



УДК 599.745.3:546.49(571.53)

Распределение и аккумуляция ртути в байкальской нерпе

М. В. Пастухов¹, В. Н. Эпов², Т. Чешельский³, В. И. Алиева¹,
В. И. Гребенщикова¹

¹РАН Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Россия, Иркутск

²Междисциплинарный Институт Исследований Окружающей Среды и Материалов, Франция, По

³Норвежский Университет Науки и Техники, Норвегия, Трондхейм

E-mail: mpast@igc.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования распределения и аккумуляции общей ртути в органах и тканях разновозрастных байкальских нерп. Показана эффективная элиминация Hg через волосяной покров. Установлено, что в печени байкальских тюленей ртуть имеет максимальный уровень биоконцентрации по сравнению с другими химическими элементами. Наиболее важные биологические факторы, влияющие на концентрацию Hg в печени – это пол и возраст байкальской нерпы. Обнаружен низкий уровень аккумуляции Hg гидробионтами пелагической пищевой цепи озера Байкал. Наибольшая степень биомагнификации Hg зафиксирована на верхних ступенях трофической пирамиды (рыба – нерпа).

Ключевые слова: байкальская нерпа, ртуть, органы и ткани, пищевая цепь, оз. Байкал

Введение

Серьезная проблема ртутного загрязнения, существующая в Прибайкалье, инициировала рост числа исследований, оценивающих влияние техногенной эмиссии на уровень концентраций ртути в озере Байкал и прилегающих к нему территориях [7; 8; 12; 20; 29]. Основным антропогенный источник ртути, расположенный поблизости от Байкала – промышленная зона г. Иркутск – г. Черемхово, где ртуть используется в производственных циклах предприятий химической отрасли (г. Усолье-Сибирское, г. Зима). Другими техногенными источниками являются ТЭЦ, котельные, городские коммунальные отходы, ртутьсодержащие пестициды и золотодобывающая промышленность. Однако, несмотря на атмосферный перенос [7] и влияние естественных источников [2], концентрация ртути в водах Байкала крайне низка (0,14–0,77 нг/л) в сравнении с открытыми водами океана и уровнем в других отдаленных и незагрязненных пресноводных системах [19]. Исследования изотопного состава ртути в донных отложениях, планктоне и мышечной ткани рыб, проведенные в 2008–2010 гг., показали, что этот элемент в оз. Байкал преимущественно имеет природное, а не техногенное происхождение [29].

Морские млекопитающие могут аккумулировать значительное количество хлорогани-

ческих соединений и тяжелых металлов [20]. В связи с этим рассматривается возможность связи иммуносупрессии и загрязнения окружающей среды. Так, состояние здоровья морских млекопитающих в Северном и Балтийском морях было связано с серьезностью повреждений и уровнем содержания ртути [23].

Байкальская нерпа (*Phoca sibirica*) – единственное млекопитающее, обитающее в оз. Байкал, является конечным звеном пищевой пелагической цепи. Совершая протяженные миграции по всему озеру, она является хорошим биогеохимическим индикатором состояния экосистемы Байкала в целом. Концентрации различных химических элементов в органах и тканях байкальской нерпы исследованы ранее [11; 24; 25; 27]. Относительно простые трофические связи в озере и постоянство химического состава его вод позволяют рассматривать этот водоём как наглядную систему для изучения природных биогеохимических циклов ртути в незагрязненной водной среде. Это включает в себя исследование биологических факторов, которые влияют на биоаккумуляцию и биомагнификацию в условиях низких концентраций ртути, а также внутренних физиологических факторов, отвечающих за распределение, накопление и выведение ртути в организмах тюленей.

Цель работы – определение особенностей биоаккумуляции ртути разновозрастными бай-

кальскими тюленями, исследование её передачи по пелагической пищевой цепи оз. Байкал, выявление возможных зависимостей накопления ртути в организме нерпы от биологических и физиологических показателей.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы гидробионтов различных трофических уровней пелагической пищевой цепи оз. Байкал: фитопланктона (*Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonsen), мезозoopланктона

(*Epischura baicalensis* Sars), макрозоопланктона (*Macrohectopus branickii* Dybowski), пелагических коттоидных рыб – малых голомянок (*Comephorus dybowski* Korotneff) и разновозрастных байкальских тюленей (*P. (Pusa) sibirica* Gmelin). Отбор проб осуществлялся в разных бассейнах озера в 2000–2009 гг. (рис. 1).

В таблице 1 приведены линейно-весовые показатели и оценки возраста исследованных тюленей.

