

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

К.г.-м.н. Е.П. Янин

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
г. Москва
yanin@geokhi.ru

В обзоре рассматриваются экологические аспекты влияния практического использования термальных вод на окружающую среду. Геотермальные воды характеризуются очень высокими концентрациями многих химических элементов (Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, S, O, Cl, F, Si, B, Li, As, Hg); в водах и растворах присутствуют значительные количества диоксида углерода, сероводорода, метана, аммиака, серной кислоты. Разработка геотермальных месторождений сопровождается тепловым и химическим загрязнением атмосферы и гидросферы. Длительная эксплуатация геотермальных месторождений без обратной закачки теплоносителя в водоносные горизонты приводит к загрязнению водоемов и опусканию почвы.

Термальные воды используются для многих целей: для выработки электроэнергии, для теплофикации и холодоснабжения, для горячего водоснабжения, в земледелии, животноводстве, рыбоводстве, в пищевой, химической и нефтедобывающей промышленности, в бальнеологии и курортологии, в рекреационных целях [1, 5, 7, 16, 20, 21, 24]. Термальные воды, особенно хлоридные рассолы, содержат в своем составе огромный комплекс металлических и неметаллических микрокомпонентов. Насыщенность рассолов микрокомпонентами находится в тесной зависимости как от генетической сущности самих рассолов, так и литолого-структурных и геотермических особенностей вмещающих пород.

В зависимости от состава и свойств термальных вод выделяются два основных направления использования геотермальных ресурсов: теплоэнергетическое и минерально-сырьевое [20]. Теплоэнергетическое направление является основным для пресных и слабоминерализованных вод, когда ценные компоненты в промышленных концентрациях практически отсутствуют, а общая минерализация не препятствует нормальной эксплуатации системы. Если высокопотенциальные воды характеризуются повышенной минерализацией и склонностью к солеотложению, то утилизация минеральной составляющей рассматривается как попутный процесс, способствующий эффективному теплоснабжению. Минерально-сырьевое направление является основным для геотермальных вод и парогидротерм, содержащих ценные компоненты в промышленных количествах. При этом обоснование промышленных концентраций обусловлено уровнем технологий. Для таких вод теплота является попутным продуктом, использование которого может повысить эффективность процесса получения основной продукции и даже сэкономить топливо. Значительная часть месторождений термальных вод высокоминерализована и представляет собой рассолы, содержащие от 35 до 400 и более г/л солей [7]. Они являются минеральным сырьем на многие химические элементы. Многие рассолы, находящиеся на большой глубине,

могут стать месторождениями ценнейших химических элементов: цезия, бора, стронция, тантала, магния, кальция, вольфрама и др. По дешевой технологической схеме из природных растворов в основном можно извлекать йод, бром, бор, хлористые соли аммония, калия, натрия, кальция, магния. Извлечение других химических элементов затруднено из-за дороговизны технологии. Перспективным методом является использование ионообменных смол для избирательного извлечения определенных компонентов из природных вод.

По данным ВСЕГИНГЕО и ВНИИКТЭП, на территории России разведано 47 месторождений природных теплоносителей с запасами термальных вод 242,4 тыс. м³/сутки и парогидротерм 103,2 тыс. т/сутки [9]. Запасы утверждены лишь по 12 месторождениям термальных вод (135,4 тыс. м³/сутки) и по 5 месторождениям парогидротерм (34,5 тыс. т/сутки в пересчете на пар). Это крайне мало, учитывая огромные потенциальные гидротермальные ресурсы России. Гидротермальные ресурсы используют преимущественно для теплоснабжения и обогрева городов и населенных пунктов на Северном Кавказе и Камчатке с общим числом населения около 500000. В некоторых районах страны глубинным теплоом обогреваются теплицы общей площадью около 465000 м². Широко используются термоминеральные воды в бальнеологии и курортологии, но и здесь резервы еще очень велики. Наиболее перспективными регионами для практического использования геотермальных ресурсов на территории России являются Северный Кавказ, Западная Сибирь, Прибайкалье, Курило-Камчатский регион, Приморье, Охотско-Чукотский вулканический пояс. Практически повсеместно внутреннее тепло Земли может осваиваться с помощью тепловых насосов.

Термальные воды с высокой минерализацией расположены на большей территории России. Рассолы с минерализацией выше 200 г/л известны в Пермской и Самарской областях, Татарии, Московской, Рязанской и других центральных областях [21]. В Москве, например, на глубине 1650 м встречены хлоридные рассолы с минерализацией 274 г/л. В Западной и Восточной Сибири существуют крупные месторождения рассолов с высокой температурой. Отдельные месторождения имеют минерализацию 400–600 г/л. Много термальных рассолов на Камчатке, Курильских островах, Сахалине.

Особенности химического (прежде всего, микроэлементного состава) достаточно наглядно иллюстрируются результатами исследований основных принципиально отличных типов минеральных вод: холодных углекислых Приморья, о-ва Сахалин, Хабаровского края, Камчатки; термальных Приморья, Камчатки, Курильских островов, Чукотки; холодных с повышенным содержанием солей без специфического газового состава [23]. Катионный состав углекислых холодных вод, как правило, кальциевый, термальные воды чаще натриевые, для солоноватых и соленых вод основным катионом является натрий. Основными анионами в составе сепарата всех добычных скважин Мутновского месторождения парогидротерм являются хлориды и сульфаты [3]. Большинство проявлений углекислых вод Дальнего Востока приурочено к трещинно-жильным системам, по которым они поступают в верхнюю трещиноватую зону, аллювиально-поровые отложения или к напорным горизонтам малых артезианских бассейнов [23]. Воды могут иметь открытые выходы на поверхность или быть экранированы глинистыми отложениями. В последнем случае нередко наблюдаются выходы просачивающегося газа (например, на месторождении Ласточка, Приморье). Низкая температура холодных углекислых вод (6–14°C) с малыми амплитудами колебаний свидетельствует о поступлении их с глубин, не пре-

