

УДК 554.01

## ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНОГЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ НИЖНЕ- КОШЕЛЕВСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

© 2021 г. В. В. Шанина<sup>а,\*</sup>, А. Ю. Бычков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: viosha@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2020 г.

После доработки 22.02.2021 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

В статье рассмотрены задачи и особенности мониторинга экосистем на примере вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелёвского термального поля (Южная Камчатка), находящегося на территории Южно-Камчатского заказника, включенного в Список объектов Всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО. О необходимости обособления собственно вулканогенных экосистем писал Е.К. Мархинин [1980]. Подлинно первым опытом в отечественной литературе можно считать обособление А.М. Стенченко [1977] Узон-Гейзерного гидротермального биогеоценоза. В данной статье подробно описаны химический состав термальных вод, отличающихся высокими температурами (49–95°C) и низкими рН (3.3–6.8), и донных осадков. Представлены содержания следующих химических элементов: кремний, титан, алюминий, железо, марганец, кальций, магний, фосфор, мышьяк, скандий, никель, медь, цинк, рубидий, стронций, молибден, свинец, хром, цезий, ванадий, кобальт, кадмий, олово. Рассмотрено высокое содержание в термальных водах и донных осадках кремния и присутствие диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*), которые могут служить индикатором устойчивого развития и существования данной вулканогенной экосистемы.

**Ключевые слова:** вулканогенная экосистема, термальные источники, Кошелёвский вулканический массив, диатомовые водоросли, Камчатка

**DOI:** 10.31857/S0203030621050060

### ВВЕДЕНИЕ

Комплексный мониторинг экосистем – система регулярных наблюдений за экосистемами с целью оценки их состояния, прогноза изменения в будущем и информационного обеспечения принятия управленческих, проектных и технологических решений в области сохранения природных ресурсов, биологического и ландшафтного разнообразия, ведения устойчивого экологически ориентированного лесного, охотничьего и сельского хозяйства [Водопьянова, 2011].

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) – участки земли, водной поверхности и воздушного пространства над ними, где располагаются природные комплексы и объекты, которые имеют особое природоохранное, научное, культурное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение, которые изъяты решениями органов государственной власти полностью или частично из хозяйственного использования и для которых установлен режим особой охраны [Реймерс, Штильмарк, 1978]. К таким территори-

ям относятся заповедники, национальные парки, федеральные заказники [Жарников и др., 2016].

О необходимости обособления вулканогенных экосистем писал Е.К. Мархинин [1980], в своей книге “Вулканы и жизнь” он рассматривал значение вулканических процессов для образования среды обитания живых организмов. Первым опытом в отечественной литературе считается обособление А.М. Стенченко Узон-Гейзерного гидротермального биогеоценоза в 1977 г. [Стенченко, 1977]. В статье “Вулканогенные экосистемы: предпосылки и возможности обособления” В.Е. Быкасов показал продуктивность разработки и создания экологического мониторинга вулканических областей в целях рационального природопользования [Быкасов, 2005]. Экосистемы термальных источников на примере Чукотского полуострова подробно рассматривались в 1981 г. [Экосистемы ..., 1981].

Выбранное для изучения Нижне-Кошелёвское термальное поле находится на территории Южно-Камчатского заказника, включенного в Список объектов Всемирного культурного и при-



**Рис. 1.** Точки опробования на территории Нижне-Кошелевского термального поля.  
а – кипящий котел (НК-1), б – пиритовый котел в Сухой воронке (НК-3).

родного наследия ЮНЕСКО. Российская Федерация взяла на себя обязательства по сохранению природных экосистем “Вулканов Камчатки”.

Основными задачами мониторинга экосистем ООПТ являются:

- оценка состава и структуры экосистем ООПТ;
- оценка состояния основных категорий природных комплексов ООПТ по совокупности критериев, основанных на биоиндикационных, биогеохимических, ландшафтных, гидрологических и других экологических показателях;
- оценка эффективности режимов охраны и природопользования на ООПТ;
- выявление угроз состоянию экосистем и их компонентов, определение основных факторов (природных и антропогенных), оказывающих негативное влияние на состояние экосистем ООПТ;
- накопление результатов мониторинга и их предоставление в установленном порядке заинтересованным органам государственного управления, государственным природоохранным учреждениям, научным организациям, общественности и другим;
- выработка рекомендаций для принятия управленческих решений в отношении природных комплексов (экосистем) ООПТ [Водопьянова, 2011].

Таким образом, целью данной работы является подробное рассмотрение вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелевского термального поля, задачей – выявление состава и структуры данной экосистемы и выработка рекомендаций для дальнейшего мониторинга.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы термальных растворов и донных осадков были отобраны в грязевых и водных кипящих котлах на территории Нижне-Кошелевского термального поля (Южная Камчатка) (в данной статье рассматриваются 8 точек) (рис. 1, табл. 1). В опробованных источниках с помощью портативного мультипараметрового анализатора WATER TEST определялись физико-химические параметры растворов: температура, pH, Eh, минерализация. Для определения минерализации вод использовали электрокондуктивность – SEC (specific electrical conductivity), которая измеряется инструментально *in situ*. С помощью коэффициента (0.55–0.76) SEC переводится в минерализацию – TDS (total dissolved solid) [Чудаев, 2002]. Химический состав осадков изучен на кафедре инженерной и экологической геологии на рентгеновском кристалл-дифракционном вакуумном спектрометре “Спектроскан Макс GV” В.В. Шаниной под руководством проф. Е.Н. Самарина, состав термальных растворов определен на кафедре геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра Element-2 [Бычкова и др., 2016, 2020]. Фотографии диатомовых водорослей и цианобактерий сделаны с использованием растрового электронного микроскопа LEO 1450 VP старшим научным сотрудником кафедры инженерной и экологической геологии М.С. Черновым и микроскопа “Jeol JSM-6480LV” на кафедре петрологии (в лаборатории локальных методов исследования вещества) доцентом В.О. Япаскуртом.

