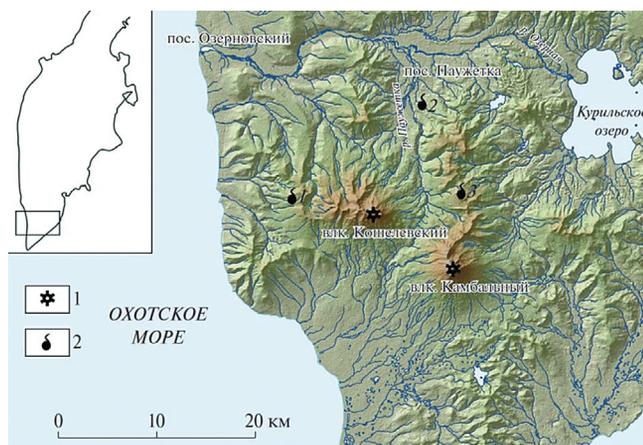


Рис. 1. Расположение ЭГС массивов гидротермальных грунтов на юге Камчатского полуострова (по [19]): 1 — действующие вулканы; 2 — термальные поля: 1 — Нижне-Кошелевское, 2 — Восточно-Паужетское, 3 — Южно-Камбальное Центральное.

Исследование выполнено на примере термальных полей юга Камчатского полуострова, причем наиболее детально изучено Восточно-Паужетское поле (рис. 1). Результаты исследования получены на основе личных материалов, полученных в ходе полевых работ в сезоны 1989–1990, 2005, 2017 и 2022 г., значительная часть которых проходила в рамках совместных работ с лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН, а также на основе обобщения опубликованных источников по данному району.

ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАССИВА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНО-ПАУЖЕТСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ

Восточно-Паужетское термальное поле относится к Паужетско-Камбальному району в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки.

Особенности абиотических компонентов

Абиотические компоненты ЭГС массивов гидротермальных грунтов представлены литотопом и эдафотопом.

Особенности литотопа ЭГС массива гидротермальных грунтов Восточно-Паужетского поля обусловлены сложным геологическим строением территории, представляющей собой посткальдерную вулканическую постройку четвертичного возраста, в пределах которой интенсивно проявлена гидротермальная деятельность.

К характеристикам литотопа данной ЭГС относятся состав и строение грунтового массива, особенности его рельефа, гидротопы, а также геохимические, геодинамические и геофизические поля [22].

Геологическое строение Паужетской ГТС достаточно хорошо изучено [1, 2, 5, 21]. Вмещающими породами рассматриваемого литотопа являются вулканогенно-осадочные, в меньшей степени — вулканогенные отложения неоген-плейстоценового возраста, существенно измененные под действием термальных флюидов в условиях низкотемпературной пропилитизации и аргиллизации.

Поле расположено на северо-западном склоне Камбального вулканического хребта на высоте около 300 м над уровнем моря. Оно имеет вытянутую в субширотном направлении форму с линейными размерами порядка 350 × 100 м (рис. 2).

По данным [17], размеры Центрального участка составляют 100 × 200 м по 20-градусной изотерме, проведенной на глубине 0.6–0.8 м. Наиболее прогретая площадь размером 60 × 120 м выделяется парящими грунтами (до 105°C на глубине 0.6–0.8 м), парогазовыми струями (от 100



Рис. 2. Эколого-геологическая система Восточно-Паужетского термального поля (фото Ю.В. Фроловой): а – общий вид, б – парогазовая струя, в – грязевой котел, г – разгрузка термальных вод на удалении от термального поля.

до 108–109°C на устьях), грязеводными кипящими котлами и мелкими теплыми озерами. На удалении 150–200 м от Центрального участка вниз и вверх по ручью отмечаются отдельные термальные площадки с грязеводными котлами.

Следует отметить, что термальное поле характеризуется естественным термодинамическим режимом, поскольку находится на удалении 1–2 км от эксплуатируемых участков месторождения, в отличие от других полей, которые за период эксплуатации (с 1966 г.) изменились из-за падения уровня термальных вод (исчезли гейзеры, остыли и покрылись растительностью крупные участки разгрузки гидротерм).

Роль *гидротона* в рассматриваемой ЭГС весьма значительна. Приповерхностные термальные воды, разгружающиеся на Восточно-Паужетском поле, представляют собой конденсаты вторичного пара, генетически связанного с глубинными растворами [5, 7]. По составу разгружающиеся воды кислые сульфатные и слабокислые гидрокарбонатно-сульфатные с широким катионным составом, общая минерализация не превышает 0.8 г/л. Глубинные воды нейтральные до щелочных

хлоридно-натриевые и хлоридно-гидрокарбонатные. В катионном составе преобладают натрий и кальций, присутствуют аммоний, бор [17]. Гидрохимические особенности флюидов обуславливают специфическое *геохимическое поле* в пределах рассматриваемой ЭГС.

ГТС относится к вододоминирующему типу. В ее строении выделяются два водоносных горизонта на глубинах 100–350 м и 500–750 м, приуроченные к толщам крупнообломочных туфов. Они подстилаются, разделяются и перекрываются тремя водоупорными комплексами пород. За счет разгрузки гидротерм в зонах повышенной проницаемости, на дневной поверхности сформировано несколько термальных полей, одно из которых — Восточно-Паужетское поле. Следует отметить, что в пределах Паужетской ГТС на поверхность выходят преимущественно тонко-мелкообломочные туфогенные породы, которые интенсивно преобразуются под действием разгружающихся гидротерм. Однако на отдельных участках туфы перекрыты лавовыми потоками андезит-андезитобазальтового состава. Именно на таком участке образовано Восточно-Паужетское гидротермальное поле.

