

УДК 550.42:551.35(265.54)

К.И.АКСЕНТОВ, А.С.АСТАХОВ

Антропогенное загрязнение ртутью донных осадков залива Петра Великого

Изучено распределение ртути в донных осадках зал. Петра Великого Японского моря на глубину до 1,5 м от поверхности дна. Повсеместно на участках с большими скоростями осадконакопления выявлен слой с высоким содержанием антропогенной ртути, накопившийся во второй половине XX в. Установлено, что основная ее масса поступила из г. Владивосток, а также с выносами рек Раздольная, Барабашевка, Артемовка. Делается предположение о том, что часть антропогенной ртути поступила в результате глобального атмосферного переноса из урбанизированных районов северного Китая и Кореи.

Ключевые слова: ртуть, зал. Петра Великого, Японское море, донные осадки, геохимия, геоэкология.

Anthropogenic pollution of bottom sediments by mercury in Peter the Great Bay. K.I.AKSETOV, A.S.ASTANOV (V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Distribution of mercury in bottom sediments of Peter the Great Bay, Sea of Japan to the depth of down to 1.5 m below seafloor has been studied. Everywhere on sites with high sedimentation rates a layer with the high content of anthropogenic mercury, accumulated during the second half of the XX century, has been revealed. The basic amount of anthropogenic mercury was brought from Vladivostok, and also by Razdol'naya, Barabashevka, and Artemovka rivers. It is supposed that the bulk portion of anthropogenic mercury was accumulated in sediments as a result of the global atmospheric carry from the urbanized areas of the northern China and Korea.

Key words: mercury, Peter the Great Bay, Japan Sea, bottom sediments, geochemistry, geoecology.

Загрязнение донных осадков зал. Петра Великого антропогенной ртутью впервые выявлено сотрудниками Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН при проведении комплексных геохимических исследований в Амурском заливе под руководством В.В.Аникиева [5]. Тогда же было установлено загрязнение ртутью морских вод и планктона, особенно в бухте Золотой Рог и прол. Босфор Восточный, сделан вывод о поступлении ртути с территории Владивостока. Эти результаты позднее подтверждены другими исследователями [1, 6, 14], которые предположили возможность поставки антропогенной ртути водами р. Раздольная и ее поступления из локальных участков на других побережьях [1, 4, 6].

Появились также сведения о важной роли глобального атмосферного переноса антропогенной ртути и его роли в загрязнении донных осадков. Предполагается, что до 90% ртути, содержащейся в Мировом океане и соответственно в его донных осадках, поступило из атмосферы [10]. По результатам изучения материковых льдов установлено, что увеличение техногенных выбросов ртути в период всеобщей индустриализации привело к повышению содержания ртути в атмосфере Земли начиная с 1880 г., причем наиболее активное загрязнение атмосферы имело место после 1950 г. [14]. Так как зал. Петра Великого находится в зоне влияния атмосферного шлейфа разноса антропогенной ртути от урбанизированных территорий Китая и Кореи [9], можно полагать, что и на его акватории

АКСЕНТОВ Кирилл Игоревич – младший научный сотрудник, АСТАХОВ Анатолий Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН, Владивосток). E-mail: astakhov@poi.dvo.ru

Исследования выполнялись при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан» и ДВО РАН (гранты 06-III-B-07-281, 06-III-A-07-249).

привнос атмосферной ртути значительно увеличился. В определенной мере это подтверждено прямыми измерениями содержания общей газообразной ртути в воздухе [1, 7, 8].

Все вышеуказанное, а также начавшееся интенсивное хозяйственное освоение прибрежных территорий и акватории зал. Петра Великого послужили основанием для проведения специальных исследований распределения и условий накопления ртути в верхней части осадочного слоя с целью выявления источников ее поступления и динамики накопления в осадках.