**Таблица 1.** Кипящие водные и водно-грязевые котлы на территории Нижне-Кошелевского термального поля

Точка	Координаты	Описание	Параметры раствора
1 (НК-1)	N51°21'44.2" E156°37'59.4"	Левый берег ручья Гремучего. Неглубокий кипящий котел среди камней – прогретая площадка у склона переработанного хребтика	85°C; pH 6.10; mS 0.13; ppt 0.06 Eh 223 mV
2 (НК-2)	N51°21'45.7" E156°37'57.3"	Большой кипящий котел в центральной части поля	87°C; pH 6.45; mS 0.19; ppt 0.09 Eh –43 mV
3 (НК-3)	N51°21'45.6" E156°38'03.7"	Старый котел среди развала глыб. Много пирита (вода серого цвета с пленкой мелкодисперсного пирита на поверхности)	76.9°C; pH 3.60; mS 2.92; ppt 1.46 Eh 73 mV
4 (НК-6)	N51°21'49.6" E156°38'13.3"	На границе Верхнего участка, у ручья, стекающего со снежника. Небольшой источник из-под двух глыб. На стенках волосы Венеры	88.8°C; pH 5.02; mS 0.61; ppt 0.31 Eh –64 mV
5 (НК-10)	N51°21'44.9" E156°38'02.6"	Правый берег Гремучего ручья. Южный склон Большой сухой воронки. Небольшой новый котел (глубина до 70 см)	86.3°C; pH 4.63; mS 0.65; ppt 0.32 Eh 40 mV
6 (НК-13)	N51°21'44.4" E156°38'00.2"	Правый борт Гремучего ручья. Центр прогретой площадки с обилием фумарол. Небольшой выход с пиритом	49.1°C; pH 3.32; mS 0.97; ppt 0.48
7 (НК-14)	N51°21'44.5" E156°37'58.1"	Северный край Термального озера. Участок, насыщенный пиритом (черная вода)	95°C; pH 6.05; mS 0.21; ppt 0.10
8 (НК-17)	N51°21'45.1" E156°37'54.8"	Окраина термального поля. На 30 м выше плотины по течению ручья. На краю большого разлива ближе к ручью Гремучий – кипящий участок	91.5°C; pH 6.84; mS 0.23; ppt 0.11 Eh –8 mV

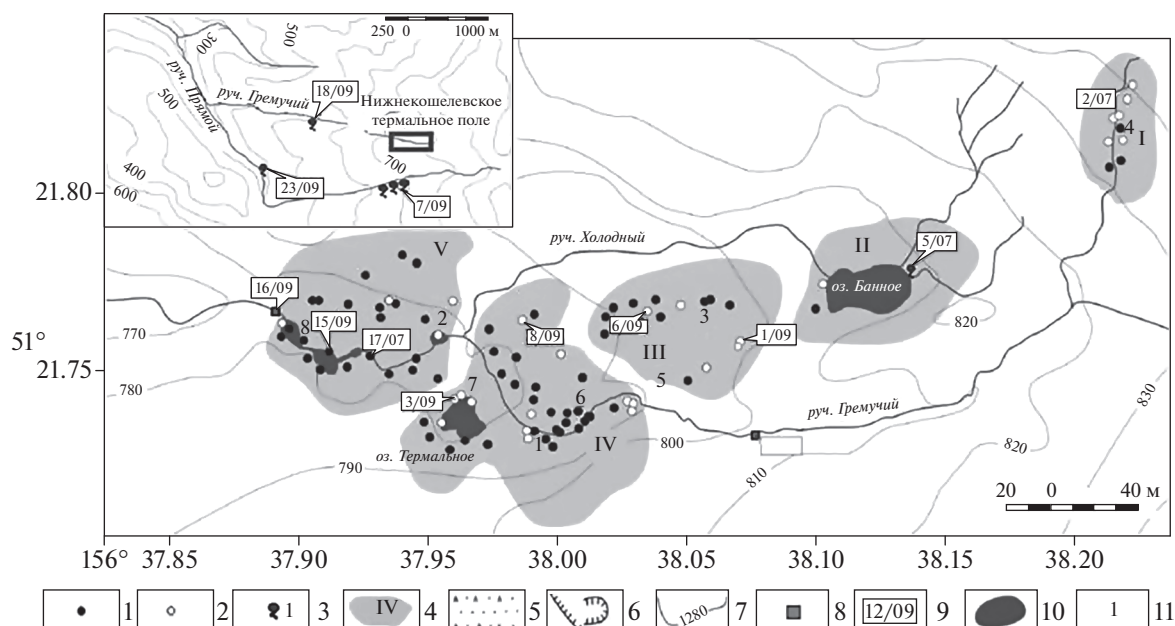
### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Кошелевский вулканический массив состоит из пяти сросшихся, полуразрушенных стратовулканов, вытянувшихся в широтном направлении. Фундамент – миоцен-плиоценовая толща, в строении которой преобладают андезитовые лавы, в подчиненном количестве лавобрекчии, туфы, туфобрекчии [Вакин и др., 1976].

На склоне Западно-Кошелевского вулкана ( $\alpha Q_{III}^1$ ) на отметке 750–800 м расположено Нижне-Кошелевское термальное поле, где на небольшой площади сконцентрировано множество мощных газопаровых струй [Вакин и др., 1976; Белоусов, 1978; Рычагов и др., 2009; Шанина и др., 2015].

Выходы Нижне-Кошелевских парогидротерм сосредоточены на площади 100 × 300 м в эрозионной котловине. Нижне-Кошелевская термоаномалия находится в сложной геоморфологической структуре, термопроявления располагаются на дне и на северном пологом склоне оврага, протянувшегося в широтном направлении [Нуждаев

и др., 2009]. На возвышенных участках располагаются струи пара, в том числе и достаточно мощные. На территории термального поля представлены различные термопроявления: газовые струи, водно-грязевые котлы, кипящие озера, мелкие разгрузки термальных вод (рис. 2). Общая минерализация вод в среднем составляет 0.3–0.7 г/л, за исключением грязевых котлов (2–3 г/л, за счет более высоких концентраций  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) [Калачева и др., 2006]. В поверхностных проявлениях Нижне-Кошелевской термоаномалии среди основных катионов преобладает аммоний ( $NH_4^+$ ) (14–39 мг/л). Высокая концентрация аммония в гидротермальном растворе и паре приводит к широкому распространению среди низкотемпературных солей, образующихся на поверхности Нижне-Кошелевского термального поля, аммониевой минерализации, особенно чермита [Житова и др., 2019]. Концентрации  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  и  $Mg^{2+}$  в большинстве источников первые мг/л. Среди анионов в поверхностных проявлениях вод преобладает сульфат-ион, а в глубинных термах Нижне-Кошелевского месторождения – гидрокарбонат-ион (до 214.8 мг/л)



**Рис. 2.** Схемы расположения основных термопроявлений Нижне-Кошелевского термального поля (на врезке термальные источники за его пределами) [Калачева и др., 2016] с дополнениями авторов.