Под действием химически активных термальных вод и пара исходные андезиты подвергаются аргиллизации, в ходе которой их первичные компоненты (плаггиоклазы, пироксены, вулканическое стекло) замещаются преимущественно глинистыми минералами и минералами кремнезема, при участии карбонатов, цеолитов, пирита и иных вторичных образований [15, 17]. В результате гидротермальной деятельности в разрезе термального поля сформировались три горизонта (снизу вверх): аргиллизированные андезиты, метасоматические брекчии и гидротермальные глины (мощностью от 1.5 до 6 м) [3, 17]. Мощности всех слоев крайне изменчивы, что связано с первичной неоднородностью и различной проницаемостью пород, слагающих термальное поле.

Исходные андезиты представляют собой плотные, низкопористые, прочные, слабдеформируемые породы. Гидротермальная переработка вызывает их разуплотнение и выщелачивание, при этом существенно меняются их деформационные и уменьшаются прочностные свойства. Происходит снижение плотности (с 2.71 г/см³ у неизмененных андезитов до 2.28 г/см³ у метасоматических брекчий), увеличение пористости (с 3 до 18%), снижение прочностных (прочность на одноосное сжатие с 142.3 до 20.6 МПа) и деформационных (динамический модуль упругости с 62.7 до 17.0 ГПа) характеристик [3, 24]. Такая тенденция в изменении свойств способствует дальнейшей прогрессирующей аргиллизацией. Верхний

горизонт андезитов брекчирован и превращен в метасоматические брекчии.

С поверхности термальное поле сложено гидротермальными глинами, сформированными за счет полного перерождения андезитов при взаимодействии с газо-гидротермальными флюидами. Толща глин имеет зональное строение, выражающееся в изменении цвета, консистенции, гранулометрического и минерального составов и свойств отложений. В частности, в нижней части глинистого горизонта преобладают смектиты с опалом и пиритом, в верхней – каолинит с опалом и гидроксидами железа; консистенция глин последовательно меняется от твердой в нижней части слоя до скрытотекучей в верхней [24].

Таким образом, в результате этих гидротермальных процессов формируются специфические литотопы, характерными чертами которых являются: 1) существенно глинистый состав грунтов самой верхней части разреза; 2) повышенная температура, обуславливающая температурную аномалию; 3) кислая-слабокислая среда поровых растворов в приповерхностном горизонте и щелочная на глубине; 4) измененные (по сравнению с материнскими породами) характеристики структуры и текстуры, показатели физических, физико-химических и физико-механических свойств.

Кроме изменения состава и свойств грунтов на площади ЭГС термальных полей существенно меняется *рельеф*, происходит частичное опускание поверхности, возникают отрицательные

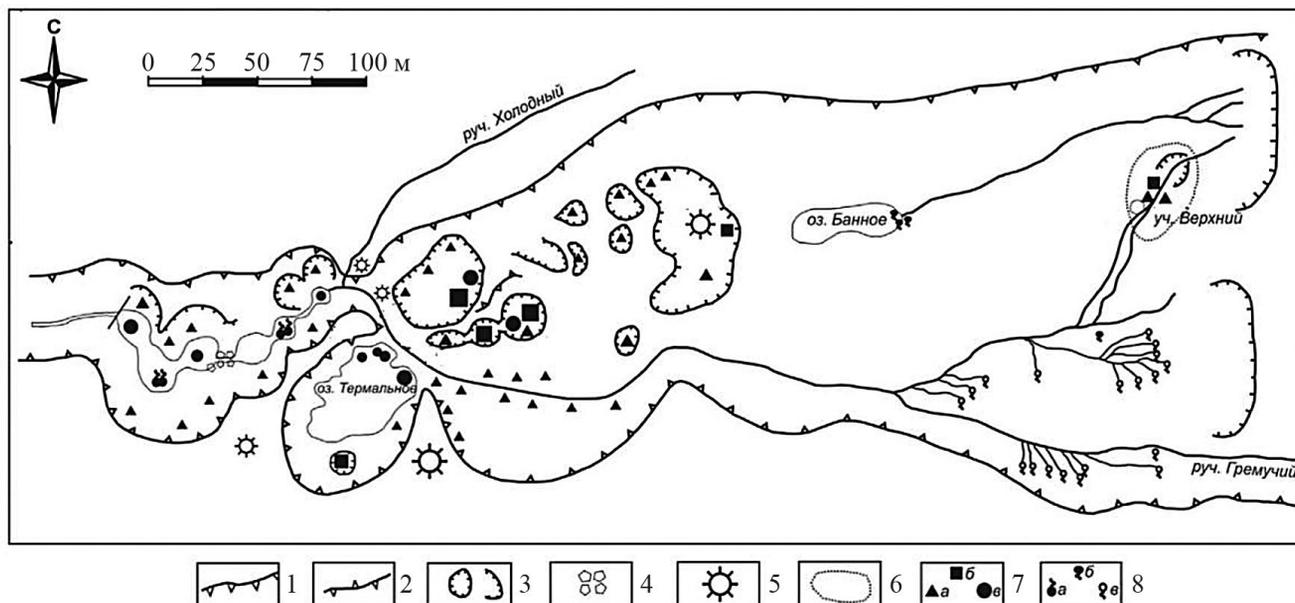


Рис. 3. Схема геоморфологического строения Нижне-Кошелевской термоаномалии (по [16]): 1 – границы основного уступа; 2 – внутренние границы водоразделов; 3 – отрицательные структуры: воронки, овраги, ограничители крупных котлов; 4 – каменные развалы; 5 – термальные бугры; 6 – границы локального термального поля (участок Верхний); 7 – парогазовые источники: *а* – газопаровые пульсирующие (“гейзеры”), *б* – крупные разгрузки термальных вод, *в* – мелкие разгрузки термальных вод, *г* – холодные источники; 8 – горячие источники.

