

ПОВЕДЕНИЕ РТУТИ В ЗОНЕ ГИПЕРГЕНЕЗА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

© 2009 г. С. Н. Рычагов*, А. А. Нуждаев*, И. И. Степанов**

* *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульв. Пийна, 9
E-mail: rychn@kscnet.ru*

** *ОАО "Александровская опытно-методическая экспедиция" Министерства Природных Ресурсов
601650 Александров, Владимирская обл., Красный пер., 6
E-mail: stepanovi@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.06.2007 г.

Показано распределение ртути во всех типах твердых отложений, представленных в зоне гипергенеза геотермальных месторождений Ю. Камчатки: горных породах, гидротермально-измененных породах (метасоматитах), почвах и почвенно-пирокластическом чехле, донных отложениях постоянных и временных водотоков, гидротермальных глинах, искусственных кремнистых осадках и сульфидах железа, образующихся за счет сброса термальных вод из скважин. Содержание ртути колеблется от фоновых для Курило-Камчатского региона - в неизмененных горных породах, до высоких и ураганных значений в гидротермальных глинах и мономинеральных пробах пирита. Получены данные об источниках, условиях миграции и механизмах концентрирования ртути. Ртуть поступает на дневную поверхность геотермальных месторождений и термальных полей в составе глубинного 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 др. соединений. Хорошими сорбентами ртути в геотермальных условиях при атмосферном давлении и температурах от 20°C до 120°C, по-видимому, являются новообразованные глинистые минералы, сульфиды железа (пирит), силикатный гель, биологическое вещество (торф).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интерес к поведению ртути в геологической среде не только не ослабевает, но значительно вырос в связи с широким распространением этого элемента в лито-, гидро- и атмосфере и выявленным новым особенностям его миграции, в первую очередь, в геодинамически активных регионах земного шара. Так, П.В. Ковалем с соавторами показана связь аномальных вариаций содержания ртути в воде зон активных разломов с современной сейсмической активностью Байкальской рифтовой зоны [1]. Цитохимические ореолы рассеяния ртути в морских четвертичных отложениях, локализующиеся вдоль флюидопроводящих разрывных нарушений, используются при выявлении и картировании источников углеводородного сырья [2]. Изучение поведения ртути на геотермальных месторождениях традиционно связано с решением задач поискового характера: обнаружением и трассированием зон, проницаемых для высокотемпературного гидротермального флюида, выделением термоаномалий и определением их границ, и т.п. [3]. При этом считается, что практически вся ртуть из вмещающих пород под воздействием аномально высокого конвективного теплового потока отгоняется из недр месторождений и накапливается в тонком слое припо-

верхностных аргиллизированных отложений. Нами было показано, что на высокотемпературном этапе развития гидротермально-магматической системы ртуть может создавать аномально высокие концентрации в трещинно-брекчиевых зонах по всему геологическому разрезу, а по мере эволюции системы основная масса ртути, по-видимому, постепенно транспортируется к дневной поверхности [4]. Одновременно происходит локализация зон миграции ртути в центральных частях систем и месторождений и потеря связи ее потока с глубинными (магматическими ?) источниками. Такое поведение Hg в современных геотермальных условиях, а также корреляция распределения ртути с Au, Ag, Pb, Cu, Zn и др. элементами на определенных участках структуры гидротермально-магматических систем позволяет обратить внимание на ртуть, как возможный индикатор механизмов формирования рудных геохимических барьеров в зоне гипергенеза геотермальных месторождений. В данной работе, направленной на исследование поведения Hg в современных минерало-рудообразующих процессах, приведены результаты систематического изучения распределения ртути в различных типах твердых отложений, развитых в приповерхностных горизонтах геотермальных месторождений.

МЕТОДИКА И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор образцов, подготовка проб для определения содержания в них ртути и аналитические исследования выполнены по стандартной методике [4] на примере наиболее известных геотермальных месторождений Южной Камчатки - Мутновского, Паужетского, Паратунского и Нижне-Кошелевского, и термальных полей Камбального вулканического хребта (рис. 1). "Фоновый" участок выбран на фланге Паратунского геотермального месторождения, где в этой части данной геологической структуры на дневной поверхности не отмечается проявлений аномального теплового потока. Изучены горные породы в первичном залегании, гидротермально измененные породы, аргиллизиты (гидротермальные глины), образующиеся в гидротермальных глинах сульфиды железа (пирит), почвенно-пирокластические отложения (подпочвенный горизонт, сложенный суглинками или супесями), минеральные осадки (в т.ч. искусственные) и донные отложения. Ранее путем послойного опробования вертикальных разрезов приповерхностного чехла гидротермальных глин и кремнистых осадков (в среднем, через 10-20 см) были получены физические и минералого-геохимические характеристики этих толщ [7-9]. Широко известные Мутновское и Паужетское геотермальные месторождения [10] характеризуются принципиально близким строением: наличием на глубине непосредственно под месторождением или на удалении до 10 км магматического источника питания базальт-андезитобазальтового состава (периферического магматического очага или остывающей интрузии), пластово-трещинно-блоковой структурой водовмещающих горизонтов и формированием дополнительного водоупора (теплоизолятора) в приповерхностном горизонте пород за счет отложения минералов кремнезема и гидротермальных глин непосредственно над восходящими потоками флюидов. Этап развития Мутновского месторождения определяется как экстремальный, Паужетского - регрессивный [11]. Традиционно считается, что термальные поля Камбального вулканического хребта, по-видимому, составляют единую с Паужетским геотермальным месторождением структуру и имеют общее глубинное питание от предполагаемого в недрах Камбального хребта магматического очага [12, 13]. Однако, в процессе доизучения месторождения были получены данные в пользу наличия долговживущего источника глубинного питания непосредственно в недрах Паужетской гидротермальной системы [14]. Нижне-Кошелевское геотермальное месторождение отличается высокими температурами теплоносителя (240°C - на глубине 1200 м, в интервале 2.5-3.0 км они могут достигать 370°C [15]), в т.ч. паро-газовых струй (до 120°C); наличием мощной зоны перегретого пара, расширяющейся на глубину и формиру-