1 – парогазовые струи; 2 – водно-грязевые котлы; 3 – термальные источники; 4 – границы термальных участков; 5 – область делювиальных отложений; 6 – эрозионные уступы; 7 – изолинии рельефа; 8 – гидростворы; 9 – номера водных проб; 10 – термальные озера; 11 – точки отбора проб, описанные в данной статье.

[Нуждаев, 2008; Рычагов и др., 2008]. Среди основных катионов водоносного горизонта геотермального месторождения преобладает  $\text{Na}^+$ , содержания которого составляют 56.1 мг/л. Количество  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  в растворенном состоянии в среднем в два раза выше (36.8–153.0 мг/л), чем в коллоидном. Алюминий присутствует только в поверхностных проявлениях Нижне-Кошелевских вод (0.7–6.8 мг/л) [Нуждаев, 2008; Рычагов и др., 2008].

В парово-газовых струях Нижне-Кошелевского термального поля соотношение объемов конденсата и газа довольно постоянно и составляет от 1/2.06 до 1/2.31. Обязательная составляющая –  $\text{CH}_4$  и его гомологи, присутствуют  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Rn}$  [Белоусов и др., 1976]. По данным А.И. Поздеева и И.Н. Нажаловой [2008], в скважинах компоненты газового состава те же, что и на термальных площадках, но составы газа на разных флангах Нижне-Кошелевского участка отличаются по содержанию основных компонентов. В центральной части главные компоненты – углекислый газ – 84.65–94.24%, метан – 2.8–6.86%, азот – 1.58–7.05%, сероводород – до 1.34%. В западной части количество метана достигает 15.18–67.29%, углекислого газа – 3.54–68.5%, азота – 11.62–40.8%. На обломках пород, находящихся в струе пара, на стенках канала, часто образуются корочки минералов, например марказит-пирито-

вые, опаловые, алунитовые, гетитовые и пр. [Сергеева и др., 2019].

Температура грунтов не превышает  $110^\circ\text{C}$ . Температура гидротермальных глинистых грунтов на глубине 0.15 м –  $44.9\text{--}97.0^\circ\text{C}$ , на 0.3 м –  $52.3\text{--}98.0^\circ\text{C}$ , на 0.5 м –  $63.5\text{--}98.4^\circ\text{C}$ . Для всех наблюдательных точек характерно увеличение температуры с глубиной и уменьшение по мере удаления от центра Нижне-Кошелевской термоаномалии.

В водах Нижне-Кошелевского месторождения парогидротерм широко распространены ценозы, включающие факультативно – автотрофные и гетеротрофные бактерии, цианобактерии, сульфат-редуцирующие бактерии, нитчатые организмы, микроскопические грибы, развивающиеся при низких температурах (14, 29 и  $49^\circ\text{C}$ ). В составе ценозов обнаружены также хемолитотрофные бактерии, гетеротрофные и аэробные зеленые бактерии, являющиеся умеренно термофильными. В воде термальных источников численность термофильных сульфат-восстанавливающих бактерий составляет 102 клеток на 1 мл. В ценозах измененных пород присутствуют как мезофильные, развивающиеся при умеренных температурах, так и термофильные, развивающиеся при температурах более  $45^\circ\text{C}$ , а также экстремально термофильные с оптимальной температурой роста  $65\text{--}70^\circ\text{C}$ . В этом ценозе обнаружены цианобактерии, хемолитотрофные бактерии, а также микроскопиче-

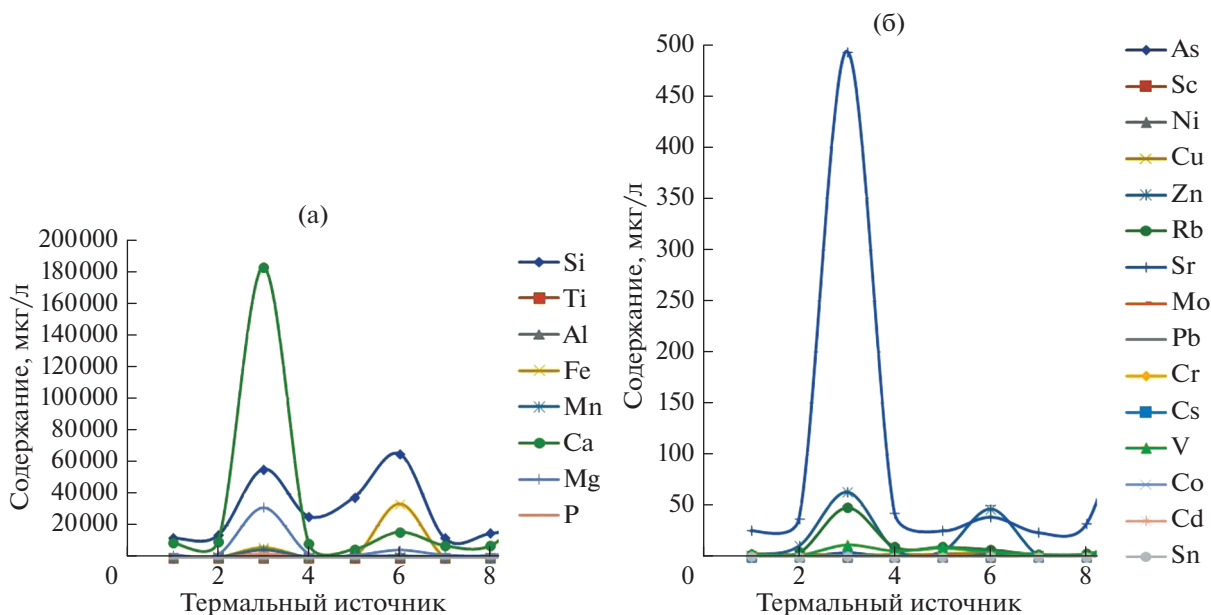


Рис. 3. Содержание основных компонентов (а) и микрокомпонентов (б) в гидротермальных растворах в кипящих водных и водно-грязевых котлах на Нижне-Кошелевском термальном поле.

