

## РТУТЬ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

*М.В. Иванов*

*ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,  
г. Владивосток, 690041; e-mail: kirov-max@mail.ru, ivanov\_m@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 24 апреля 2013 г.

Изучено содержание и распределение ртути в донных осадках окраинных морей северо-восточной Азии. Максимальные содержания ее отмечаются в районах с активным геодинамическим режимом и на участках Амурского залива Японского моря подверженных антропогенному воздействию. Выявлены геохимические ассоциации ртути с другими химическими элементами. Установлены фоновые содержания Hg в поверхностных донных осадках исследуемых морей.

**Ключевые слова:** ртуть, тяжелые металлы, донные осадки, геохимия, геоэкология, Арктика, Охотское море, Японское море.

### ВВЕДЕНИЕ

Ртуть из-за широкого участия в геологических и антропогенных процессах, летучести, природной атомизации, чувствительности к геодинамике и других особенностей является важным элементом-индикатором при прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых и геологическом картировании. Она также важный репер для характеристики антропогенного загрязнения участков и территорий.

Районы Чукотского и прилегающей части Северного Ледовитого океана, Охотского, Японского морей (рис. 1) были выбраны для изучения, поскольку они различаются характером поступления и накопления ртути.

Чукотское море и прилегающая часть Северного Ледовитого океана отличаются от других рассматриваемых бассейнов тем, что находятся в большой удаленности от районов с развитой промышленностью. В пределах бассейнов рек, впадающих в Чукотское море, отсутствуют индустриальные промзоны. Котловина Дерюгина Охотского моря известна многочисленными эндогенными источниками [7], которые могут поставлять ртуть в морскую воду и осадки. Амурский залив Японского моря отличается от других районов исследований тем, что здесь существуют локальные антропогенные источники загрязнения: выбросы неочищенных сточных вод г. Владивостока, вынос терригенной взвеси водами рек, судоходная деятельность, загрязнения побережья в местах массового отдыха [1, 2, 9].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы пробы донных осадков, отобранные в экспедициях на НИС «Профессор Хромов» в 2004 г., ГИСУ «СЕВЕР» в 2006 г., МБ «Шуя» в 2006 г., НИС «Малахит» в 2004–2010 гг., а также из коллекции ТОИ ДВО РАН, полученные в рейсах НИС «Академик Несмеянов» в 1993 г., «Академик Лаврентьев» в 1996, 2002, 2009 и 2011 гг., ГС «Маршал Геловани» в 1999 г., НИС «Профессор Хромов» в 2002 г. Пробы отбирались дночерпателями, бокс-корером, малти-корером, гравитационными и гидростатическими трубками. Определено содержание ртути в 2200 пробах донных отложений. Использовался анализатор ртути Ра-915+ с пиролитическими приставками РП-91С, ПИРО-915. Нижний предел обнаружения – 0.5 нг/г. Погрешность анализа составляла 2–3 %. Стандартными образцами на ртуть служили ГСО 7183-95, СПДС-1,2,3. Внешний контроль ежегодно выполнялся в лаборатории фирмы-производителя (ООО Люмэкс, г. Санкт-Петербург). Для определения форм нахождения ртути в донных осадках использовалась комбинированная схема термического и атомно-абсорбционного анализов с экспериментально-аналитическим подходом [20]. На превращение форм ртути в природной среде влияют многие факторы, учесть которые адекватно, в рамках какой-то единой концепции, довольно трудно. Поэтому главным, хотя и не единственным путем исследования становится эмпирический, основанный на изучении форм ртути в конкретных объектах и обстановках. Наибо-

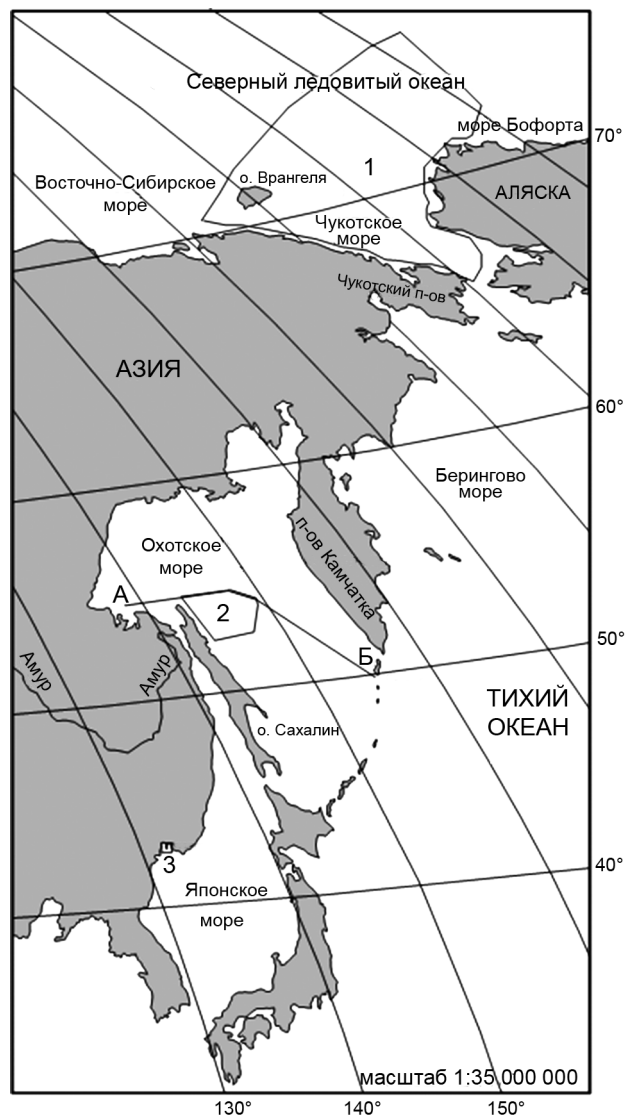


Рис. 1. Районы работ.

1 – Чукотское море и прилегающая часть Северного Ледовитого океана; 2 – котловина Дерюгина Охотского моря, 3 – Амурский залив Японского моря. Профиль А-Б (Шантарские острова – о. Парамушир).

