

## АТМОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ РТУТИ НАД АКТИВНЫМИ ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

**В.В. Калинин, А.С. Астахов**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

Осенью 2010 г. в северной части Японского моря в районе возвышенностей Витязя и Алпатова были зафиксированы контрастные ореолы рассеяния атомарной ртути. Основываясь на методе исключения, выдвинуто предположение, что причина их возникновения — поступление ртути через толщу морской воды в составе пузырьков газа или в результате диффузии и турбулентного перемешивания от гидротермальных или водно-газовых источников на морском дне. Сделан вывод о возможности использования газортутных измерений при геологическом изучении морских акваторий.

*Рифтогенная структура, атмосфера, ртуть, Японское море.*

## ATMOCHEMICAL MERCURY DISPERSION AUREOLES OVER ACTIVE GEOLOGIC STRUCTURES OF THE NORTHERN SEA OF JAPAN

**V.V. Kalinchuk and A.S. Astakhov**

In the autumn of 2010, contrasting dispersion aureoles of atomic mercury were revealed in the northern Sea of Japan, in the vicinity of the Vityaz' and Alpatov Rises. Based on the elimination method, the assumption is made that the aureoles resulted from the supply of mercury from hydrothermal or water-gas bottom sources through the sea water column, either in gas bubbles or as a result of diffusion and turbulent mixing. It is inferred that gas-mercury measurements can be used in geological research in sea water areas.

*Rift structure, atmosphere, mercury, Sea of Japan*

### ВВЕДЕНИЕ

Существующая на сегодняшний день концепция о ртутной дегазации Земли [Озерова, 2010], согласующаяся с гипотезой плюмов [Кирдяшкин и др., 2005; Добрецов и др., 2005, 2010] и теорией об эндогенных флюидах Земли [Летников, 2006; Шарапов и др., 2006], предполагает, что ртуть в силу своих специфических физико-химических свойств из нижней мантии (внешнего ядра?) в составе флюидов перемещается сквозь мантийное вещество наверх к земной коре. Далее по зонам глубинных разломов в периоды активизации флюиды мигрируют к поверхности Земли, где ими, либо при их участии, в результате различных геологических процессов формируются различные ртутьсодержащие залежи на континенте и в океане (рудные, газовые, газонефтяные), а также ртутные аномалии в осадочных и вулканогенно-осадочных отложениях подвижных поясов Земли. На некоторых месторождениях природного газа, локализованных в узлах пересечения глубинных разломов и приуроченных к ртутным поясам, запасы ртути составляют первые тысячи тонн [Озерова, 2007]. С этих позиций ртуть можно рассматривать как элемент-индикатор глубинной дефлюидизации не только мантии, но также земной коры и осадочного чехла. В литосфере ртуть мигрирует в основном в газообразной атомарной форме, что позволяет ей формировать гидрохимические и атмохимические ореолы рассеяния в атмосфере и водных бассейнах.

Используя эту особенность ртути, а также ее специфические физико-химические свойства, для наземных условий разработаны атмохимические методы поиска и оконтуривания различных месторождений и картирования зон глубинных разломов по контрастным ореолам рассеяния атомарной ртути ( $\text{Hg}^0$ ) [Машьянов, 1985; Фурсов, 2006; Озерова, 2010]. На море число подобных исследований невелико, но их результаты однозначно указывают на то, что ртуть может поступать в атмосферу от активных геологических объектов, расположенных на дне, таких как глубинные разломы [Ганеев и др., 1984] и подводные вулканы [Астахов и др., 2011]. Возможные проникновения ртути сквозь водную толщу в атмосферу определяются поступлением ее в составе пузырьков газа или термальных и распресненных вод газовых и гидротермальных источников, формирующихся над дегазирующими углеводородными залежами, гидротермальными источниками, активными подводными вулканами. Важным фактором, влияющим на возможность образования атмохимических ореолов рассеяния ртути над активными подводными геологическими объектами, является отсутствие или слабая стратификация водных масс и низкая биопродуктивность поверхностных вод.

### Рис. 1. Местоположение района работ в северной части Японского моря.

Цифрами на карте обозначены: 1 — возвышенность Витязя, 2 — возвышенность Алпатова. 1 — граница Охотоморской и Амурской литосферных плит; 2 — зона максимальной сейсмической активности в районе формирующейся зоны субдукции, по [Родников и др., 2010]; 3 — участки дна и прилегающей суши с величиной теплового потока более 100 мВт/м<sup>2</sup>, по [Веселов, Липина, 1982]; 4 — схематичное изображение горизонтальной циркуляции поверхностных вод [Яричин, 1980]; 5 — изобаты (м).