ские грибы. В ценозах измененных глин сульфат-восстанавливающие бактерии занимают большее место, чем в воде самого термопроявления [Рычагов и др., 1993].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экосистема Нижне-Кошелевского термального поля может являться характерным объектом мониторинга вулканогенных экосистем, в первую очередь это связано с природными термальными водами – горячими источниками с широким диапазоном температур (49–95°C, см. табл. 1) и низкими рН (3.3–6.8, см. табл. 1), минерализация которых достигает 1.7 г/л. При этом в ряду сидерофильных элементов в водах Нижне-Кошелевского месторождения наибольшие концентрации имеет железо, достигая максимальных значений (33.9 мг/л) в водно-грязевом котле (точка НК-13), и фосфор (2.6 мг/л) в пиритовом котле Сухой воронки (точка НК-3) (табл. 2, рис. 3а). Никель в половине проб ниже предела обнаружения, максимальное содержание 0.07 мг/л в большем кипящем котле в центральной части поля (точка НК-2). Из литофильных элементов наибольшими содержаниями отличаются кальций, магний и марганец, достигая (0.18, 0.03 и 0.005 г/л соответственно) в пиритовом котле (см. табл. 2), а также кремний до 0.065 г/л в небольшом водно-грязевом котле (точка НК-13).

Среди халькофильных элементов повышенные содержания характерны для цинка (63.7 мг/л в пиритовом котле (точка НК-3)), мы-

шьяка и селена (3.9 и 0.4 мг/л соответственно), максимальные содержания которых также наблюдаются в точке НК-3 (см. рис. 3б). По химическому составу четко выделяется проба из точки НК-17 практически полным отсутствием микроэлементов (см. табл. 2), так как данная точка – это кипящий котел в ручье, где активный водообмен препятствует накоплению микроэлементов из окружающих горных пород.

Описанные выше особенности химического состава термальных источников Нижне-Кошелевского поля в первую очередь отражаются на образующихся в них донных осадках. Изученные донные осадки характеризуются высоким содержанием кремния (при этом и в осадке, и в растворе его максимальное содержание в пробе из кипящего водно-грязевого котла НК-13, а минимальное – в Термальном озере (точка НК-14)) (см. рис. 3, 4а), алюминия и железа (см. табл. 2). Содержание оксида титана в большинстве точек укладывается в диапазон для изученных пород, его минимальное количество в пробах осадка и раствора из точки НК-17 (ручей Гремучий на окраине поля). В ряду сидерофильных элементов необходимо отметить присутствие никеля во всех пробах гидротермальных растворов при преобладающем отсутствии в донных осадках Нижне-Кошелевского месторождения (присутствует только в одной пробе) (см. рис. 4б).

Важная характеристика любой экосистемы – живые организмы. Видовой состав бактерий вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелевского термального поля подробно описан в работе

**Таблица 2.** Состав донных осадков (верхние строчки) и гидротермальных растворов (нижние строчки) в кипящих водных и водно-грязевых котлах на Нижне-Кошелевском термальном поле

Параметры		НК-1	НК-2	НК-3	НК-6	НК-10	НК-13	НК-14	НК-17	Среднее	Минимум	Максимум
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Кремний	SiO <sub>2</sub> , %	57.85	58.30	62.36	68.17	58.56	70.83	33.26	59.31	58.58	33.26	70.83
	Si, мкг/л	12400	14200	55700	26100	38100	65300	12300	15400	29938	12300	65300
Титан	TiO <sub>2</sub> , %	0.91	1.02	1.11	0.86	1.13	1.26	1.44	0.78	1.06	0.78	1.44
	Ti, мкг/л	0.14	1.51	0.46	1.85	14.10	19.8	0.11	0.09	4.76	0.09	19.8
Алюминий	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	18.08	18.79	19.44	15.06	19.82	17.24	21.98	18.18	18.57	15.06	21.98
	Al, мкг/л	95.5	109	447	195	713	1025	170	73.8	354	73.8	1025
Железо	FeO(t), %	10.55	10.42	8.59	5.70	11.22	6.04	18.54	9.96	10.13	5.70	18.54
	Fe, мкг/л	28.70	116	6220	40.4	357	33872	61.8	1.91	5087	1.91	33872
Марганец	MnO, %	0.08	0.08	0.05	0.06	0.05	0.03	0.11	0.10	0.07	0.03	0.11
	Mn, мкг/л	30.6	81.1	5018	182	88.1	458	52.3	52.4	745	30.6	5018
Кальций	CaO, %	2.08	1.38	0.95	0.91	0.87	0.03	2.34	3.45	1.50	0.03	3.45
	Ca, мкг/л	9294	10116	182378	8897	5383	16114	7546	7478	30901	5383	182378
Магний	MgO, %	3.64	3.20	2.64	1.97	3.25	1.59	5.52	4.17	3.25	1.59	5.52
	Mg, мкг/л	1760	1856	31596	2454	1474	4776	1518	1298	5842	1298	31596
Фосфор	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0.22	0.16	0.16	0.12	0.18	0.15	0.27	0.13	0.17	0.12	0.27
	P, мкг/л	151	174	2606	91	601	73.8	100	160	495	73.8	2606
Мышьяк	As, ppm	0.00	0.00	0.15	0.23	0.00	0.14	0.00	0.00	0.07	0.00	0.23
	As, мкг/л	0.17	0.25	3.94	0.27	2.58	2.97	0.11	0.07	1.30	0.07	3.94
Скандий	Sc, ppm	15.90	15.20	12.81	11.17	13.27	10.58	22.35	18.03	14.91	10.58	22.35
	Sc, мкг/л	0.00	0.02	0.25	0.00	0.11	0.28	0.01	0	0.08	0	0.28
Никель	Ni, ppm	93.03	76.29	42.81	50.97	64.50	15.68	188.15	76.52	75.99	15.68	188.15
	Ni, мкг/л	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.01	0	0.07
Медь	Cu, ppm	29.84	26.00	6.40	15.67	19.95	0.00	74.80	26.00	24.83	0.00	74.80
	Cu, мкг/л	0.80	2.24	1.65	2.05	2.34	4.59	0.56	0.43	1.83	0.43	4.59
Цинк	Zn, ppm	153.89	137.70	163.29	170.11	89.76	127.34	97.02	145.40	135.56	89.76	170.11
	Zn, мкг/л	1.83	10.70	63.70	7.21	5.75	47.1	1.47	0.17	17.24	0.17	63.7
Рубидий	Rb, ppm	52.63	48.76	56.44	55.82	52.84	56.22	37.59	46.73	50.88	37.59	56.44
	Rb, мкг/л	2.44	4.17	48.40	9.70	9.72	7.21	2.24	3.09	10.87	2.24	48.4
Стронций	Sr, ppm	290.47	310.43	288.91	184.71	374.46	322.44	428.20	386.66	323.29	184.71	428.20
	Sr, мкг/л	25.70	37.40	494.00	42.50	25.60	39.1	23.8	32.9	90.1	23.8	494
Молибден	Mo, ppm	1.25	1.23	0.13	0.71	1.09	0.13	3.59	1.35	1.18	0.13	3.59
	Mo, мкг/л	0.17	0.12	0.21	0.09	2.32	0.09	0.12	0.10	0.40	0.09	2.32
Свинец	Pb, ppm	0.00	0.00	23.29	0.00	0.00	18.31	0.00	0.00	5.20	0.00	23.29
	Pb, мкг/л	0.01	0.05	0.12	0.04	0.20	0.31	0.01	0	0.09	0	0.31
Хром	Cr, ppm	45.50	43.77	42.42	40.39	46.25	39.40	65.08	44.96	45.97	39.40	65.08
	Cr, мкг/л	0.05	0.17	0.43	0.12	0.25	0.29	0.07	0.01	0.17	0.01	0.43
Цезий	Cs, ppm	0.00	3.97	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.50	0.00	3.97
	Cs, мкг/л	0.05	0.10	1.70	0.29	0.25	0.22	0.04	0.07	0.34	0.04	1.7
Ванадий	V, ppm	101.13	158.41	65.50	85.81	39.17	72.53	254.99	98.31	109.48	39.17	254.99
	V, мкг/л	3.42	1.66	11.70	5.76	8.68	4.85	2.61	2.76	5.18	1.66	11.7
Кобальт	Co, ppm	59.92	52.01	60.74	35.68	33.59	24.54	77.80	43.20	48.44	24.54	77.80
	Co, мкг/л	0.02	0.06	0.46	0.04	0.08	0.28	0.01	0	0.12	0	0.46
Кадмий	Cd, ppm	0.12	0.10	0.10	0.14	0.04	0.06	0.11	0.13	0.10	0.04	0.14
	Cd, мкг/л	0.01	0.03	0.19	0.02	0.04	0.11	0.01	0	0.05	0	0.19
Олово	Sn, ppm	4.76	2.49	7.56	0.33	5.33	0.94	13.31	4.65	4.92	0.33	13.31
	Sn, мкг/л	0.25	0.08	0.43	0.14	0.13	0.27	0.02	0	0.17	0	0.43