лее подвижная форма (выход до 250 °С) – элементная ртуть и легкорастворимые органические соединения Hg. Определялись также физически сорбированная и хемосорбированная формы (выход при 250–350 °С), обладающие повышенной подвижностью, прочно связанные формы – сульфидная и изморфная Hg (выход – выше 350 °С). Определение Al, Ti, Fe, Mn, Ba и микроэлементов в осадках выполнялось методами атомной абсорбции на приборе «Hitachi Limited» (модель 180-5) с пламенным атомизатором, атомной эмиссией на спектрально-аналитическом комплексе PLASMAQUANT 110 в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Органический

углерод (часть образцов) и общую серу определяли хроматографически на анализаторе CARLO ERBA NA-1500 без предварительного разложения образца в университете Тонджи, Китай. Содержания карбоната кальция и аморфного кремнезема были определены по стандартным методикам для отдельных колонок. Возраст отложений (вскрытых колонками) принят по ранее опубликованным результатам датирования различными методами. Физико-механические свойства осадков определялись по стандартной методике. Определение вещественного состава проб проводилось путем изготовления и изучения микроскопических препаратов с полуколичественным определением основных осадкообразующих компонентов.

Гранулометрический анализ части проб ( $n = 98$ ) выполнялся с помощью сканирующего лазерного анализатора размерности частиц Analizette («Fritch», Германия). Типизация осадков основывалась на принципе трехкомпонентной классификации по соотношению фракций псаммита Ps (1–0.1 мм), алевроита А (0.1–0.01 мм) и пелита Pl (< 0.01 мм).

Статистические параметры распределения были определены с помощью программы GeoStat (табл. 1).

Типичный уровень содержания химического элемента, в данном случае Hg, считается среднефоновым содержанием – Сф. Его еще называют фоновым содержанием, т.е.  $C_f = C_m$ . При его оценке аномальные и ураганные содержания не принимались во внимание.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Чукотское море и прилегающая часть Северного Ледовитого океана.** В результате обработки данных было установлено, что содержание ртути изменяется с глубиной водной толщи (рис. 2). Район исследований характеризуется выборкой 199 проб поверхностных донных осадков (0–5 см), которые подразделяются на 3 группы: 1) до глубин 50 м ( $n = 116$ ); 2) в интервале 50–100 м ( $n = 59$ ) и 3) в интервале 100–4000 м ( $n = 24$ ). Содержания ртути для данного района варьируют от 6 до 102 нг/г, при среднем и медианном содержании 29 и 26 нг/г, соответственно. За фоновое содержание принято значение медианы для подвыборки проб ( $n = 96$ ). Фон равен 26 нг/г.

Основным фактором, определяющим изменчивость содержания ртути в донных осадках Чукотского моря и прилегающих районов, является наличие окисленных или восстановленных осадков. Превышение над фоном в 2–3 раза характерно для глубоководной части (глубина 100–4000 м) района (рис. 2), где распространены окисленные осадки. В пределах его отмечены максимумы содержаний, приуроченные

Таблица 1. Статистические параметры распределения ртути в донных осадках районов исследования.

Район	Кол-во проб	X	Сме	min	max	Аномально высокие концентрации	Ед. изм.
Чукотское море и прилегающая часть Северного Ледовитого океана	255	30	26	7	90	152	нг/г
Котловина Дерюгина Охотского моря	660	67	29	6	421	702	нг/г
Амурский залив Японского моря	375	60	13	5	198	1400	нг/г

Примечание. X, Сме, min, max – статистические параметры (среднее, медиана, минимальное и максимальное значения). При расчете аномально высокие концентрации не принимались во внимание.

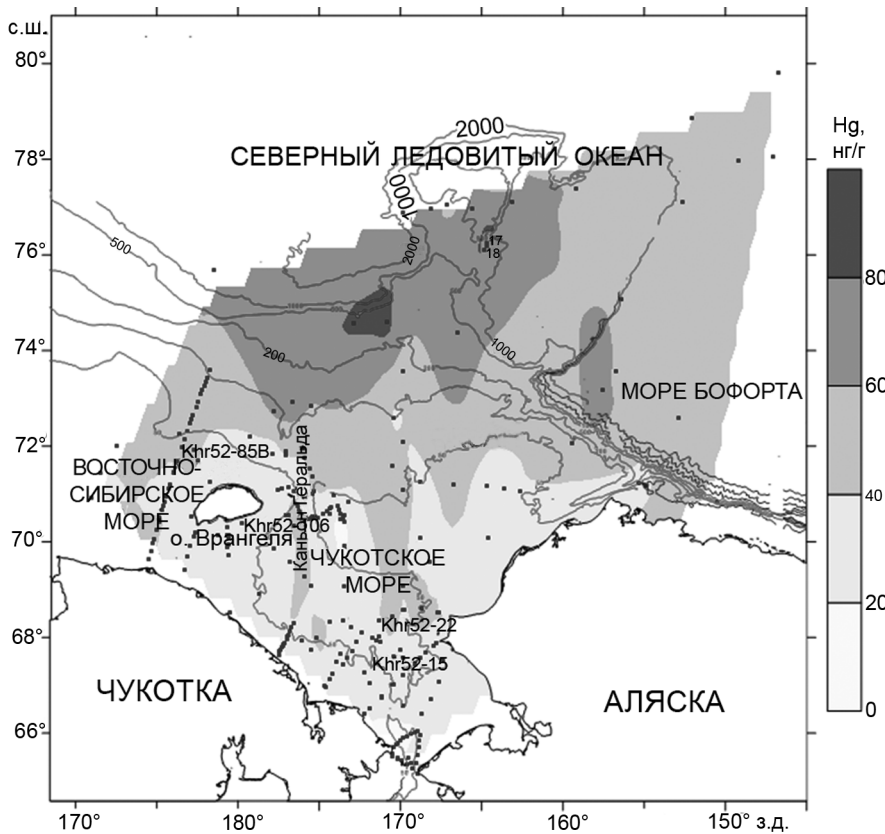


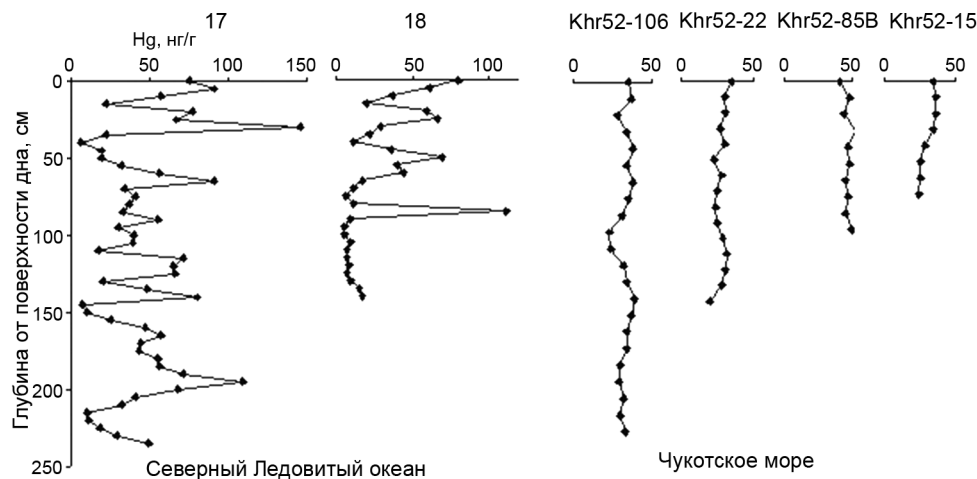
Рис. 2. Содержание ртути в поверхностных донных осадках Чукотского моря и прилегающей части Северного Ледовитого океана. Точками показаны станции отбора, изолиниями – рельеф дна (м).