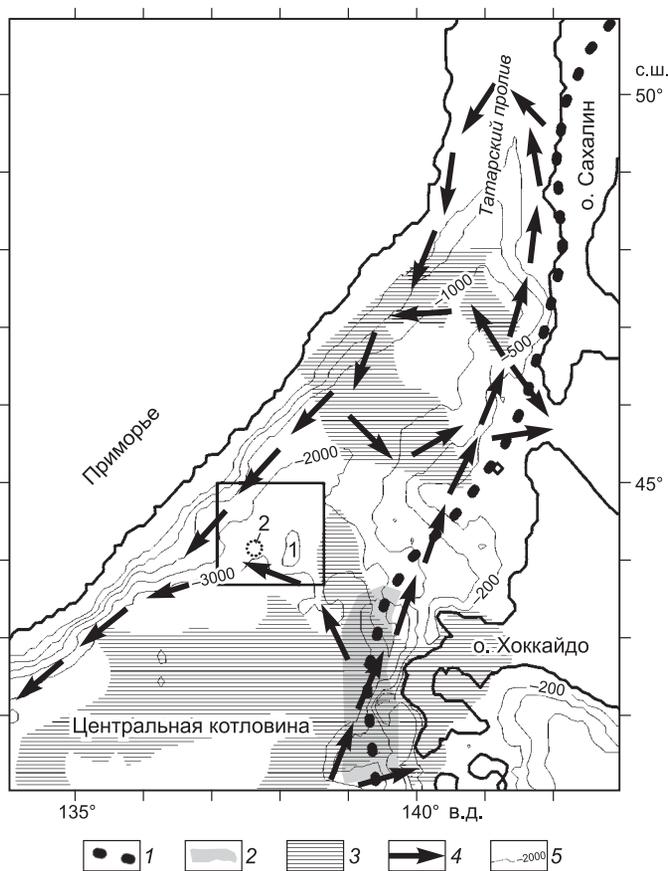
Один из наиболее интересных и недостаточно изученных в геологическом плане объектов в Японском море — это район северного замыкания Центральной глубоководной котловины и ее сочленение с впадиной Татарского пролива. Он находится в зоне перехода континентальной земной коры в субокеаническую. Две крупных морфоструктуры — центральная котловина Японского моря и впадина Татарского пролива, дно которой расположено на 1000—1500 м выше дна Центральной котловины, разделены подводным уступом, образованным возвышенностями Витязя и Алпатова совместно с сегментами островного склона Хоккайдо и материкового склона средней части Приморья [Леликов, Терехов, 1988] (рис. 1). Возвышенности разделены грабенами субмеридионального простирания и имеют крутые (15—35°) западные и восточные борта и южные склоны, на которых обнажаются породы верхнепалеозойского метаморфического фундамента, прорванные позднемиоценовыми гранитоидами и перекрытые морскими миоценовыми отложениями (рис. 2). Вблизи района на востоке проходит активная граница Амурской и Охотоморской литосферных плит [Родников и др., 2010]. Южная часть ее в настоящее время интерпретируется как новая субдукционная зона, начавшая действовать около 2 млн лет назад [Honza, 1979; Родников и др., 2010]. Она характеризуется аномально высокой сейсмичностью и высоким тепловым потоком. К западу от нее располагается зона рифтогенной деструкции земной коры, которую многие исследователи объясняют внедрением мантийных (астеносферных) диапиров [Берсенева и др., 1987; Родников и др., 2010]. В осевой зоне Татарского пролива мощность земной коры уменьшается до 26 км [Родников и др., 2005], а в районе возвышенности Витязя, судя по положению изолинии скорости продольных волн 8.0 км/с, до 20 км [Родников и др., 2010].

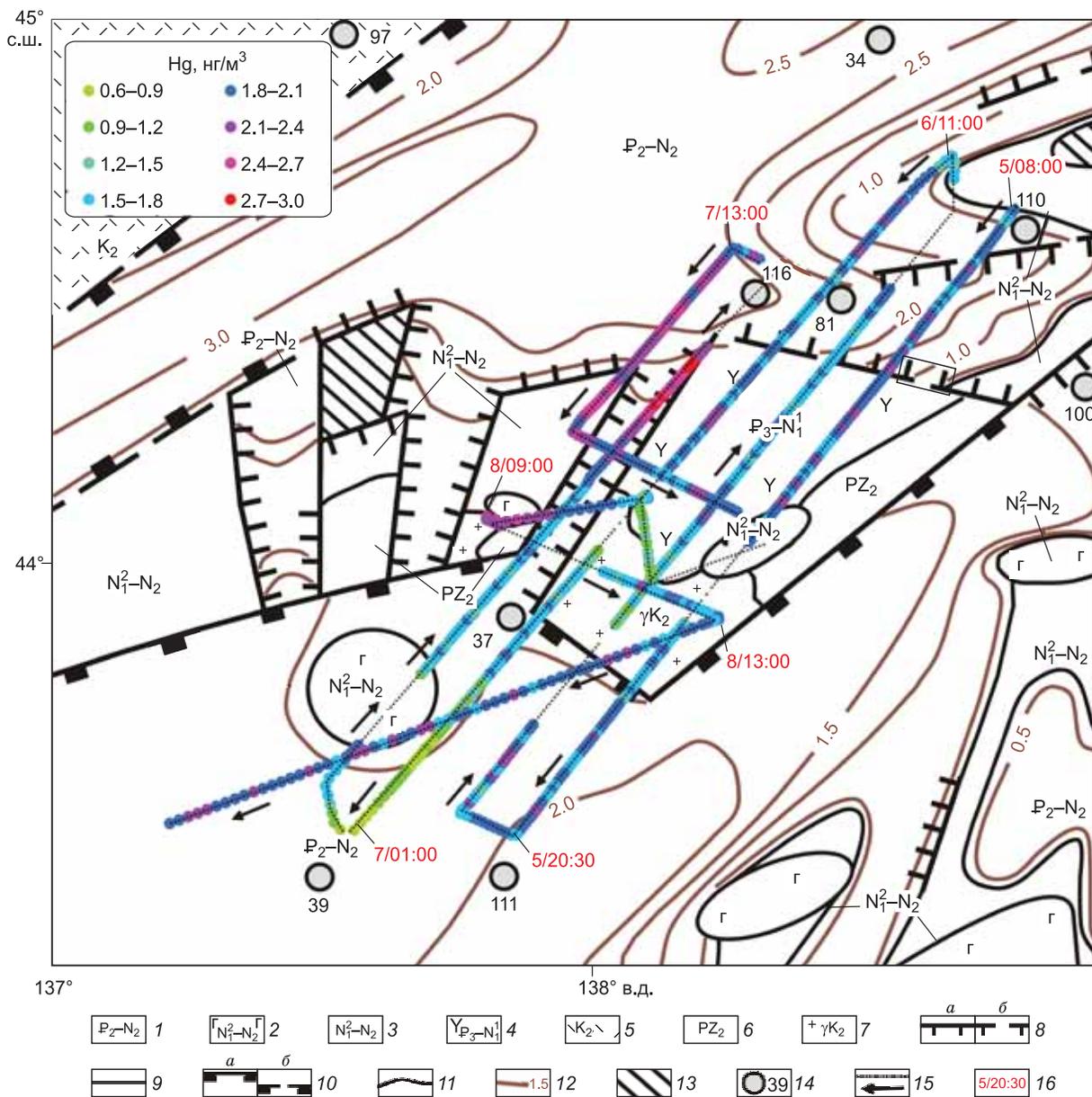
Неглубокое залегание поверхности астеносферы обусловило интенсивное развитие в Япономорском регионе разновозрастного базит-гипербазитового магматизма [Берсенева и др., 1987]. В конце палеогена — начале миоцена из-за остывания вещества плюма усилилось дифференцированное погружение дна формирующегося морского бассейна, что сопровождалось известково-щелочным «зеленотуфовым» вулканизмом на возвышенностях Витязя и Алпатова. О современном продолжении процессов тектонической переработки региона свидетельствует его сейсмическая активность и высокий тепловой поток [Безверхний и др., 1988].