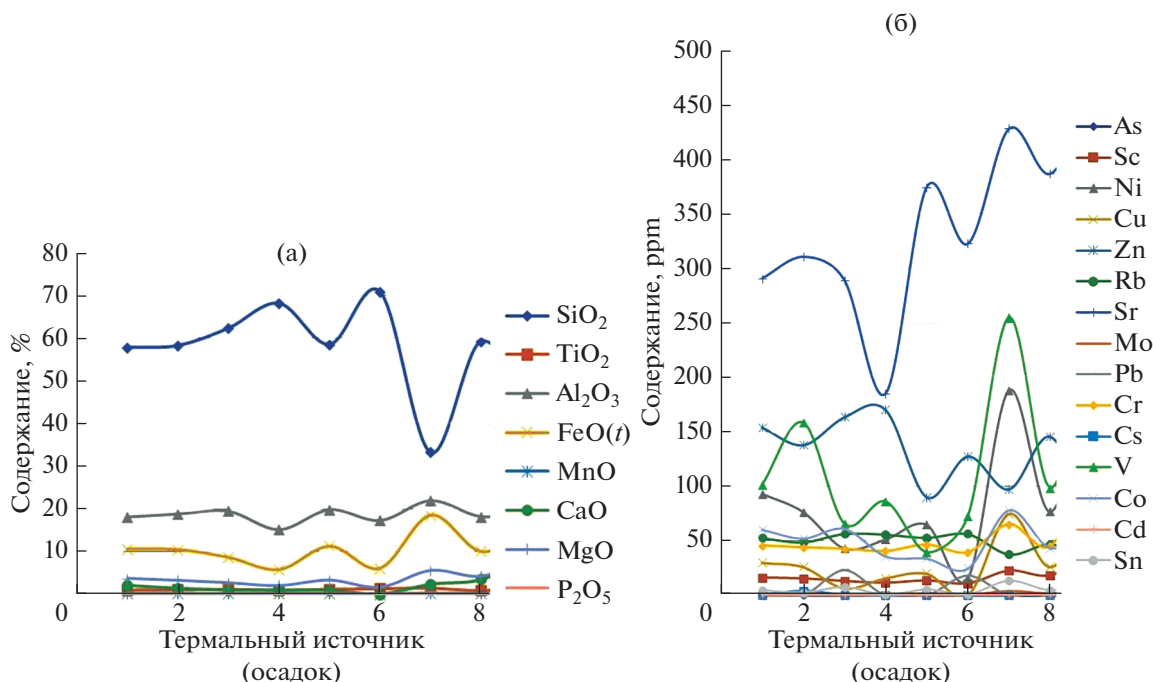
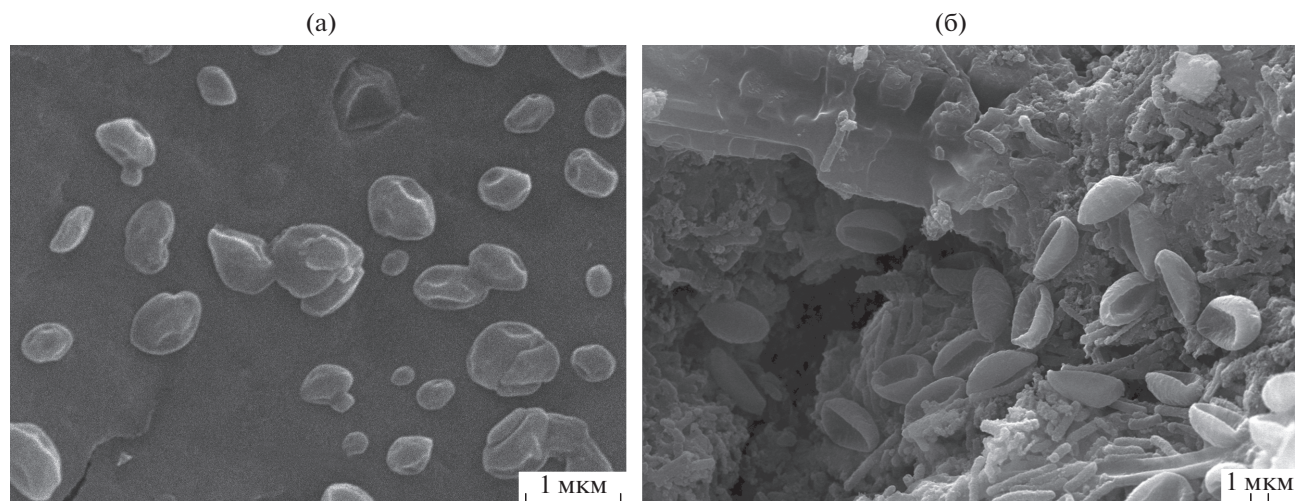


Рис. 4. Содержание основных компонентов (а) и микрокомпонентов (б) в донных осадках в кипящих водных и водно-грязевых котлах на Нижне-Кошелевском термальном поле.