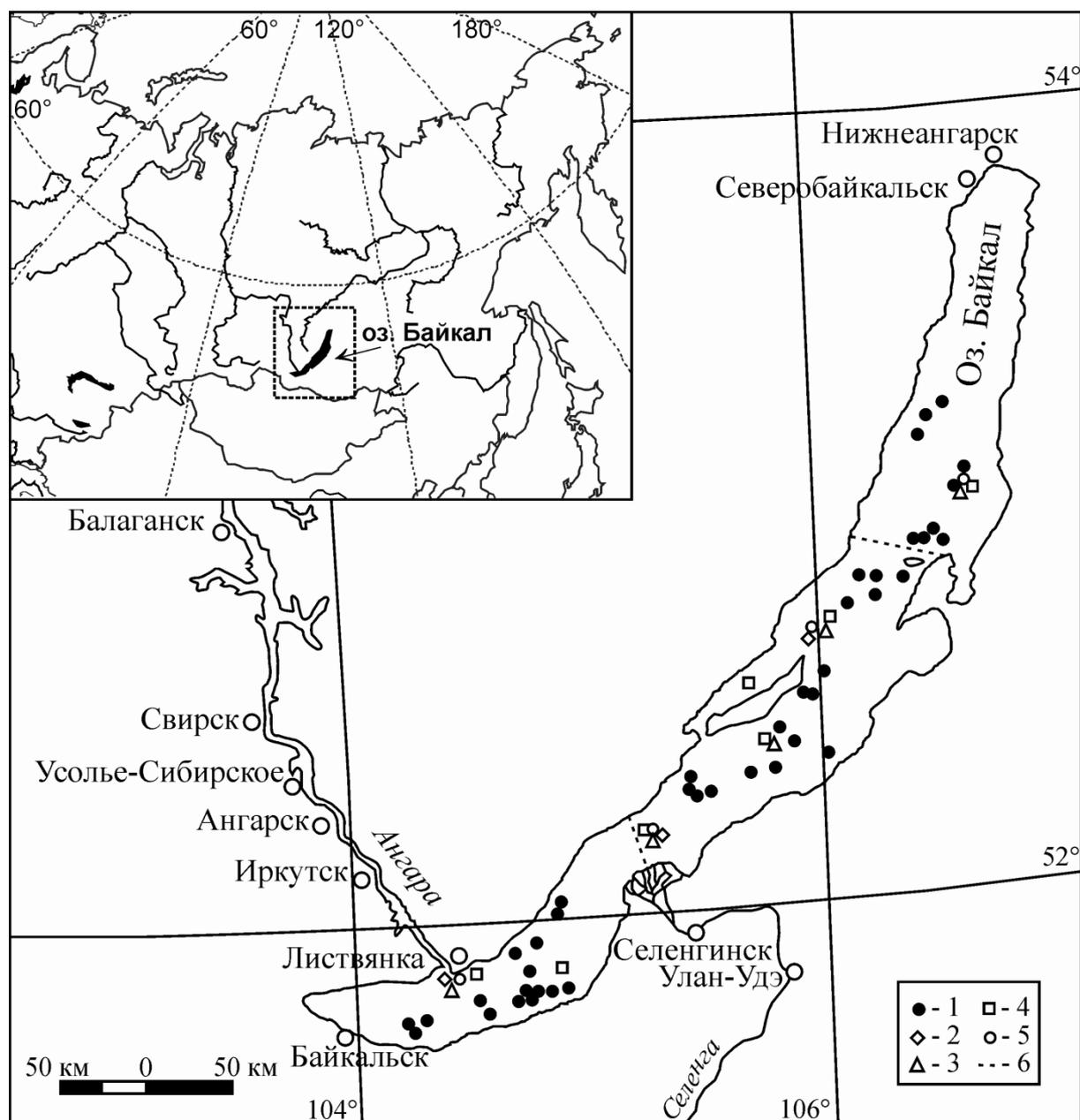


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб пелагических гидробионтов оз. Байкал. 1 – байкальский тюлень; 2 – малая голомянка; 3 – макрозоопланктон; 4 – мезозoopланктон; 5 – фитопланктон; 6 – границы котловин озера Байкал

Таблица 1

Биометрические показатели и возраст исследованных байкальских тюленей

| Возрастная группа | n | Возраст, лет | Вес тела, кг | Длина тела (нос – хвост), см |
|-------------------|----|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Первогодки | 14 | 1–2* | $\frac{17,3 \pm 3,9}{11,1–23,4}$ | $\frac{85,6 \pm 6,5}{74,0–99,0}$ |
| Неполовозрелые | 3 | $\frac{1,3 \pm 0,6^{**}}{1–2}$ | $\frac{30,7 \pm 3,3}{27,7–34,2}$ | $\frac{104,5 \pm 3,13}{101,1–107,3}$ |
| Взрослые самки | 13 | $\frac{10,9 \pm 4,2}{5–18}$ | $\frac{49,5 \pm 16,6}{28,6–83,0}$ | $\frac{133,5 \pm 10,6}{120,0–152,2}$ |
| Взрослые самцы | 12 | $\frac{9,2 \pm 2,9}{5–16}$ | $\frac{49,7 \pm 21,77}{30,0–110,7}$ | $\frac{132,8 \pm 12,2}{117,0–160,3}$ |
| Все | 42 | $\frac{6,1 \pm 5,6}{0,125–18}$ | $\frac{33,9 \pm 20,7}{11,1–110,9}$ | $\frac{110,0 \pm 24,9}{74,0–160,3}$ |

* возраст в месяцах; ** в числителе – среднее $\pm SD$, в знаменателе – пределы значений

В лабораторных условиях образцы гидробионтов взвешивали и помещали в лиофильную сушилку «Иней 3–2», где происходила сублимация образцов при -80 °С. Продолжительность сушки каждой пробы составляла 48 часов (до постоянного веса). Высушенные образцы повторно взвешивались, гомогенизировались, после чего часть пробы (0,6 г) отбиралась для определения ртути.

Общая ртуть в компонентах биоты определялась методом непламенной атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией по способу «холодного пара», который входит в международный стандарт для определения ртути. Определение ртути проводилось на ртутном анализаторе «РА 915+» фирмы «Люмэкс» (Санкт-Петербург) при компьютерной регистрации с высокочастотной модуляцией сигнала и зеемановской коррекцией неселективного поглощения.

Для проверки аналитического качества процедуры определения общей ртути в биологических объектах использовались стандартные образцы DORM-2 (Dogfish Muscle Certified Reference Material for Trace Metals, National Research Council of Canada) и DOLT-3 (Dogfish Liver Certified Reference Material for Trace Metals). Полученные результаты составили 94,6 % и 98,5 % аттестованных значений соответственно. Точность определения, выраженная как относительное стандартное отклонение, составляла 3,4 % и 5,6 % соответственно. Эти результаты были вычислены по последующим анализам трёх подобразцов каждого исходного материала, выполненным в течение одного дня. Предел обнаружения ртути в биологических объектах для этого метода составляет 0,001 мкг/г влажного веса.

CF (фактор биоконцентрации относительно среды обитания) ртути в гидробионтах различных трофических уровней был вычислен по

уравнению, предложенному Маскеу с соавторами [28]:

$$CF = C_x \text{ (мкг/г влажного веса)} / C_s \text{ (мкг/г воды озера)},$$

где C_x – средняя концентрация ртути в исследуемых гидробионтах, C_s – средняя концентрация Hg в воде оз. Байкал.

BMF (фактор биомагнификации или фактор, повышающий концентрации токсических веществ от нижестоящего трофического уровня к вышестоящему) был выражен как отношение концентрации ртути в хищнике (потребитель) к её концентрации в жертве (пища):

$$BMF = C \text{ (хищник)} / C \text{ (жертва)}.$$

В предыдущей работе [25] BMF для байкальских тюленей определялся относительно концентраций элементов в печени, а весовые соотношения других органов и тканей и концентрации в них исследуемых элементов рассчитывались по данным из литературных источников. В настоящем исследовании использовались не расчётные данные, а истинный вес органов и тканей, полученный для каждого тюленя. Определение концентрации ртути в организмах тюленей производилось по средним значениям, полученным для большинства органов и тканей животных, составляющих 95–97 % от массы тела:

$$C_{seal} = \sum_{i=1,n} (C_i \times M_i) / \sum_{i=1,n} M_i,$$

где i – исследуемый орган или ткань тюленя; n – количество проанализированных органов и тканей; C_i – средняя концентрация ртути (мг/кг влажного веса) в органе или ткани; M_i – масса органа или ткани (кг).