Колонки донных осадков отбирали трубкой ГОИН длиной 1,5 м в экспедициях на НИС «Малахит» в 2005–2007 гг. (рис. 1). Содержание ртути определяли с помощью анализатора РА 915+ и пиролитической приставки РП-91С по стандартной методике [1]. Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica, картографирование и интерпретацию – с помощью программных комплексов ArcGIS и Surfer (метод интерполяции kriging).

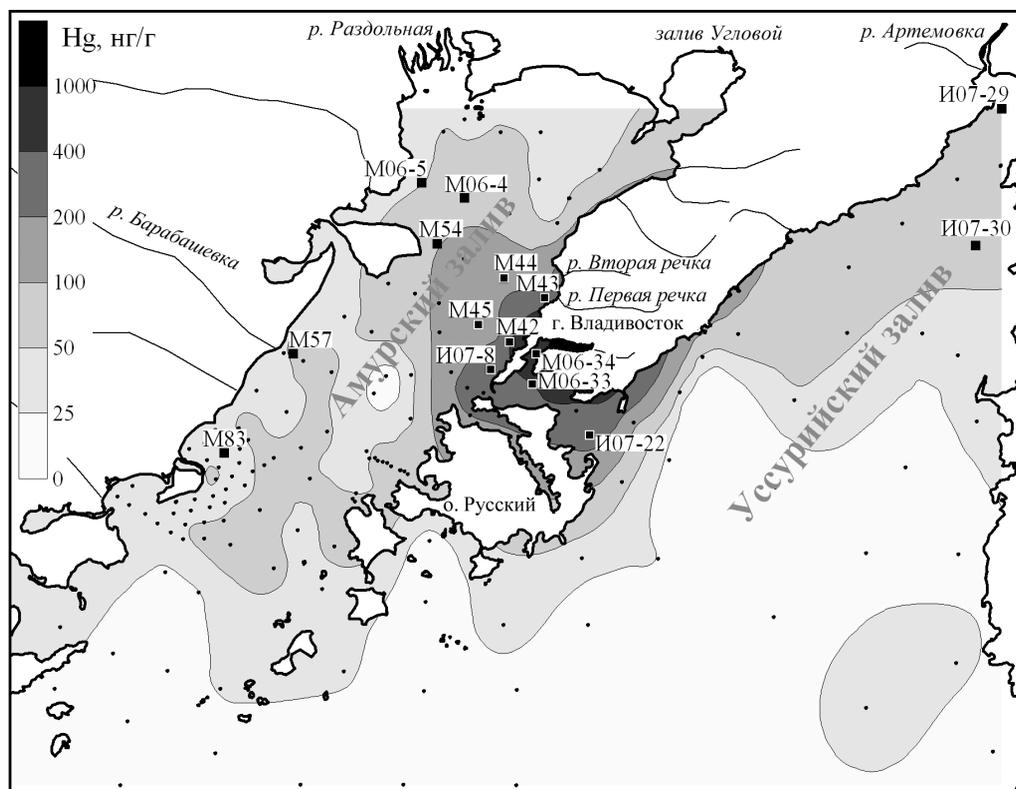


Рис. 1. Содержание ртути в поверхностном слое донных осадков зал. Петра Великого. Точками отмечены места отбора проб донных осадков, квадратами – номера станций, упоминаемых в тексте

Результаты и обсуждение

Поверхностные осадки. Полученные данные позволили существенно по сравнению с имеющимися [5, 6, 15] детализировать и расширить карту распределения ртути в поверхностном слое донных осадков зал. Петра Великого (см. рис. 1), а также подтвердить предположение об интенсивном антропогенном загрязнении ртутью донных осадков акваторий, примыкающих к г. Владивосток. Максимальное содержание ртути отмечено в бухте Золотой Рог. В донных осадках прол. Босфор Восточный ее концентрация достигает 200–400 нг/г, в центральной части Амурского залива, между п-овом Песчаный и г. Владивосток, – 100–300 нг/г, в остальной части Амурского и Уссурийского заливов – не более