к зоне покмарков на Чукотском плато в пределах кайнозойской рифтогенной структуры «рифт Норсвилл» с глубинами 570–680 м [21]. Установлено, что здесь могли иметь место в последние десятки тысяч лет назад разгрузки газосодержащих флюидов [5]. Большое поле осадков с содержанием ртути более 80 нг/г находится на материковом склоне в районе выхода на него с континентальной части неотектонических структур мезозойской грабен-рифтовой системы Чукотского моря [5, 13], а с океанической – кайнозойской рифтогенной структуры «рифт Чарли» [21].

В мелководной части (0–100 м) Чукотского моря, где распространены восстановленные осадки различного состава, содержания ртути значительно меньше, однако также прослеживается влияние отдельных структур грабен-рифтовой системы. Оно отражено в

появлении субмеридиональных полос с повышенными содержаниями Hg вдоль каньона Геральда. Одним из механизмов более интенсивного накопления ртути в осадках отрицательных неотектонических структур предполагается различие в гранулометрическом их составе. Другим механизмом, возможно, является дополнительное поступление эндогенных флюидов по активным разломным зонам.

Подобная картина распределения ртути в поверхностных донных осадках характерна для других районов Арктики с природными источниками ее поступления. В центральной части Северного Ледовитого океана, где распространены окисленные осадки, содержания ее составляют 80–100 нг/г, в поверхностных осадках прибрежной части моря Бофорта – 20–100 нг/г, прибрежной части Восточно-Сибирского и



**Рис. 3.** Содержание ртути (нг/г) по колонкам донных осадков Чукотского моря и прилегающей части Северного Ледовитого океана.

моря Лаптевых – 20–40 нг/г, в районе устьев крупных рек – около 60–80 нг/г [23].

При анализе распределения ртути в колонках донных осадков можно отметить, что в глубоководной части оно характеризуется весьма большой изменчивостью по вертикали, что связано с чередованием в разрезе окисленных и восстановленных осадков, накапливавшихся, соответственно, в периоды потепления и похолодания [5]. Содержания ртути в колонках (17, 18), отобранных в районе покмарков, составляют от 10 до 146 нг/г (рис. 3). Во вскрытых отложениях в районе покмарков повышенные содержания углеводородных газов или признаки их недавней миграции к поверхности дна обнаружены не были [13]. Здесь в колонках выявлено наличие прослоев кальцита, что типично для районов холодных газовых выходов [9]. В колонках донных осадков (Khr52-22, Khr52-15) с шельфа южной части Чукотского моря (рис. 3) содержания ртути значительно меньше – около 35 нг/г.

По результатам термического анализа установлено, что ртуть в поверхностных донных осадках Чукотского моря находится в сульфидной форме (рис. 4). Другие формы нами не были выявлены [10].

Корреляционный и R-факторный анализ массива данных (60 проб) установил, что Hg имеет хорошие ( $0.7 < r \leq 0.9$ ) корреляционные связи с Mn, Cu, Ni, V и Zn. Диаграмма в пространстве первого и второго R-факторов иллюстрирует обособление отдельных элементов (Si, Ca, Sr) и 4 полиэлементных ассоциаций (рис. 5). Каждая из них определяется наличием специфических особенностей минерального состава, характерных для большинства проб в выборке и приводящих к появлению выявленных статистических закономерностей. В свою очередь, эти особенности возникают под действием определенных седиментологических процессов. В этом районе преобладает

терригенное осадконакопление. Помимо этого, установлены районы и участки с аномальными условиями осадконакопления, где заметная часть осадков представлена хемогенным материалом, накопившимся из морских или иловых вод. Предполагается, что эти специфические гидрохимические условия в большинстве случаев возникли либо при прямом поступлении эндогенных флюидов, либо при интенсификации раннедиагенетических процессов в осадках в результате их воздействия [5].

Ртуть входит в ассоциацию II и тесно связана с Mn, Cu и Ni. Вхождение ртути в полиэлементные ассоциации с Mn и микроэлементами, возможно, свидетельствует о ее эндогенной поставке. Признаки гидротермальной деятельности имеются в пределах так называемой грабен-рифтовой системы Чукотского моря. Остальные микроэлементы, хотя образуют повышенные содержания в осадках, обогащенных марганцем, но, в такой же степени, коррелируют с микроэлементами, входящими в ассоциацию I. Элементы ассоциации II накапливаются в тонкозернистых осадках, но находятся в большей мере в их аутигенных компонентах, чем в терригенных.

Результаты исследований показали, что основным фактором, определяющим изменчивость содержания ртути в поверхностных донных осадках и колонках района, является наличие окисленных или восстановленных осадков.

Антропогенное загрязнение осадков ртутью нами не отмечено, но нельзя исключать, что какая-то часть Hg, поступающая с тихоокеанскими водами и взвесью через Берингов пролив и накапливающаяся в южной части Чукотского моря, может иметь антропогенное происхождение.