выпадающих первые сотни метров. Состав газа в подавляющем количестве (90%) представлен CO_2 с высоким парциальным давлением. Термальные воды Приморья (низкотемпературные, до 35°C) поступают с глубин около 2 км из зоны недавних тектонических подвижек [23]. Пространственно они ассоциируют прежде всего с медовыми гранитами и приурочены к крупным разломам и их оперению в пределах или на контакте интрузивных тел с меловыми эффузивами. В составе спонтанно выделяющегося или растворенного газа преобладает атмосферный азот (до 99%). Сходный газовый состав имеют Чукотские термы (в частности Чаплинские), хотя их солевой состав связан, вероятно, с участием морских вод. Температурные вариации для камчатских и курильских терм значительны (от десятков до нескольких сотен $^\circ\text{C}$) и обусловлены в основном воздействием на воды близповерхностных магматических очагов. Их газовый состав более разнообразен: SO_3 , H_2S , HCl , CO [23] и др. Термальные воды вулканических областей отличаются высокими концентрациями натрия, лития, рубидия и цезия [2].

Изучение состава вод показало, что они характеризуются высокими концентрациями многих химических элементов (при выраженной пространственно-временной вариации) (табл. 1). Большая часть химических элементов отличается уровнями заметно (нередко существенно) превышающими среднее содержание в реках мира. Вариации содержания микроэлементов в минеральных водах Дальнего Востока зависят от типа вод, их pH, температуры, общего солевого и газового состава, специфики водовмещающих пород.

Авторами [8] изучен химический состав термальных вод месторождений Тумнин и Анненское, расположенных на юге Дальнего Востока вблизи побережья Охотского и Японского морей и относящихся к Сихотэ-Алиньскому вулканическому поясу. Одновременно проведено сравнение с хорошо изученными источниками Приморья: Амгинскими и Чистоводненскими грушами термальных вод.

Месторождение Анненских минеральных вод расположено на северо-востоке Хабаровского края в нижнем течении р. Амур, в 70 км от побережья Охотского моря и в 6,5 км от р. Амур. Выходы термальной воды находятся на отметке 53 м в поле эффузивных и туфогенно-осадочных пород верхнемелового возраста больбинской и татаркинской свит. Больбинская свита сложена порфиридами и их лавобрекчиями, туфами с редкими прослоями туфоконгломератов, а татаркинская – переслаивающимися туфоконгломератами, туфопесчаниками, туфами кварцевых порфиров с прослоями туфов фельзитов. Разгрузка терм происходит под пяти-восьмиметровым слоем алювиальных, глинисто-галечниковых отложений. Тумнинское месторождение термальных вод расположено в восточной части Хабаровского края, в 9 км от р. Тумнин и в 40 км от Татарского пролива (Японское море). Все термальные воды отличаются высокими содержаниями многих химических элементов (табл. 2).

В гидро- и литохимических потоках рассеяния зоны гипергенеза геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) установлены повышенные (относительно глобальных средних) концентрации ряда химических элементов [18]. Так, в водных потоках фиксировались увеличенные концентрации Au, Ag, Zn, As, Cr, Mn Ti; в илито-песчаной фракции отложений наблюдались повышенные уровни Au, Ag, Cu, Pb, As, V, Mo.

Химические элементы в минеральных водах Дальнего Востока, мкг/л [23]

Регион, тип вод	Si, мг/л	Al	B	Pb	Be	Cr	Co	Ni	Cu
Термальные воды									
Приморье	12,9 – 21,9	5,8 – 18,8	< 10 – 20	< 0,1 – 0,16	< 0,1	0,46 – 1,85	< 0,1	0,12 – 0,38	< 0,1 – 2,42
Камчатка:									
Узон-Гейзерная система	75,1 – 91,3	84,4 – 1659	1600 – 66000	< 0,1 – 2,4	0,5 – 18,9	< 0,1 – 1,7	< 0,1 – 0,5	0,8 – 5,8	0,22 – 3,7
Мутновско-Родниковская система	1,2 – 362	3,1 – 6643	< 10 – 23000	< 0,1 – 114,1	< 0,1 – 6,1	< 0,1 – 6,2	< 0,1 – 53,9	< 0,1 – 177	0,16 – 8,1
Паратунка	14,6 – 25	4,3 – 25,6	1030 – 6130	0,18 – 0,6	< 0,1	0,1 – 0,66	< 0,1	< 0,1 – 1,06	0,1 – 0,54
Малки	33,8 – 40,4	32,9 – 63,7	3090 – 4560	< 0,1 – 0,19	0,9 – 1,5	32,9 – 63,7	< 0,1	< 0,1 – 0,32	0,22 – 0,87
Курилы:									
кислые термы	13 – 130	26 – 211000	–	0,1 – 367	0,3 – 3,3	1,2 – 7,3	0,2 – 10,1	0,3 – 43,9	0,6 – 74,6
нейтрально-щелочные	10,4 – 219	20 – 9200	–	< 0,1 – 0,9	< 0,1 – 0,4	0,2 – 7,4	0,1 – 0,4	0,1 – 1,2	5,2 – 230
Чукотка, Чаплино	8,9 – 14,4	–	820 – 990	< 0,1	< 0,1	3,9 – 4,6	0,6 – 0,8	3,4 – 4,1	135 – 180
Среднее, реки мира [11]		160	18	1	0,2	1	0,3	2,5	7
Термальные воды									
Приморье	< 0,5–2,16	1,2–2,3	0,4–0,9	0,2–5,6	0,3–1,7	< 0,1–0,63	24,3–59,8	6,4–23,7	< 0,1
Камчатка:									
Узон-Гейзерная система	< 0,5–56,9	< 0,1–1,9	2–32,1	–	54,9–583	7,6–305,1	158,7–207,8	< 0,1–44,4	< 0,5–290
Мутновско-Родниковская система	< 0,1–1796	< 0,1–7,5	< 0,1–39,3	430–864	0,25–344	< 0,1–211	1,5–1236	< 0,1–100	< 0,1–239
Паратунка	< 0,5–2,12	0,2–1,2	2,1–9,5	–	4–18	0,28–66	249–1440	7,6–26,1	< 0,1–34,7
Малки	< 0,5–6,1	0,95–1,7	4,4–5,7	–	33,5–38,3	18,9–28,9	192–227	24,1–26,7	1,3–2,2
Курилы:									
кислые термы	11,3–3600	0,7–44,8	0,6–30	1,3–1640	2,4–211	0,6–89,3	21–1970	0,1–1,4	< 0,1–13,3
нейтрально-щелочные	0,1–5,1	0,2–18,2	2,1–141,3	1,5–1672	19,4–509	2,3–248	88–2366	0,13–5,9	< 0,1–18,2
Чукотка, Чаплино	–	4,8–8,5	0,9–1,1	18,7–22,3	357–443	169–207	15800–19450	5,0–6,2	0,16–0,20
Среднее, реки мира [11]	20	0,1	0,07	1,4	2	0,03	50	1	20
									2,5