После определения средней концентрации ртути для каждого экземпляра вычислялось среднее для всех тюленей, представленных в выборке.

По нашему мнению, такой расчёт среднего содержания ртути в организмах тюленей даёт наиболее достоверные результаты для определения ВМФ. Прочие гидробионты, использованные для этого исследования, анализировались на содержание ртути целиком.

Результаты и их обсуждение

Особенности распределения и аккумуляции ртути в органах и тканях байкальских тюленей

С целью определения уровня накопления ртути в различных органах и тканях разновозрастных байкальских тюленей рассмотрены три группы животных: первородки (возраст 1–1,5 месяца), неполовозрелые (возраст 1–2 года) и взрослые 8-летние тюлени. Для оценки главных путей поступления и выведения ртути были проанализированы пищевые объекты (для первородков – молоко нерпы, для остальных нерп – малая голомянка) и содержимое прямой кишки исследуемых тюленей. Следует отметить, что средние концентрации ртути в объектах питания – молоке нерпы и малой голомянке, близки по своим значениям (0,022 и 0,028–

0,031 мкг/г влаж. веса, соответственно). В содержимом кишечника у трёх возрастных групп также обнаружены соизмеримые концентрации этого элемента (0,121–0,176 мкг/г влаж. веса).

Полученные результаты показали сходство распределения ртути в организмах первородков, неполовозрелых и взрослых нерп вне зависимости от типа их питания. Наименьшее накопление ртути происходит в костной ткани и подкожном жире животных, который занимает значительную долю (обычно более 50 %) от общей массы тела тюленей-первородков и 39–47 % у взрослых нерп [6]. У всех исследованных тюленей максимальные концентрации отмечены в органах выделения – печени и почках, а также в волосяном покрове. В других органах и тканях обнаруженные концентрации ртути были невысокими и изменялись в пределах одного порядка: в среднем $\pm SD$ у первородков – $0,043 \pm 0,022$ мкг/г влаж. веса, у неполовозрелых – $0,093 \pm 0,062$ мкг/г влаж. веса, у взрослых тюленей – $0,103 \pm 0,07$ мкг/г влаж. веса (рис. 2).

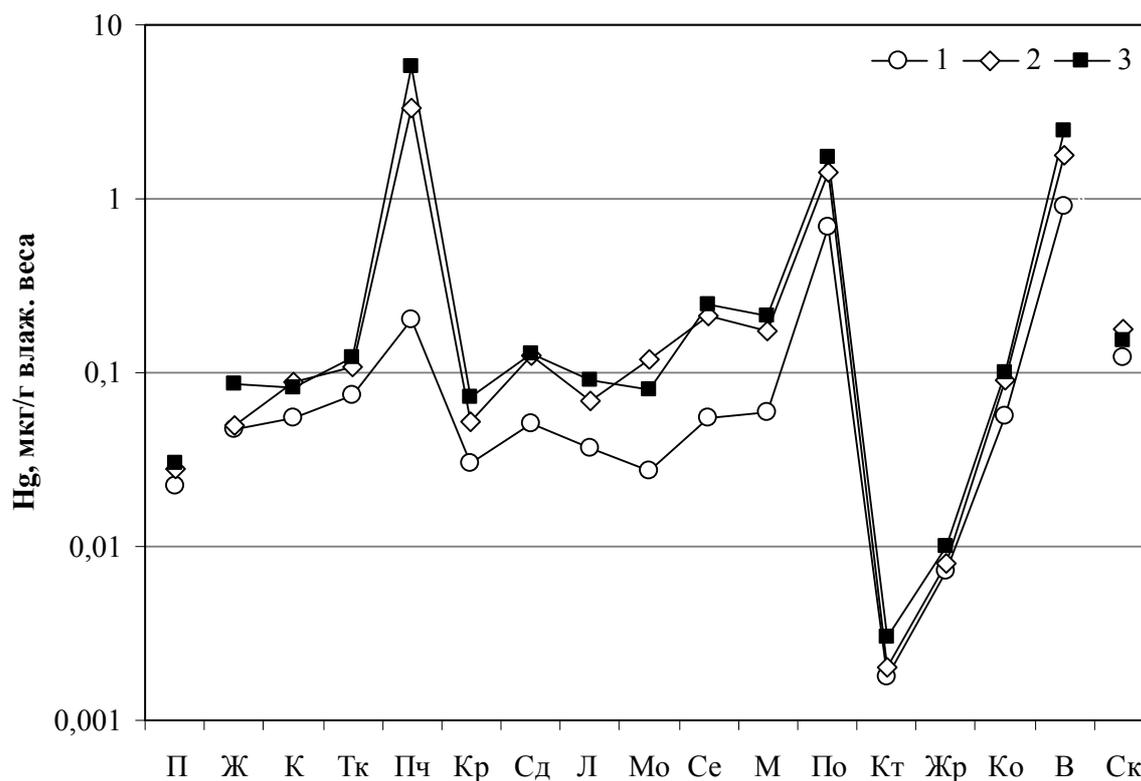


Рис. 2. Средняя концентрация общей ртути в органах и тканях разновозрастных байкальских тюленей. 1 – первородки (1–1,5 месяца), 2 – неполовозрелые (1–2 года), 3 – взрослые – (8 лет); П – пища (щенки – молоко; 1–8-летние – рыба), Ж – желудок, К – тонкий отдел кишечника, Тк – толстый отдел кишечника, Пч – печень, Кр – кровь, Сд – сердце, Л – лёгкие, Мо – мозг, Се – селезёнка, М – мышечная ткань, По – почки, Кт – костная ткань; Жр – подкожный жир, Ко – кожа (эпидермис + дерма), В – остевые волосы, Ск – содержимое кишечника (фекалии).

Сравнительный анализ показал высокую степень сходства в накоплении ртути органами и тканями неполовозрелых и взрослых тюленей ($R = 0,99$, $p < 0,000001$), значительно меньшая корреляция наблюдается между неполовозрелыми и первогодками ($R = 0,60$, $p < 0,023$) и ещё более низкая – между взрослыми и первогодками ($R = 0,50$, $p < 0,071$).