**Котловина Дерюгина Охотского моря** характеризуется выборкой из 51 пробы поверхностных

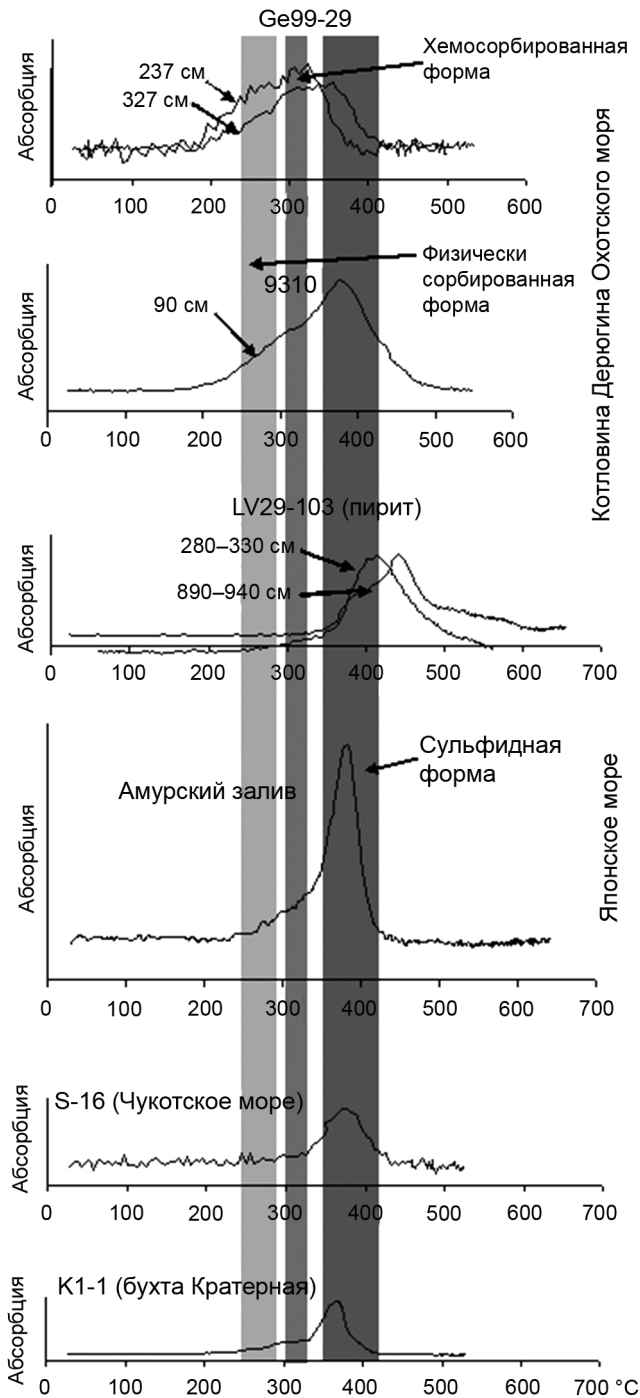


Рис. 4. Термограммы выхода ртути из донных осадков Чукотского, Охотского и Японского морей.

донных осадков, которые подразделяются на 3 группы: 1) пробы до глубин 250 м (n = 12); 2) в интервале 250–1450 м (n = 22) и 3) в интервале 1450–1750 м (n = 17). Содержания Hg в целом для данного полигона варьируют от 6 до 421 нг/г, при среднем и медианном содержании, соответственно, 48 и 29 нг/г. Фон равен 29 нг/г (рис. 6).

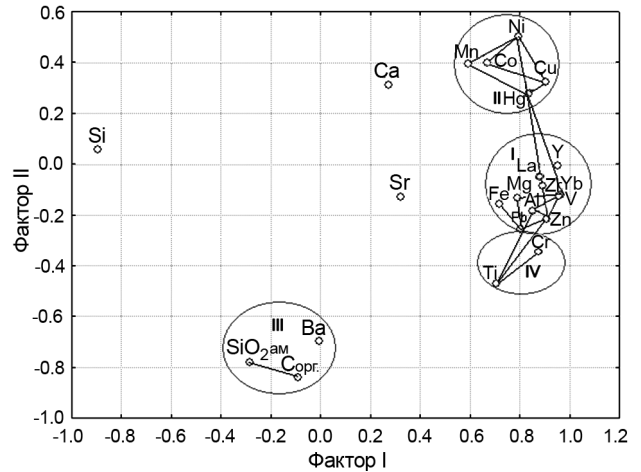


Рис. 5. Диаграмма факторных нагрузок (метод главных компонент, вращение вэримакс) и значимые положительные корреляционные связи химических элементов донных осадков Чукотского моря и прилегающей части Северного Ледовитого океана.

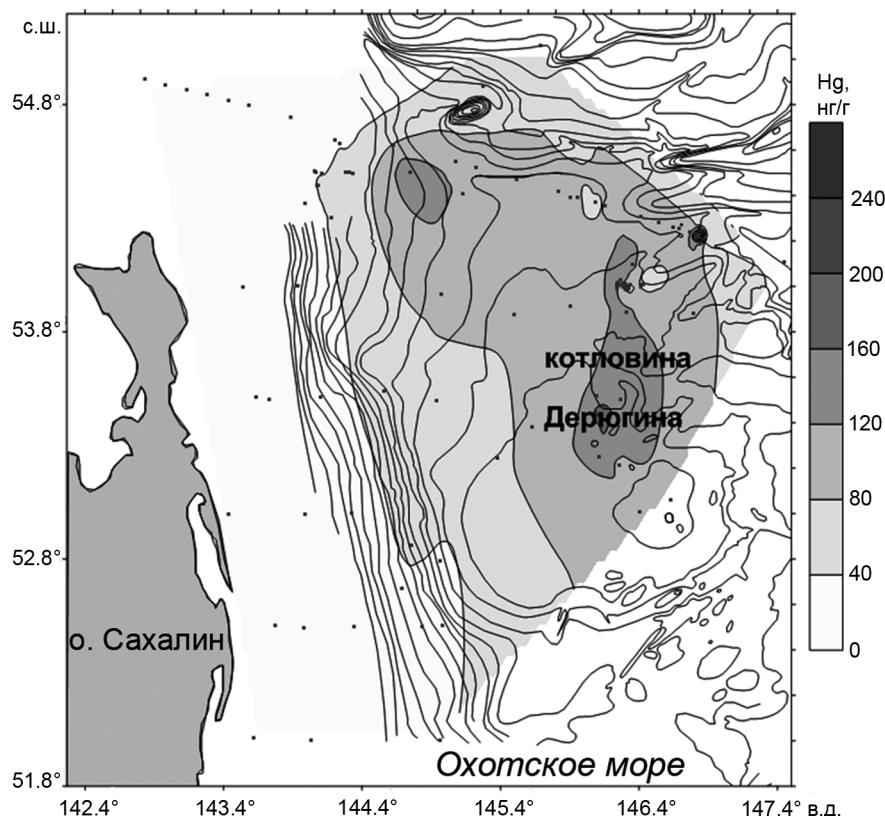
Линиями показаны очень сильные корреляционные связи.

Низкие содержания зафиксированы для глубин до 250 м и составляют около 12 нг/г. При увеличении глубины содержания ртути резко увеличиваются до 75 нг/г. В котловине Дерюгина (глубина 1450–1750 м) они достигают 150 нг/г. Повышенные содержания для этого района составляют 421 нг/г. Максимальные содержания (702 нг/г) установлены в районе эндогенных источников (Баритовые горы) [4].

Содержания ртути в поверхностных донных осадках по профилю А-Б (Шантарские острова – о. Парамушир) находятся в интервале 8–100 нг/г, при среднем содержании 29 нг/г (n = 60). Это намного меньше, чем в районе котловины Дерюгина, что свидетельствует о влиянии эндогенных источников на содержание ртути.