100 нг/г. В центральной части Уссурийского залива и во всей открытой части зал. Петра Великого (южная часть района исследований, см. рис. 1) содержания ртути в осадках не превышают 25 нг/г. При сопоставлении карт донных осадков и скоростей осадконакопления в зал. Петра Великого [3] можно отметить, что низкие содержания Hg приурочены к областям с очень малыми скоростями осадконакопления, где на поверхности дна залегают реликтовые разнородные пески. Во внутренней части шельфа зал. Петра Великого, где накапливаются (иногда с очень высокой скоростью) современные тонкозернистые осадки, содержание ртути в той или иной степени повышено в зависимости от близости места исследования к источникам антропогенного загрязнения. Несомненно, что основным из них является г. Владивосток. На распределении ртути в поверхностных осадках проявляется также влияние рек Артемовка и Барабашевка (см. рис. 1), в бассейнах которых расположены промышленные предприятия или иные возможные источники антропогенного загрязнения. Имеются данные о поставке ртути в Амурский залив водами р. Раздольная, но в ее распределении в поверхностных осадках это выражено очень слабо. Предположительно здесь сказывается наличие большого твердого стока реки, в результате чего загрязнение осадков выявляется только при изучении их конкретных фракций [4].

На этом фоне обычное для морских отложений обогащение ртутью тонкозернистых осадков по сравнению с песчаными и алевритовыми проявляется локально на участках со слабым антропогенным загрязнением – 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 Hg 20–40 нг/г. Еще меньшими содержаниями (10–20 нг/г) отличаются реликтовые пески, покрывающие весь внешний шельф в южной части района исследований (см. рис. 1). Однако сравнение их с тонкозернистыми осадками прибрежных районов зал. Петра Великого не является корректным, так как поверхностный слой последних накопился в условиях сильного антропогенного загрязнения.

Донные осадки. Во внутренней части шельфа с высокими скоростями осадконакопления наиболее загрязнен верхний слой, мощность которого и концентрация в нем ртути существенно различаются по районам (рис. 2). Содержание ртути в загрязненном слое в первом приближении соответствует таковому в поверхностных осадках, но формы перехода от незагрязненных осадков с содержаниями Hg от 10 до 30 нг/г (среднее 25 нг/г) к загрязненным различны; имеются изменения содержания внутри загрязненного слоя. Наиболее обычный характер таких изменений – постепенное увеличение снизу вверх, иногда с наличием подповерхностного максимума на глубине 5–15 см. Мощность слоя загрязненных осадков зависит от скорости осадконакопления. В центральной части Амурского залива она составляет 40–60 см, в устьевых зонах рек Барабашевка и Артемовка – 90–125, в южной части Амурского залива и Уссурийском заливе – 10–30 см; в глубоководной части зал. Петра Великого (с глубинами более 50 м), где на поверхность дна выходят реликтовые осадки, загрязненный слой отсутствует.

Более детально рассматривая распределение и концентрацию ртути в колонках отдельных районов, можно отметить следующие особенности. Максимальные содержания ртути в загрязненном слое отмечены в бухте Золотой Рог (1320 нг/г) и в прол. Босфор Восточный (см. рис. 2а); здесь слой полностью вскрыт лишь в одной колонке, где имеет мощность 45 см. В колонке М06-34 под загрязненными осадками подняты незагрязненные, но переход между ними очень резкий: в 70–80-е годы прошлого века здесь проводились дноуглубительные работы, и накопившийся к тому времени слой загрязненных осадков вместе с подстилающими мягкими незагрязненными илами был убран. За прошедшие после дноуглубительных работ годы на поверхности более древних уплотненных алевропелитов накопилось 32 см загрязненных осадков, т.е. скорость осадконакопления здесь большая, чем в Амурском заливе. Она не соответствует природной, так как заполнение выемки после дноуглубления, в том числе за счет перераспределения материала из окружающих участков, происходит несомненно быстрее, чем накопление осадков.