Рассмотрим подробнее органы выделения (почки, печень) и волосяной покров, в которых отмечаются максимальные уровни накопления ртути.

Волосяной покров байкальской нерпы, как и других морских и наземных млекопитающих, играет значительную роль в накоплении и последующем ежегодном удалении ртути вместе со старым волосом во время процесса линьки. Наиболее показательно этот процесс наблюдается у новорожденных бельков байкальской нерпы. Как известно, они рождаются с густым белым эмбриональным мехом, который в первый месяц самостоятельной жизни тюленя выполняет важную защитную функцию в экстремальных условиях сибирской зимы. Через 2–3 недели после рождения у первогодков нерп начинается первая линька. В этот период имеется возможность отобрать пробы как эмбрионального волосяного покрова, так и новых подросших вторичных волос с одного и того же первогодка.

Результаты химического анализа показали наибольший уровень накопления ртути в волосяном покрове первогодков по сравнению с другими органами и тканями. Концентрация ртути в эмбриональных волосах была соизмерима с её концентрацией в волосах взрослых животных (табл. 2).

Столь высокое содержание ртути в эмбриональном волосе можно объяснить тем, что во время беременности (11 месяцев) ртуть длительное время поступает в эмбрион из питающей его материнской крови. Следует отметить, что концентрация ртути в крови самок в среднем в два раза превышает её концентрации в пищевых объектах разновозрастных байкальских тюленей – молоке и рыбе (см. рис. 2). Как

показано в работе [29], среднее процентное содержание органических метилированных форм ртути в рыбах различных трофических статусов оз. Байкал находится на уровне 92–95 %. То есть с объектами питания (пелагическими рыбами) в организм взрослых самок байкальских тюленей поступает преимущественно метилированная ртуть, которая благодаря липофильности способна проникать через клеточные мембраны. Плацентарный барьер также не является преградой для проникновения метилированных форм ртути в развивающийся эмбрион [14; 22]. Следовательно, во время внутриутробного развития эмбрион получает от матери значительное количество ртути, которая аккумулируется главным образом в эмбриональном волосяном покрове.

Через месяц после рождения эмбриональные волосы первогодков уже находятся в фазе регрессии и выпадения, в то время как остевые вторичные волосы активно растут в результате интенсивного деления клеток матрикса в основании волосяного фолликула. В этот период интенсивных обменных процессов в волосяных фолликулах значительно увеличивается размер перифолликулярных сосудов [10], и как следствие, растёт интенсивность кровоснабжения. По всей вероятности, именно во время анагеновой фазы происходит основная элиминация ртути из крови в волосяной покров. Этот факт подтверждают данные, приведенные в таблице 2: у первогодков байкальских тюленей за 2–3 недели роста остевых волос концентрации ртути в них достигают величин, на 1–2 порядка превышающих её содержание в большинстве органов и тканей (см. рис. 2). Подобный механизм выведения ртути в волосяной покров в период фазы анагена, вероятно, присущ и взрослым особям, так как линька (следовательно, рост волос) байкальских тюленей происходит только раз в году. Сравнение концентраций ртути в пробах волосяного покрова, отобранных у взрослых тюленей в различные периоды года, достоверных отличий не показало, что еще раз подтверждает вышесказанное.

Таблица 2

Концентрация ртути (мкг/г сух. веса) в волосяном покрове байкальских тюленей

| Возрастная группа | Среднее±SD | Медиана | Min | Max |
|-------------------|-------------|---------|-------|-------|
| Первогодки 1* | 2,323±0,860 | 2,052 | 1,612 | 3,575 |
| Первогодки 2** | 0,843±0,192 | 0,851 | 0,640 | 1,028 |
| Взрослые | 2,440±1,008 | 2,240 | 1,538 | 3,740 |

* эмбриональные волосы, ** подрастающие вторичные остевые волосы

Таким образом, волосяной покров байкальских тюленей, помимо защитной, выполняет очень важную функцию выведения ртути из организма. Причём процесс поступления ртути в волосяной фолликул, а затем в стержень волоса, вероятно, происходит не пассивно с притоком крови, а идёт активно и избирательно. Об этом свидетельствует низкий уровень содержания ртути в органах и тканях с более интенсивным кровоснабжением, а также незначительные концентрации этого элемента в эпидермисе и дерме, окружающих волосяные фолликулы. Эффективный механизм удаления ртути из организма тюленей через волосяной покров даёт ластоногим адаптивное преимущество к условиям ртутного загрязнения по сравнению с китообразными, не имеющих волос на теле.

Печень и почки, являясь детекторами, фильтрами и трансформаторами токсических веществ, выполняют важную функцию контроля уровня накопления ртути в организме нерпы. Эти органы способны аккумулировать концентрации ртути на порядки, превышающие её содержание в других органах и тканях тюленей. Здесь происходит частичная фиксация ртути посредством её связи с нуклеинами [4; 25].

Уровни концентраций ртути в почках неполовозрелых и взрослых тюленей соизмеримы между собой, превышая в 2–3 раза её содержание в почках у годовиков. Однако в отличие от старших групп тюленей, у которых уровень биоаккумуляции ртути в печени значительно выше по сравнению с почками, у годовиков наблюдается противоположная закономерность – концентрация ртути в почках в среднем в 3,3 раза выше, чем в печени (см. рис. 2). Вероятно, такие отличия связаны с отставанием физиологической активности печени в ходе эмбриогенеза, с молочным питанием годовиков и разной «инерционностью» аккумуляции ртути этими органами в первые месяцы постэмбрионального развития.

Печень принимает на себя основную ртутную нагрузку, концентрация ртути в ней может достигать у байкальских тюленей 30,3 мкг/г сух. веса [27]. В таблице 3 приведены данные по содержанию ртути в печени 42 исследованных разновозрастных тюленей.

В ткани печени тюленей ртуть распределяется достаточно равномерно. Проведённый анализ содержания ртути в четырёх различных участках печени взрослой самки (в трёх долях и участке, прилегающем к желчному пузырю) показал близкие результаты. Незначительные вариации концентраций ртути также обнаружены при анализе 15 образцов из различных участков печени годовика (табл. 4).