При анализе распределения ртути по колонкам было выделено несколько типов распределения [4]. В некоторых колонках донных осадков котловины Дерюгина содержания по вертикали находятся в районе фоновых. Такие колонки характерны для восточного склона шельфа о. Сахалин и банки Кашеварова. В остальных колонках котловины Дерюгина содержания намного выше и сильно варьируют (25–650 нг/г).

В верхней части материкового склона о. Сахалин большинство колонок, сложенных диатомовыми илами, имеют очень низкие и равномерные содержания Hg по всему разрезу (рис. 7). При этом изменения в вещественном составе осадков, наличие газогидратов (рис. 7), карбонатной минерализации и слоев диагенетических изменений не сказываются



**Рис. 6.** Содержание ртути в поверхностных донных осадках котловины Дерюгина и прилегающей части Охотского моря.

Точками показаны станции отбора, изолиниями – рельеф дна (м).

ся существенно на содержании ртути. Скорей всего, это связано с тем, что в этом районе отсутствуют крупные разломы и гидротермальные источники, как в центральной части котловины Дерюгина. Средние содержания Hg равны 15–25 нг/г и близки отмеченным [14] в качестве фоновых (11 нг/г) для осадков Охотского моря. Исключение составляет колонка Ge99-29, в нижней части которой выявлены резко изменчивые и аномальные содержания этого элемента. Максимальные концентрации ртути характерны для осадков, залегающих под слоем газогидратов, хотя высокое количество отмечено также в некоторых горизонтах выше. Можно предполагать, что основное влияние на формирование аномальных содержаний ртути оказывает глубинный источник газов. В целом, вся колонка отличается более высокими содержаниями ртути, по сравнению с другими колонками, отобранными в этом районе [4].

В центральной части котловины почти повсеместно выявлено значительное увеличение содержаний в голоценовых отложениях и особенно в их верхнем горизонте, сложенном диатомовыми илами с возрастом до 6–8 тыс. лет. Среднее содержание ртути в этом горизонте изменяется весьма значительно. В нижележащих верхнеплейстоценовых отложениях содержания ртути значительно ниже и отличаются относительно малой изменчивостью при средних

ее содержаниях 35–40 нг/г. В некоторых колонках в верхнеплейстоценовых отложениях отмечаются существенные вариации содержаний ртути, обусловленные, вероятно, различиями в вещественном составе (рис. 7).

Повышенные и аномальные содержания ртути в позднеплейстоценовых отложениях характерны только для колонок Ge99-36 и 9310 из района Баритовых гор. В некоторых районах Баритовых гор голоценовые осадки отсутствуют [7], а позднеплейстоценовые отличаются наличием аутигенной баритовой и карбонатной минерализациями, причем в колонке 9310 она проявлена более интенсивно [9].

В основном в донных осадках котловины Дерюгина ртуть присутствует в сульфидной форме (исключение составляет колонка Ge99-29, где можно предполагать 3 формы нахождения ртути). В пробах с высоким содержанием ртути из котловины Дерюгина (рис. 4) термограмма выхода ртути для разных горизонтов колонки донных осадков сильно варьирует. Это связано с неоднородностью донных осадков, что обусловлено геологическими процессами, происходящими на дне котловины [4]. Колонка 9310 характеризуется присутствием форм физически сорбированной и хемосорбированной ртути (рис. 4).

Данные коореляционного и R-факторного анализа (94 пробы) показывают обособление отдель-



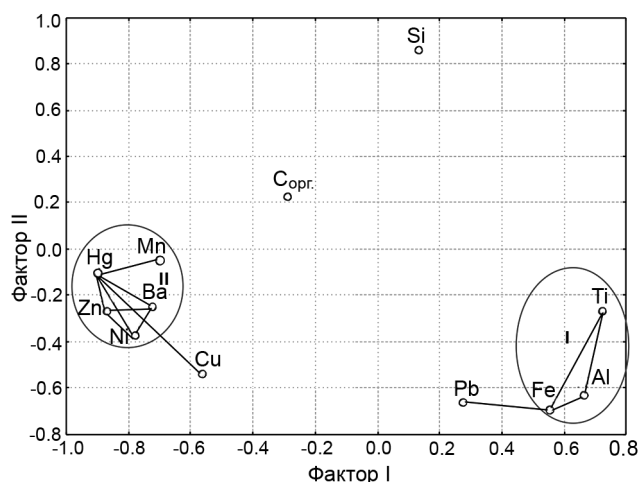
ных элементов (Si, C<sub>орг.</sub>) и 2 полиэлементные ассоциации (рис. 8). Основу ассоциации составляет марганец, имеющий положительные корреляционные связи не только с ртутью, но и с другими микроэлементами (Ba, Zn, Ni). Скорей всего, это связано с наличием эпизодических действующих низкотемпературных гидротермальных источников в центральной части котловины Дерюгина, в которой сформированы массивные баритовые постройки, гидротермальные железомарганцевые корки [6].

Проведенные исследования позволили выявить приуроченность повышенных и аномальных содержаний Hg в голоценовых осадках котловины Дерюгина и прилегающих районов Охотского моря к активной рифтогенной структуре и отдельным флюидным источникам в ее пределах.

**Амурский залив Японского моря.** Он характеризуется выборкой в 103 пробы из поверхностных донных осадков, которые подразделены на 4 группы: 1) пробы до глубин 20 м (n = 57); 2) в интервале 20–50 м (n = 62); 3) пробы с глубин более 50 м (n = 14) и 4) пробы прибрежной части в зоне прямого влияния г. Владивостока (n=17). Содержания Hg в целом для этого района варьируют от 6 до 145 нг/г (без аномальных содержаний), при среднем и медианном содержаниях 48 и 13 нг/г, соответственно. За фоновые содержания приняты значения медианы для совокупности проб, которые находятся на глубинах более 50 м. Фон равен 13 нг/г (рис. 9). Максимальные ее содержания получены для осадков в районах выхода неочищенных сточных вод г. Владивостока (р. Вторая речка, р. Первая речка). Содержания Hg в этих местах превышают фоновые в 10–20 раз. Максимальные содержания данного металла нами установлены в радиусе 300–500 м от места сброса сточных вод р. Вторая речка. Сравнение содержаний ртути в донных осадках, опробованных в 1987 г. [15], и проб, отобранных в 2004 г., показало, что содержания ртути в пробах 2004 г. в 1.5 раза ниже, чем в пробах 1987 г. Это связано с уменьшением интенсивности хозяйственной деятельности после 1988 г. В период 1988–2000 гг. сброс сточных вод за счет перепрофилирования и сокращения общего числа предприятий-загрязнителей снизился в 6 раз [17].