Таким образом, принимая во внимание все вышеизложенное, нами была поставлена цель — выявить возможную эмиссию ртути от рифтогенных структур в зоне сопряжения Центральной глубоководной котловины с впадиной Татарского пролива (в северном замыкании Центральной глубоководной котловины Японского моря) путем изучения особенностей пространственно-временной изменчивости содержания Hg<sup>0</sup> в приводной атмосфере над ней.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прямые определения содержания Hg<sup>0</sup> в приводном слое атмосферы над северным замыканием Центральной глубоководной котловины Японского моря были выполнены с 5 по 8 октября 2010 г. в





**Рис. 2. Пространственно-временное изменение содержания Hg<sup>0</sup> в приводном слое атмосферы в районе возвышенностей Витязя и Алпатова, на основе [Геологическая карта..., 1988].**

1 — эоцен—плиоцен, осадочные и осадочно-вулканогенные породы; 2 — средний миоцен—плиоцен, вулканические породы основного состава, трахибазальтовый комплекс; 3 — средний миоцен—плиоцен, осадочные и осадочно-вулканогенные породы; 4 — олигоцен—нижний миоцен, вулканические породы смешанного состава, осадочные, осадочно-вулканогенные породы и трахиандезитовый комплекс; 5 — верхний мел, вулканические породы кислого состава, дациториолитовый комплекс; 6 — средний палеозой, метаморфические, осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 7 — позднемеловые гранитоиды; 8—10 — разрывные нарушения: (а — выходящие на поверхность или отраженные в рельефе дна, б — скрытые под более молодыми отложениями); 8 — сбросы, 9 — с переменной или неустановленной кинематикой, 10 — предполагаемые раздвиговые границы блоков (а — выходящие на поверхность или отраженные в рельефе дна, б — скрытые под более молодыми отложениями); 11 — установленные геологические границы; 12 — изопахиты эоцен-плиоценовых отложений (км); 13 — выходы на поверхность докайнозойских и кайнозойских вулканогенных пород (акустический фундамент); 14 — точки измерения теплового потока и его величина (мВт/м<sup>2</sup>, по [Веселов, Липина, 1982]); 15 — галсы и направление движения судна; 16 — дата/время (UTC) в точке замера.

составе комплексной океанологической экспедиции в 52-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с помощью атомно-абсорбционного спектрометра с зеемановской коррекцией РА-915+ (ООО «Люмэкс», г. Санкт-Петербург) в стандартном автоматическом режиме «мониторинг», с пределом обнаружения 0.3 нг/м<sup>3</sup> [Sholupov et al., 2004]. Воздух закачивали в анализатор встроенным в него компрессором с

левого борта носовой части судна по шлангу длиной 20 м. Расстояние между воздухозаборным концом шланга и поверхностью воды составляло около 2 м. Полученные ежесекундные значения содержания ртути в воздухе усредняли за 5-минутный интервал и получали пространственную привязку.

Одновременно каждые 3 ч регистрировали скорость и направление движения судна, метеорологические параметры (температура окружающего воздуха, атмосферное давление, направление и скорость ветра) с помощью штатных судовых приборов и автоматической метеостанции Davis Weather Wizard III (Davis Instruments, США) соответственно.

Все полученные значения концентрации  $Hg^0$  в воздухе были приведены к нормальным условиям (атмосферное давление — 760 мм рт. ст., температура окружающего воздуха — 0 °С) в соответствии с методикой выполнения измерений [М 03-06-2000..., 2000] по формуле:

$$X = S_{\text{ср}} \frac{273 + T}{PQ},$$

где  $S_{\text{ср}}$  — среднее значение концентрации  $Hg^0$  в воздухе, измеренное за 5 мин;  $T$  — температура окружающего воздуха (°С);  $P$  — атмосферное давление (мм рт.ст.);  $Q$  — коэффициент пересчета, равный 0.358 для открытой местности.

При расчете во избежание ошибок, связанных с загрязнением анализируемого воздуха выхлопными газами, не учитывались значения, полученные при небольшой либо равной нулю скорости судна, а также при попутном ветре, равном или превышающем скорость движения судна.