ющей единственную на месторождении локальную поверхностную термоаномалию размерами 250 X 500 м, но большой тепловой мощности (25000 ккал/сек [16]). Параметры и структура Нижне-Кошелевского геотермального месторождения соответствуют прогрессивному этапу развития. Низкими параметрами теплоносителя (до 110°C на глубине 1000-1200 м) обладает Паратунская гидротермальная система и одноименное месторождение [17]. Гидротермальная система сформирована в грабенообразной структуре, предполагается ее связь с остывающим магматическим очагом кислого состава. Таким образом, для получения полной картины распределения ртути в современных геотермальных условиях на конкретных примерах рассмотрены все этапы развития гидротермальных систем (месторождений): начальный или прогрессивный (Нижне-Кошелевское), средний или экстремальный (Мутновское) и завершающий или регрессивный этап (Паужетское и Паратунское).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех объектов наблюдается неоднородное распределение ртути в зависимости от типа твердых отложений и приуроченности к конкретному геотермальному месторождению (табл. 1). Неизмененные горные породы, обладающие, в основном, средним составом (от андезитов-базальтов до андезитодацитов), характеризуются низкими, фоновыми для Курило-Камчатского региона, значениями [18]. Исключение составляют породы Мутновского геотермального месторождения, которое выделяется повышенными средними значениями концентраций ртути во всех типах отложений. Максимально высокими значениями содержаний Hg характеризуются залегающие на дневной поверхности гидротермальные глины: для Нижне-Кошелевской термоаномалии концентрации ртути в глинах достигают ураганных (более $n \times 10^{-3}\%$). Обращают на себя внимание устойчивые повышенные значения содержаний ртути в почвах и русловых (донных) образованиях. Мутновское месторождение выделяется в ряду других известных геотермальных месторождений Ю. Камчатки высоким уровнем концентраций Hg во всех типах отложений зоны гипергенеза. Это обстоятельство, наряду с широким и длительным (в течение всего четвертичного периода) проявлением на дневной поверхности высокотемпературных гидротермальных процессов в этом районе [16], свидетельствует в пользу наличия в недрах современной Мутновской гидротермально-магматической системы мощного источника тепла и рудных элементов.

Таким образом, изученные геотермальные месторождения Ю. Камчатки характеризуются, в целом, высокими значениями содержания ртути в гидротермально-метасоматических образованиях, прежде всего — глинах (рис. 2). Гидротермальные