Минимальные содержания ртути выявлены для осадков, которые расположены южнее о. Попова и бухты Перевозной. В этих районах нет крупных населенных пунктов и промышленности.

Содержание ртути зависит от гранулометрического состава осадков (табл. 2). Как и для других районов исследований, повышенные содержания ртути характерны для пелитовой фракции. Имеются данные о поставке ртути в Амурский залив водами р. Раздоль-



**Рис. 8.** Диаграмма факторных нагрузок (метод главных компонент, вращение вэримакс) и значимые положительные корреляционные связи химических элементов донных осадков котловины Дерюгина Охотского моря.

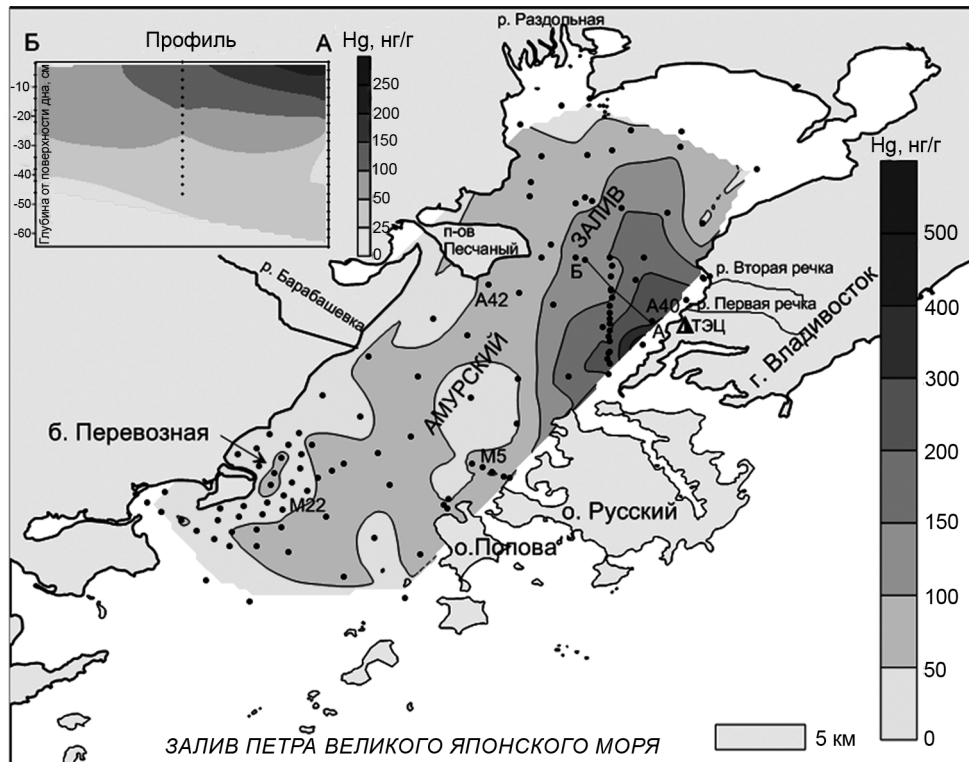
Линиями показаны очень сильные корреляционные связи.

ной, но в ее распределении в поверхностных осадках это выражено слабо. Предположительно здесь сказывается наличие твердого стока реки, в результате чего загрязнение осадков выявляется только при изучении их конкретных фракций [2, 16].

В центральной части Амурского залива, где преобладают пески мелкозернистые [19], выделяется район с низким содержанием ртути. На этом фоне обычное для морских отложений обогащение ртутью тонкозернистых осадков по сравнению с песчаными и алевритовыми проявляется локально на участках со слабым антропогенным накоплением – например, на юге Амурского залива, где в осевой части залегают пелитовые осадки с содержанием ртути 50–100 нг/г, а вдоль западного берега – пески с содержанием 20–40 нг/г [2].

Анализ распределения ртути по колонкам донных осадков (рис. 10) выявил весьма сильные вариации ее концентраций как результат антропогенного поступления и высокой скорости осадконакопления. Содержания Hg в колонках донных осадков колеблются от 10 до 550 нг/г. В колонках донных осадков в Амурском заливе выделилось два слоя. Верхний слой, отражающий «техногенный» период накопления осадков, и нижний, сложенный незагрязненными (10–50 нг/г) осадками. В зависимости от скорости и длительности седиментации мощность верхнего (загрязненного) слоя может достигать до 30 см (станции возле г. Владивостока). При сопоставлении верхних и нижних слоев колонок выявилось, что поверхностные осадки практически всей акватории Амурского





**Рис. 9.** Содержание ртути в поверхностных донных осадках Амурского залива Японского моря. На врезке показаны содержания ртути по глубине колонок по профилю А-Б.

залива в той или иной степени загрязнены ртутью. В колонках, отобранных в районах бухты Перевозной и п-ова Песчаный, содержания уже намного меньше и составляют около 20–40 нг/г.

Колонки, отобранные в районе Первой и Второй речек, показательны максимальными содержаниями ртути (около 300 нг/г). В них на глубину до 20 см содержания ртути составляют от 100 до 150 нг/г. Можно говорить о том, что донные осадки здесь испытали существенное антропогенное влияние за последние 100 лет. Также в этих районах поступает около 60 % неочищенных сточных вод г. Владивостока [18]. Здесь содержания выше фона в 10–20 раз.

На интервале 20–30 см содержание ртути в толще осадков составляет 50 нг/г. Это уже намного меньше, но все же они считаются загрязненными. Средние содержания по колонкам (А40, М5), подверженным антропогенному поступлению, составляют около 75 нг/г (рис. 9).

Профиль А-Б в Амурском заливе (рис. 9) свидетельствует, что загрязненный слой осадков прослеживается поперек всей верхней части залива. Содержания ртути в нем уменьшаются при удалении от г. Владивостока в глубь залива. Мощность этого слоя составляет около 15–30 см по всему разрезу, что примерно соответствует средней скорости осадконако-

**Таблица 2.** Содержания ртути в поверхностных донных осадках и тип осадка районов исследования.

	Чукотское море и прилегающая часть Северного Ледовитого океана				
	Пелит	Пелит алевритовый	Алеврит пелитовый	Алеврит псаммитовый	Псаммит пелитовый
Кол-во проб	27	19	7	1	2
Hg, нг/г	63	39	37	21	18
	Амурский залив Японского моря				
	Пелит	Пелит алевритовый	Алеврит пелитовый	Алеврит псаммитовый	Псаммит пелитовый
Кол-во проб	6	6	3	1	-
Hg, нг/г	138	92	71	23	-

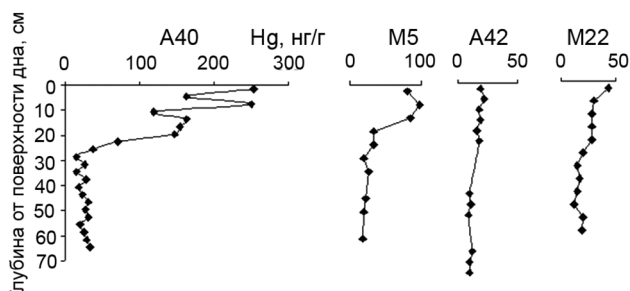


Рис. 10. Содержание ртути (нг/г) в колонках Амурского залива Японского моря.