Очень большие различия в мощности загрязненного слоя осадков и содержания в нем ртути выявлены в северной и центральной частях Амурского залива. Наибольшая мощность загрязненного слоя вблизи устьев рек Барабашевка (более 90 см) и Вторая речка (65 см), а также в зоне влияния выносов р. Раздольная, на некотором удалении от устья (станция М06-4), – более 55 см. В Угловском заливе загрязненный слой более 40 см, хотя содержание ртути в нем всего в 2 раза превышает фоновое. Большая мощность (более 43 см) и очень высокие содержания ртути (727 нг/г) отмечены на станции И07-8 (см. рис. 2а) у п-ова Шкота (Эгершельд), где в 1980-е годы сбрасывали загрязненный грунт, вывозимый при дноуглубительных работах из бухты Золотой Рог. Для этой колонки характерно полное отсутствие закономерности в распределении и увеличении содержаний ртути в нижней части (см. рис. 2а). В колонках М42, М45 (см. рис. 2б) и других отмечается ступенчатое увеличение содержаний Hg внутри загрязненного слоя. Возможно, это связано со сбросом загрязненного материала на разных этапах хозяйственной деятельности.

В южной части Амурского залива скорость осадконакопления относительно невысока, мощность загрязненного слоя осадков не превышает 35 см, доходя до максимума в осевой части залива и уменьшаясь к его бортам. Содержание ртути невелико, в 2–3, реже 4 раза выше фонового в незагрязненных осадках. Отмечается постепенное увеличение содержаний к верхней части колонок (М83, см. рис. 2г).

В Усурийском заливе мощность загрязненного слоя осадков не превышает 30 см, лишь в колонке И07-29 (рис. 2г), отобранной в устье р. Артемовка, она полностью не вскрыта (более 54 см). Содержание ртути в загрязненном слое не превышает 90 нг/г, что в 2–3 раза выше фонового, и постепенно увеличивается к верхней части колонки.

При сопоставлении гранулометрического состава осадков (содержание фракции <0,01 мм) по колонкам и содержаний в них ртути значимой корреляционной зависимости не выявлено. Одни и те же осадки в загрязненном и незагрязненном слоях колонок различаются по содержанию ртути в десятки раз. В пелитовых осадках незагрязненных интервалов колонок ртуть отмечена в среднем в количестве 20–30 нг/г, что почти равно содержаниям в реликтовых песчаных осадках внешнего шельфа зал. Петра Великого.

Установлено, что в пределах изученной акватории зал. Петра Великого загрязнение ртутью донных осадков проявляется повсеместно на участках с большой скоростью осадконакопления. На иных участках за время, прошедшее с начала интенсивного хозяйственного освоения территории, не накопился слой осадков, который может быть отобран и проанализирован, и здесь антропогенное загрязнение ртутью не выявлено. По количеству ртути, накопившемуся в загрязненном слое, выделяются несколько участков, близких к источникам сноса. Это прежде всего прибрежные акватории г. Владивосток (бухта Золотой Рог, прол. Босфор Восточный, район Второй и Первой речек), где при мощности загрязненного слоя осадков 40–95 см содержания избыточной (антропогенной) ртути составляют 250–900 нг/г, а ее количество, накопившееся за техногенный период, достигает 0,2 г/м². Сюда же можно отнести и участок сброса загрязненных грунтов, вывозимых из бухты Золотой Рог в районе п-ова Шкота (Эгершельд). Поскольку в конце 1980-х годов сброс там был прекращен, на поверхности накопились осадки с относительно низким содержанием ртути, и в распределении ее по поверхности (см. рис. 1) этот участок не выделяется. Загрязненные осадки с очень большим содержанием ртути залегают ниже 20 см от поверхности дна, и их полная мощность не вскрыта (колонка И07-8, см. рис. 2а). Влияние дампинга прослеживается во многих колонках вблизи этого участка, отмечаются скачкообразные увеличения содержаний ртути, связанные, вероятно, со сбросом наиболее загрязненного грунта (колонки М42, М45, см. рис. 2б).