**Химический состав термальных вод различных термальных источников
Дальнего Востока [8]**

Компоненты	Анненские	Тумнин	Амгу	Чистоводное
t°C	49,9	44,8	34,5	27,5
pH	9,2	9,3	9,1	8,9
		мг/л		
HCO ₃ ⁻	112,8	35,8	57,3	56,0
H ₂ SiO ₃	26,3	9,2	46,8	31,7
SO ₄ ²⁻	25,4	7,1	13,6	5,7
Cl ⁻	4,0	1,4	3,6	2,4
F ⁻	2,7	0,8	0,9	3,9
Na ⁺	61,0	35,6	34,4	25,3
K ⁺	0,8	0,5	0,4	0,35
Ca ²⁺	5,2	7,8	2	4,34
Mg ²⁺	1,4	0,04	0,04	0,04
		мгг/л		
Ge	2,65	0,65	0,65	0,72
Mo	6,23	13,81	21,98	15,6
Li	71,49	11,39	6,26	46,17
Cu	3,79	2,59	0,38	0,09
Ga	2,1	1,32	2,27	1,79
As	14,32	21,28	6,26	3,42
Rb	6,91	1,15	1,65	0,25
Sr	69,99	17,14	24,35	42,93
U	1,1	1,29	0,05	5,91

Авторы цитируемой работы считают, что повышенные концентрации Au, Ag, As и Pb в зоне гипергенеза связаны с разгрузкой глубинных хлоридно-натриевых гидротермальных растворов. Отложение электронейтральных частиц золота, а также труднорастворимых хлор- и серосодержащих соединений Ag, As и Pb обусловлено резкими изменениями pH и температуры растворов и происходит на глубине в зоне смешения субщелочных хлоридно-натриевых вод с кислыми нагретыми паром сульфатными водами, либо на дневной поверхности при смешении кислых сульфатных (сульфатно-хлоридных) вод с метеорными водами. Характерным элементом геотермальных минеральных вод Южной Камчатки является ртуть, которая поступает на дневную поверхность геотермальных месторождений (Мутновское, Паужетское, Паратунское, Нижне-Кошелевское) и термальных полей (Камбального вулканического хребта) в составе гидротермального потока и концентрируется на термодинамических барьерах в гидротермальных глинах, кремнистых осадках (силикагеле) и почвах, обладающих повышенной соленостью за счет отложения в них из пароводяной смеси кремнезема, сульфатов и других соединений [19]. Ее концентрации в различных типах отложений геотермальных полей нередко существенно превышают кларковый уровень в литосфере (табл. 3).

Проблемы, связанные с поиском и разведкой месторождений геотермальных вод, во многом аналогичны соответствующим проблемам при разведке нефти и природного газа, и решаются с помощью аналогичных геологических и геофизических методов в сочетании с геохимическими и гидрологическими исследованиями, а также изучением переноса тепла [6].

Основным и рентабельным методом разведки остается бурение. Первое разведочное бурение обычно проводится на глубины всего в несколько десятков или сотен метров с целью определения локальных геотермических градиентов, а также гидрогеологических условий и литологии месторождения. За исключением случаев, когда существует опасность встретить высокотемпературные теплоносители, разведочное бурение проводится традиционными методами, и поэтому в основном развитие соответствующего оборудования и методов будет заключаться в снижении затрат на бурение разведочных скважин малого диаметра и скважин без обсадки. Считается, что период бурения, обследования скважины и последующий период построения установки на поверхности сопровождается временной локальной нагрузкой на окружающую среду [4]

Таблица 3

Среднее содержание ртути в различных типах отложений на геотермальных месторождениях Южной Камчатки, 10⁻⁷%

Тип отложений	Пау-жетское	Нижне-Кошелёвское	Мутновское	Паратунское
Горные породы	16	16	136	29
Гидротермально измененные породы	75	75	1184	217
Почвы	523	2010	510	106
Донные отложения	102	–	977	–
Кремнистые осадки	9	–	–	–
Гидротермальные глины	2727	15350	5000	–
Пирит (мономинеральные пробы)	7280	–	–	–

Примечание. Среднее содержание ртути в литосфере составляет $83 \times 10^{-7}\%$ (по А.П. Виноградову).

В Венгрии при эксплуатации известных термальных источников Бюкфюрдо и Бюкксек на поверхность поступает 31000 т и 13000 т растворённых твёрдых минеральных компонентов соответственно [4]. Извлечённые термальные воды источника Эгерсалока содержат ртуть, свинец, мышьяк, цинк и даже уран. В Венгрии энергетически использованную термальную воду, за исключением нескольких случаев, выводят в высушенные хранилища, бассейны или в худшем случае в водотоки.

Определенные экологические проблемы могут возникать при использовании геотермальных вод для получения электроэнергии на геотермальных ТЭС. С точки зрения воздействия на окружающую среду, ГеоТЭС имеет те же недостатки, что и любая электростанция, но к преимуществам ГеоТЭС при этом следует отнести отсутствие площадей для хранения топлива, погрузочно-разгрузочных работ и оборудования для сжигания топлива а также дымовых труб. Кроме того, для установки ГеоТЭС необходимы сравнительно меньшие, чем для строительства традиционных ТЭС, участки земли, их можно проектировать и размещать на любых землях. ГеоТЭС имеют значительно меньшие количества вредных выбросов в атмосферу – типичная геотермическая станция производит выброс CO₂ на 1 МВт·ч выработанной энергии в объёме 0,45 кг, тогда как теплоэлектростанция, работающая на природном газе, – 464 кг, на мазуте – 720 кг, на угле – 819 кг [13].