формы рельефа — обширные эрозионные котловины. Причинами этих изменений являются эрозионные процессы в местах разгрузки термальных вод, а также гидротермальная переработка пород, сопровождающаяся выщелачиванием, увеличением пористости, снижением прочности и ослаблением массива, развитием оползневых процессов и др. В рельефе термальные поля обычно представляют собой понижения, осложненные воронками, котлами, оврагами и термальными буграми разного размера. Это особенно хорошо проявлено в пределах Нижне-Кошелевского (рис. 3) и Южно-Камбального Центрального термального поля (рис. 4).

Геофизическое поле в пределах рассматриваемого литотопа представлено, прежде всего, температурной аномалией. Внешне термальные поля представляют собой небольшие по площади и относительно однородные парящие площадки. Температура грунтов в пределах Восточно-Паужетского термального поля колеблется от 20°C на периферии до 105°C на наиболее прогретом центральном участке (на глубине 0.5–0.8 м) [17]. Вниз по разрезу температура закономерно повышается. Кроме того, проведенные в последние годы исследования показали, что данное термальное поле отличается от других полей района аномальными значениями магнитного, гравитационного и электрического полей [17].

Наряду с рассмотренными выше геохимическими и геофизическими полями важным компонентом литотопа ЭГС являются *геодинамические поля*. Последние обуславливают развитие геодинамических процессов в пределах рассматриваемого массива. Геологические процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой и представляют определенную последовательность происходящих событий, образуя парагенетические ряды (рис. 5).

Ослабленные вследствие гидротермальных процессов породы легче подвергаются водной эрозии, оползневым процессам [23]. Наряду с этими процессами на термальных полях происходят гидротермальные взрывы. В частности, внезапный выброс горячего пара с обломками андезитов произошел в ходе бурения на Восточно-Паужетском термальном поле. По-видимому, буровой снаряд попал в зону перегретого пара, приуроченную к контакту андезитового лавового потока и подстилающих его туфов. После гидротермального выброса на этом месте образовался большой грязевой котел [23].

Все вышеперечисленные особенности анализируемого литотопа безусловно сказываются и на формирующихся на них, как на литогенной основе, эдафотопе и биотических компонентах.

Особенности эдафотопе ЭГС Восточно-Паужетского гидротермального поля заключаются в формировании на его территории гидротермально-измененных почв — *термоземов*. Так, в пределах Паужетской гидротермальной системы выделены три группы термоземов, происхождение которых связано с участками различной интенсивности гидротермального воздействия [4].

1. *Термоземы на пирокластических субстратах* (без морфологически видимых признаков гидротермального изменения), распространенные за пределами термальных полей. Слоистость и полигенетичность почвенных профилей, легкий гранулометрический состав и высокая общая мощность почв (более 1.8 м) являются наиболее общими признаками почвообразования вне зоны термопроявлений. Строение профиля мезоморфных почв может быть представлено обобщенной формулой: $AO/AdA1-\{A1-Bhf/Voxp-Mr\}n$. В гидроморфных почвах в нижних горизонтах профиля отмечается оглеение; в случае воздействия минерализованных



Рис. 4. Котловина Южно-Камбального Центрального термального поля (фото Ю.В. Фроловой, 2022 г.).



Рис. 5. Геологические последствия и явления, вызванные гидротермальной деятельностью, и их взаимосвязь (по [23], с изменениями).

вод могут присутствовать солевые выцветы над уровнем капиллярной каймы. В их минеральном составе преобладают минералы материнских пород – плагиоклазы, кварц, кристобалит и отчасти смектит-каолинитовые ассоциации. Для них характерен мощный гумусовый профиль (>1 м).

2. *Термоземы, частично преобразованные* гидротермальным процессом, формирующиеся в зоне слабого или умеренного воздействия, располагаются обычно на периферии термальных полей. В нижней части профиля происходит более глубокое преобразование минеральной массы почв, вплоть до полной переработки исходных пород. При этом формируются гидротермально-метаморфические¹ горизонты (Vm) более тяжелого (суглинистого или глинистого) гранулометрического состава, происходит оструктурирование почвенной массы и ухудшение водно-физических свойств почв. В частично метаморфизованных горизонтах (суглинистого состава), наряду с признаками гидротермального метаморфизма, хорошо выражены и альфегумусовые процессы, что позволяет выделять самостоятельные иллювиально-метаморфические горизонты (Vt). Под ними формируются однородные глинистые горизонты практически без

¹ Отметим, что в почвоведении несколько иное понятие термина “метаморфизм”, чем принятое у геологов: почвоведы выделяют в разрезе почв *структурно-метаморфический горизонт* (Vm), имеющий более яркие и “теплые” тона окраски, ореховато-комковатую структуру, отличающийся от материнской породы ее структурными изменениями почвообразовательными процессами (“метаморфизацией”) и образующийся на любых материнских породах (от скальных силикатных до глинистых, кроме песков).

признаков почвообразования (Cm). Принципиальное строение профиля мезоморфных почв характеризуется формулой: Ад/АОА1-{А1-Vfh/Voxp-МГ}п-(Vm)-Ст. В почвах, контактирующих с термальными водами, отмечается оглеение: АО-{А1-Vfh(g)-МГg}п-Cmg-Gm. В их минеральном составе преобладают минералы материнских пород, а также появляются метагаллузит и каолинит-смектитовая ассоциация. Для них характерно полимодальное распределение гумуса с глубиной.