“Структура гидротермальной системы” [Рычагов и др., 1993] и в работах Е.Д. Коробушкиной с соавторами. Основными обитателями термальных источников Нижне-Кошелевского поля являются прокариотные организмы, среди которых важное место занимают цианобактерии, что хорошо видно на рис. 5. По данным В.Н. Никитиной [2000], разнообразие цианобактерий в термальных источниках Камчатки велико – выявлено порядка 115 видов и внутривидовых таксонов. Известно лишь небольшое количество эукариотических организмов, встречающихся при температурах выше 50°C [Карпов и др., 2016]. Сложно найти организмы, способные выживать в высокотемпературных термальных источниках и быть маркером состояния экосистемы. Здесь нам на помощь приходят диатомовые водоросли. Долгое время считалось, что диатомовые водоросли ограничены в своем развитии температурами примерно до 40°C [Жегалло и др., 2017; Карпов и др., 2016]. С развитием растровой электронной микроскопии данные представления начали меняться. Диатомовая флора термопроявлений горячих источников на Камчатке включает более 75 видов, разновидностей и форм водорослей из классов *Coscinodiscophyceae*, *Fragilariophyceae* и *Bacillariophyceae* [Никулина, Грищенко, 2017]. Включая вид *Pinnularia acidojaponica*, который в 2001 г. был описан японскими исследователями, как обитающий в экстремальных условиях – ручьях с кислой реакцией среды и реках с высоким органиче-

ским загрязнением вод [Akihiro Tuji, 2003; Fukushima et al., 2002; Idei, Mayama, 2001]. Позднее этот вид был выявлен в перифитонных альгосообществах термальных источников Курильских островов и Сахалина [Никулина, 2010; Nikulina, Kosciolk, 2011]. Характерной особенностью самых спокойных на территории Нижне-Кошелевского термального поля условий является присутствие диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*) с кремниевым скелетом (рис. 6). Таким образом, термальные источники Нижне-Кошелевского поля являются уникальным биотопом, где эукариотические термофильные микроорганизмы нашли для себя экологическую нишу для процветания. В данной работе основное внимание уделяется диатомовым водорослям, так как размеры их клеток обычно превышают 5 мкм, тогда как у цианобактерий от 0.5 до 5 мкм [Астафьева и др., 2011], что облегчает изучение и идентификацию первых. Кроме этого, в живом природном материале цианобактерии находятся в разных состояниях жизнеспособности или посмертной деградации, что дополнительно затрудняет их идентификацию [Герасименко, Крылов, 1983].

При температуре воды более 50°C видовой состав водорослевых сообществ значительно обедняется [Никулина, Грищенко, 2017]. В гидротермах Нижне-Кошелевского поля отмечен вид *Pinnularia acidophila* (см. рис. 6в), являющийся истинным термофилом – характерным представителем горячих источников. Диатомовые водо-



**Рис. 5.** Скопление коккоидных форм с диаметром от 0.2 до 0.7 мкм, точка НК-1 (фото – В.О. Япаскурт) (а) и кокки цианобактерий (фото – М.С. Чернов) (б).

росли так зависят от диоксида кремния, что если концентрация кремнезема в определенном регионе довольно низкая, то диатомовые водоросли не будут делиться [Давидович, 2017]. Поэтому выше рассмотренные высокие содержания диоксида кремния в донных осадках термальных источников Нижне-Кошелёвского поля являются хорошим показателем устойчивого существования уникальной вулканогенной экосистемы термального поля.

Не только условия среды влияют на организмы, но и сами они активно действуют на среду обитания. Средообразующая деятельность организмов проявляется в их влиянии на химические и физические свойства воздуха, воды, почвы, минералов [Лукашевич и др., 2009]. На новое направление в разработке проблемы низкотемпературной гидротермальной минерализации, связанное с обнаружением в толще миоценовых платобазальтов фоссилизированных фрагментов микробиоты – возможных активных агентов формирования слоистых силикатов и ряда других минералов, указывал А.Р. Гептнер [2009]. В пределах термальных площадок, на которых обильно развиваются альгобактериальные биоценозы (маты), отмирающие термофильные микроорганизмы фоссилизируются, как правило, с участием кремнезема [Ерошев-Шак и др., 2007].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшие физические и химические параметры, определяющие условия обитания микроорганизмов вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелёвского термального поля (температурный и водный режим, химический состав грунтов и вод), подробно охарактеризованы в многочис-