Выходящий на поверхность пар содержит 0,5–5% неконденсирующегося газа [6]. Обычно это двуокись углерода, считающаяся безвредной. Однако этот газ также содержит некоторое количество сероводорода и незначительные количества других газов, таких, как метан и аммиак. Газы обычно сбрасываются в атмосферу сразу же или после выделения из конденсата в градирнях. Сероводород имеет сильный неприятный запах, и если он собирается в низинах, или на ограниченной площади, то может представлять опасность для людей и животных. Есть сведения, что на ГеоТЭС мощностью 100 МВт за год поступает 100 млн. т воды, которая выносит из недр 100 тыс. т солей хлора, 100–1000 т аммиака, фтора, серной кислоты и 1000–10000 т сероводорода [6]. В конденсате находят следы бора, мышьяка и других летучих соединений. Причем, если конденсат попадает в поверхностные воды или в виде капель переносится ветром, то он может представлять опасность для растений, а при попадании в корм – и для животных. Обычно конденсат выбрасывается при повышенных температурах, и тогда он является также источником теплового загрязнения.

При получении влажного пара из систем с преобладанием жидкости до 20% массового расхода из скважины составляет пар, содержащий упомянутые выше примеси. Остальные 80% представляют собой горячую воду с более высокими концентрациями примесей и гораздо более высоким содержанием различных растворенных минеральных солей, особенно карбонатов и кремнезема. Если сброс геотермальной воды осуществляется в поверхностные воды, то это может привести к гибели рыб, животных и растений, а поскольку этот сброс очень велик, то он представляет собой значительно больший источник химического и теплового загрязнения, чем выброс парового конденсата. В отводимых водах в повышенных концентрациях содержатся мышьяк и ртуть. Например, в Новой Зеландии в рыбе, обитающей в р. Уайкато ниже места сброса сточных вод ГеоТЭС, уровни ртути были в 4,5 раза выше, нежели в рыбе, выловленной выше по течению [6]. Тепловые сбросы отработавшего теплоносителя способны в жаркие летние периоды поднять температуру речной воды до опасного для всего живого уровня.

Экологические проблемы особенно остро стоят на первых ГеоЭС, которые, как правило, строились без учета их вредного воздействия [22]. Так, на Новозеландской ГеоЭС «Вайракей», которая построена в 1958 г., отработавший геотермальный теплоноситель, сбрасываемый в реку Вайракей, содержит хлориды, натрий, мышьяк, ртуть, сероводород, диоксид углерода. Вода в водозаборе пос. Вайракей – концентрации мышьяка превышают норму и в летние сезона достигают 0,25 мг/кг (в 5 раз выше нормы). В реке обнаружена ртуть, концентрации которой в мышечной ткани форели в 4,4 раза превышают норму. С ростом веса рыб уровень ртути растет. Концентрация сероводорода в сбросном геотермальном флюиде в 15 раз превышает предел безопасности для разведения мальков форели. В конце 1970-х гг. в р. Паужетка (Камчатка), куда сбрасывался отработавший геотермальный теплоноситель Паужетской ГеоЭС, превышение нормы концентрации мышьяка было существенным [22].

Геотермальные теплоносители включают в себя различные примеси и неконденсирующиеся газы, среди которых углекислый газ, сероводород, метан, водород и др. [15]. Для большинства ГеоЭС наиболее сложной экологической проблемой является снижение выбросов сероводорода. Выбросы сероводорода вредны для людей и животных, приводят к усыханию деревьев и другой растительности. В ряде стран введены нормативы по ограниче-

нию выбросов сероводорода (в США, например, не более 200 г на каждый МВт-час вырабатываемой электроэнергии).

Шум и запахи от геотермальных систем обычно не превышают допустимых пределов [6]. Проблема, связанная с содержанием нежелательных минеральных солей в паровом конденсате или в воде из месторождений с влажным паром, не перешедшей в пар, традиционно решалась путем сброса таких вод в близлежащий водоем. Это, как правило, вызывает значительное химическое и тепловое загрязнение поверхностных вод. Как отмечалось выше, решением этой проблемы отчасти является закачка использованной воды в продуктивную формацию через непродуктивные скважины или через специальные пробуренные для этой цели скважины. При этом восполняется часть извлеченной из месторождения жидкости и понижается опасность значительного оседания поверхности.

Длительная эксплуатация мощных ГеоЭС без обратной закачки теплоносителя в водоносные горизонты приводит к загрязнению водоемов и опусканию почвы, интенсивность которой на месторождении «Гейзерс» (Калифорния, США) достигала в последнее время 2–3 см в год [22]. На ГеоЭС «Вайракей» по этой причине даже возникла опасность разрушения здания станции. Значительное разрушение геотермальных полей и их эксплуатация без возврата геотермального носителя в гидрорезервуар приводит также к увеличению сейсмичности района. В последнее время наметилась тенденция закачивать образующийся конденсат и излишки воды со всеми растворенными в них газами и минеральными солями в продуктивную формацию через непродуктивные или специально пробуренные скважины [6]. При этом почти все химические загрязнения вновь оказываются под землей, и исключается возможность их попадания в поверхностные воды. Месторождение вновь заполняется жидкостью, и опасность оседания поверхности, связанная с извлечением теплоносителя, понижается. Однако это требует дополнительных затрат и связано с риском закупорки породы частицами или осадком, содержащимися в закачиваемой воде, вблизи скважины для закачки.