Важную роль в регуляции уровня ртути в организме выполняют купферовские клетки печени, выстилающие синусоиды печёночной дольки [17]. Выполняя барьерную функцию, фагоцитарные купферовские клетки способны захватывать, частично восстанавливать и откладывать ртуть, поступающую в печень с кровью из кишечника [5]. Функцию детоксикации и трансформации ртути в печени также выполняют и гепатоциты, обеспечивающие желчегонный процесс. Благодаря выделительной функции печени, значительная часть ртути поступает в кишечник вместе с желчью. В дальнейшем часть ртути, прошедшей через печёночный фильтр, может вторично участвовать в гепато-энтеральной циркуляции, вновь всасываясь кишечником [4]. Однако сравнение концентраций ртути в пищевых объектах и содержанием прямой кишки исследованных байкальских нерп указывает на то, что существенная часть ртути, выводимой желчью, удаляется из организма путём дефекации (см. рис. 2). Следует заметить, что у байкальских тюленей активно происходит процесс выделения желчи и связано это в первую очередь с тем, что объектами их питания (более 90 %) служат пелагические коттоидные рыбы – малая и большая голомянки, имеющие очень высокое процентное содержание липидов (до 43 % от массы тела) [9]. Молоко нерпы также имеет высокую жирность – более 40 % [6]. Такие обогащенные липидами объекты питания стимулируют желчегонный процесс, а, следовательно, и процесс выведения ртути из печени. Невысокое содержание ртути в мышечной ткани исследованных разновозрастных байкальских тюленей, с одной стороны, свидетельствует об эффективной барьерной роли печени, с другой – об активном синтезе в мышцах, печени и почках металлотиионов – низкомолекулярных белков, участвующих в детоксикации и регуляции уровня ртутной нагрузки.

Сравнительный анализ концентраций ртути в печени пресноводных тюленей семейства Phocidae показал значительные отличия в накоплении этого элемента у разных видов. У кольчатых тюленей (*Phoca hispida saimensis*) из озера Сайма в Финляндии концентрация ртути в печени варьировала от 240 до 1698 (в среднем 766) мкг/г сух. веса [16], а у кольчатого тюленя из Ладожского озера (*Phoca hispida ladogensis*) – от 1,37 до 568 (в среднем 118) мкг/г сух. веса [18]. В нашем исследовании концентрация ртути в печени байкальской нерпы (*Phoca sibirica*) изменялась от 0,27 до 19,1 (в среднем 4,16) мкг/г сух. веса, что на 2 порядка ниже по сравнению с аналогичными результатами в озёрах Сайма и Ладога.

Биоконцентрация ртути и других химических элементов в печени байкальских тюленей, корреляционные зависимости накопления ртути

Вычисленный коэффициент биоконцентрации ($CF = 40 \times 10^5$) для ртути в печени разновозрастных байкальских нерп (0,125–15 лет) демонстрирует высокую степень усвоения ртути организмом из всех источников поступления (пища, вода, воздух), в значительной степени превышающую выведение в ходе биологических процессов. По сравнению с ртутью, фактор концентрации других элементов варьировал в промежутке от $<3,5 \times 10^2$ для Si, Sr, Ba до $3,5 \times 10^4$ для Cd (рис. 3).

Таким образом, ртуть имеет наибольший фактор биоконцентрации в сравнении с други-

ми химическими элементами, содержащимися в печени байкальской нерпы. Ртуть, несмотря на свою концентрацию в организме байкальской нерпы, может быть определена как элемент, попадающий под категорию токсичных, либо потенциально токсичных, т. е. элементов, которые имеют значение CF больше, чем $3,5 \times 10^4$ [11].

Наши результаты соответствуют данным Mackey (1995) [28], где значение коэффициента обогащения (EF) для печени чёрных дельфинов (*Globicephala melas*), белухи (*Delphinapterus leucas*) и кольчатого тюленя (*Phoca hispida*) были поделены на три основные категории: электролиты (самое низкое значение EF), жизненно важные элементы и токсичные элементы с наибольшим значением EF

Таблица 3

Концентрация ртути (мкг/г сух. веса) в печени разновозрастных байкальских тюленей

| Возрастная группа | Среднее±SD | Медиана | Min | Max |
|-------------------|------------|---------|------|------|
| Первогодки | 0,53±0,31 | 0,43 | 0,27 | 1,4 |
| Неполовозрелые | 5,34±3,91 | 4,09 | 2,21 | 9,72 |
| Взрослые самки | 6,65±4,30 | 5,97 | 1,82 | 19,1 |
| Взрослые самцы | 4,08±1,23 | 4,31 | 1,81 | 6,1 |
| Все | 3,7±3,59 | 3,23 | 0,27 | 19,1 |

Таблица 4

Распределение ртути (мкг/г влаж. веса для взрослой самки, мкг/г сух. веса для первогодка) в печени байкальских тюленей

| Возрастная группа | Среднее±SD | Медиана | Min | Max |
|-------------------|-------------|---------|-------|-------|
| Первогодок | 0,551±0,037 | 0,546 | 0,495 | 0,628 |
| Взрослая самка | 6,431±0,320 | 6,350 | 6,150 | 6,875 |

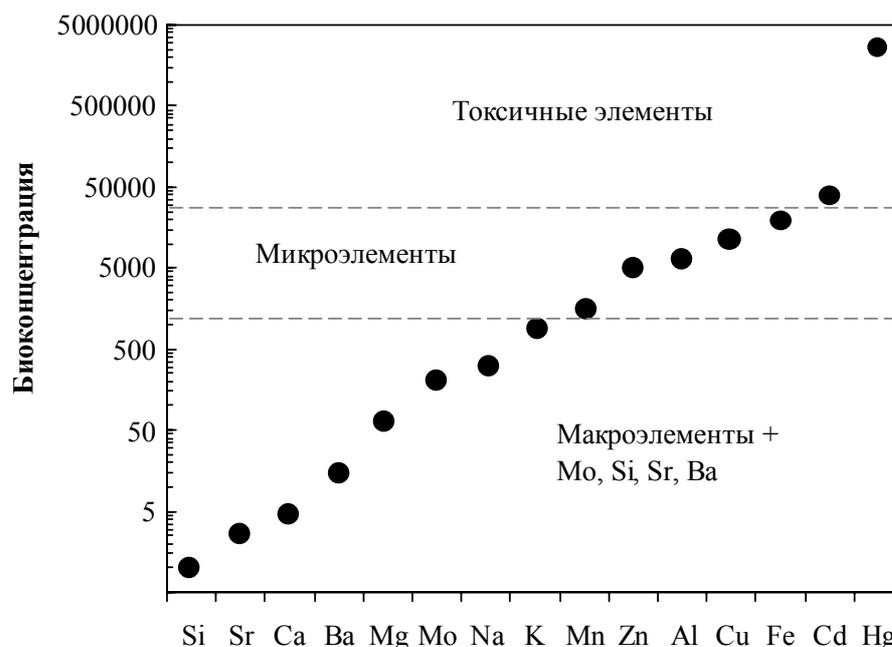


Рис. 3. Биоконцентрация химических элементов в печени байкальской нерпы относительно их концентрации в воде оз. Байкал