3. *Термоземы на гидротермальных субстратах*, формирующиеся в зоне наиболее интенсивного гидротермального воздействия. К ним относятся как наиболее молодые почвы, сравнительно недавно начавшие развиваться на гидротермально-измененных субстратах при понижении их температуры, так и почвы, претерпевшие сложную эволюцию с практически полным стиранием признаков предшествовавшего почвообразования и аккумуляции пеплов. В профиле почв, в силу их относительной молодости и/или высокого темпа гидротермального метаморфизма, отсутствует интенсивная слоистость, связанная с пеплопадами, а также не фиксируются погребенные горизонты. Почвенные признаки (гумусонакопление, дифференциация на генетические горизонты, выраженность альфегумусовых процессов и др.) ослабевают с глубиной, сменяясь признаками ГТ-метаморфизма (сапролитизация тефры, утяжеление гранулометрического состава, повышение внутрипочвенных температур и др.). В их минеральном составе уже практически нет минералов материнских пород, вместо них преобладают смектит и отчасти смектит-каолинитовая и каолинит-смектитовая ассоциации. Для них характерно резко убывающее

распределение гумуса с глубиной и маломощный гумусовый горизонт (0.1–0.5 м).

Почвы с полноразвитым профилем характеризуются следующим набором основных генетических горизонтов: Ад-АI-Bhf-Bm-Cm; их мощность варьирует от 0.5 до 1.0 м. Повышение температур в корнеобитаемом слое (до 20–30°C) приводит к интенсификации биологических процессов и увеличению количества поступающей в почвы биомассы [4].

Установлены закономерности *распределения солей* в почвах гидротерм [4]. Так, почвы, контактирующие с минерализованными термальными водами, характеризуются наибольшим содержанием солей в нижней части профиля (2.0–7.7%). Глубина горизонтов максимального соленакопления определяется положением уровня капиллярной каймы. Состав солей в большинстве случаев соответствует химическому составу самих воздействующих вод. Почвы на пропаренных ГТ-субстратах содержат меньшее количество солей (до 2%). Глубина горизонтов соленакопления зависит от уровня конденсации ГТ-пара и контролируется температурным фактором. Почвы в зонах аэриального выпадения солей могут содержать до 1% солей в поверхностных горизонтах. Поступление солей контролируется преобладающим направлением и дальностью переноса пара, особенностями рельефа, и отмечается и за пределами термальных полей.

Особенности биотических компонентов

Биотические компоненты рассматриваемой ЭГС локального уровня представлены характерными видами микробсообщества, фито- и зооценоза, сообщества которых составляют данный биоценоз.

Особенности микробсообщества рассматриваемой ЭГС сформировались под влиянием геотермальных процессов на микробные сообщества, развивающиеся в ее пределах. Давно было обнаружено, что в геотермальных источниках формируются специфические микробсообщества, для которых ведущими факторами являются температура и состав геотермальных растворов [6]. При этом часто основную массу микробиоты составляют экстремофилы.

Химические компоненты ГТ-систем являются основными источниками энергии для хемоавтотрофных микроорганизмов, которые в этих биотопах и являются первичными продуцентами органического вещества, формируя цианобактериальные маты, а также взвеси и обрастания различной мощности. В последние годы появились комплексные работы, главным образом, микробиологов по изучению жизни в экстремальных природных условиях [10].

В ЭГС Восточно-Паужетского геотермального поля также выявлены микробные сообщества экстремофилов, образующие так

называемые “микробные маты”, основу которых составляют термофильные микроорганизмы. В составе этих сообществ здесь обнаружены виды, для которых оптимальны pH около 7–8 и температура 40–70°C. Это аэробные бактерии: *Thermus aquaticus*, *Th. flavus*, *Th. thermophilus*, *Th. ruber*, *Bacillus caldolyticus*, *B. caldovelox*, *B. thermocatenuatus*, *B. acidocaldarius*, *Chloroflexus aurantiacus* [8].

Кроме них в Паужетских гидротермах обнаружены различные сине-зеленые водоросли – цианобактерии. Среди них выявлены цианобактерии порядка *Mastigocladales*, представленные в основном мастигокладусом пластинчатым (*Mastigocladales laminosus*), для которого характерно V-образным ветвление. В этом порядке одно семейство *Mastigocladaceae* содержит семь родов, почти все с одним видом. Их слоевища кожистые, губчато-мясистые, крепкие и твердые, иногда слистые и с зернышками извести внутри, сине-вато- или оливково-зеленые, нити густо переплетающиеся. Наиболее пышное развитие этих цианобактерий отмечено при температуре 45–52°C, pH 7.0–8.0 в хлоридно-натриевых, углекисло-натриевых источниках с общей минерализацией 1.36–3.78 г/л и преобладанием уголекислоты, сероводорода, аммиака в составе парогазовых струй [8].

Другие синезеленые водоросли, выявленные в Паужетских гидротермах, относятся к порядку осцилляториевых (*Oscillatoriales*). Здесь встречаются виды: *Phormidium amhiguum*, *Ph. angustissimum*, *Ph. bohneri*, *Ph. foveolarum*, *Ph. frigidum*, *Ph. gelatinosum*, *Ph. inundalum*, *Ph. laminosum*, *Ph. mole*, *Ph. mucicola*, *Ph. ramosum*, *Ph. tenue*, *Ph. thermophilum*, *Ph. valderiae*, *Ph. valderiae*. Наиболее богаты видами нейтральные источники, в щелочных (pH 8.0–9.0) гидротермах видовое разнообразие меньше. Общий диапазон температур 30–70°C. Наиболее пышное развитие отмечено при температуре 40–50°C [8].

Общей особенностью для указанных микробных сообществ Паужетских гидротерм является наличие горизонтальной и вертикальной зональности в их распространении, которая, в свою очередь, обусловлена гидротермально-метасоматической зональностью строения их литотопов и эдафотопов, описанных выше.