В современных условиях поступление ртути в атмосферу от геологических источников может быть выявлено только после учета возможного атмосферного переноса ртути на дальние расстояния от мощных антропогенных и природных источников. С этой целью нами был проведен расчет обратных траекторий движения воздушных масс из точек замера содержания ртути с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), разработанной лабораторией воздушных ресурсов Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США), с учетом базы метеорологических данных GDAS (Global Data Assimilation System) [Draxler, Rolf, 2013; Rolf, 2013]. Для расчетов были использованы следующие входные данные: в качестве начальных координат обратных движений воздушных масс были взяты координаты местоположения судна (точек измерения) через каждые 3 ч, начальная высота обратного движения воздушной массы составляла 500 м над ур. м., так как приблизительно именно до этой высоты распространяется пограничный слой атмосферы, подверженный определяющему влиянию подстилающей поверхности [Кабанов, 1997].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненных измерений (744 точки замера) была выявлена пространственно-временная неоднородность содержания  $Hg^0$  в приводном слое воздуха над северным замыканием Центральной котловины Японского моря (см. рис. 2). Концентрация  $Hg^0$  изменялась в диапазоне от 0.7 до 2.8 нг/м<sup>3</sup>, среднее значение составило  $1.8 \pm 0.4$  нг/м<sup>3</sup> (табл. 1). Над северо-западным склоном возвышенности Витязя был зафиксирован контрастный ореол рассеяния  $Hg^0$  в приводной атмосфере площадью 700 км<sup>2</sup> (длина — 50 км, ширина — 14 км). Внутри данной аномальной зоны (выборка 1) содержание  $Hg^0$  в воздухе находилось в пределах от 1.7 до 2.8 нг/м<sup>3</sup>, при среднем значении  $2.3 \pm 0.2$  нг/м<sup>3</sup> ( $N = 95$ ). Еще один участок с повышенным содержанием  $Hg^0$  в приводном воздухе был выявлен в западной части района работ над небольшой вулканической постройкой. Содержания  $Hg^0$  в пределах этой аномалии (выборка 2) изменялись от 2.0 до 2.5 нг/м<sup>3</sup>, среднее составило  $2.3 \pm 0.1$  нг/м<sup>3</sup> ( $N = 12$ ). В целом концентрация  $Hg^0$  на полигоне без учета содержаний на аномальных участках находилась в диапазоне от 0.7 до 2.4 нг/м<sup>3</sup> и в среднем составляла  $1.7 \pm 0.3$  нг/м<sup>3</sup> ( $N = 637$ ) (выборка 3). Таким образом, содержание  $Hg^0$  в приводном слое воздуха на полигоне, за исключени-

Таблица 1. Статистические показатели содержания  $Hg^0$  (нг/м<sup>3</sup>) в воздухе на полигоне

Показатель	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
Объем выборки	95	12	637
Среднее арифм.	2.3	2.3	1.7
Среднее геометр.	2.3	2.3	1.7
Медиана	2.3	2.3	1.8
Мода	2.2	2.2	1.8
Сумма	217.8	27.5	1085.5
Минимум	1.7	2.1	0.7
Максимум	2.8	2.5	2.4
Нижний квантиль	2.1	2.2	1.6
Верхний квантиль	2.5	2.4	1.9
Дисперсия	0.05	0.01	0.10
Станд. откл.	0.2	0.1	0.3
Коеф. вариации	10.1	5.1	18.6
Станд. ошибка	0.02	0.03	0.01
Асимметрия	-0.06	0.19	-0.87
Станд. ошибка асимметрии	0.25	0.64	0.10
Эксцесс	-0.21	-0.67	0.52
Станд. ошибка эксцесса	0.49	1.23	0.19

Таблица 2. Выявление статистически значимого различия между средними значениями в выборках

Показатель	Выборка		
	1, 3	2, 3	1, 2
<i>t</i> -критерий Стьюдента	-17.5	-6.4	0.0
<i>df</i> , число степеней свободы	730	647	105
<i>P</i>	0.000	0.000	0.989
<i>F</i> -критерий Фишера	1.87	7.37	3.94
<i>p</i>	0.0003	0.0008	0.015

Примечание. *P* — вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются; *p* — вероятность справедливости гипотезы о том, что дисперсии сравниваемых выборок не различаются.

статистического различия нет, так как высока вероятность справедливости гипотезы о том, что сравниваемые средние значения не различаются ( $P = 0.989$ ). Таким образом, повышенные содержания  $Hg^0$  в северо-западной части полигона объясняются влиянием некоего фактора.

На графике, отображающем изменение  $Hg^0$  во времени (рис. 3), видно, как из обычного/общего хода содержания  $Hg^0$  выделились два аномальных периода с повышенными количествами (07.10.10/19:00 — 08.10.10/05:00 и 08.10.10/19:30 — 08.10.10/20:30 по местному времени), чья аномальность подтверждается результатами статистического анализа. Для установления причины, которая вызвала наличие в приводной атмосфере над Японским морем данных аномалий, было проанализировано возможное влияние всех известных факторов, способных увеличить содержания  $Hg^0$  в атмосфере над морем. В-первых, были рассмотрены циклические физико-химические процессы, в результате действия которых может изменяться содержание  $Hg^0$  в атмосфере в общем и, в частности, в приводном слое тропосферы над морем в вечернее и ночное время.

Предполагается, что циклическое изменение концентраций различных форм ртути в разных слоях тропосферы в течение суток прямо либо опосредованно обусловлено солнечным излучением. Так, например, считается, что над сушей в приземном слое тропосферы суточное изменение содержания  $Hg^0$  зависит от ее испарения с поверхности Земли в результате фотоиндуцированных биологических про-

ем двух аномальных повышений, находилось на уровне типичных фоновых концентраций  $Hg^0$  в приземном слое атмосферы Северного полушария — 1.5—1.7 нг/м<sup>3</sup> [Lindberg et al., 2007].

Для выявления статистически значимого различия между средними значениями в выборках был применен критерий Стьюдента для независимых выборок (табл. 2). Использование данного критерия обусловлено тем, что распределения переменных в выборках близки нормальному, а дисперсии наблюдений не слишком различны (см. табл. 1). В результате попарного сравнения средних величин содержания ртути в выборках (см. табл. 2) можно утверждать с доверительной вероятностью 0.95, что выборки 1 и 3, 3 и 2 статистически различаются. Между выборками 1 и 2 статисти-