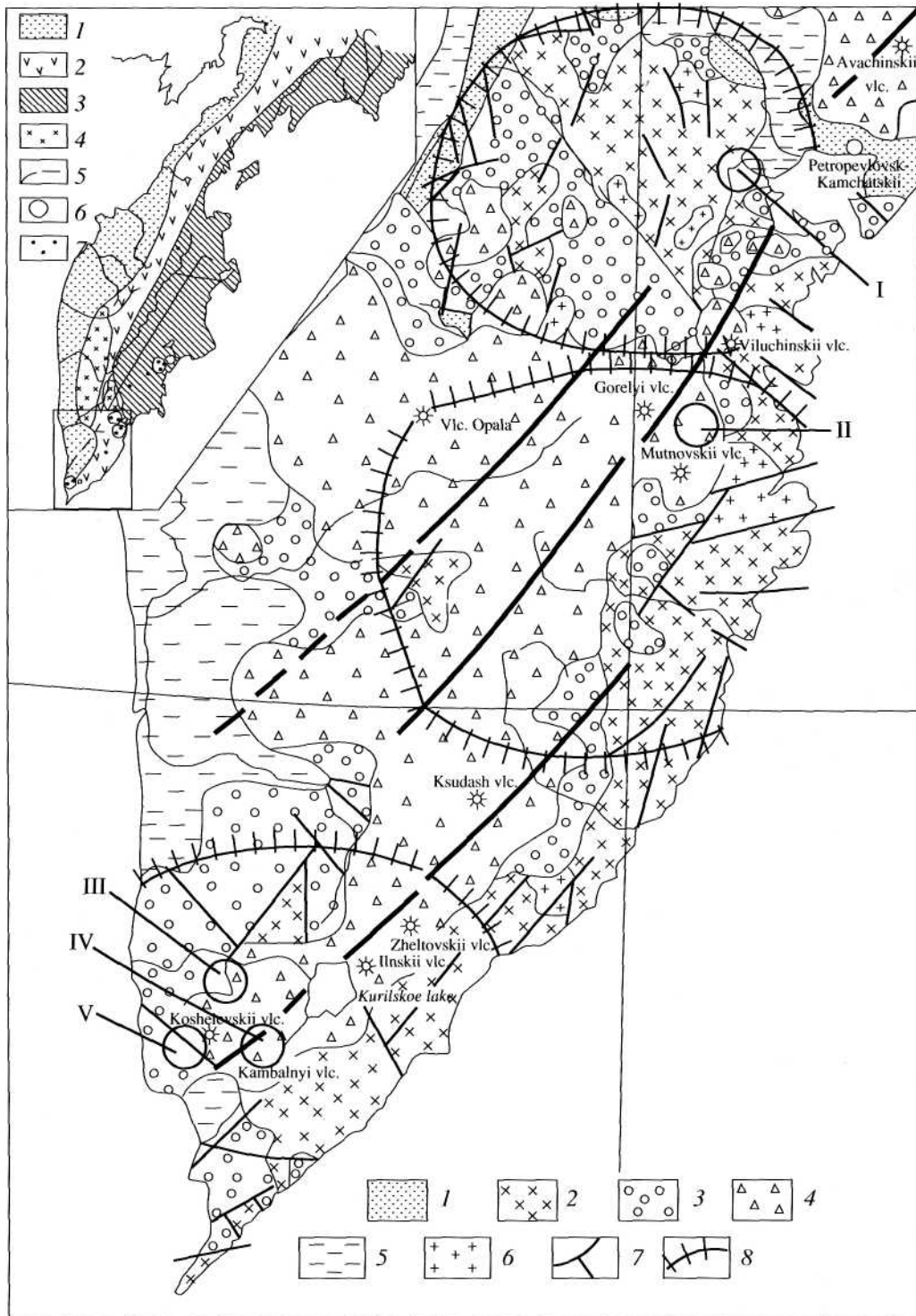


Рис. 1. Геотермальные районы Южной Камчатки, структурная схема (по работе [5], с изменениями [6]). На врезке: основные структурные зоны Камчатки в палеоген-неогеновое время (составлена Г.М.Власовым и В.В. Ярмолюком в 1964 г.): 1 - Западно-Камчатская, 2 - Центрально-Камчатская, 3 - Восточно-Камчатская зоны; 4 - Срединный массив; 5 - граница Восточно-Камчатской вулканической зоны; 6 - геотермальные районы; 7 - геотермальные системы. На основном рисунке: 1 - доостроводужные породы (доолигоценовые); 2 - нижний структурный ярус (олигоцен(?) - средний миоцен); 3 - средний ярус (средний миоцен - плиоцен); 4 - верхний ярус - четвертичные вулканиды; 5 - четвертичные и плиоцен-четвертичные (?) осадочные толщи верхнего структурного яруса внутренней зоны островной дуги; 6 - крупные тела формации кварцевых диоритов; 7 - разломы; 8 - границы геотермальных районов, с севера на юг: Паратунского, Мутновско-Жировского и Паужетско-Камбально-Кошелевского. Цифрами обозначены геотермальные месторождения: I - Паратунское, II - Мутновское, III - Паужетское, V - Нижне-Кошелевское; и термопроявления Камбального хребта (IV).

Таблица 1. Средние значения концентрации ртути в различных типах отложений на геотермальных месторождениях Южной Камчатки

№ п.п.	Тип отложений	Hg, 10 ⁻⁷ %			
		Геотермальные месторождения			
		Паужетское	Нижне-Кошелевское	Мутновское	Паратунское
1	Горные породы	16/220	16/220	136/13	29/42
2	Гидротермально измененные породы	75/220	75/220	1184/5	217/22
3	Почвы	523/50	2010/62	510/38	106/34
4	Донные отложения	102/42	-	977/56	-
5	Кремнистые осадки	9/34	-	-	-
6	Гидротермальные глины	2727/250	15350/48	5000/32	-
7	Пирит (мономинеральные пробы)	7280/57	-	-	-

Примечание. Определения выполнены в ИВиС ДВО РАН атомно-флюоресцентным методом с диффузионным разделением. Аналитики: И.И. Степанов, Н.И. Чеброва, Н.И. Свинухова и В.П. Коростелева. В числителе - средние значения концентрации ртути в пробах, в знаменателе - количество определений.

глины, образующие на поверхности изученных термальных полей практически непрерывный чехол мощностью 1.3-1.5 м, выделяются из числа других новообразований не только в целом аномально высокими концентрациями ртути (табл. 1), но и определенным распределением Hg по слоям. Строение и состав слоистой толщи гидротермальных глин, особенности образования пирита как рудоконцентрирующего минерала, распределение Au и др. элементов

показано в работе [9]. Распределение ртути в разрезах толщи гидротермальных глин имеет следующий характер (табл. 2). На Верхне-Паужетском термальном поле Hg концентрируется в приповерхностном горизонте "синих глин". На отдельных участках Нижне-Кошелевского геотермального месторождения прослеживается аналогичная тенденция, но для данного объекта более всего характерен высокий уровень значений Hg в каждом слое вертикального разреза глин. Как первая, так и вторая тенденции в значительной степени определяются высокими сорбционными свойствами сульфидов железа, насыщающих горизонт "синих глин" - до 90 объемных %, и относительно равномерно, с содержанием до > 30-40 объемных %, распределенных в слоях глины Нижне-Кошелевского геотермального месторождения [9]. На рис. 3 выделяются три области значений концентрации Hg: первую характеризует

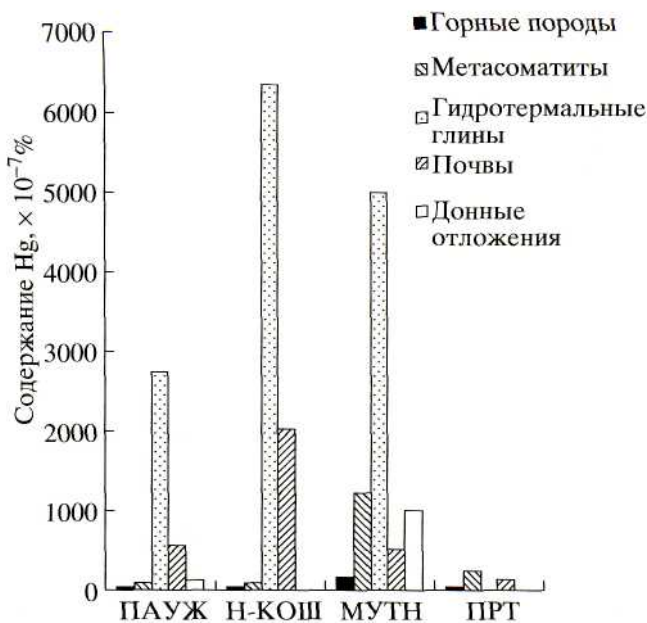


Рис. 2. Диаграмма распределения концентраций ртути в различных типах отложений на четырех основных геотермальных месторождениях Южной Камчатки. Пауж - Паужетское, Н-Кош - Нижне-Кошелевское, Мутн - Мутновское, ПРТ - Паратунское геотермальные месторождения.