Особенности фитоценоза ЭГС локального уровня Паужетских гидротерм целиком определяются абиотическими факторами: локальными аномалиями температурного поля, химизма подземных и поверхностных вод, состава и свойств грунтов и эдафотопов. Согласно геоботаническому районированию, данный фитоценоз относится к Южнокамчатскому тундрово-стланиковому округу, входящему в Южнокамчатско-Северокурильскую тундрово-стланиковую провинцию [14].

В пределах фитоценоза рассматриваемой ЭГС локального уровня в диапазоне высот 130–300 м над уровнем моря выявлены мхи, лишайники-термофилы (как, например, кладония

вулканная — *Cladonia vulcani*), а также обнаружено 112 видов и подвидов сосудистых растений, относящихся к 91 роду и 38 семействам [18]. Характерной особенностью растительного покрова гидротермально-прогретых местообитаний Паужетских гидротерм является наличие развитого мохового покрова. Развитие мохового покрова на ГТ-прогретых почвах объясняется, вероятнее всего: 1) рассредоточенным парением, создающим слой пара у поверхности земли; 2) слабой конкуренцией со стороны сосудистых растений на этих территориях. В распределении видов мхов прослеживается четкая зональность в плане [18].

В целом исследование изменчивости морфологических показателей, проективного покрытия и плотности побегов, выполненное на примере *Artemisia opulenta*, как одного из распространенных видов в пределах термального поля показало, что интенсивный ГТ-процесс оказывает угнетающее действие на растения [18]. Согласно исследованиям Т.Ю. Самковой [18], от центра к периферии термоаномалии растет общее число видов, число видов в сообществах и число сообществ. Максимальное число сообществ и местообитаний на территории термального поля приурочено к умеренно прогретой зоне за границей рассредоточенного парения. Максимальное число видов характерно для сообществ разнотравных лугов в слабо прогретых местообитаниях на периферии термоаномалии. В то же время здесь встречаются и растения-термофилы, как например, фимбристилис охотский (*Fimbristylis ochotensis*), произрастающий исключительно у термальных источников с температурой воды выше 50°C. Из прочих растений термофилов отмечены киллинга камчатская (*Kyllinga kamtschatica*), ореорхис раскидистый (*Oreorchis patens*), черела камчатская (*Bidens kamtschatica*), антоцерос пашенный (*Anthoceros agrestis*) и др., многие из которых являются реликтами теплых климатических периодов и относятся к охраняемым видам [18, 20].

В горизонтальной структуре растительности Восточно-Паужетского термального поля Т.Ю. Самковой [18] были выявлены характерные сочетания фитоценозов, образующих комплексы поясного строения, не встречающиеся вне ГТ-полей. Линейные размеры микропоясных комплексов на исследованных термальных полях варьируются от нескольких метров до нескольких десятков метров. Чаще встречаются микропоясные комплексы, диаметр центральной зоны которых составляет 4–5 м. Встречаются концентрические, эксцентрические, мозаичные микропоясные комплексы, которые, располагаясь на близких расстояниях, создают картину полицентрической комплексности. Последовательно сменяющие друг друга сообщества микропоясных комплексов по сути являются экологическими рядами. Смена сообществ происходит вдоль градиента температуры почв, а с учетом сопутствующего комплекса факторов — вдоль

комплексного градиента тепловой интенсивности геотермального процесса.

При этом для фитоценозов Восточно-Паужетского поля был выявлен обобщенный экологический ряд растительных сообществ, сменяющих друг друга по мере удаления в стороны от термопроявлений. В *мезоморфных условиях* это ряд сообществ: полевицево-фимбристелисово-зеленомошные — росичковые — лапчатковые — полынно-лапчатковые — лапчатово-полынные — полынные — сообщества разнотравных лугов — сообщества крупнотравных лугов. В *гигромезоморфных условиях* реализуется другой эколого-фитоценотический ряд: полевицево-фимбристелисово-зеленомошные — росичковые — полевицевые — полынные — ирисово-кровохлебковые — вейниковые сообщества [18].

Установлено также [18], что растительные сообщества отражают (индицируют) в первую очередь не конкретные почвенные разности, а интенсивность современного ГТ-процесса. Из этого следует, что: а) изменение экологических условий по мере активизации или угасания ГТ-процесса влечет за собой сукцессионные изменения сообществ; б) ведущими абиотическими факторами, детерминирующими смену сообществ, являются не консервативные характеристики, обусловленные ГТ-процессом, такие как общая мощность почв, мощности отдельных генетических горизонтов, гранулометрический состав, а динамичные факторы, существующие, пока существует интенсивный ГТ-процесс, и исчезающие вместе с затуханием процесса.

Т.Ю. Самковой [18] для Паужетских гидротерм было выделено шесть зон различной тепловой интенсивности влияния ГТ-процесса на фитоценозы. Границы между зонами соответствуют почвенным изотермам и смене растительных сообществ в пределах термальных полей: 1) граница экстремальных температур почв (30–25°C на глубине 5 см в октябре) — граница зоны II, индицируется границами полевицево-фимбристелисово-зеленомошных сообществ, границами распространения редких видов: *Fimbristylis ochotensis*, *Agrostis pauzhetica*, *Campulopus umbellatus*, *C. atrovirens*, *C. pyriformis*; 2) граница рассредоточенного парения (20–15°C на глубине 5 см) — переходная зона между зоной III и IV, индицируется границей между полынно-лапчатковыми и полынными сообществами; 3) граница между умеренно прогретыми и слабо прогретыми местообитаниями (10°C на глубине 5 см) индицируется границей между полынными сообществами (зона IV) и сообществами разнотравных лугов (зона V). За пределами выделенных границ происходят скачкообразные изменения количества видов.