Опасность оседания земной поверхности возникает в случае извлечения из недр в больших количествах воды или пара. Над гидротермальными системами с сухими породами, которые не заполнены водой и расположены на большой глубине в ограниченном пространстве, вряд ли могут произойти заметные оседания поверхности [6]. Однако гидротермальные системы, которые обычно занимают большие площади, включают более узкие формации и пористые породы и из которых извлекаются большие количества жидкости, весьма подвержены оседанию. Опыт, приобретенный при добыче нефти, показывает, что закачка жидкости в количествах, достаточных для поддержания постоянного давления в месторождении, может предотвратить значительное оседание, что, к сожалению, на геотермальных месторождениях не всегда возможно. Не исключена опасность возникновения сильных землетрясений, связанная с закачкой жидкости в естественные геотермальные месторождения, а также с давлением нагнетания теплоносителя при создании и использовании искусственных систем. В частности, изучения землетрясений в Денвере, проведенные Геологической службой и другими организациями США, а также эксперименты по созданию искусственных землетрясений в Рейнджл (шт. Колорадо) показывают, что значительные землетрясения возможны лишь при закачке больших количеств жидкости при сравнительно высоких давлениях в сейсмически активные системы [6]. Удачные опыты и работы по закачке использованных термальных вод про-

ведены в Витербо (Италия), Ауачапане (Сальвадор), Отаке (Япония), а также в Долине Больших Гейзеров и Импириал-Валли (шт. Калифорния) и в Валлес-Кальдера (шт. Нью-Мексико) [6]. Причем в Долине Больших Гейзеров ежедневно закачивается в землю до 18 тыс. т конденсата, а в Валлес-Кальдера через две специальные скважины только в 1973–1974 г. было закачано почти 380 тыс. т воды.

Согласно Руководству [17], к числу экологических проблем, могущих возникнуть в связи с реализацией проектов в сфере геотермальной энергетики, относятся: стоки (буровые растворы и буровой шлам, отработанная геотермальная жидкость), выбросы в атмосферу, твердые отходы, фонтанирование скважин и разрывы трубопроводов, потребление и забор воды. В частности, при бурении скважин, которое может осуществляться на этапах разведки, разработки и эксплуатации геотермальных ресурсов, обычно используются буровые растворы на водной или углеводородной основе, которые могут содержать химические присадки, способствующие управлению перепадом давлений в скважине и предохраняющие от резкого снижения вязкости. Особую опасность представляет шлам из бурового раствора на углеводородной основе, который интенсивно загрязнен нефтепродуктами. Составной частью образующихся стоков является отработанная геотермальная жидкость, которая состоит из отсепарированной воды (т. е. воды, которая изначально поступает из геотермального резервуара вместе с паром) из паровых сепараторов и конденсата, образующегося во время конденсации отработанного пара после генерации электроэнергии. На ГеоТЭС, где в процессе испарения используются градирни, геотермальный конденсат обычно направляется в контур охлаждения. Геотермальный конденсат характеризуется высокой температурой, низкими значениями pH и высокими содержаниями металлов. У отсепарированной воды показатель pH часто нейтральный; в ней также могут присутствовать тяжелые металлы. Естественно, что состав поступающих из скважин пара и воды колеблется в зависимости от свойств геотермальных ресурсов. Отработанная геотермальная жидкость обычно закачивается во вмещающую формацию, поэтому стоки невелики по объёму и состоят из отсепарированной воды. Содержание возможных поллютантов в стоках с объектов геотермальной энергетики варьируется в зависимости от минералогических свойств вмещающей геологической формации, температуры геотермальной воды и особенностей технологии, применяемой на том или ином предприятии. Тем не менее добыча, обратная закачка и сброс геотермальной жидкости может повлиять на качество и объём запасов поверхностных и подземных вод. К числу конкретных примеров такого воздействия относятся непреднамеренное попадание геотермальной жидкости в расположенные на меньшей глубине водоносные пласты во время ее добычи или обратной закачки, либо сокращение дебита горячих термальных источников вследствие забора геотермальных вод.

Выбросы в атмосферу от геотермальных электростанций (по сравнению с выбросами от электростанций, вырабатывающих энергию за счет сжигания ископаемого топлива) очень малы. На ГеоТЭС, работающих на пару (сухом или получаемом из геотермальной воды) основными потенциальными поллютантами воздуха являются сероводород и ртуть. В паре, как отмечалось выше, также содержится диоксид углерода. Наличие и концентрация потенциальных поллютантов воздуха может колебаться в зависимости от свойств геотермальных ресурсов. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу могут происходить во время бурения скважин и измерения притока, а

также через смешивающие конденсаторы/градирни, если выбрасываемые газы не выкачиваются из испарителя и не закачиваются в пласт вместе с отводимой геотермальной жидкостью. Потенциальными источниками выбросов сероводорода могут быть также выпускные установки на электростанции или при группе скважин, особенно при работе в нештатном режиме, когда возникает необходимость выпуска газа. На электростанциях, где применяется двухконтурная технология либо её сочетание с конденсацией пара (с бесконтактной технологией конденсации), объём выбросов сероводорода и ртути близок к нулю, так как все геотермальные газы и жидкости повторно закачиваются в пласт. Геотермальные газы (например, сероводород), поступающие в атмосферу, могут оказывать негативное воздействие на обслуживающий персонал, особенно во время аварийных выбросов геотермальной жидкости (например, разрывов трубопроводов) и работ по техническому обслуживанию в замкнутом пространстве, например, внутри трубопроводов, турбин и конденсаторов. Серьёзность риска воздействия сероводорода может варьироваться в зависимости от местоположения объекта и свойств разрабатываемого пласта.

На геотермальных электростанциях не образуется существенных объёмов твёрдых отходов. Из градирен, воздухоочистительных установок, с турбин и из паровых сепараторов периодически удаляется осадок, состоящий из серы, кремнезема и карбонатов. В особых случаях этот шлам может быть отнесен к опасным отходам в зависимости от содержания в нем хлоридов, мышьяка, ртути, ванадия, никеля и ряда тяжёлых металлов и других химических элементов.

Во время бурения скважин и эксплуатации электростанции могут – хотя и крайне редко – иметь место фонтанирование скважин и разрывы трубопроводов. Такие аварии обычно приводят к выбросу токсичных буровых растворов и присадок к ним, а также сероводорода из горных пород. Разрывы трубопроводов, кроме того, могут привести к выбросу на поверхность геотермальной жидкости и пара, содержащих тяжёлые металлы, кислоты, минеральные отложения и прочие загрязняющие вещества.