Концентрация ртути позитивно коррелировала ($p < 0,001$) с биометрическими параметрами, такими как длина и масса тела, толщина и масса жирового слоя, объём тела. Содержание ртути находилось в положительной корреляционной зависимости с содержанием Cd ($p < 0,00001$) и в отрицательной – Mn ($p < 0,01$), Mo ($p < 0,01$) и Zn ($p < 0,05$). Аккумуляция ртути в организме нерпы нарастает с возрастом, в то время как концентрация Mn, Zn и Mo была выше у первогодков, чем у взрослых нерп [25]. Результаты исследований показали сильную статистическую зависимость концентрации ртути от возраста ($p < 0,01$, $F = 8,5$) и пола ($p < 0,0000001$, $F = 44,9$) исследуемых тюленей, а также значительную степень взаимодействия между этими переменными ($p = 0,014$, $F = 5,3$). В нашем исследовании обнаружены более высокие концентрации ртути в организмах самок по сравнению с самцами. Связанные с половыми различиями отклонения в уровне концентрации ($p = 0,01$, $F = 8,27$) могут быть объяснены большим количеством ртути, попадающей в организм с пищей у самок, чем у самцов [27], возможно, из-за необходимости для самок получать больше энергии для нормального протекания репродуктивного процесса. С другой стороны, у самок есть дополнительная возможность выделения ртути из организма – роды. Выведение ртути с плодом в процессе родов может считаться важным фактором, влияющим на более значительные изменения концентраций ртути в организмах самок по сравнению с самцами.

Для тюленей, обитающих в Северном, Среднем и Южном Байкале, достоверных отличий в накоплении ртути органами и тканями не обнаружено. Также не было установлено различий в концентрациях ртути между пойманными нерпами и найденными погибшими. Низкий уровень содержания ртути в байкальских тюленях и отсутствие разницы между бассейнами Байкала отражает низкую концентрацию ртути в байкальской воде, о которой сообщалось ранее в работах [19; 21]. Это позволяет предполагать, что находящаяся в оз. Байкал ртуть имеет в основном природное происхождение.

Биомагнификация и биоконцентрация ртути в пелагической пищевой цепи оз. Байкал

Пелагическая пищевая цепь озера Байкал, конечным звеном которой является млекопитающее – байкальская нерпа, может рассматриваться как показательная модель процесса миграции ртути от гидробионтов низших трофиче-

ских уровней к высшим в незагрязнённых природных водоёмах. Для оценки уровня биоаккумуляции ртути байкальскими гидробионтами в данной работе мы использовали упрощённую модель трофических связей в пелагиали озера.

Диатомовые водоросли (*A. baicalensis*) – самые массовые представители фитопланктона Байкала, способны аккумулировать ртуть только из воды. Они являются продуцентами и относятся к первому трофическому уровню. *A. baicalensis* служит пищей мезозoopланктону и частично макрозоопланктону. *E. baicalensis* и *M. branickii* – доминирующие виды зоопланктона открытых вод оз. Байкал, являются важной составляющей диеты организмов, находящихся на высших уровнях трофической цепочки. Изотопные показатели $\delta^{15}\text{N}$ для мезозoopланктона (*E. baicalensis*) несколько ниже, а для макрозоопланктона (*M. branickii*) незначительно выше второго трофического уровня [26]. Связано это с тем, что пелагическая амфипода *M. branickii* имеет смешанный фитозoopланктонный тип питания, т. е. пищевыми объектами ему служат как диатомовые водоросли, так и мезозoopланктон [1]. Таким образом, *E. baicalensis* и *M. branickii* являются главными нехищными «потребителями», а уровень $\delta^{15}\text{N}$ в целом позволяет говорить об их втором трофическом уровне. В пелагической пищевой цепи оз. Байкал планктонофаг (*C. dybowskii*) рассматривается как вторичный потребитель (трофический уровень близок к третьему), питающийся в основном *M. branickii*, *E. baicalensis* и частично личинками пелагических рыб [3]. В свою очередь, *C. dybowskii* является основным объектом питания байкальских тюленей (*P. sibirica*) [6], занимающих четвёртый трофический уровень [26].

Учитывая описанные выше трофические отношения, можно утверждать, что полученные результаты (табл. 5) говорят о слабой биомагнификации ртути на низших трофических уровнях (фитопланктон – мезозoopланктон, мезозoopланктон – макрозоопланктон) в сравнении с высшими трофическими звеньями «рыба – нерпа», где BMF достигает 11,6. BMF ртути на отрезке пищевой цепи «макрозоопланктон – рыба» существенно выше, чем на нижних трофических уровнях, но несоизмеримо меньше коэффициента биомагнификации в тюленях (табл. 5). Степень биомагнификации ртути гидробионтами с различным трофическим статусом сильно отличается. Это, вероятно, связано с разным процентным содержанием наиболее мобильных и трудно выводимых метилированных форм ртути в их объектах питания.

Биоконцентрация (CF) и биомагнификация (BMF) ртути в пелагической трофической цепи оз. Байкал

| Трофический уровень | Виды | n | Hg, мкг/г влажного веса | CF×10 ⁵ | BMF |
|---|--|----|-------------------------------|--------------------|------|
| Фитопланктон (продуцент) | <i>Aulacoseira baicalensis</i> (фитопланктон) | 4 | 0,0031 | 0,12 | 1,6 |
| Мезозoopланктон (консумент 1 порядка) | <i>Epischura baicalensis</i> (мезозoopланктон) | 7 | 0,005 | 0,20 | |
| Макрозоопланктон (как филь- ратор – консумент 1 порядка, как хищник – консумент 2 по- рядка) | <i>Macrohectopus branickii</i> (макрозоопланктон) | 5 | 0,0055 | 0,22 | 1,1 |
| | | | | | 5,1 |
| Рыбы (консумент 2 порядка) | <i>Comephorus dybowski</i> (пелагические рыбы) | 51 | 0,028 | 1,12 | 11,6 |
| Нерпа (консумент 3 порядка) | <i>Phoca sibirica</i> (байкальская нерпа) | 7* | 0,325 | 13,0 | |

*Для расчётов использовался показатель средней концентрации ртути во взрослых нерпах; средняя концентрация ртути в воде Байкала – 0,25 нг/л [19].