Особенности зооценоза ЭГС в пределах ГТ-полей обусловлены взаимодействием факторов, определяющих специфику компонентов

эколого-геологических систем, набор и сочетание которых отличаются от характерных для зональных условий. Как и для фитоценозов по мере приближения к термопроявлениям в зооценозах меняется набор действующих факторов и нарастает их напряжение. В соответствии с этим сообщество животных термальных полей по совокупности признаков (видовому составу и разнообразию, биомассе и др.) все более отличаются от зональных. При этом формируется микропоясное строение зооценозов термальных полей, что соответствует скачкообразному характеру изменений комплекса абиотических факторов.

В то же время, влиянию зональности в пределах Паужетских термальных полей подчиняются не все животные, а только самые консервативные в смысле мобильности – гидробионты, а также тесно связанные с почвами и подпочвенными грунтами, как средой обитания, а также дендрофильные организмы [11]. К ним относятся, прежде всего, различные беспозвоночные – кольчатые черви, моллюски, некоторые членистоногие (пауки, многоножки, клещи, насекомые). Мобильные виды животных (некоторые насекомые, а также перелетные птицы, крупные млекопитающие) не подчиняются микрозональности, они могут встречаться как в пределах биотопа ГТ-систем, так и за их границами.

Среди насекомых Камчатки обнаружены облигатные виды двукрылых (*Diptera*) экстремофилов – журчалки-эристаллины (*Eristalinus sepulchralis*), основная часть жизненного цикла которых в кальдере вулкана Узон проходит в исключительных условиях сероводородных гидротермальных

источников с химическим составом, недопустимым для большинства других организмов. К настоящему времени в гидротермальных водоемах Камчатки обнаружено свыше 100 видов насекомых – гидробионтов, обитающих при повышенных температурах и гидрохимически более агрессивной среде, чем за пределами ГТ-полей [10].

Геотермальная активность на границе лесной и субальпийской растительности обуславливает на этой территории большое биотопическое разнообразие местности и, как следствие, разнообразие птиц: видовое разнообразие составляет около 31 вида на км², а плотность населения птиц – около 212 пар/км². Кроме того, гидротермы определяют возможность зимовки здесь некоторых видов птиц [9]. Многие из них относятся к охраняемым видам [20].

Общие особенности эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов

В результате выполненного анализа можно охарактеризовать общие особенности ЭГС массивов гидротермальных грунтов, представленные в табл. 1, из данных которой следует, что абиотические и биотические компоненты этих систем тесно взаимосвязаны, а их взаимное влияние приводит к формированию зональности как их компонентов, так и ЭГС в целом. При этом, поскольку в плане температурное поле гидротермы в самом общем виде в основном имеет почти концентрическую структуру, то и обусловленная им зональность ЭГС и ее компонентов также имеет квазиконцентрическую структуру.

Таблица 1. Особенности эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов

Особенности абиотических компонентов	Особенности биокосных и биотических компонентов:			
литотопа	эдафотопа	микробоценоза	фитоценоза	зооценоза
1. Специфические зональные гидротермально-метасоматические грунты 2. Температурная аномалия 3. Особый состав и pH гидротермальных растворов 4. Измененные характеристики структуры и текстуры, показатели свойств грунтов 5. Специфический рельеф 6. Парагенез геодинамических и гидротермальных процессов, активизация ЭГП	1. Развитие термоземов на: – вулканогенно-осадочных (туфогенных) грунтах; – частично преобразованных эффузивных (андезитах-андезитобазальтах) грунтах; – гидротермально-метасоматических (глинистых) грунтах; – четвертичных склоновых отложениях. 2. Наличие горизонтальной зональности почв	1. Преобладание микробов-термофилов. 2. Наличие анаэробных (на глубине) и аэробных (в верхней части) микробных сообществ. 3. Разнообразие цианобактерий. 4. Наличие горизонтальной зональности микробных сообществ.	1. Развитие термофильных фитоценозов. 2. Наличие горизонтальной микрозональности растительных сообществ.	1. Развитие термофильных зооценозов беспозвоночных и дендрофильных животных. 2. Наличие горизонтальной зональности зооценозов.

Структура эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов

Проведенный анализ позволяет получить обобщенную структуру эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов, показанную на рис. 6.

Как следует из представленной схемы биотоп рассматриваемой ЭГС образован тремя абиотическими компонентами: литотопом, гидротопом и эдафотопом. Наличие температурной аномалии в литотопе (температурного поля) обуславливает вертикальную и горизонтальную зональность, проявляющуюся в особенностях зонального изменения грунтов, рельефа, геохимического, геофизического и геодинамического полей. Это также отражается в зональности гидротопы и эдафотопы.

Биотические компоненты рассматриваемой ЭГС локального уровня представлены микро-, фито- и зооценозом, которые также обладают микрозональностью, обусловленной вышеуказанными факторами, прежде всего – микрозональностью почв.



Рис. 6. Структура природной ЭГС массивов гидротермальных грунтов: ГДП – геодинамические поля; ГХП – геохимические поля; ГФП – геофизические поля.

ВЫВОДЫ

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Эколого-геологические системы массивов гидротермальных грунтов обладают специфическими особенностями как абиотических, так и биотических компонентов, резко отличных от окружающих их экосистем.

2. Для эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов характерна зональность, проявляющаяся во всех их компонентах и обусловленная, прежде всего, наличием температурной аномалии.

3. Определяющим фактором формирования специфических особенностей данной ЭГС является своеобразие ее литотопа, представленного массивом гидротермальных грунтов.