Забор поверхностной воды необходим для проведения ряда работ на объектах геотермальной энергетики, в том числе для бурения скважин, исследования пластов на приёмистость и использования в системах охлаждения. Поверхностная вода, используемая в однопроходных системах бесконтактного охлаждения, обычно возвращается в источник с несколько повышенной температурой, однако, в общем, без потерь в качестве.

В России имеющиеся запасы геотермальной энергии представлены двумя разновидностями: парогидротермы вулканических районов и энергетические термальные воды с температурой 60–200°C в платформенных и предгорных районах. Особенно значительными геотермальными ресурсами обладает Камчатский полуостров, где выполнена разведка и оценка 13 геотермальных месторождений. Балансовые запасы термальной воды – 80,63 тыс. м³/сут. и пароводяной смеси – 93,67 тыс. т/сут. В эксплуатации с целью добычи термальных вод находится ряд месторождений: Мутновское, Паужетское, Паратунское, Верхне-Паратунское, Анавайгское, Эссовское и др. Суммарный годовой водоотбор составляет 25,2 млн. м³ [25]. Здесь наиболее перспективным является Мутновское геотермальное месторождение, разведанные запасы которого оцениваются в 300 МВт. В настоящее время на Камчатке работают Верхне-Мутновская ГеоЭС (с 1999 г.), Мутновская ГеоЭС (2001 г.) и Паужетская ГеоЭС (1967 г.). На Курилах функционируют Менделеевская ГеоТЭС (2002 г., на о. Кунашир) и Океанская ГеоТЭС (2006 г.,

на о. Итуруп, ныне законсервирована). В 1989 г. на Северном Кавказе на Каясулинском месторождении была создана опытная Ставропольская ГеоТЭС.

На Камчатке разведка геотермальных ресурсов сопровождалась минимизированными рекультивационными работами, в результате чего в настоящее время на геотермальных полях полуострова можно наблюдать самоизливающиеся скважины с разрушенными временем и агрессивными средами оголовками [10].

Мутновский геотермоэнергетический комплекс может рассматриваться как сложная горная природотехническая система, ведущая роль в стабильности функционирования которой принадлежит геологической среде [12]. Техногенная часть этой системы, воздействуя на напряженно-деформированное состояние массива пород, вызывает развитие и активизацию опасных эндогенных процессов, отличающихся от их природных аналогов большой непредсказуемостью, поскольку вызывающие их факторы недостаточно изучены и малообычны для окружающей среды. Исследования свидетельствуют о том, что интенсивное воздействие комплекса геотермальных электростанций на среду нарушает естественное равновесие гидротермальной системы, меняет ее параметры, вызывает появление локальных землетрясений. Зафиксирован и описан гидротермальный взрыв в пределах эксплуатируемой площади, в результате которого образовалось новое поверхностное термопроявление. В условиях планируемой интенсификации разработки месторождения можно ожидать дальнейшей активизации геодинамики района. В условиях планируемой интенсификации разработки месторождения можно ожидать дальнейшей активизации геодинамики района.

К негативному влиянию на окружающую среду при эксплуатации геотермальных месторождений Камчатки можно отнести нарушение поверхности, воздействие на естественные геотермальные проявления, шумовую нагрузку, тепловое и химическое загрязнение атмосферы и гидросферы, а также биологические последствия [5].

В настоящее время одной из актуальных проблем эксплуатации геотермальных месторождений является утилизация отработанных геотермальных растворов [10]. Наиболее эффективным методом утилизации принято считать обратную закачку (реинжекцию) отработанных растворов в породы геотермального резервуара, а очистка стоков экономически целесообразна только при комплексном использовании ресурса, получении дополнительной энергии или при извлечении из раствора ценного минерального сырья. На Мутновском месторождении парогидротерм проблема утилизации отработанного теплоносителя ГеоЭС решается обратной закачкой в породы геотермального резервуара [10]. Обратная закачка позволяет поддержать давление в пласте, снизить риск опускания поверхности, возникновения оползней, ухудшения сейсмичности района, исчезновения естественных поверхностных проявлений (источников). Обратная закачка является решением экологических проблем при освоении геотермальных месторождений, однако применение данного способа ограничивается влиянием на эксплуатационные параметры геотермальной системы [14].

Другая схема реализована на Паужетской геотермальной станции [10]. Здесь на эксплуатационных скважинах установлены скважинные сепараторы, на станции поступает пар, а водная фаза (сепарат) сбрасывается на грунт и в руч. Быстрый, приток р. Паужетка. Реинжекция осуществляется частично. При эксплуатации месторождения образуется значительный поверхностный поток термальной воды расходом более 15,2 тыс. м³/сут, с температурой от 70°C до 120°C. В данном случае отсепарированная вода яв-

ляется сопутствующим продуктом и составляет технологические потери, сопровождающие добычу пара. Отсутствие достаточного количества потребителей в п. Паужетка и значительная удалённость месторождения от п. Озерновский приводят к тому, что основной объём высокопотенциальных теплоэнергетических вод сбрасывается в поверхностные водотоки. Таким образом, уменьшается негативная тепловая нагрузка на водные объекты, но сохраняется химическое воздействие, выражающееся в высоком содержании в сбросных водах В, Li, As. Некоторые химические соединения могут накапливаться в грунте, осадках и организмах. Учитывая рыбохозяйственное значение р. Паужетка, этот факт свидетельствует о дополнительных экологических рисках.