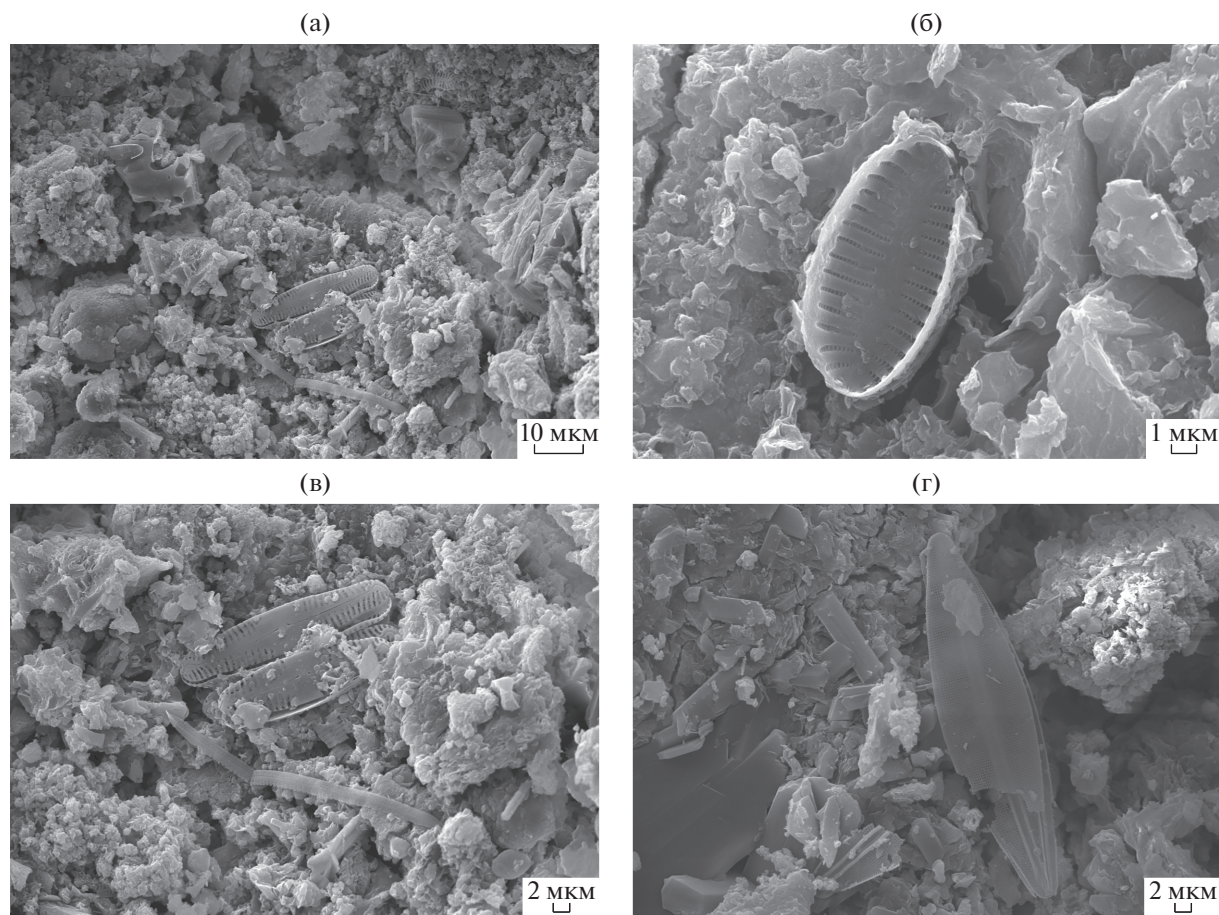
ленных работах сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с коллегами. Благодаря усилиям Сергея Николаевича Рычагова, с 2005 г. ведется регулярное, ежегодное слежение за составом термальных источников и парогазовых струй, солевых отложений, гидротермальных глинистых грунтов. К сожалению, пока не проводился мониторинг состояния микроорганизмов, входящих в вулканогенную экосистему Нижне-Кошелёвского поля.

Основные характеристики вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелёвского термального поля в первую очередь связаны с природными термальными водами – горячими источниками с большим диапазоном температур (49–95°C) и низкими рН (3.3–6.8). Высокое содержание диоксида кремния в донных осадках термальных источников хорошо согласуется с высоким содержанием кремния в химическом составе термальных вод. В совокупности данные факторы являются благоприятными для развития не только цианобактерий, но и диатомовых водорослей, которые могут служить индикатором устойчивого развития и существования данной экосистемы. Таким образом, ежегодное наблюдение за состоянием вулканогенной экосистемы Нижне-Кошелёвского термального поля предлагается дополнить анализом не только цианобактерий, но и диатомовых водорослей, которые благодаря своим размерам и сохранности надежнее идентифицируются.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарны Сергею Николаевичу Рычагову за возможность многолетнего участия в полевых работах в составе Южно-Камчат-





**Рис. 6.** Диатомовые водоросли в источниках на территории Нижне-Кошелевского термального поля (фото – М.С. Чернов). а – точка НК-12, б – точка НК-17, в – *Pinnularia acidophila*, г – *Navicula*.

ско-Курильской экспедиции, сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, особенно Антону Алексеевичу и Ивану Алексеевичу Нуждаевым за помощь в проведении натуральных исследований, микробиологу Тамаре Сергеевне Рычаговой за помощь с определением диатомовых водорослей.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-54-12030 ННИО\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гептнер А.Р., Жегалло Е.А., Жмур С.И., Карпов Г.А., Орлеанский В.К., Пономаренко А.Г., Розанов А.Ю., Сумина Е.Л., Ушатинская Г.Т., Хувер Р., Школьник Э.Л.* Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах // Научное издание / Науч. ред. А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.

*Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 176 с.

*Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г.* Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 23–57.

*Быкасов В.Е.* Вулканогенные экосистемы: предпосылки и возможности обособления // Вестник ДВО РАН. 2005. № 5. С. 91–97.

*Бычкова Я.В., Сеницын М.Ю., Петренко Д.Б., Николаева И.Ю., Бугаев И.А., Бычков А.Ю.* Методические особенности многоэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2016. № 6. С. 56–63.

*Бычкова Я.В., Стародымова Д.П., Шайхутдинова К.В., Дягилева Д.Р., Семернин М.А., Декунова Е.М., Николаева И.Ю., Бычков А.Ю.* Особенности химической подготовки проб донных отложений для мультиэлементного анализа методом ИСП-МС // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2020. № 4. С.45–54.

*Вакин Е.А., Декусар З.Б., Серезников А.И., Спиченкова М.В.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива / Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 56–84.