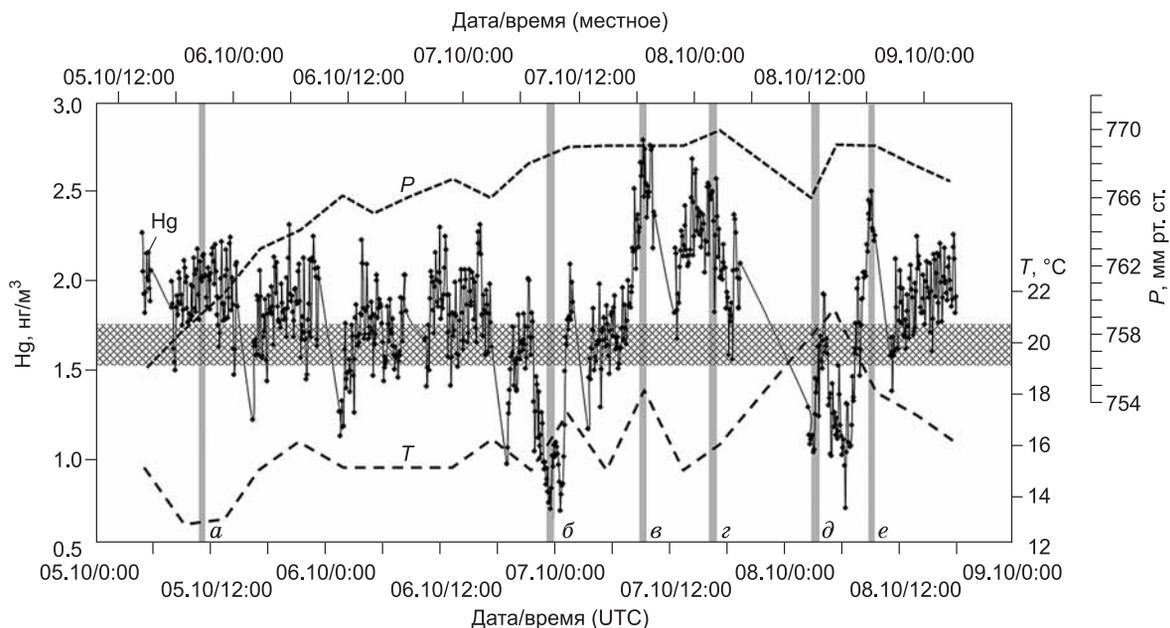


Рис. 3. Временная изменчивость содержания  $Hg^0$  и метеопараметров ( $T$  и  $P$ ) в приводном слое атмосферы за период измерений с 5 по 10 октября 2010 г.

Поперечной штриховкой показаны пределы значений фоновых содержаний ртути в воздухе Северного полушария [Lindberg et al., 2007]; вертикальные серые линии — периоды *a*—*e*, для которых на рис. 4 соответственно отображены обратные траектории движения воздушных масс в точку измерения.

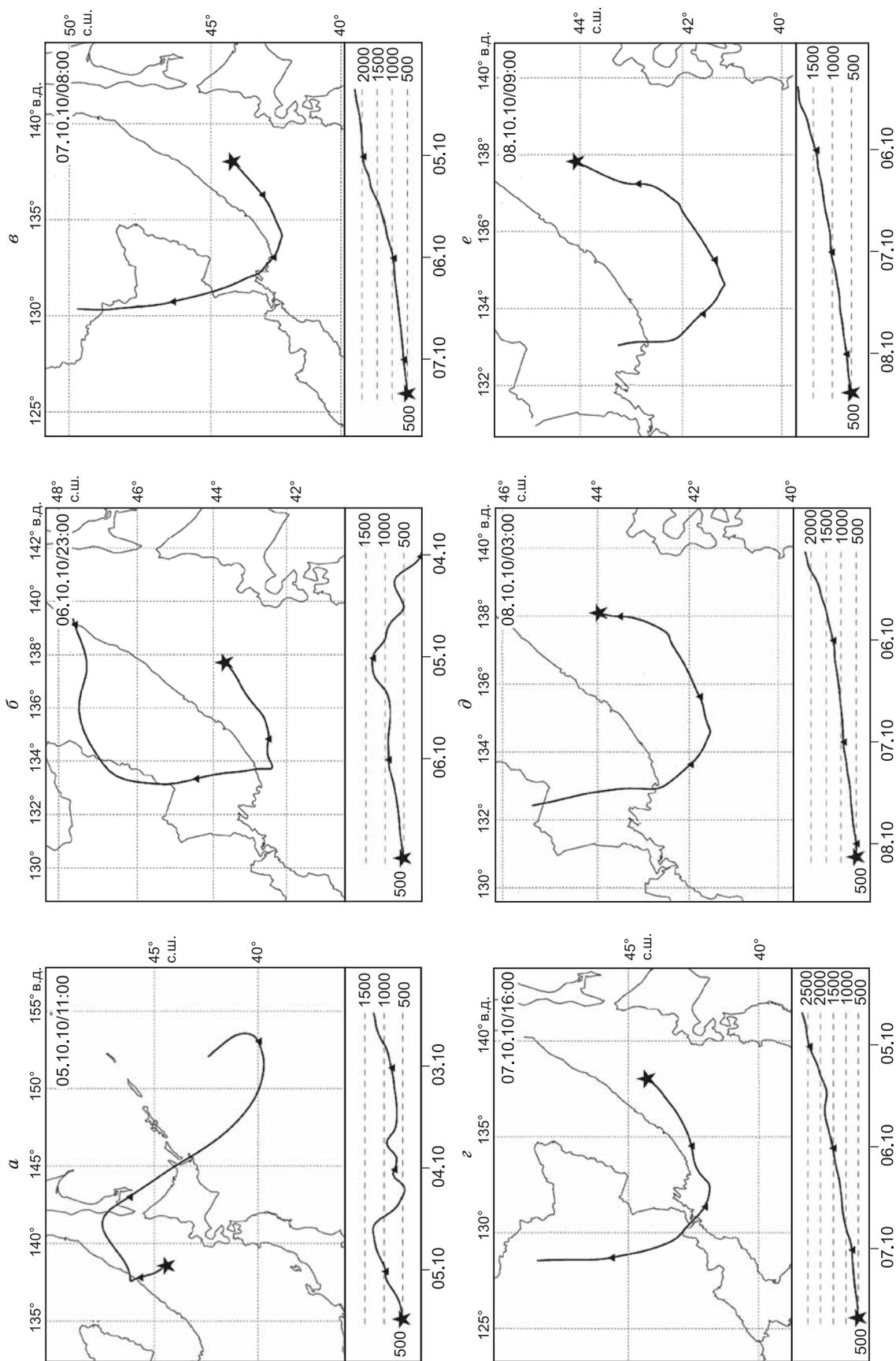
цессов (например, фотосинтеза), которые, в свою очередь, контролируются температурой окружающего воздуха и уровнем солнечной радиации соответственно [Tomiyasu et al., 2006; Nguyen et al., 2008]. Подобный процесс происходит и в морской среде, когда в результате фотохимического восстановления двухвалентной ртути ( $\text{Hg}^{2+}$ ), контролирующегося интенсивностью солнечного излучения, образуется  $\text{Hg}^0$  [Amyot et al., 1994; Costa, Liss, 2000]. Последующая ее эмиссия из поверхностного слоя воды, вероятно, может вызывать повышение концентрации  $\text{Hg}^0$  в приземном слое атмосферы в дневное время.