Паратунское месторождение в настоящее время используется для теплоснабжения с. Паратунка, п. Термальный, нужда Паратунской курортной зоны (более 30 групп потребителей). Объём использования термальных вод месторождения составляет более 6 млн. м³ в год, со средней температурой воды 77°С [10]. Отработанный теплоноситель после смешения с хозяйственно-бытовыми сточными водами сбрасывается в р. Паратунка – нерестилище лососёвых пород рыб, выше по течению от места сброса на Паратунском рыбообразовном заводе выращивают мальков кеты. Ниже по течению реки присутствует тепловое и химическое загрязнение соединениями В, As. Села Быстринского района Эссо и Анавгай обеспечены тепловыми ресурсами Эссовского месторождения с суточным водоотбором – 15,3 тыс. м³, со средней температурой 75°С и Анавгайского месторождения термальных вод при суточном водоотборе – 2,3 тыс. м³, с температурой 72°С [25]. Отработанный теплоноситель из системы теплоснабжения с. Эссо сбрасывается в р. Уксихан и р. Быстрая, с системы теплоснабжения с. Анавгай сток сбрасывается в р. Быстрая. В сточных водах присутствуют высокие содержания В, Li, As.

В геотермальных растворах присутствуют химические соединения, которые при высоких температурах и давлении выщелачиваются из пород геотермальных месторождений и выносятся на поверхность в составе пароводяной смеси. В гидротермальный раствор входят соединения таких элементов, как Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, S, O, Cl, F, C, Si, H, N, B, Li, As в концентрациях, значительно превышающих ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). Выполненная геохимическая оценка состава сбрасываемых в поверхностные водотоки геотермальных вод различных геотермальных месторождений Камчатки показывает превышения предельно допустимых концентраций, установленных для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) (табл. 4). Следует отметить, что в геотермальных районах естественный геохимический фон также превышающий ПДК_{рх}.

Разработка нормативов для сбрасываемых в водотоки геотермальных стоков должна осуществляться с учетом суммарного дебита источников естественной разгрузки гидротермальных систем. Например, естественная разгрузка Паужетского гидротермального месторождения составляет около 100 л/с [10]. Для того, чтобы исключить нарушение экологического равновесия, необходимо сохранить сброс токсичных соединений в бассейн р. Озерной строго в пределах естественной разгрузки месторождения. Разница между расходом сбрасываемого отработанного геотермального теплоносителя в условиях эксплуатации и естественной разгрузкой является для Паужетского и других гидротермальных месторождений тем количеством термальных вод, которое в целях сохранения экологического равновесия необходимо либо закачивать обратно, либо очищать перед сбросом. Про-

гнозные ресурсы соединений В, Li, Rb, Cs Паужетского геотермального месторождения составляют (тонн в год): H_3BO_3 – 2785, Li_2CO_3 – 221; Rb_2CO_3 – 9,2; Cs_2CO_3 – 5,9 [2]. Попутное извлечение этих компонентов при комплексном использовании геотермальных ресурсов Паужетского месторождения может оказаться рентабельным.

Таблица 4

Кратность превышения ПДК_{рх} по некоторым элементам и соединениям в составе вод геотермальных месторождений Камчатки, сбрасываемых в реки [10]

Месторождение	Li	Al	As	H_3BO_3	Na	K	F	Cl	SO_4^{2-}
Анавайгское	36	2	12	3	2,3	–	2,5	–	–
Быстринское	45	–	5	12,5	3,5	–	2,5	2	–
Эссовское	15	–	2	5	1,7	–	3	–	5,5
Пушинское	3	–	–	10,5	12	4,8	–	4,5	4
Налычевское	4,3	–	200	28	8,5	12	–	5,5	4,5
Паратунское	2	–	3	3	–	–	–	–	5,5
Верхне-Паратунское	8	200	120	25	–	23	–	–	5
Апачинское	13,5	–	–	11	–	–	2,5	–	–
Больше-Банное	–	–	10	–	2	1,6	10	–	4,5
Паужетское	37,5	–	–	54	8	7	–	5	–

Таким образом, эксплуатация геотермальных месторождений сопровождается тепловым и химическим загрязнением атмосферы и гидросферы. Утилизация отработанных геотермальных растворов, содержащих широкий спектр химических соединений, является одной из актуальных проблем недропользования. В геотермальных растворах присутствуют химические соединения, которые при высоких температурах и давлении выщелачиваются из пород геотермальных месторождений и выносятся на поверхность в составе пароводяной смеси. В гидротермальный раствор входят соединения таких элементов, как Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, S, O, Cl, F, C, Si, H, N, B, Li, As в концентрациях, значительно превышающих ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). В то же время в геотермальных районах присутствует естественный геохимический фон, также превышающий ПДК_{рх}. Геотермальные электростанции по условиям работы теснейшим образом связаны с гидрологическими и инженерно-геологическими условиями. Химический состав теплоносителя и концентрации элементов и соединений определяется геохимией пород месторождения, температурой и давлением, при которых происходит взаимодействие воды и породы. Последние особенно важны, поскольку очень часто именно они и определяют концентрации компонентов. Так как конкретные гидрологические и инженерно-геологические условия в комплексе в природе почти не повторяются, то геотермальным электростанциям свойственна индивидуальность. Однако и в геотермальной энергетике имеются общие черты, что позволяет создавать для нее некоторые типовые конструкции и предъявлять к ним общие обязательные требования. В настоящее время универсальных технологических схем очистки сточных вод ГеоЭС и утилизации извлеченного материала не существует, но актуальность работ по их разработке и внедрению очевидна.

Дальнейшие исследования могли бы сделать извлечение минеральных компонентов из отработанных геотермальных растворов жизнеспособной технологией. Преимущества извлечения минералов из геотермальных растворов по сравнению с традиционными химико-технологическими схемами: 1) повышение эффективности работы ГеоЭС, снижение температуры reinjection и повышение возможности применения бинарных схем; 2) исходный геотермальный раствор является отходом энергопроизводства, извлечение минералов частично решает проблему его утилизации; 3) повышение комплексности использования геотермального теплоносителя, увеличение прибыли за счет совмещения энергетического и минерального производства, уменьшение платежей за сверхнормативный сброс.

В общем случае к числу экологических проблем, могущих возникнуть в связи с реализацией проектов в сфере геотермальной энергетики, относятся: стоки (буровые растворы и буровой шлам, отработанная геотермальная жидкость), выбросы в атмосферу, твердые отходы, фонтанирование скважин и разрывы трубопроводов, потребление и забор воды. При бурении скважин, которое может осуществляться на этапах разведки, разработки и эксплуатации геотермальных ресурсов, обычно используются буровые растворы на водной или углеводородной основе, содержащие различные химические присадки.