пления 3–6 мм/год, согласно рассчитанным скоростям по  $^{210}\text{Pb}$  [3].

На рис. 4 представлены примеры записи данных термо-абсорбционного анализа одной из проб донных осадков Амурского залива. По температуре выхода ртути 370–410 °С можно определить, что основная масса находится в сульфидной форме. Подобные термограммы получены и для других проб проанализированных донных отложений исследуемой территории. Преобладание сульфидной ртути характерно для морских отложений в целом, хотя в других районах присутствуют и иные формы, что обусловлено специфическими геолого-геохимическими процессами. В то же время это и наиболее устойчивая ее форма, тем самым, находясь в донных осадках Амурского залива, ртуть не оказывает существенного влияния на экосистему.

R-факторным анализом массива данных (36 проб) элементы разделились на две группы (рис. 11). Уровни концентраций металлов из первой группы, имеющие тесную связь с Fe и Al, формируются под влиянием речного стока и, как правило, тесно связаны с фракционным составом осадков. Содержание элементов второй группы в меньшей мере связано с фракционным составом осадков и отражает преимущественное поступление этих элементов с хозяйственно-бытовыми и промышленными стоками г. Владивостока. Таким образом, первый фактор объясняет терригенное происхождение элементов Al, Co, Fe, Mn, Ni, которые являются типичными компонентами в составе морских осадков. Второй фактор, включающий Hg, Zn, Cu и Pb, отражает антропогенное воздействие на акваторию залива, так как в эту группу входит Pb, известный трассер техногенного загрязнения окружающей среды [12].

Корреляционная матрица донных осадков Амурского залива Японского моря показывает, что хорошо устойчивые связи ртуть имеет с такими тяжелыми металлами, как Cu и Pb. Здесь можно говорить о том, что такая корреляция указывает на антропогенный ха-

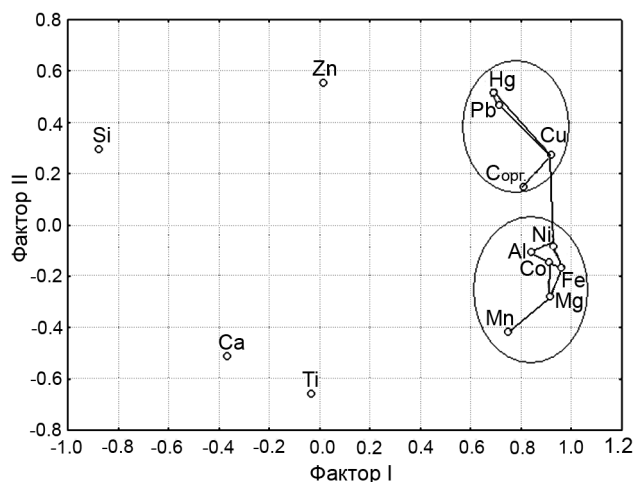


Рис. 11. Диаграмма факторных нагрузок (метод главных компонент, вращение взримакс) и значимые положительные корреляционные связи химических элементов донных осадков Амурского залива Японского моря.

Линиями показаны очень сильные корреляционные связи.

актер загрязнения донных осадков Амурского залива [15]. Скорей всего, это связано с наличием крупной ТЭЦ г. Владивостока в районе Первой речки, которая использует уголь с содержанием ртути около 700 нг/г, мазут и другие нефтепродукты с 1960 г. После сжигания Hg попадает в атмосферу, далее – в морскую воду и донные осадки Амурского залива. Во Владивостоке преобладают ветра северо-западного направления. Разнос ртути и других тяжелых металлов от ТЭЦ составляет около 5–7 км [8]. Большую роль в поставке ртути в залив играют сточные воды г. Владивостока. В районах сброса (ст. Чайка, р. Вторая речка, р. Первая речка) содержания ртути в морской воде определялись различными авторами и составляют 21 нг/л (ст. Чайка, Вторая речка) [1], а также 20 нг/л (в водотоках) [22], при среднем ее содержании в водах залива около 2 нг/л.

На накопление ртути в донных осадках Амурского залива оказывают влияние два основных фактора: степень антропогенной нагрузки и вещественный, прежде всего, гранулометрический состав отложений. Этот район характеризуется главным образом антропогенной составляющей, связанной с поступлением ртути с неочищенными водами г. Владивостока. Природные составляющие связаны с выносами р. Барабашевка, которая впадает в Амурский залив и в долине которой известны многочисленные сурьмяно-ртутные рудопроявления.

## ВЫВОДЫ

Содержания ртути в донных осадках Чукотского моря и прилегающей части Северного Ледовитого

океана варьируют от 12 до 102 нг/г. Максимальные содержания для этого района приурочены к глубоководным районам Северного Ледовитого океана, минимальные характерны для Берингова пролива.

Концентрации Hg в донных осадках котловины Дерюгина Охотского моря находятся в интервале 15–600 нг/г. Минимальные содержания характерны для восточного шельфа о. Сахалин, максимальные характерны для района Баритовых гор и факела Обжирова. Распределение ртути по колонкам донных осадков неравномерно для этих районов. В районе склона о. Сахалин содержания ртути не превышают фоновые (около 50 нг/г).

Максимальные содержания ртути в донных осадках Амурского залива определяются антропогенным характером поступления от г. Владивостока. Распределение содержания ртути в донных осадках неравномерно и изменяется в диапазоне 15 до 550 нг/г. Повышенные содержания характерны для акватории, прилегающей к г. Владивостоку. Относительно низкие содержания получены для южной части Амурского залива.

Hg в донных осадках морей присутствует в сульфидной форме. Только в колонке донных осадков станции Ge99-29 (котловина Дерюгина) ртуть находится не только в сульфидной, но и в физически сорбированной и хемосорбированной формах.