Достаточно значимыми источниками поступления ртути в Амурский и Усурийский заливы являются и некоторые другие участки побережья, прежде всего реки Раздольная, Барабашевка, Артемовка, выносящие большое количество взвешенных наносов. В их приустьевых зонах загрязненный слой осадков имеет большую мощность, хотя содержание

в нем ртути из-за сильного разбавления терригенным материалом невелико. На приустьевом участке р. Барабашевка в колонке М57 мощность загрязненного слоя осадков превышает 90 см (рис. 2в), он полностью не вскрыт, а в распределении ртути отмечаются три ступени, вероятно, соответствующие определенным этапам хозяйственной деятельности в бассейне реки. На приустьевых акваториях р. Раздольная накопление взвешенных наносов происходит не в самом устье, а в северо-западной части Амурского залива, в полосе, протягивающейся вдоль его западного берега и огибающей п-ов Песчаный [4]. Здесь в колонке М54 загрязнение осадков ртутью, в 2–5 раз превышающее фоновое, прослеживается по всему слою 125 см, но высокие содержания характерны только для верхних 50 см (рис. 2в). Содержание избыточной (антропогенной) ртути в осадках приустьевых акваторий указанных рек составляет 26–46 нг/г, а ее количество, накопившееся за техногенный период, – более 0,03 г/м². Для расчета временного интервала накопления загрязненного ртутью слоя осадков использовалась скорость осадконакопления, определенная свинцовым методом по содержанию изотопа ²¹⁰Pb; в центральной части залива в районе станции М44 она составляет 7,2 мм/год [2, 4]. Здесь же отмечены и максимальные (более 2 мм/год), осредненные для голоцена, скорости осадконакопления, определенные по мощности осадков, накопившихся за последние 10 тыс. лет [3]. Необходимо учитывать, что всегда существует большая разница между современными и осредненными для голоцена скоростями осадконакопления из-за уплотнения осадков и включения в расчеты периодов, когда морское осадконакопление на мелководном шельфе отсутствовало. Поэтому можно считать, что две полученные цифры не противоречат друг другу, хотя значение, определенное свинцовым методом, вероятно, завышено. С использованием скорости осадконакопления, равной 7,2 мм/год, выполнено предварительное возрастное членение колонки М44 (рис. 2д). Согласно ему вскрытые колонкой осадки (85 см) накопились после 1890 г., слой с высоким содержанием ртути начал накапливаться после 1960 г. Содержание ртути в осадках более раннего происхождения имеет близкое фоновому значению либо на 10–30% превышает его. Это не противоречит данным о распределении ртути в шельфовых осадках других регионов [11–13] (см. рис. 2д) и атмосфере Северного полушария [14].

В некоторых колонках Амурского залива ниже загрязненного слоя, накопление которого произошло после 1960 г., выделяются интервалы с более высокими, чем фоновые, содержаниями ртути (М42, М54, см. рис. 2б, в). Эти колонки получены в центральной и северо-западных частях Амурского залива, а также в части, примыкающей к г. Владивосток. Можно предполагать, что загрязнение осадков ртутью здесь началось раньше, чем на всей остальной акватории зал. Петра Великого, за счет выносов из г. Владивосток и р. Раздольная. Они же оставались основными поставщиками антропогенной ртути и после 1960 г., но загрязнение осадков проявилось уже на значительно большей акватории, чем ранее. Одна из предполагаемых причин этого – дополнительное поступление ртути в результате ее глобального атмосферного переноса из урбанизированных районов северного Китая и Кореи.