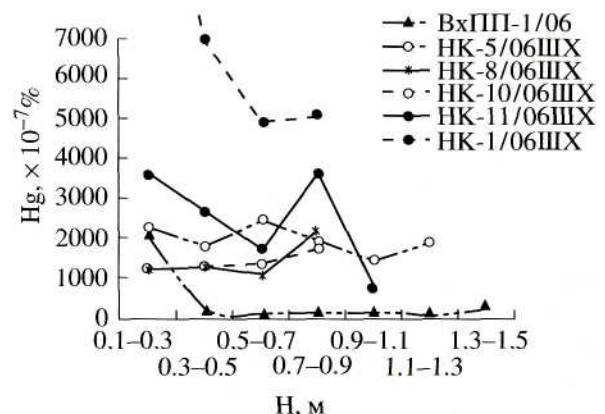


Рис. 3. Распределение ртути в вертикальных разрезах гидротермальных глин Верхне-Паужетского термального поля (кривая VxIII) и Нижне-Кошелевской термоаномалии, (см. табл. 2).

Таблица 2. Концентрации ртути в вертикальном разрезе толщи гидротермальных глин Верхне-Паужетского термального поля и Нижне-Кошелёвской термоаномалии

№ п.п.	Интервал отбора проб, м	Hg, 10 ⁻⁷ %					
		ВхПП-1/06	НК-1/06ШХ	НК-5/06ШХ	НК-8/06ШХ	НК-10/06ШХ	НК-11/06ШХ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1-0.3(0.2-0.4)	2048	15804	1176	1198	2255	3565
2	0.3-0.5 (0.4-0.6)	200	6980	-	1245	1744	-
3	0.5-0.7 (0.6-0.8)	69	4929	1341	1040	2391	1694
4	0.7-0.9(0.8-1.0)	90	5040	1682	2106	1882	3589
5	0.9-1.1 (1.0-1.2)	104	-	-	-	1381	698
6	1.1-1.3(1.2-1.35)	37	-	-	-	1827	-
7	1.3-1.5	140	-	-	-	-	-

Примечание. Определения выполнены в Аналитическом Центре ИВиС ДВО РАН атомно-флюоресцентным методом с диффузионным разделением. Аналитики И.И. Степанов и В.П. Коростелева. ВхПП - Верхне-Паужетское термальное поле, НК - Нижне-Кошелёвская термоаномалия. НК-1/06, 5/06, 8/06 - шурфы, остальные - скважины колонкового бурения. В графе "интервал отбора проб" в скобках приводится глубина послыного опробования глин в скважине НК-11/06ШХ.

кривая ВхПП (Верхне-Паужетское поле) и отождествляет собой отмеченную выше первую тенденцию распределения ртути, вторую - группа кривых в поле высоких средних значений (в данном случае это отражение второй тенденции), третью область - кривая НК-1/06 (Нижне-Кошелёвская термоаномалия), одновременно подчеркивающая и первую, и вторую тенденции распределения ртути в гидротермальных глинах Паужетского и Нижне-Кошелёвского месторождений.

В процессе эксплуатации Паужетского геотермального месторождения за счет постоянного сброса некоторого объема ("излишков") пароводяной смеси на дневную поверхность образуются кремнистые отложения (искусственные "гейзериты"), заполняющие долины временных или постоянных водотоков. Отложения имеют мощность от 20-30 до > 80 см, протяженность до 600-700 м при средней ширине 5-10 м, продолжительность формирования толщи кремнистых осадков исчисляется 25-30 годами [8]. Эти образования представляют большой интерес с различных позиций: изучения миграции золота и полиметаллов в условиях реального натурального эксперимента [14], оценки скорости накопления кремнистого вещества в современном гидротермальном процессе, исследования влияния данной динамически активной геохимической системы на экологическую обстановку в районе геотермального месторождения, и др. В настоящей работе нами исследовалось распределение ртути при образовании кремнистых осадков на сбросе термальных вод из трех эксплуатационных скважин: R-106, ГК-3 и R-120. В целом, осадки содержат ртуть на уровне низких, фоновых для гидротермальных образований [4], значений: (10-30) × 10⁻⁷%. Высокими значениями Hg отличаются кремнистые осадки, образующиеся непо-

средственно на изливе термальных вод из скважин R-106 и R-120 (табл. 3). При этом прослеживается тенденция снижения концентраций ртути вниз по простиранию кремнистого плаща и от верхнего слоя к нижнему. В разрезе, где вскрыта подошва толщи (R-120/06-2), отмечается увеличение концентраций ртути в нижних слоях на 1 порядок, что связано, как отмечалось выше, по-видимому, с высокой сорбционной способностью органического вещества (торфа), рис. 4. Кремнистые осадки характеризуются также высокими значениями содержания золота (табл. 3) с аналогичной тенденцией уменьшения концентраций от верхнего слоя к нижнему, и по простиранию плащей. Содержание некоторых дру-

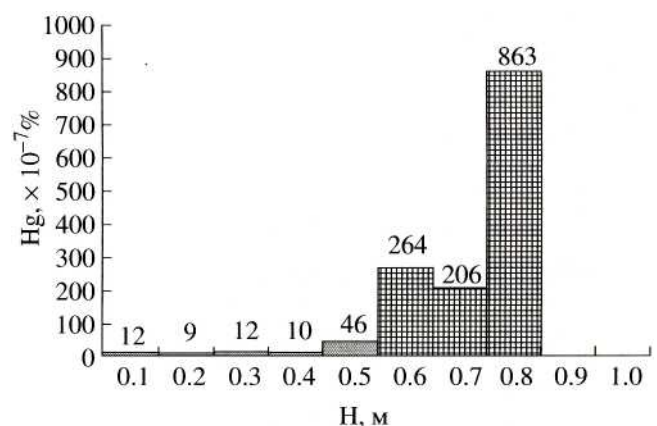


Рис. 4. Распределение концентраций ртути по слоям вертикального разреза толщи кремнистых отложений в точке R-120/06-2 (табл. 3). Три нижних слоя представлены торфом, образовавшимся в течение 25—27 лет за счет консервации и преобразования растительных остатков под слоем кремнистых отложений в условиях постоянных повышенных температур (от 90°C у истоков потока до 35—40°C на удалении 450-500 м).