4. Выявленные особенности в составе и структуры анализируемой ЭГС необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях на аналогичных объектах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьев В.В., Белоусов В.И.* Геологический очерк района Паужетского месторождения // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 8–24.
2. *Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г.* Геологическое строение и гидрологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 23–57.
3. *Большаков И.Е.* Закономерности изменения состава и свойств андезитов и андезибазальтов на термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик (Камчатка): автореф. дис. ... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 2023. 22 с.
4. *Гольдфарб И.Л.* Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки): автореф. дис. ...канд. геогр. н. М.: МГУ, 2005. 27 с.
5. *Ерощев-Шак В.А.* Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона. М.: Наука, 1992. 132 с.
6. *Заварзин Г.А., Карпов Г.А., Горленко В.М. и др.* Кальдерные микроорганизмы. М.: Наука, 1989. 120 с.
7. *Кононов В.И.* Геохимия термальных вод в областях активного вулканизма. М.: Наука, 1983. 215 с.
8. Красная книга Камчатки. Т. 2. Растения, грибы, термофильные микроорганизмы / Отв. ред. О.А. Черныгина. Петропавловск-Камчатский: Камч. печ. двор. Книжное издательство, 2007. 341 с.
9. *Лобков Е.Г.* Ревизия фауны птиц Долины гейзеров на Камчатке: видовой состав, особенности экологии // Вестник КамчатГУ. Биологические науки. 2023. № 65. С. 87–110.
10. *Лобкова Л.Е.* Жизнь на пределе существования: насекомые в экстремальных природных условиях кальдеры Узона и Долины гейзеров (Камчатка. Кроноцкий заповедник) // Состояние особо охраняемых природных территорий Дальнего Востока. Матер. научно-практич. конф., посв. 75-летию Лазовского

- заповедника. Владивосток: Изд-во “Русский Остров”, 2010. С. 159–166.
11. Лобкова Л.Е. Основные векторы адаптации насекомых к условиям обитания на геотермальных полях Камчатки // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: доклады 4-й научн. конф. Петропавловск-Камчатский: 2004. С. 96–99.
 12. Маврицкий Б.Ф. Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. М.: Наука, 1971. 242 с.
 13. Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
 14. Нештаева В.Ю. Растительность полуострова Камчатка. М.: КМК, 2009. 537 с.
 15. Пампура В.Д. Минералообразование в гидротермальных системах. М.: Наука, 1977. 204 с.
 16. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В., Королева Г.П. Характеристика приповерхностного горизонта гидротермальных глин Нижне-Кошелевского и Паужетского геотермальных месторождений // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2008. № 2. Вып. № 12. С. 116–134.
 17. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С. и др. Минералообразование на Восточно-Паужетском термальном поле (Южная Камчатка) как отражение влияния глубинного щелочного флюида и эпитептермальной рудообразующей системы // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 2. С. 255–279.
 18. Самкова Т.Ю. Влияние гидротермального процесса на растительность (на примере Паужетской гидротермальной системы Камчатки): автореф. дис.... канд. б. н. Петропавловск-Камчатский, 2009. 27 с.
 19. Сергеева А.В., Житова Е.С., Нуждаев А.А., Назарова М.А. Моделирование процесса минералообразования на термоаномалиях с аммонийно-сульфатными термальными водами: роль водородного показателя (рН) // Вулканология и сейсмология. 2022. №1. С. 39–53.
 20. Справочник-определитель редких и охраняемых видов животных и растений Камчатского края / Отв. ред. О.А.Чернягина. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2013. 124 с.
 21. Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 295 с.
 22. Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
 23. Фролова Ю.В. Формирование инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород (на примере Курило-Камчатской вулканической дуги): автореф. дис. докт. г.-м. н. М.: МГУ, 2022. 34 с.
 24. Фролова Ю.В., Чернов М.С., Рычагов С.Н. и др. Преобразование андезитов в разрезе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Матер. XX региональной конф. “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 223–226.

CONTINENTAL ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF HYDROTHERMAL SOILS MASSIFS OF SOUTH KAMCHATKA

V. A. Korolev^{a, #}, Yu. V. Frolova^{a, ##}

^aGeological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

[#]E-mail: va-korolev@bk.ru

^{##}E-mail: ju_frolova@mail.ru

The authors identified the main features of continental (land) ecological-geological systems (EGS) of hydrothermal soil massifs at the local level using the example of thermal fields in the south of the Kamchatka Peninsula — the East Pauzhetsky geothermal field. The field is located on the northwestern slope of the Kambalny volcanic ridge at an altitude of about 300 m above sea level. It has a shape elongated in the sublatitudinal direction with linear dimensions of the order of 350×100 m. From the surface, the thermal field is composed of hydrothermal clays formed due to the complete degeneration of andesites during interaction with gas–hydrothermal fluids. The abiotic and biotic components of the EGS data were analyzed. The specific features of the lithotopes of the considered EGS, represented by massifs of hydrothermal-metasomatic soils with a certain topography, a characteristic hydrotope, as well as geochemical, geodynamic and geophysical fields developed within their boundaries, have been established. The characteristic features of the lithotope of the EGS under consideration are: 1) the essentially clayey composition of the soils in the uppermost part of the section; 2) elevated temperature causing a temperature anomaly; 3) acidic–slightly acidic environment of pore solutions in the near-surface horizon and alkaline at depth; 4) changed (compared to parent rocks) characteristics of structure and texture, indicators of physical, physico-chemical and physico-mechanical properties. Lithotopes, in turn, determine specific edaphotopes on their surface, as well as the development of peculiar biocenoses: thermophilic microbiocenoses, communities of characteristic plants and animal thermophiles. The EGS of hydrothermal soil massifs is characterized by horizontal zoning, which manifests itself in all of its components and is caused, first of all, by the presence of a zonal temperature anomaly in the hydrotherms under consideration. The main determining factor in the formation of the specific features of this EGS is the originality of its lithotope, represented by an array of hydrothermal-metasomatic soils with vertical and horizontal zoning. The identified features in the composition and structure of the analyzed EGS must be taken into account during engineering and environmental studies and engineering and environmental surveys at similar objects.