- Водопьянова Т.П.* Комплексный мониторинг экосистем на особо охраняемых природных территориях (на примере национального парка “Беловежская пушча”) // Труды БГТУ. 2011. № 7. С. 114–117.
- Гептнер А.Р.* Вулканогенно-осадочный литогенез в наземной рифтовой зоне Исландии / Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2009. 31 с.
- Герасименко Л.М., Крылов И.Н.* Посмертные изменения цианобактерий в водорослево-бактериальных пленках термальных источников Камчатки // Докл. АН СССР. 1983. Т. 272. № 1. С. 201–203.
- Давидович О.И.* Половое воспроизведение некоторых видов бентосных диатомовых водорослей и его зависимость от абиотических факторов среды / Дисс. ... канд. биол. наук. Феодосия, 2017. 214 с.
- Ероцев-Шак В.А., Золотарев Б.П., Карпов Г.А., Набоко С.И., Артамонов А.В.* Постэруптивные процессы современного вулканизма Камчатки: БТТИ, КВЦ, Вулканно-гидротермальная система Узон, океанические и континентальные современные и палеотипные рудопроявления / Отв. ред. В.Б. Курносоев // Труды ГИН РАН. Вып. 566. М.: Наука, 2007. 183 с.
- Жарников В.И., Евсюкова И.Н., Конева А.В.* О формировании системы показателей мониторинга особо охраняемых природных территорий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 3. № 2. С. 230–235.
- Жегалло Е.А., Зайцева Л.В., Орлеанский В.К., Самылина О.С., Карпов Г.А.* Роль бактерий в образовании гейзеритов Камчатки // Серия “Гео-биологические системы в прошлом”. М.: ПИН РАН, 2017. С. 8–21.
- Житова Е.С., Сергеева А.В., Нурдаев А.А., Кржижановская М.Г., Чубаров В.М.* Чермигит термальных полей Южной Камчатки: высокотемпературное преобразование и особенности ИК-спектра // Записки Российского минералогического общества. 2019. Ч. СХLVIII. № 1. С. 100–116.
- Калачева Е.Г., Королева Г.П., Сандимирова Е.И., Шульга О.В.* Условия формирования и геохимические особенности Нижне-Кошелевских гидротерм (Южная Камчатка) / Вулканизм и геодинамика. Улан-Удэ, 2006. Т. 3. С. 717–719.
- Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нурдаев А.А.* Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41–56.
- Карпов Г.А., Жегалло Е.А., Герасименко Л.М., Зайцева Л.В., Орлеанский В.К., Самылина О.С.* Биолитогенез в современных гейзеритах Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2016. 70 с.
- Лукашевич О.Д., Колбек М.В., Филичев С.А.* Практические работы по экологии и охране окружающей среды / Методическое пособие. Томск: Изд-во Томского гос. архитектурно-строительного ун-та, 2009. 80 с.
- Мархинин Е.К.* Вулканы и жизнь (Проблемы биовулканологии). М.: Мысль, 1980. 196 с.
- Никитина В.Н.* Синезеленые водоросли термальных местообитаний / Автореф. дисс. ... докт. биол. наук: 03.00.05. СПб., 2000. 43 с.
- Никулина Т.В.* Водоросли горячих источников Курильских островов (Россия) // Альгология. 2010. Т. 20. № 3. С. 334–356.
- Никулина Т.В., Грищенко О.В.* Флора диатомовых водорослей дачных термальных источников (Камчатка, Россия) / Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2017. Вып. 17. С. 185–193.
- Нурдаев А.А.* Новые результаты изучения Верхне- и Нижне-Кошелевской термоаномалии (Южная Камчатка) / Материалы VI региональной молодежной научной конференции “Исследования в области наук о Земле”. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. С. 43–49.
- Нурдаев И.А., Феофилактов С.О., Нурдаев А.А.* Объемная 3D визуализация топографического плана в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии // Исследования в области наук о Земле. Материалы VII региональной молодежной конференции “Исследования в области наук о Земле”. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2009. С. 57–66.
- Поздеев А.И., Нажалова И.Н.* Геология, гидродинамика и нефтегазоносность Кошелевского месторождения парогидротерм, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 32–45.
- Реймерс Н.Ф., Штильмарк Ф.Р.* Особо охраняемые природные территории / Оформление художника Т.К. Самигулина. М.: Мысль, 1978. 296 с.
- Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В.* Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 39–55.
- 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.
- Рычагов С.Н., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д., Королева Г.П., Ладыгин В.М., Сандимирова Г.П., Стефанов Ю.М., Сывороткин В.Л., Васильева Ю.В., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П., Делемень И.Ф., Кривошеева З.А., Ломоносов И.С., Молоствовский Э.А., Рихтер Я.А., Фролов И.Ю.* Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Сергеева А.В., Денисов Д.К., Назарова М.А.* Ассоциации глинистых минералов современных термоаномалий Южной Камчатки // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 11. С. 1267–1277.
- Стенченко А.М.* Узон-Гейзерный термальный биогеоценоз Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1977. № 7. С. 59–60.
- Чудаев О.В.* Геохимия и условия формирования современных гидротерм зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану / Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Томск, 2002. 59 с.
- Шанина В.В., Бычков А.Ю., Герке К.М., Фуникова В.В.* Изменение состава, строения и свойств андезитов и базальтов Кошелевского вулкана (Ю. Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов: экспериментальные исследования в натуральных условиях // Вода: химия и экология. 2015. № 1. С. 3–10.
- Экосистемы термальных источников Чукотского полуострова (гидрология, структура растительности, автотрофные компоненты) / Отв. ред. Б.А. Юрцев. Л.: Наука, 1981. 144 с.
- Akihiro Tuji.* Two new endemic Pinnularia species (Bacillariophyceae) from Japan / Akihiro Tuji, Toshiharu Watanabe // Diatom 19. 2003. P. 47–53.

*Fukushima H., Yoshitake S., Ko-Bayashi T.* Three new diatoms *Pinnularia* from acid water in Japan // *Diatom* 18. 2002. P. 1–12.

*Idei M., Mayama S.* *Pinnularia acidojaponica* M. Idei et H. Kobayasi sp. nov. and *P. valdetolerans* Mayama et H. Kobayasi sp. nov. – new diatom taxa from Japanese extreme environments // *Lange-Bertalot-Festschrift: Studies on*

*Diatoms*. Dedicated to Prof. Dr. Dr. h.c. Horst Lange-Bertalot on the occasion of his 65th Birthday. A.R.G. Gantner Verlag. K.G. P. 2001. P. 265–277.

*Nikulina T.V., Kociolek J.P.* Diatoms from hot springs from Kuril and Sakhalin Islands (Far East, Russia) // *The Diatom World*. London, N. Y.: Springer, 2011. P. 333–363.

## Tasks and Features Monitoring of Ecosystems the Example of Volcanogenic Ecosystem of the Nizhne-Koshelevsky Thermal Field (South Kamchatka)

V. V. Shanina<sup>1,\*</sup> and A. Yu. Bychkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: viosha@mail.ru*

The article considers the tasks and features of monitoring ecosystems on the example of the Nizhne-Koshelevsky thermal field (South Kamchatka), located on the territory of the South Kamchatka Reserve, included in the List of UNESCO World Cultural and Natural Heritage Sites. E.K. Markhinin [1980] wrote about the need to separate the volcanogenic ecosystems themselves. Truly, the first experience in domestic literature can be considered the separation of A.M. Stenchenko [1977] Uzon-Geyser hydrothermal biogeocenosis. This article describes in detail the chemical composition of thermal waters characterized by high temperatures (49–95°C) and low pH (3.3–6.9), and bottom precipitation. The contents of the following chemical elements are presented: silicon, titanium, aluminum, iron, manganese, calcium, magnesium, phosphorus, arsenic, scandium, nickel, copper, zinc, rubidium, strontium, molybdenum, lead, chromium, cesium, vanadium, cobalt, cadmium, tin. The high content of silicon in thermal waters and bottom sediments and the presence of diatomaceous algae (Bacillariophyta) are considered, which can serve as an indicator of the sustainable development and existence of this ecosystem.

*Keywords:* volcanogenic ecosystem, thermal springs, Koshelevsky volcanic massif, diatomaceous algae, Kamchatka