Таблица 3. Концентрации ртути и золота в кремнистых отложениях ("гейзерите"), формирующихся на дневной поверхности Паужетского геотермального месторождения за счет сброса термальных вод из скважин

№ п.п.	№ пробы	Глубина отбора, см	Удаленность точки отбора от устья скважин, м	Отложения	Hg, 10 ⁻⁷ %	Au, г/т
1	2	3	4	5	6	7
1	R-106/04-1	0-10	5	Кремн. осадки	150	0.082
2	R-106/04-2	0-10	30	Кремн. осадки	43	0.024
3	R-106/04-3	0-10	60	Кремн. осадки	29	0.02
4	R-106/04-4	0-10	120	Кремн. осадки	37	0.046
5	ГК-3/05-1	0-10	5	Кремн. осадки	20	1.71
6	ГК-3/05-2	0-10	9	Кремн. осадки	37	0.12
7	ГК-3/05-3А	0-10	17	Кремн. осадки	34	0.084
8	ГК-3/05-4в-1	0-20 (I)	37	Кремн. осадки	23	0.103
9	ГК-3/05-4в-2	20-40 (II)	37	Кремн. осадки	22	0.16
10	ГК-3/05-5в-1	0-10	48	Кремн. осадки	28	0.095
11	ГК-3/05-8	0-10	70	Кремн. осадки	11	-
12	<i>R-120/04-1-1</i>	<i>0-5 (I)</i>	<i>30</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>420</i>	<i>0.148</i>
13	<i>R-120/04-1-2</i>	<i>5-15 (II)</i>	<i>30</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>110</i>	<i>0.088</i>
14	<i>R-120/04-1-3</i>	<i>15-25 (III)</i>	<i>30</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>53</i>	<i>0.034</i>
15	<i>R-120/04-1-4</i>	<i>25-30 (IV)</i>	<i>30</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>14</i>	<i>0.062</i>
16	R-120/04-2-1	0-10	80	Кремн. осадки	19	0.006
17	R-120/04-3-1	0-10	130	Кремн. осадки	3.6	-
18	R-120/04-4-1	0-10 (I)	450	Кремн. осадки	5.2	-
19	R-120/04-4-2	10-20(II)	450	Кремн. осадки	79	-
20	R-120/05-1В	0-15	50	Кремн. осадки	6.4	0.057
21	R-120/05-2а	15-25	100	Кремн. осадки	9.6	0.009
22	R-120/05-3в	0-5 (I)	150	Кремн. осадки	9.6	0.042
23	R-120/05-3а	20-25 (III)	150	Кремн. осадки	14	0.003
24	R-120/05-5	0-10	250	Кремн. осадки	14	0.008
25	<i>R-120/06-2-1</i>	<i>0-9 (I)</i>	<i>40</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>12</i>	<i>0.025</i>
26	<i>R-120/06-2-2</i>	<i>9-20 (II)</i>	<i>40</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>9</i>	<i>0.024</i>
27	<i>R-120/06-2-3</i>	<i>20-30 (III)</i>	<i>40</i>	<i>Кремн. осадки</i>	<i>12</i>	<i>0.019</i>
28	<i>R-120/06-2-4</i>	<i>30-40 (IV)</i>	<i>40</i>	<i>Ил с крошкой кремн. осадка</i>	<i>10</i>	<i>0.012</i>
29	<i>R-120/06-2-5</i>	<i>40-60 (V)</i>	<i>40</i>	<i>Ил и глина</i>	<i>46</i>	<i>0.011</i>
30	<i>R-120/06-2-6</i>	<i>60-70 (VI)</i>	<i>40</i>	<i>Торф</i>	<i>264</i>	<i>0.01</i>
31	<i>R-120/06-2-7</i>	<i>70-80 (VII)</i>	<i>40</i>	<i>Торф</i>	<i>206</i>	<i>0.019</i>
32	<i>R-120/06-2-8</i>	<i>80-90 (VIII)</i>	<i>40</i>	<i>Торф</i>	<i>863</i>	<i>0.015</i>

Примечание. Определение содержаний Hg выполнены в АЦ ИВиС ДВО РАН атомно-флюоресцентным методом с диффузионным разделением, аналитики И.И. Степанов и В.П. Коростелева. Определение содержаний Au выполнены в Институте геохимии СО РАН атомно-абсорбционным методом, аналитик Г.И. Щербакова. В графе "глубина отбора" римскими цифрами обозначены номера слоев (сверху - вниз). Полужирным выделены два представительных разреза кремнистых отложений, полученных в близко расположенных точках, но в разное время (2004 и 2006 гг.).