В высокогорных районах (около 3 км над ур. м.), характеризующихся небольшой суточной вариацией температуры окружающего воздуха, предполагается, что содержание  $\text{Hg}^0$  в атмосфере в течение суток изменяется в результате действия двух других факторов [Swartzendruber et al., 2006; Sheu et al., 2010]. Первый заключается в том, что в приземной тропосфере основная форма нахождения ртути — атомарная и ее содержание повышено относительно содержания в верхней тропосфере, в которой основная форма ртути — окисленная и сорбированная частицами [Talbot et al., 2007]. Вторая причина — атмосферная конвекция, имеющая над сушей ярко выраженный суточный и годовой ход с максимумом после полудня и летом. Днем над сушей, в случае достаточного увеличения температуры приземного слоя воздуха для возникновения неустойчивой стратификации тропосферы, возникает поток воздушных масс от поверхности Земли в свободную тропосферу. В Японском море суточные колебания температуры воды, связанные с изменчивостью солнечной радиации, у поверхности моря очень малы и оставляют около  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  [Гидрометеорология..., 2003]. По этой причине, а также вследствие радиационного охлаждения воздуха в свободной тропосфере вертикальные градиенты температуры и, соответственно, максимальные потоки воздушных масс, направленные от поверхности моря вверх в атмосферу, возникают в ночное время. В атмосфере над морем содержится больше солей, чем в атмосфере над сушей, и здесь предполагается наличие особых (отличных от тех, что происходят в атмосфере над сушей) суточных циклов ртути, обусловленных окислительно-восстановительными реакциями  $\text{Hg}^0$  с активными формами галогенов (в основном брома), образующимися в результате фотохимических реакций [Sprovieri et al., 2010]. Подобными реакциями объясняется резкое уменьшение содержания  $\text{Hg}^0$  и увеличение  $\text{Hg}^{2+}$  в приземной атмосфере Арктики и прибрежной части Антарктики во время весеннего восхода Солнца [Коноплев, Панкратов, 2005]. Данные реакции вызывают суточный ход содержания  $\text{Hg}^0$  с максимумом ночью и минимумом днем.

Таким образом, определенные физико-химические процессы, происходящие в системе море—атмосфера, способны вызывать цикличное изменение содержания различных форм ртути в атмосфере над морем. Однако в ходе 4-дневных измерений на полигоне суточные максимумы и минимумы содержания  $\text{Hg}^0$  фиксировались как в ночное, так и в дневное время. Мы считаем, что выявленные в вечернее и ночное время аномалии с повышенным содержанием ртути нельзя объяснить действием вышеописанных физико-химических процессов, так как их проявления не цикличны, т.е. отсутствуют в другие дни. Отсутствие ярко выраженной закономерной цикличности изменения содержания  $\text{Hg}^0$  в воздухе может быть связано с взаимной компенсацией обуславливающих ее процессов и/или их недостаточной интенсивностью, а также мешающим влиянием других факторов.

Один из таких факторов — это атмосферный перенос ртути от мощных природных (вулканы), антропогенных (горно-добывающая промышленность, сжигание ископаемого топлива) и вторично-комбинированных (лесные пожары) источников. От них в атмосферу ртуть попадает в различных формах [Mason, Sheu, 2002]. Однако перемещаться на дальние расстояния в атмосфере она в силу своих физико-химических свойств может в основном только в атомарной форме [Hall, 1995; Shia et al., 1999; Travnikov, 2012]. В результате последних исследований установлено, что содержание  $\text{Hg}^0$  в атмосфере над Японским морем может увеличиваться до трех раз относительно фона с приходом воздушных масс из района Желтого моря, окруженного высокоиндустриализированными территориями Китая и Южной Кореи. Это следует из результатов физико-химического моделирования переноса антропогенной ртути [Dasatoor, Larosque, 2004], которые подтверждаются данными натурных наблюдений [Астахов и др., 2011; Аксентов, Калинин, 2012; Калинин и др., 2013]. Для проверки этой возможности был проведен расчет обратных траекторий движения воздушных масс для различных периодов, в том числе когда в приземной атмосфере района исследований отмечались повышенные содержания ртути (см. рис. 3). Результаты показали, что в эти отрезки времени воздушные массы приходили в район исследований из регионов с низкой степенью антропогенного загрязнения и их источником были средние слои тропосферы (рис. 4). Поэтому можно утверждать, что атмосферный перенос ртути от удаленных источников не являлся причиной возникновения выявленных контрастных ореолов рассеяния  $\text{Hg}^0$ .

Существуют еще несколько факторов, теоретически способных вызывать увеличение концентрации  $\text{Hg}^0$  в приземной атмосфере над морем. Система поверхностных течений в Японском море [Яричин, 1980], частично отображенная на рис. 1, позволяет предположить, что в район исследования Цусимским течением могли быть привнесены водные массы из Желтого моря, характеризующиеся повышенными содержаниями ртути [Ci et al., 2011] и, в свою очередь, увеличившие ее содержание в приземной атмос-



**Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс в точку измерения (звездочки) для шести (*a—e*) временных интервалов (см. рис. 3) за предыдущие 3 сут (треугольники) в горизонтальной (вверху) и вертикальной (внизу) плоскостях.**  
 Дата/время — UTC. На графике для вертикальной плоскости по оси абсцисс — дата, месяц; по оси ординат — расстояние от уровня моря (м).