Похожие результаты были получены при изучении биомагнификации стабильных хлор- и броморганических соединений в водных пищевых цепях Арктики. Фактор биомагнификации, основанный на отношениях хищник – жертва, был на порядки выше в высших звеньях морской пищевой цепи Арктики (морские птицы и тюлени) в сравнении с нижними звеньями – зоопланктоном и рыбой [15]. Причинами такого явления были названы потребность в большем количестве энергии, более высокое положение в трофической цепи и более продолжительный жизненный цикл теплокровных морских млекопитающих и птиц по отношению к пойкилотермным беспозвоночным и рыбе. Ещё одно важное различие между двумя тепловыми группами животных, влияющее на значение фактора биомагнификации – это прямое взаимодействие ртути с водой через дыхательные и другие поверхности, незначительно выраженное у тюленей [15].

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что максимальная аккумуляция ртути происходит в печени и почках, являющихся барьерами для проникновения значительного количества ртути в другие органы и ткани байкальских тюленей. Эффективным механизмом элиминации ртути из организмов тюленей является её выведение в волосяной покров и последующее удаление в период линьки.

Обнаружена низкая концентрация ртути в гидробионтах пелагической пищевой цепи оз. Байкал. Коэффициент биоконцентрации (CF) и биомагнификации (BMF) описывают возможности биоаккумуляции ртути в пелагической пищевой цепи оз. Байкал. Самая высокая степень биомагнификации ртути зафиксирована на высших ступенях трофического взаимодействия (рыба – нерпа). Это, в первую очередь, связано с процентным содержанием метилированных форм ртути в пищевых объектах и большим её потреблением тюленями с пищей, благодаря интенсивному обмену веществ.

Наиболее важные биологические факторы, влияющие на уровень накопления ртути в печени – это пол и возраст байкальской нерпы. Наше исследование не обнаружило различий в концентрациях ртути у нерп из разных районов оз. Байкал, как и между пойманными и найденными погибшими тюленями. Так как нерпа представляет собой высшее звено трофической цепочки Байкала, полученные данные отражают ртутное загрязнение всей экосистемы озера. На основании результатов исследования можно утверждать, что Байкал в настоящее время не подвержен значительному техногенному ртутному загрязнению. Дальнейшее изучение форм и изотопии ртути в гидробионтах оз. Байкал поможет более детально изучить процессы миграции, аккумуляции и трансформации этого элемента в трофических цепях незагрязнённых природных водоёмов.

Авторы признательны аналитикам Института геохимии СО РАН Л. Д. Андрулайтис и

О. С. Рязанцевой и аналитикам Медицинского Университета Гданьска. Исследование выполнено при поддержке СО РАН (Интеграционный проект № 122), Национального Института Наук о Вселенной (INSU), Франция (проект MerLaVa программы Cytrix EC2CO), Национального Комитета по Научным Исследованиям, Польша (проект № 6 P04F 108 2).

Литература

1. Атлас и определитель пелагиобионтов Байкала (с краткими очерками по экологии) / О. А. Тимошкин [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1995. – 694 с.
2. Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны (ртуть, радон и торон) / П. В. Коваль [и др.] // ДАН. – 2006. – Т. 409, № 3. – С. 389–393.
3. Гурова Л. А. Питание и пищевые взаимоотношения пелагических рыб и нерпы Байкала / Л. А. Гурова, В. Д. Пастухов. – Новосибирск : Наука, 1974. – 185 с.
4. Моисеенко Т. И. Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты / Т. И. Моисеенко. – М. : Наука, 2009. – 400 с.
5. Немова Н. Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб / Н. Н. Немова. – М. : Наука, 2005. – 140 с.
6. Пастухов В. Д. Нерпа Байкала / В. Д. Пастухов. – Новосибирск : Наука, 1993. – 272 с.
7. Пастухов М. В. Особенности распределения ртути в снеговом покрове акватории Южного Байкала / М. В. Пастухов, В. И. Гребенщикова // Вопр. экологической безопасности и охраны окружающей среды : материалы 3-й межрегион. науч.-практ. конф. (Иркутск, 3–5 июня 2010 г.). – Иркутск, 2010. – С. 70–71.
8. Ртуть в биогеохимическом цикле Братского водохранилища и экологические последствия ртутного загрязнения / П. В. Коваль [и др.] // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы. – М. : ИФК и БПП РАН, 2008. – С. 99–121.
9. Стариков Г. В. Голомянки Байкала / Г. В. Стариков. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. – 93 с.
10. Хэм А. Гистология / А. Хэм, Д. Кормак. – М. : Мир, 1983. – Т. 4. – 245 с.
11. Comparison of trace element accumulation in Baikal seals (*Pusa sibirica*), Caspian seals (*Pusa caspica*) and northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) / T. Ikemoto [et al.] // Environ. Pollut. – 2004. – Vol. 127. – P. 83–97.
12. Correlation of natural and technogenic mercury sources in the Baikal polygon / P. V. Koval. – Russia. J. Geochem. Expl. – 1999. – Vol. 66 (1–2). – P. 277–290.
13. Das K. D. V. Heavy metals in marine mammals / K. D. V. Das, S. Pillet, J.-M. Bouqueneau // Toxicology of Marine Mammals. – Taylor&Francis, London and N. Y., 2003. – P. 135–167.
14. Elements and their Compounds in the Environment / G. Drasch [et al.] // Wiley-Vch Verlag GmbH&Co KGaA, Weinheim. – 2004. – P. 931–1005.
15. Food web magnification of persistent organic pollutants in poikilotherms and homeotherms / H. Hop [et al.] // Environ. Sci. Technol. – 2002. – Vol. 36. – P. 2589–2597.
16. Kari T. Mercury and selenium contents of seals from fresh and brackish waters in Finland / T. Kari, P. Kauranen // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 1978. – Vol. 19. – P. 273–280.
17. Kuntz E., Kuntz H.-D. Hepatology. Principles and Practice: History, Morphology, Biochemistry, Diagnostics, Clinic, Therapy / E. Kuntz, H.-D. Kuntz. – Springer : 2th ed., 2005. – 906 p.
18. Medvedev N. Levels of heavy metals in seals of Lake Ladoga and the White Sea / N. Medvedev, N. Panichev, H. Hyvärinen // Sci. Total Environ. – 1997. – Vol. 206. – P. 95–105.
19. Meuleman C. Mercury speciation in Lake Baikal / C. Meuleman, M. Leermakers, W. Baeyens. – Water Air Soil Pollut. – 1995. – Vol. 80. – P. 539–551.
20. Mercury distribution in the bottom and stream sediments of Lake Baikal, water reservoirs Angara river cascade, and adjacent drainage basins / P. V. Koval [et al.] // Lake Baikal. – Elsevier, 2000. – P. 165–175.
21. Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs / K. K. Falkner [et al.] // Limnol. Oceanogr. – 1997. – Vol. 42. – P. 329–345.
22. Organometallic compounds in the environment. Principles and reactions / Ed. by P. J. Craig. – Longman Group Limited, 1986. – 368 p.
23. Potential relation between mercury concentrations and necropsy findings in cetaceans from German waters of the North and Baltic Seas / U. Siebert [et al.] // Mar. Pollut. Bull. – 1999. – Vol. 38. – P. 285–295.
24. Preliminary results about contaminants in the biota of Lake Baikal / A. M. Beim [et al.] // Aquat. Ecosyst. Health Manage. – 2000. – Vol. 3. – P. 245–248.
25. Relationships and bioaccumulation of chemical elements in Baikal seal (*Phoca sibirica*) / T. Ciesielski [et al.] // Environ. Pollut. – 2006. – Vol. 139. – P. 372–384.
26. Stable isotope analyses of the pelagic food web in Lake Baikal. / K. Yoshii [et al.] // Limnol. Oceanogr. – 1999. – Vol. 44. – P. 502–511.
27. Trace element accumulation in Baikal seal (*Phoca sibirica*) from the Lake Baikal / I. Watanabe [et al.] // Environ. Pollut. – 1996. – Vol. 94. – P. 169–179.
28. Trace element concentrations in cetacean liver tissues archived in the National Marine Mammal Tissue Bank / E. A. Mackey [et al.] // Sci. Total Environ. – 1995. – Vol. 175. – P. 25–41.
29. Tracing Sources and Bioaccumulation of Mercury in Fish of Lake Baikal – Angara River Using Hg Isotopic Composition / V. Perrot [et al.] // Environ. Sci. Technol. – 2010. – Vol. 44, N 21. – P. 8030–8037.