Ртуть в донных осадках коррелирует с другими химическими элементами. В Амурском заливе хорошие корреляционные связи Hg установлены с такими тяжелыми металлами, как Cu, Pb. В Чукотском море и прилегающей части Северного Ледовитого океана ртуть коррелирует с Cu, Ni, V, Mn. В котловине Дерюгина Hg коррелирует с Mn, Zn, Ni, Cu, Ba.

Значительный вклад в загрязнение ртутью донных осадков Амурского залива вносят неочищенные сточные воды г. Владивостока.

Влияние вещественного состава донных осадков на содержание ртути выражается в приуроченности минимальных содержаний к песчаным осадкам. По мере увеличения содержаний в донных осадках глинистого материала концентрации ртути возрастают. Илы по сравнению с песчаными осадками содержат в 2–6 раза больше ртути.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан», ДВО РАН и РФФИ (грант 14-05-00723-А).

Автор благодарит К.И. Аксентова, Е.А. Гусева, О.В. Дударева, Ван Рудзяна, А.Н. Колесника, А.Г. Мочалова и Р.Б. Шакирова за предоставление дополнительных проб донных осадков для изучения. Автор выражает искреннюю благодарность и признатель-

ность А.С. Астахову за ценные советы, конструктивные замечания и пожелания при обсуждении рукописи. Автор выражает глубокую признательность рецензенту за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению данной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксентов К.И. Ртуть в абиотических компонентах экосистемы залива Петра Великого // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 173–184.
2. Аксентов К.И., Астахов А.С. Антропогенное загрязнение ртути донных осадков залива Петра Великого // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 115–121.
3. Аникиев В.В., Дударев О.В., Касаткина А.П., Колесов Г.М. Влияние терригенных и биогенных факторов на формирование седиментационных потоков химических элементов в прибрежной зоне Японского моря // Геохимия. 1996. № 1. С. 59–72.
4. Астахов А.С., Валлман К., Иванов М.В. и др. Распределение ртути и скорость ее накопления в верхнечетвертичных отложениях котловины Дерюгина Охотского моря // Геохимия. 2007. Т. 45, № 1. С. 54–70.
5. Астахов А.С., Босин А.А., Колесник А.Н. и др. Геологические исследования в Чукотском море и примыкающих районах Северного Ледовитого океана в экспедиции RUSALCA-2009 // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 6. С. 110–116.
6. Астахова Н.В., Липкина М.И., Мельниченко Ю.И. Гидротермальная баритовая минерализация во впадине Дерюгина Охотского моря // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 1. С. 212–215.
7. Астахова Н.В. Аутигенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2007. 244 с.
8. Бураго А.И., Шлыков С.А. Карта оценки экологического состояния Владивостока. Владивосток: Примор. центр геодезии и картографии, 1995. 153 с.
9. Деркачев А.Н., Обжиров А.И., Борман Г. и др. Аутигенное минералообразование на участках проявления холодных газово-флюидных эманаций на дне Охотского моря // Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 7–60.
10. Иванов М.В., Астахов А.С., Крэйн К. Ртуть в донных осадках Чукотского моря // Морские исследования ДВО РАН в Арктике. Владивосток: Дальнаука, 2006. (Тр. Аркт. регион. центра. Т. 4). С. 132–137.
11. Иванов М.В., Аксентов К.И., Астахов А.С. Распределение ртути в донных осадках дальневосточных морей // Дальневосточные моря России. Кн. 3. М.: Наука, 2007. С. 461–481.
12. Ковкековдова Л.Т., Симоконов М.В. Ртуть в донных отложениях и промысловых гидробионтах залива Петра Великого (Японское море) // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Материалы Междунар. симпоз. (Москва, 7–9 сент. 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 227–230.
13. Логвинова Е.А., Матвеев Т.В., Крылов А.А. и др. Литолого-геохимические особенности отложений покмарков Чукотского плато // Геология морей и океанов: Материалы XIX

- междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: Изд-во ИО РАН, 2011. С. 88–92.
14. Лучшева Л.Н. Природные аномалии ртути в дальневосточных морях России и их экологическое значение: Автореф. дис. .... канд. биол. наук. Владивосток: ИБМ ДВО РАН, 2004. 77 с.
  15. Поляков Д.М., Варцавс М., Козлова С.И. и др. Содержание ртути в компонентах экосистемы залива Петра Великого // Водные ресурсы. 1991. № 5. С. 101–108.
  16. Поляков Д.М., Аксентов К.И., Иванов М.В. Ртуть в донных отложениях маргинального фильтра р. Раздольная (Амурский залив) // Геохимия. 2008. № 6. С. 666–673.
  17. Нигматулина Л.В., Огородникова А.А., Щеглов В.В. Влияние стока прибрежных территорий на степень загрязнения вод Амурского залива (Японское море): Междунар. науч. конф. «Человек в прибрежной зоне: опыт веков». Владивосток: ТИНРО-Центр, 2002. С. 73–77.
  18. Огородникова А.А., Вейдеман Е.Л., Силина Э.И., Нигматулина Л.В. Воздействие береговых источников загрязнения на биоресурсы залива Петра Великого (Японское море) // Экология нектона и планктона дальневосточных морей и динамика климато-океанологических условий. Владивосток: Изв. ТИНРО, 1997. Т. 122. С. 430–450.
  19. Сясько А.А., Кутуб -Заде Т.К., Короткий А.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000. Сер. Ханскайская. 2-е изд. Листы К-52-ХП / Ред. С.В. Коваленко. Владивосток: Главное управление природ. ресурсов и охраны окружающей среды по Приморскому краю.
  20. Таусон В.Л., Гелетий В.Ф., Меньшиков В.И. Уровни содержания, характер распределения и формы нахождения ртути как индикаторы источников ртутного загрязнения природной среды // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 1–2. С. 161–173. ФГУГП, 2002.
  21. Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И. Тектоника и нефтегазоносность Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 443–460.
  22. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
  23. Экологический атлас Арктики. 2000. <http://www.arctic.noaa.gov/aro/atlas/>

*Рекомендована к печати О.В. Чудаевым*

*M.V. Ivanov*

### **Mercury in the bottom sediments of the North Asia marginal seas**

The content and distribution of mercury in the bottom sediments of the Northeast Asia marginal seas was studied. Maximum mercury contents are found in the areas with active geodynamic conditions and anthropogenic areas of the Amur Bay, the Sea of Japan. Geochemical association of mercury and other chemical elements were identified. Hg background contents have been determined in the superficial bottom sediments of the studied seas.

**Key words:** mercury, heavy metals, bottom sediments, geochemistry, geocology, Arctic, Okhotsk Sea, Sea of Japan.