Keywords: ecological-geological system, thermal field, lithotope, edaphotope, microbiocenosis, phytocenosis, zoocenosis, hydrothermal soils, metasomatism, thermophiles

REFERENCES

1. Aver'yev, V.V., Belousov, V.I. [Geological sketch of the area of the Pauzhetskoye field]. In [Pauzhetskie hot waters in Kamchatka]. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 8–24. (In Russian)
2. Belousov, V.I., Sugrobov, V.M., Sugrobova, N.G. [Geological structure and hydrological features of the Pauzhet hydrothermal system]. In [Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka]. Vladivostok, 1976, pp. 23–57. (In Russian)
3. Bol'shakov, I.Ye. [Patterns of changes in the composition and properties of andesites and andesibasalts in the thermal fields of the Pauzhetsko-Kambalny district and the Bolshoy Semyachik massif (Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Geol.-Min.) Sci. Dissertation, Moscow, Moscow State University, 2023, 22 p. (In Russian)
4. Gol'dfarb, I.L. [The influence of the hydrothermal process on soil formation (on the example of Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Geol.) Sci. Dissertation, Moscow, Moscow State University, 2005, 27 p. (In Russian)
5. Yeroshchev-Shak V.A. [Hydrothermal subsurface lithogenesis of the Kuril-Kamchatka region]. Moscow, Nauka Publ., 1992, 132 p. (In Russian)
6. Zavarzin, G.A., Karpov, G.A., Gorlenko, V.M. et al. [Kal'dernyye mikroorganizmy]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 120 p. (In Russian)
7. Kononov, V.I. [Geochemistry of thermal waters in the areas of active volcanism]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 215 p. (In Russian)
8. [The Red Book of Kamchatka. Vol. 2. Plants, fungi, thermophilic microorganisms]. O.A. Chernyagin., (Ed), Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamch. pech. dvor. Book Publ. House, 2007, 341 p. (In Russian)
9. Lobkov, E.G. [Revision of the bird fauna of the Geyser Valley in Kamchatka: species composition, ecological features]. *Bulletin of Kamchatka State University, Biological sciences*, 2023, no. 65, pp. 87–110. (In Russian)
10. Lobkova, L.E. [Life at the limit of existence: insects in extreme natural conditions of the Uzon caldera and the Valley of geysers (Kamchatka. Kronotsky Nature Reserve)]. In [The state of specially protected natural territories of the Far East: proc. scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Lazovsky Reserve]. Vladivostok, "Russian Island" Publ., 2010, pp. 159–166.
11. Lobkova, L.E. [The main vectors of insect adaptation to habitat conditions in the geothermal fields of Kamchatka]. In [Conservation of the biodiversity of Kamchatka and adjacent seas: reports of the 4th scientific conf.]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004, pp. 96–99.
12. Mavritskiy, B.F. [Thermal waters of folded and platform regions of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 242 p. (In Russian)
13. Naboko, S.I. [Hydrothermal metamorphism of rocks in volcanic areas]. Moscow, Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1963, 172 p. (In Russian)
14. Neshataeva, V.Yu. [Vegetation of the Kamchatka Peninsula]. Moscow, KMK Publ, 2009, 537 p. (In Russian)
15. Pampura, V.D. [Mineral formation in hydrothermal systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 204 p. (In Russian)
16. Rychagov, S.N., Davletbaev, R.G., Kovina, O.V., Koroleva, G.P. [Characteristics of the near-surface horizon of hydrothermal clays of Nizhne-Koshelevsky and Pauzhetsky geothermal deposits]. *Vestnik KRAUNTS. Earth sciences*, 2008, no. 2, issue 12. pp. 116–134. (In Russian)
17. Rychagov, S.N., Sandimirova, E.I., Chernov, M.S. et al. [Mineral formation in the East-Pauzhetsky thermal field (South Kamchatka) as a reflection of the influence of deep alkaline fluid and epithermal ore-forming system]. *Geology and Geophysics*, 2023, vol. 64, no. 2, pp. 255–279. (In Russian)
18. Samkova, T.Y. [The influence of the hydrothermal process on vegetation (on the example of the Pauzhet hydrothermal system of Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Biolog.) Sci. Dissertation, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009, 27 p. (In Russian)
19. Sergeeva, A.V., Zhitova, E.S., Nuzhdaev, A.A., Nazarova, M.A. [Modeling of the process of mineral formation on thermoanomalial with ammonium-sulfate thermal waters: the role of the hydrogen index (pH)]. *Volcanology and seismology*, 2022, no. 1, pp. 39–53.
20. [Handbook of rare and protected species of animals and plants of the Kamchatka Territory]. O.A. Chernyagin, (ed), Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatpress Publ., 2013, 124 p. (In Russian)
21. [The structure of the hydrothermal system]. V.I. Belousov, I.S. Lomonosov, (Eds), Moscow, Nauka Publ., 1993, 295 p.
22. Trofimov, V.T. [Ecological and geological system, its types and position in the ecosystem structure]. *Bulletin of Moscow Univ, Ser. 4: Geology*, 2009, no. 2, pp. 48–52. (In Russian)
23. Frolova, Yu.V. [Formation of engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks (on the example of the Kuril-Kamchatka volcanic arc)]. Extended abstract of Cand. (Geol.-Min.) Sci. Dissertation, Moscow State University, 2022. 34 p. (In Russian)
24. Frolova, Yu.V., Chernov, M.S., Rychagov, S.N. et al. [Transformation of andesites in the section of the East-Pauzhet thermal field (South Kamchatka)]. In [Proc. XX Regional conf. "Volcanism and related processes"]. Petropavlovsk-Kamchatsky, IViS FEB RAS, 2017, pp. 223–226. (In Russian)