гих элементов в кремнистых осадках составляет на 1-2 порядка выше фоновых значений для пород Курило-Камчатского региона: В - (50-500) $\times 10^{-3}\%$, Sb - (5-30) $\times 10^{-3}\%$, As - (10-80) $\times 10^{-3}\%$, Ag - (80-4000) $\times 10^{-6}\%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование распределения ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений Ю. Камчатки показало, что поведение этого химического элемента неоднозначно и зависит от температурных и физико-химических условий формирования (преобразования) различных геологических отложений. Залегающие на дневной поверхности горные породы, в целом, содержат низкие, фоновые для Курило-Камчатского региона [18], значения концентраций Hg. При этом Мутновское геотермальное месторождение отличается высокими средними значениями концентраций Hg в разнообразных по происхождению неизмененных породах (лавах, туфах, игнимбритах, брекчиях), а также в других твердых отложениях - метасоматитах, почвах, глинах и др. (табл. 1). По нашему мнению, это объясняется, прежде всего, отличием Мутновского месторождения и одноименной гидротермально-магматической системы от других изученных объектов по ряду общих параметров: повышенной установленной и прогнозной мощностью (62 и более 300 МВт, соответственно), длительным характером (в течение всего четвертичного периода) гидротермально-метасоматической переработки огромного массива пород ($\geq n \times 100 \text{ км}^3$), широким проявлением на дневной поверхности толщи аргиллизитов ($\geq n \times 10 \text{ км}^2$), наличием в недрах гидротермально-магматической системы крупного и длительноживущего источника теплового и рудного питания [19].

Гидротермально-измененные породы, а также развитые в пределах всей зоны гипергенеза почвы (почвенно-пирокластические мелко-тонкообломочные отложения) содержат ртуть в концентрациях на 1—2 порядка выше фоновых значений. Это же характерно и для донных отложений, изученных с высокой степенью детальности на двух геотермальных месторождениях — Паужетском и Мутновском. Накопление ртути в указанных образованиях, безусловно, связано с современным гидротермальным процессом и наличием в метасоматитах, почвах и донных осадках субстрата (минералов), концентрирующего ртуть. Частично на вопросы об условиях и механизмах накопления и перераспределения ртути при различных параметрах геотермальной среды могут ответить данные изучения толщи гидротермальных глин и искусственных кремнистых осадков.

Ранее было показано, что высокий уровень содержания ртути в гидротермальных глинах обусловлен, главным образом, накоплением ее в глинистых минералах на температурном барьере [3, 20]. Наряду с этим, активным концентратором ртути в гидротер-

мальных зонах выступает пирит. Этот тезис находит подтверждение на примере изучения разрезов гидротермальных глин Нижне-Кошелевской термоаномалии и Верхне-Паужетского геотермального поля [9]. На последнем высокие концентрации Hg в глинах связаны с четко выделяющимся приповерхностным горизонтом "синих глин" (до $\geq 2 \times 10^{-4}\%$), в которых количество пирита составляет $\geq 90\%$ от объема. При этом мономинеральные пробы пирита показывают значения концентраций Hg на 1—2 порядка выше. Гидротермальные глины в разрезах Нижне-Кошелевской термоаномалии характеризуются, в целом, высоким содержанием и относительно равномерным распределением пирита в слоях (до 30-40 объемных %); концентрации Hg колеблются в интервале значений (1.0-3.6) $\times 10^{-4}\%$. Таким образом, сульфиды железа являются хорошими концентраторами ртути, а также золота, полиметаллов и др. элементов, что было показано не только для эпитеермальных рудных месторождений, но и для современных геотермальных условий [9, 21, 22].

Кремнистые осадки содержат ртуть, в среднем, на уровне (10-30) $\times 10^{-7}\%$, что отвечает фоновым значениям для твердых отложений в условиях гидротермального процесса [4]. Высокими концентрациями Hg (на порядок выше фоновых значений) отличаются кремнистые осадки, образующиеся непосредственно на изливе термальной воды из скважин. Отмечается также тенденция снижения концентраций ртути от верхнего слоя осадков к нижнему и от начала формирования "плаща" вниз по его простиранию. Приведенные данные свидетельствуют в пользу поступления ртути из глубинного гидротермального потока (эксплуатируемый водоносный горизонт на данном участке месторождения расположен, в среднем, в интервале глубин 300—600 м) и концентрированию ее совместно с коллоидной кремнекислотой на первом термодинамическом барьере - у устья скважин. Вероятно, силикагель, наряду с растительным субстратом, является хорошим сорбентом ртути. При старении силикагеля и образовании минералов кремнезема ртуть, находящаяся здесь в атомарной форме, может достаточно легко высвободиться из решетки или дефектов структуры минералов и мигрировать к основанию разреза и вдоль по потоку. По-видимому, этот процесс и был зафиксирован нами при изучении распределения Hg в вертикальных разрезах и по простиранию толщи кремнистых осадков.

Высокий уровень концентраций ртути в почвах на центральных участках геотермальных месторождений обусловлен следующими причинами: 1) интенсивной эманацией ртути из вмещающих пород (из глубинного источника ?) под воздействием аномально высоких температур восходящего теплового потока, установленного для Нижне-Кошелевского и Мутновского месторождений [23] и накоплением ее в породах вблизи дневной поверхности на температурном барьере; 2) возможным

образованием термодинамического и геохимического барьера в основании почвенного разреза, в частности, за счет выпадения здесь ряда солей (сульфатов, скрытокристаллического кремнезема из силикатного геля, и др.), которые могут выполнять роль сорбентов ртути. Хорошим сорбентом ртути также можно считать отложения торфа (известно, что растения, как и многие другие биологические материалы, служат активными концентраторами ртути), погребенного под толщей современных кремнистых осадков, образующихся при сбросе термальной воды на поверхность Паужетского месторождения: значения Hg в "гейзерите" относительно низкие ((10-150) × 10⁻⁷%), в илисто-кремнистом переходном к торфянику слое достигают 200 × 10⁻⁷%, в отложениях торфа концентрации Hg устойчиво растут от верхнего к нижележащему слою ((260-860) × 10⁻⁷%). На сорбционные свойства торфяника, вероятно, оказывают влияние высокая степень открытости системы "кремнистый осадок - растительный субстрат" за счет активной и постоянной циркуляции термальных вод, и интенсивное преобразование захороненных растительных остатков в условиях повышенных температур среды.