Особую опасность представляет шлам из бурового раствора на углеводородной основе, который интенсивно загрязнен нефтепродуктами. Составной частью образующихся стоков является отработанная геотермальная жидкость, которая состоит из отсепарированной воды (т. е. воды, которая изначально поступает из геотермального резервуара вместе с паром) из паровых сепараторов и конденсата, образующегося во время конденсации отработанного пара после генерации электроэнергии. Геотермальный конденсат характеризуется высокой температурой, низкими значениями pH и высокими содержаниями металлов. У отсепарированной воды показатель pH часто нейтральный; в ней также могут присутствовать тяжелые металлы. Содержание возможных поллютантов в стоках с объектов геотермальной энергетики варьируется в зависимости от минералогических свойств вмещающей геологической формации, температуры геотермальной воды и особенностей технологии, применяемой на том или ином предприятии. Добыча, обратная закачка и сброс геотермальной жидкости может повлиять на качество и объем запасов поверхностных и подземных вод.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что геотермальные воды характеризуются очень высокими концентрациями многих макро- и микроэлементов, среди которых Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, S, O, Cl, F, Si, B, Li, As, Hg; в водах и растворах присутствуют значительные количества диоксида углерода, сероводорода, метана, аммиака, серной кислоты. Разработка геотермальных месторождений сопровождается тепловым и химическим загрязнением атмосферы и гидросферы. В геотермальных растворах также присутствуют химические соединения, которые при высоких температурах и давлении выщелачиваются из пород геотермальных месторождений и выносятся на поверхность в составе пароводяной смеси. Длительная эксплуатация геотермальных месторождений без обратной закачки теплоносителя в водоносные горизонты приводит к загрязнению водоемов и опусканию почвы.

Литература

1. *Антипов М.А., Бондаренко С.С., Стрелетов В.П., Каспаров С.М.* Минеральное сырье. Бром и йод. М.: Геоинформмарк, 1999. – 45 с.
2. *Арсанова Г.П.* Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. – Новосибирск: Наука, 1974. – 110 с.
3. *Бабушкин Н.А., Молодежникова А.П.* Химический состав геотермальных вод Мутновского месторождения // Теплофизические основы энергетических технологий. Сб. научн. трудов II Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием, 6–8 октября 2011 г., Томск. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011, с. 312–313.
4. *Бела П., Жуга Я.* Влияние геотермальной энергии на окружающую среду // Энергия. Нефть и газ, 2012, № 8/9, с. 60–65.
5. *Белушов В.П., Белушова С.П.* Природные катастрофы и экологические риски геотермальной энергетики. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2002. – 132 с.
6. *Берман Э.* Геотермальная энергия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
7. *Бондаренко С.С.* Минеральное сырье. Воды промышленные. – М.: Геоинформмарк, 1999. – 45.
8. *Брагин П.В., Челюков Г.А.* Геохимия термальных вод юга Дальнего Востока // Современные проблемы геохимии: Материалы конференции молодых ученых. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2007, с. 86–90.
9. *Вартамян Г.С., Колягина В.А., Плотникова Р.П., Соустова Т.Н., Шпак А.А.* Использование и перспективы освоения минеральных, термальных и промышленных вод. – М.: Геоинформмарк, 1999. – 86 с.
10. *Горбач В.А.* Проблемы утилизации отработанных геотермальных растворов // Георесурсы, 2014, № 3 (58), с. 44–48.
11. *Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. – М.: Наука, 1983. – 160 с.
12. *Кугачко Ю.А., Мельников Д.В.* Проявления техногенеза в геодинамически активном районе Мутновского геознергетического комплекса (Южная Камчатка) // География и природные ресурсы, 2006а, № 3, с. 30–37.
13. *Кусова Ж.Г.* Разработка месторождений термоминеральных вод как наиболее экологичный и перспективный метод комплексного использования недр // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2008, № 2, с. 19–23.
14. *Пашкевич Р.П., Чернев П.П., Шадрин А.В.* Термогидродинамическое моделирование Мутновского месторождения парогидротерм // Разведка и охрана недр, 2009, № 7, с. 37–43.
15. *Поваров О.А., Томаров Г.В.* Физико-химические проблемы геотермальной энергетики // Изв. РАН, Энергетика, 1997, № 4, с. 3–17.
16. *Посохов Е.В., Толстихин Н.П.* Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). – Л.: Недра, 1977. – 240 с.
17. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для геотермальной энергетики. Международная финансовая корпорация. Группа Всемирного Банка // <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>.
18. *Рычагов С.Н., Королева Г.П., Степанов П.П.* Рудные элементы в зоне гипергенеза месторождения парогидротерм: распределение, формы миграции, источники // Вулканология и сейсмология, 2002, № 2, с. 37–58.

19. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов П.П. Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Геохимия, 2009, № 5, с. 533–542.

20. Свалова В.Б. Комплексное использование геотермальных ресурсов // Георесурсы, 2009а, № 1 (29), с. 17–23.

21. Свалова В.Б. Геотермальные ресурсы России и их комплексное использование // Альтернативная энергетика и экология, 2009б, № 7 (75), с. 69–79.

22. Томафов Г.В. Экологические проблемы строительства и эксплуатации геотермальных электрических станций // Известия Академии Промышленной Экологии, 1997, № 4, с. 20–24.

23. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Минеральные воды Дальнего Востока и их микроэлементный состав // Вестник ДВО РАН, 2005, № 3, с. 66–75.

24. Янин Е.П. Оценка состояния окружающей среды в районе Троицкого йодного завода // Экологическая экспертиза, 2007, № 5, с. 8–32.

25. Яроцкий Г.П., Алискеров А.А., Бурмаков Ю.А., Орлов А.А. Минерально-сырьевой потенциал Камчатской области. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского гос. унив. им. Витуса Беринга. 2007. – 115 с.