Заключение

Исследования показали, что донные осадки на всей акватории зал. Петра Великого, накапливающиеся в настоящее время, загрязнены антропогенной ртутью. Процесс начался в середине XX в., и с тех пор образовался слой осадков, мощность которого местами превышает 1 м. Наиболее интенсивное загрязнение характерно для акваторий, прилегающих к г. Владивосток и устьям рек Раздольная, Барабашевка, Артемовка.

Обращает на себя внимание повсеместное загрязнение ртутью донных осадков, накопившихся за техногенный период (рис. 2д). Оно не выявлено лишь на участках, где современное осадконакопление не происходит, поэтому можно предполагать, что часть ртути, находящейся сейчас в загрязненном слое осадков, поступила из атмосферы, где ее

содержание резко увеличилось в середине XX в. в связи с возросшей антропогенной эмиссией из промышленно развитых регионов Восточной Азии, Европы, Северной Америки. Зал. Петра Великого находится в зоне с повышенным содержанием антропогенной ртути в приземном слое воздуха, что можно связать с атмосферным переносом с урбанизированных территорий Северного Китая и Кореи. Оценка роли трансграничного переноса в формировании загрязненного слоя осадков может послужить основой для определения его влияния и на современные морские экосистемы региона.

Большую помощь при выполнении экспедиционных и аналитических работ оказали М.В.Иванов, Д.М.Поляков, А.Н.Колесник.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксентов К.И. Ртуть в абиотических компонентах экосистемы зал. Петра Великого // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 173-184.
2. Аникеев 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.
3. Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др. Структура осадков и фации Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 286 с.
4. Поляков Д.М. Накопление тяжелых металлов донными осадками Амурского залива // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 163-173.
5. 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.
6. Поляков Д.М., Вирцавс М., Козлова С.И. и др. Содержание ртути в компонентах экосистемы залива Петра Великого // Вод. ресурсы. 1991. № 5. С. 101-108.
7. Степанов И.И., Калягин А.Н. Распределение концентраций ртути в атмосфере над акваторией западной части Тихого океана // Вестн. ДВО РАН. 1997. № 3. С. 48-56.
8. Astakhov A.S., Crane K., Li B., Ivanov M.V. Mercury distribution in air, water and sediments of the north west pacific marginal seas (results of the Russian-American RUSALCA cruise) // Regularities of the structure and evolution of Geospheres: materials of VII Int. Interdisc. Symph. Vladivostok: FEB RAS, 2007. P. 253-257.
9. Dastoor A.P., Larocque Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study // *Atm. Envir.* 2004. № 38. P. 147-161.
10. Fitzgerald W.P., Mason R.P. The global mercury cycles: oceanic and anthropogenic aspects // *Global and regional mercury cycles: Sources, Fluxes and Mass Balance* / ed. by W.Baeyens, R.Ebinghaus, O.Vasiliev. Kluwer Academic Publishers. 2. Environment. 1996. Vol. 1. P. 85-108.
11. Global mercury assessment. Issued by UNEP Chemicals. Geneva, Switzerland, 2002. 270 p. – <http://www.chem.unep.ch/mercury/Report/Final%20report/final-assessment-report-25nov02.pdf>
12. Matsumoto E. The sedimentary environment in the Tokyo bay // *Geochemistry (Jap.)*. 1983. Vol. 17, N 1. P. 27-32.
13. Oddvar L., Thorsnes T. (ed.) Skagerrak in the past and at the present: An integrated study of geology, chemistry, hydrography and microfossil ecology. Trondheim: Geological Survey of Norway (NGU), 1997. (Spec. publ. 8).
14. Schuster P.F., Krabbenhof D.P., Naftz D.L. et al. Atmospheric mercury deposition during the last 270 years: a glacial ice core record of natural and anthropogenic sources // *Env. Sci. Technol.* 2002. Vol. 36, N 11. P. 2303-2310.
15. Tkalin A.V., Presley B.J. Trace metals in bottom sediments near Vladivostok, Russia // *Pacific Oceanography*. 2003. Vol. 1, N 2. P. 185-187.