фере. Однако, если допустить такой вариант, то увеличение концентрации  $Hg^0$  в воздухе зафиксировали бы и на других профилях в этом районе (см. рис. 2), но это не было отмечено. Атомарная ртуть, поступающая в атмосферу в результате восстановления окисленной ртути в морской воде в ходе биотических и абиотических процессов [Lindberg et al., 2007], также не должна иметь контрастного локального ореола рассеяния, за исключением, вероятно, случая, когда присутствует локальный источник поступления окисленной ртути в морскую среду.

Таким образом, методом исключений нами был установлен единственный из известных факторов увеличения содержания ртути в атмосфере над морем, который мог бы обусловить наличие контрастной аномалии с повышенными содержаниями  $Hg^0$  в воздухе над районом исследований, — это поступление ртути через толщу воды из неких геологических источников на дне либо в составе пузырьков газа, как это предположительно происходит от других активных геологических объектов [Ганеев и др., 1984; Астахов и др., 2011], либо в результате диффузии и/или турбулентного перемешивания.

Повышенные содержания ртути в атмосферном воздухе были установлены в двух районах (см. рис. 2): над небольшой вулканической постройкой в западной части участка и к северо-востоку в месте пересечения рифтогенных грабенов, разделяющих блоки с более древней земной корой. Ранее на этом же участке был отмечен максимальный для района тепловой поток  $126 \text{ мВт/м}^2$  (см. рис. 2). Высокие значения теплового потока ( $100\text{—}110 \text{ мВт/м}^2$ ) измерены также восточнее участка работ, но они связаны уже с областью высокой тектонической активности на склоне островов Хоккайдо и Хонсю. В пределах блоков с более древней континентальной корой отмечены очень низкие значения теплового потока, что в сочетании с высокими значениями в пределах разделяющих их грабенообразных структур может указывать на современную активность последних.

Учитывая общую высокую геодинамическую активность региона и приуроченность участков с высоким содержанием  $Hg^0$  в приводном воздухе к определенным геологическим структурам, можно предполагать, что поставщиком ртути явились локальные водно-газовые источники на морском дне, связанные с вулканизмом или дефлюидизацией осадочного чехла и земной коры по глубинным разломам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности пространственно-временной изменчивости содержания  $Hg^0$  в приводной атмосфере и результаты анализа природных процессов, определяющих ее поступление и миграцию, свидетельствуют о наличии локальных геологических источников ртути на морском дне. Высокий тепловой поток, наличие молодых вулканических и молодых рифтогенных грабенов свидетельствуют о современной геологической активности в пределах этих участков, что позволяет предполагать поступление ртути из водно-газовых, возможно, гидротермальных источников.

Полученные данные свидетельствуют о том, что морские ртутно-метрические измерения по атмосферическим ореолам рассеяния могут быть использованы в качестве дополнительного метода морского геологического исследования для геологического картирования и, возможно, поисков углеводородных и рудных залежей.

Авторы выражают благодарность М.Г. Валитову за организацию и проведение экспедиции, Е.А. Лопатникову за помощь в получении данных, В.Ф. Мишукову за ценные консультации, сотрудникам лаборатории воздушных ресурсов Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) за предоставление модели HYSPLIT в он-лайн доступе (<http://ready.arl.noaa.gov>).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-00723) и проекта «Расчет полей течений переноса и трансформации загрязняющих веществ (включая радионуклиды, тяжелые металлы и нефтяные углеводороды) и экологических угроз в Дальневосточном регионе России» программы №1 «Фундаментальные проблемы математического моделирования» РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

**Аксентов К.И., Калинин В.В.** Особенности распределения атомарной ртути в приводном слое атмосферного воздуха Японского моря осенью 2010 г // Метеорология и гидрология, 2012, № 10, с. 44—51.

**Астахов А.С., Иванов М.В., Ли Б.Я.** Гидрохимические и атмосферические ореолы рассеяния ртути над гидротермальными источниками подводного вулкана Пийпа (Берингово море) // Океанология, 2011, т. 51, № 5, с. 879—888.

**Безверхний В.Л., Берсенев И.И., Ващенко Н.Г., Горовая М.Т., Леликов Е.П., Цой И.Б.** Геологическое строение северного замыкания Центральной глубоководной котловины Японского моря // Тихоокеанская геология, 1988, № 4, с. 15—23.

**Берсенев И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Т., Терехов Е.П., Цой И.Б.** Геология дна Японского моря. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1987, 140 с.

**Веселов О.В., Липина Е.Н.** Каталог данных о тепловом потоке востока Азии, Австралии и запада Тихого океана. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1982, 122 с. [http://www.wdcb.ru/sep/data/hdata/hf\\_reg1.dat](http://www.wdcb.ru/sep/data/hdata/hf_reg1.dat).

**Ганеев А.А., Машьянов Н.Р., Свешников Г.Б., Шолупов С.Е.** О возможности картирования активных тектонических структур по газовым ореолам ртути над морской поверхностью // Докл. АН СССР, 1984, т. 275, № 5, с. 1162—1164.

**Геологическая карта** дна Японского моря м-ба 1:2 500 000 / Под ред. И.И. Берсенева, Л.И. Красного. М., Мингео СССР, 1988.

**Гидрометеорология** и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.С. Васильева, Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева. СПб., Гидрометеоздат, 2003, 398 с.

**Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Параметры горячих точек и термохимических плюмов // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (6), с. 589—602.

**Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.** Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1159—1187.

**Кабанов М.В.** Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 1. Научно-методические основы / Ред. В.Е. Зуев. Томск, Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997, 211 с.

**Калинчук В.В., Астахов А.С., Мишуков В.Ф., Аксентов К.И.** Изменение концентрации атомарной ртути в приводном слое атмосферы над акваторией Уссурийского залива Японского моря во время прохождения тайфуна Болавен в 2012 г. // Метеорология и гидрология, 2013, № 5, с. 26—35.