Как показали исследования на эпitherмальных ртутных месторождениях [24], основными природными источниками поступления Hg в окружающую среду являются: ветровая эрозия и дегазация ртути из разрушающихся на дневной поверхности пород и минералов; земная кора (по-видимому, авторами имеются в виду все компоненты ее фазового состояния - породы, флюиды, растворы, газ); вулканы и геотермальные проявления. Практически все три типа отмеченных выше источников наиболее ярко проявлены в зоне гипергенеза геотермальных месторождений, расположенных в структуре длительноживущих гидротермально-магматических систем и современных вулканических массивов (в частности, Кошелевского на юге Камчатки). Горные породы и др. твердые отложения, расположенные в центральных частях систем (кратерных зонах вулканов), активно взаимодействуют с восходящими кислыми газами и хлоридно-сульфатными натриевыми растворами, которые отличаются высокой металлоносностью, в т.ч. содержанием ртути [24]. Одним из ярких примеров разгрузки высокоминерализованных металлоносных растворов на вулканах Курило-Камчатской островной дуги являются кислые и ультракислые источники знаменитой реки Юрьева на вулкане Эбеко (о-в Парамушир) [25]. Даже при том, что гидротермальные растворы областей современного вулканизма обладают, в основном, низкой общей минерализацией (в среднем, от 0.1-0.2 до 3-5 г/л), восходящие потоки природных вод содержат широкий спектр металлов, щелочных и редких элементов [26]. А.А. Оболенский с соавторами отмечают, что существенную роль в транспорте ртути гидротермальными флюидами играет атомарная форма Hg⁰ [24]. Детальное изучение мине-

рального состава гидротермальных глин Нижне-Кошелевского геотермального месторождения позволило установить наличие в них киновари. Киноварь в виде аморфных натечных агрегатов и затвердевших ярко-красных капель заполняет пустоты между кристаллами образованного в глинах пирита [9]. Находки минералов ртути на fumarольных и сольфатарных полях вулканов редки [27, 28], а в недрах высокотемпературных геотермальных месторождений - единичны [29]. По-видимому, это обусловлено тем, что при температуре 269°C происходит полное разложение киновари и переход ртути в атомарную форму [30]. Атомы ртути при движении из недр гидротермально-магматической системы к дневной поверхности локализуются в микротрещинах, на дислокациях и в междоузельном пространстве кристаллических решеток минералов-носителей [20, 31] в зонах охлаждения пород. На этих участках, а также на термодинамическом барьере зоны гипергенеза в условиях циркуляции кислых сульфатных растворов и избытка серы, вероятно, могут формироваться сульфиды ртути. Л.М. Лебедев с соавторами при изучении минералогии сольфатарных полей действующего вулкана Менделеева (о-в Кунашир) установили наличие во вмещающих окремненных (опализированных) дацитовых туфах полостей размером в диаметре до 5 см, заполненных высокоминерализованными (до 77 г/л) кислыми-ультракислыми растворами. В этих полостях диагностированы кристаллы марказита, галенита, антимонита, кристобалита, метациннабарита и киновари [32]. Киноварь выделяется в виде сферолитов и их сложных агрегатов на стенках пустот и между кристаллами других рудных минералов. Показано, что отмеченные выше минералы образуют одну ассоциацию и являются продуктами кристаллизации из кислых и ультракислых сульфатных растворов.

Зона гипергенеза геотермальных месторождений областей современного вулканизма характеризуется чрезвычайно контрастными термодинамическими и физико-химическими условиями минералообразования и частой сменой этих условий, в т.ч. не только под влиянием эндогенных, но и разнообразных экзогенных факторов. Так, в одном и том же термальном источнике состав растворов может меняться от хлоридного до сульфатного, pH - на 3-5 единиц, Eh - от положительных к отрицательным значениям и в обратную сторону, температуры - до нескольких десятков градусов, в зависимости от количества атмосферных осадков, условий смешения термальных и метеорных вод, миграции системы газо-водных каналов на термальных и fumarольных полях, что весьма типично для приповерхностной геодинамически активной зоны геотермальных месторождений. Поэтому сульфиды ртути, свинца, сурьмы и др. элементов, а также образующиеся здесь в изобилии сульфаты Ca, Fe, Al и Mg, крайне неустойчивы.

По-видимому, в связи с недостаточной изученностью механизмов переноса ртути, необходимо на настоящем этапе исследований допустить возможность существования в геотермальной среде, помимо преобладающей, как отмечают большинство исследователей, атомарной формы, хлоридных, сульфидных, гидросульфидных и др. комплексов ртути. Косвенным указанием на это служит прямая корреляция ртути с золотом, серебром, мышьяком и свинцом, образующих целый ряд простых и сложных комплексов (хлоридных, сульфидных, гидросульфидных, сульфатных, тиосульфатных и др.) в зоне восходящего высокотемпературного гидротермального флюида Океанского геотермального месторождения (Южные Курильские острова) [33]. На начальных этапах развития гидротермально-магматических систем аномально высокие концентрации ртути характерны для высокопроницаемых гидротермально измененных горных пород по всему вертикальному разрезу систем, что прямо указывает на поступление ртути из глубинного (магматического ?) источника. На последующих этапах эволюции гидротермально-магматических систем и геотермальных месторождений происходит отгонка ртути из недр, ее локализация и перераспределение вблизи и на дневной поверхности в аргиллизированных породах.

Продолжение исследований и проведение натуральных экспериментов на геотермальных полях и в кратерах действующих вулканов позволит получить новые данные об условиях переноса ртути и других химических элементов в областях четвертичного и древнего вулканизма. Исследование миграции ртути в условиях современных геотермальных процессов, помимо изучения механизмов формирования геохимических барьеров, может пролить свет на общие проблемы эволюции длительноживущих рудообразующих гидротермально-магматических систем.