Distribution and bioaccumulation of mercury in Baikal seal

M. V. Pastukhov¹, V. N. Eпов², T. Ciesielski³, V. I. Alieva¹, V. I. Grebenshchikova¹

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

² Interdisciplinary Institute Environment and Materials Studies, Pau, France

³ Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

Abstract. The article presents research results on total mercury distribution and bioaccumulation in organs and tissues of Baikal seal of different ages. The research demonstrates effective mercury elimination through the hair coat. Hg bioconcentration level in the seal liver was shown to be maximal as compared with other elements. Most important biological factors, those affect Hg concentration level in liver, are sex and age of the Baikal seal. Hydrobionts of the Baikal pelagic chain are shown to have a low Hg concentration level. The highest Hg bioaccumulation rate is observed at the upper trophic levels (fish-seal).

Key words: Baikal seal, mercury, organs and tissues, food chains, Lake Baikal.

Пастухов Михаил Владимирович
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
научный сотрудник
тел.: (3952) 51-14-42, факс: (3952) 42-66-00
E-mail: mpast@igc.irk.ru

Pastukhov Mikhail Vladimirovitch
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1 a Favorsky St., Irkutsk, 664033
research scientist
phone: (3952) 51-14-42, fax: (3952) 42-66-00
E-mail: mpast@igc.irk.ru

Эпов Владимир Николаевич
Междисциплинарный институт исследований
окружающей среды и материалов
64053, г. По, проспект Пьера Анжюа, 2, Франция
кандидат химических наук
тел.: 33 (0) 5-40-17-50-3,
факс: 33 (0) 5-59-40-77-81
E-mail: vladimir.epov@univ-pau.fr

Eпов Vladimir Nikolaevitch
Interdisciplinary Institute of Environmental
and Materials Studies
2, Pierre Angot av., Pau, 64053, France
Ph.D. in Chemistry
phone: 33 (0) 5-40-17-50-3,
fax: 33 (0) 5-59-40-77-81
E-mail: vladimir.epov@univ-pau.fr

Чешельский Томаш Мачей
Норвежский университет науки и технологий,
отделение биологии
NO-7491, г. Трондхейм, ул. Høgskoleringen, 5,
Норвегия
кандидат биологических наук
тел.: +4773551289; факс: +47 73596100
E-mail: tomasz.ciesielski@bio.ntnu.no

Ciesielski Tomasz Maciej
Department of Biology, Norwegian University
of Science and Technology
5 Høgskoleringen St., Trondheim, NO-7491
Norway
Ph.D. in Biology
phone: +4773551289; fax: +47 73596100
E-mail: tomasz.ciesielski@bio.ntnu.no

Алиева Вера Игоревна
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
кандидат геолого-минералогических наук, младший
научный сотрудник
тел.: (3952) 51-14-42, факс: (3952) 42-66-00
E-mail: alieva@igc.irk.ru

Alieva Vera Igorevna
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1 a Favorsky St., Irkutsk, 664033
Ph.D. in Geology and Mineralogy
junior research scientist
phone: (3952) 51-14-42, fax: (3952) 42-66-00
E-mail: alieva@igc.irk.ru

Гребенщикова Валентина Ивановна
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
тел.: (3952) 42-66-00, факс: (3952) 42-66-00
E-mail: vgreb@igc.irk.ru

Grebenshchikova Valentina Ivanovna
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1 a Favorsky St., Irkutsk, 664033
D. Sc. in Geology and Mineralogy,
Head of Laboratory
phone: (395 2) 51-14-42, fax: (395 2) 42-66-00
E-mail: vgreb@igc.irk.ru