**Кирдяшкин А.А., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н., Сурков Н.В.** Гидродинамические процессы при подъеме мантийного плюма и условия формирования канала излияния // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (9), с. 891—907.

**Коноплев А.В., Панкратов Ф.Ф., Рычков А.М.** Уменьшение концентрации ртути в атмосфере Российской Арктики весной // Метеорология и гидрология, 2005, № 9, с. 50—54.

**Леликов Е.П., Терехов Е.П.** Палеозойские породы складчатого фундамента северной части Японского моря // Океанология, 1988, т. 28, № 2, с. 271—279.

**Летников Ф.А.** Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1296—1307.

**Машьянов Н.Р.** Газортутная съемка в приземном слое атмосферы при поисках рудных месторождений: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Л., ЛГУ, 1985, 25 с.

**М 03-06-2000.** Методика выполнения измерений массовой концентрации паров ртути в атмосферном воздухе, воздухе жилых и производственных помещений атомно-абсорбционным методом с зеэмановской коррекцией неселективного поглощения и использованием анализатора ртути РА-915+. СПб., ООО «Льюмэкс», 2000, 10 с.

**Озерова Н.А.** Ртутно-углеводородные месторождения // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Тезисы докладов Всероссийской конференции. М., ГЕОС, 2007, с. 180—181.

**Озерова Н.А.** Ртутная дегазация земли: геолого-экологические следствия // Ртуть в биосфере: эколого-геохимический аспект. Материалы Международного симпозиума. М., ГЕОХИ РАН, 2010, с. 24—31.

**Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И.** Геотраверс региона Охотского моря // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле, 2005, № 5, с. 45—58.

**Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А.** Глубинное строение континентальных окраин региона Японского моря // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле, 2010, № 15, с. 33—45.

**Фурсов В.З.** Ртутометрические методы при геологическом картировании и экологических исследованиях. Методическое руководство. М., Геокарт, ГЕОС, 2006, 315 с.

**Шарапов В.Н., Перепечко Ю.В., Мазуров М.П.** Мантийно-коровые флюидно-магматические системы зон спрединга // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1326—1343.

**Яричин В.Г.** Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Тр. ДВНИГМИ, 1980, № 80, с. 46—61.

**Amyot M., Mierle G., Lean D.R.S., McQueen D.J.** Sunlight-induced formation of dissolved gaseous mercury in lake waters // Environ. Sci. Technol., 1994, v. 28, p. 2366—2371.

**Ci Z., Zhang X., Wang Z.** Elemental mercury in coastal seawater of Yellow Sea, China: temporal variation and air-sea exchange // Atmos. Environ., 2011, v. 45, p. 183—190.

- Costa M., Liss P.** Photoreduction and evolution of mercury from seawater // *Sci. Total. Environ.*, 2000, v. 261, p. 125—135.
- Dastoor A.P., Larocque Y.** Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study // *Atmos. Environ.*, 2004, № 38, p. 147—161.
- Draxler R.R., Rolph G.D.** HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2013, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- Hall B.** The phase oxidation of elemental mercury by ozone // *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, № 80, p. 301—315.
- Honza E.** Sediments, structure and spreading of Japan Sea // *Japan Sea*, 1979, № 10, p. 23—45.
- Lindberg S., Bullock R., Ebinghaus R., Engstrom D., Feng X., Fitzgerald W., Pirrone N., Prestbo E., Seigneur C.** A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition // *AMBIO*, 2007, № 36 (1), p. 19—32.
- Mason R.P., Sheu G.R.** Role of the ocean in the global mercury cycle // *Global Biogeochem.*, 2002, № 16, p. 1093—1106.
- Nguyen H.T., Kim K.-H., Kim M.-Y., Kang C.-H., Shim S.-G.** Mercury in air in an area impacted by strong industrial activities // *Chemosphere*, 2008, v. 71, p. 2017—2029.
- Rolph G.D.** Real-time Environmental Applications and Display system (READY). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2013, <http://ready.arl.noaa.gov>.
- Sheu G.R., Lin N.H., Wang J.L., Lee C.T., Ou Yang C.F., Wang S.H.** Temporal distribution and potential sources of atmospheric mercury measured at a high-elevation background station in Taiwan // *Atmos. Environ.*, 2010, v. 44, p. 2393—2400.
- Shia R.L., Seignuer C., Pai P., Ko M., Sze N.D.** Global simulation of atmospheric mercury concentrations and deposition fluxes // *Geophys. Res.*, 1999, № 104, p. 23747—23760.
- Sholupov S., Pogarev S., Ryzhov V., Mashyanov N., Stroganov A.** Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples // *Fuel Processing Technology*, 2004, v. 85, p. 473—485.
- Sprovieri F., Hedgecock I., Pirrone N.** An investigation of the origins of reactive gaseous mercury in the Mediterranean marine boundary layer // *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, № 10, p. 3985—3997.
- Swartzendruber P.C., Jaffe D.A., Prestbo E.M., Weiss-Penzias P., Selin N.E., Park R., Jacob D.J., Strode S., Jaegle L.** Observations of reactive gaseous mercury in the free troposphere at the Mount Bachelor Observatory // *J. Geophys. Res.*, 2006, v. 111, № 24, article ID D24301.
- Talbot R., Mao H., Scheuer E., Dibb J., Avery M.** Total depletion of Hg<sup>0</sup> in the upper troposphere-lower stratosphere // *Geophys. Res. Lett.*, 2007, v. 34, article ID L23804.
- Tomiyasu T., Eguchi M., Sakamoto H., Anarawa K., Imura R.** Seasonal change and vertical movement of atmospheric mercury at Kagoshima city in relation with Sakurajima Volcano, Japan // *Geochem. J.*, 2006, v. 40, p. 253—263.
- Travnikov O.** Atmospheric transport of mercury // *Environmental chemistry and toxicology of mercury*, 2012, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, p. 331—365.

*Рекомендована к печати 21 апреля 2014 г.  
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 22 июля 2013 г.,  
после доработки — 14 января 2014 г.*