Авторы глубоко признательны Н.И. Чебровой, Н.И. Свинуховой и В.П. Коростелевой за большой объем выполненных аналитических исследований; коллегам по комплексным научным исследованиям Г.П. Королевой, Н.С. Жатнуеву, А.Д. Коробову, С.В. Кореневой, Р.Г. Давлетбаеву и др. за непосредственное участие в экспедиционных работах на вулканах и геотермальных месторождениях; и всем специалистам, сделавшим ряд ценных замечаний при обсуждении основных положений рукописи статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 06-05-64689а) и Президиума ДВО РАН (проекты 06-III-A-08-332, 07-III-D-08-091 и 06-III-B-08-371).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М. и др. Антропогенная компонента и баланс ртути в эко-

- системе Братского водохранилища // Доклады Академии Наук. 2003. Т. 388. № 2. С. 225-227.
2. Астахов А.С., Валлманн К., Иванов М.В. и др. Распределение ртути и скорость ее накопления в верхнечетвертичных отложениях котловины Дерюги на Охотского моря // Геохимия. 2007. № 1. С. 54-70.
 3. Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А. Ртуть в современном гидротермальном процессе. М.: Наука, 1986. 199 с.
 4. Рычагов С.Н., Степанов И.И. Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: особенности поведения ртути в недрах // Вулканология и сейсмология, 1994. №2. С. 41-52.
 5. Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Под ред. Сергеева К.Ф., Красного М.Л. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 л.
 6. Rychagov S.N., Belousov V.I., Belousova S.P. Hierarchy System of Geothermal Structures, a New Outlook on Generation and Transport of Geothermal Energy in Modern Volcanism Areas // Geothermal Resources - Securing Our Energy Future, 2006. V. 30. Pp. 941-946.
 7. Frolova J.V., Ladygin V.M., Bashina J.S. and Rychagov S.N. Artificial Silica Deposits from Pauzhetskoe Geothermal Field: Petrophysical Properties and Possibility of Utilization (South Kamchatka, Far East, Russia) // Proceeding Conference on Mineral Extraction from Geothermal Brines. Tucson, Arizona, USA, 2006.
 8. Rychagov S.N., Boikova I.A., Kalacheva E.G. et al. Artificial Siliceous Sinter Deposits of the Pauzhetsky Geothermal System // Proceeding Conference on Mineral Extraction from Geothermal Brines. Tucson, Arizona, USA, 2006.
 9. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. Роль гидротермальных глин и образующегося в них пирита в современных рудно-геохимических процессах на геотермальных полях (Южная Камчатка) // Материалы Всероссийской конференции "Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды". Иркутск, 2007.
 10. Сугробов В.М., Кононов В.И., Постников А.И. Прогнозные ресурсы областей современного вулканизма Камчатки и Курильских островов: научные и прикладные аспекты // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Петропавл.-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 9-24.
 11. Рычагов С.Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг. Автореф. дисс. на соискание уч. степ. доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ. РАН, 2003. 50 с.
 12. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
 13. Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с.
 14. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
 15. Писарева М.В. Зона природного пара Нижне-Кошелевского геотермального месторождения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 52-63.
 16. Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и тер-

- мальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 85-114.
17. Манухин Ю.Ф., Ворожейкина Л.А. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия ее формирования // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 143-178.
 18. Леонова Л.Л. Геохимия четвертичных и современных вулканических пород Курильских островов и Камчатки // Геохимия. 1979. № 2. С. 179-197.
 19. Belousov V.I., Rychagov S.N., Belousova S.P. A Conceptual Model of Mutnovsky Geothermal Area (Kamchatka) // Geothermal Resources Council, 2002. Reno, Nevada, USA.
 20. Степанов И.И., Стахеев Ю.И., Сандомирский А.Я., Мясников И.Ф. Новые данные о формах нахождения ртути в горных породах и минералах // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 1007-1011.
 21. Королева Г.П., Ломоносов И.С., Стефанов Ю.М. Золото и другие рудные элементы в гидротермальной системе // Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. С. 253-280.
 22. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Степанов И.И. Пирит как индикатор структуры современной высокотемпературной гидротермальной системы и проблема источника рудного вещества // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4-5. С. 43-53.
 23. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с.
 24. Obolensky A.A., Gushchina L.V., Naumov E.A. Natural Hg-bearing hydrothermal systems and environment geohistorical estimation of the mercury contribution // RMZ-materials and geoenvironment periodical for mining, metallurgy and geology, 2004. V. 51. № 1. Pp. 173-176.
 25. Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
 26. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг). Тр. ГИН, вып. 379. М.: Наука, 1983. 216 с.
 27. Неверов Ю.Л. О находке киновари на вулкане Менделеева (о. Кунашир) // Труды Сах. КНИИ, 1963. Вып. 15.
 28. Озерова Н.А., Айдиньян Н.Х., Добровольская М.Г. и др. Современное ртутное рудообразование на вулкане Менделеева (Курильские острова) // Геология рудных месторождений. 1969. № 5.
 29. Знаменский В.С. Гидротермально измененные породы Мутновского (Камчатка) и Кипящего (о. Итуруп) геотермальных месторождений // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1991. № 5. С. 110-123.
 30. Айдиньян Н.Х., Озерова Н.А., Волкова А.В., Шикина Н.Д. К вопросу о летучести ртути и ее соединений // Геохимия. 1969. № 9. С. 251-260.
 31. Жеребцов Ю.Д. Термоформы нахождения ртути в литохимических ореолах золото-серебряных месторождений и их поисковое значение // Геохимия. 1991. № 1. С. 75-87.
 32. Лебедев Л.М., Шурманов Л.П., Никитина И.Б. Новые данные по минералогии колчеданной залежи на северо-восточном склоне вулкана Менделеева // Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, 1977. С. 104-122.
 33. Рычагов С.Н., Королева Г.П., Степанов И.И. Рудные элементы в зоне гипергенеза месторождения парогидротерм: распределение, формы миграции, источники // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 37—58.