

УДК 556.55(235.47)

Е.Н. Чернова^{1,2}, В.М. Шулькин¹, Е.В. Лысенко¹, Т.Н. Луценко¹,
А.Г. Болдескул^{1*}

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7;

² Дальневосточный федеральный университет,
690000, ул. Суханова, 8

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕСНЫХ И СОЛОНОВАТОВОДНЫХ ОЗЕР ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ

Изучен химический состав поверхностных вод пресных и солоноватых озер восточной части Сихотэ-Алиня. Показано, что содержание главных ионов — хлоридов, сульфатов, натрия — формируется под влиянием морской среды. Повышенное содержание этих макроионов отличает пресные озера восточного Сихотэ-Алиня от озер Восточно-Европейской равнины. Различия между содержанием тяжелых металлов в пресных и солоноватых озерах практически отсутствуют, кроме марганца, концентрация которого в пресных озерах выше. Озера с высоким уровнем заболоченности водосборов отличаются повышенными концентрациями растворенного органического углерода, а также железа и марганца, уровень которых зависит от водного режима. Накопление металлов в озерном планктоне — создателе первичной продукции — в озерах восточного Сихотэ-Алиня зависит главным образом от его потребности в элементах и практически не зависит от содержания микроэлементов в водной среде. В воде наиболее антропогенно-измененного и загрязненного свинцом оз. Васьковского количество свинца (суммарно в растворенной и взвешенной форме) повышено, но не превышает ПДК для питьевых вод.

Ключевые слова: главные ионы, микроэлементы, озера восточного Сихотэ-Алиня, растворенный органический углерод, горнорудная промышленность.

Chernova E.N., Shulkin V.M., Lysenko E.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G. Hydrochemical and biogeochemical features of freshwater and brackish lakes in eastern Sikhote-Alin // *Izv. TINRO.* — 2014. — Vol. 178. — P. 157–172.

Concentration of major ions and trace metals dissolved and suspended in water and trace metals in plankton of freshwater (Vaskovskoye, Golubichnoye, Yaponskoye) and brackish (Dukhovskoye, Krugloye, Mramornoye, Blagodati) lakes of eastern Sikhote-Alin is determined in July 2011–2012. The Lakes Golubichnoye and Blagodati are included in the Sikhote-Alin

* Чернова Елена Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: elena@tig.dvo.ru; Шулькин Владимир Маркович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: shulkin@tig.dvo.ru; Лысенко Евгения Валерьевна, младший научный сотрудник, e-mail: lysenko_tig@mail.ru; Луценко Татьяна Николаевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, e-mail: luts@tig.dvo.ru; Болдескул Анна Геннадьевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, e-mail: boldeskul@tig.dvo.ru.

Chernova Elena N., Ph.D., senior researcher, e-mail: elena@tig.dvo.ru; Shulkin Vladimir M., D.Sc., head of laboratory, e-mail: shulkin@tig.dvo.ru; Lysenko Eugenia V., junior researcher, e-mail: lysenko_tig@mail.ru; Lutsenko Tatiana N., Ph.D., researcher, e-mail: luts@tig.dvo.ru; Boldeskul Anna G., Ph.D., researcher, e-mail: boldeskul@tig.dvo.ru.

State Natural Biosphere Reserve. Anions are detected by the liquid chromatography (Shimadzu LC-10AVP), cations and metals are analyzed by the atomic absorption spectrophotometry (AAS Shimadzu 6800), and carbon concentration is measured by the method of thermocatalytic oxidation with infrared registration (TOC-VCPN, Shimadzu). The freshwater lakes of eastern Sikhote-Alin are distinguished by heightened concentrations of chlorides, sulfates, and sodium as compared with lakes of East-European Plain, mainly because of aerial transfer of ions from the sea. The ions concentration in brackish lakes is determined by direct penetration of seawater. Difference of the heavy metals concentration between freshwater and brackish lakes is negligible, except the manganese with higher concentration in the freshwater lakes. Lakes with wetlands in their drainage area have high concentrations of dissolved organic carbon, iron and manganese, which are depended on water regime. Concentrations of trace metals in the lakes water are low because of its pluvial origin (rainwater transforms slightly in the process of filtration through effusive rocks), with exception of Lake Vaskovskoe located in the area of mining and processing the polymetallic and borosilicate ores, close to the lead smeltery in Rudnaya Pristan stopped in 2009: the lead concentration in the water of this lake is heightened, both in dissolved and suspended forms, though does not exceed the maximal permissible concentration for drinking water. Accumulation of metals by plankton is determined mainly by biological need of the plankton in these elements and practically doesn't depend on their concentration in water.

Key words: anion, cation, heavy metal, suspended solid, dissolved organic carbon, suspended organic carbon, eastern Sikhote-Alin, Sikhote-Alin State Natural Biosphere Reserve.

Введение

Озера представляют собой природные «очистные сооружения», в которых осаждаются и аккумулируются растворенные и взвешенные формы химических соединений, как мобилизованные на водосборах, так и поступающие с атмосферными осадками. Химический состав вод малых озер более четко, чем крупных водоемов и водотоков, отражает зональную и региональную специфику условий его формирования, а также те глобальные антропогенные воздействия, которые испытывает в последнее время окружающая среда. Закономерности изменения содержания макроионов и микроэлементов в малых озерах различных природно-климатических зон от тундры до засушливых степей детально исследованы для Европейской России (Моисеенко и др., 2006; Моисеенко, Гашкина, 2007). Достаточно полно изучены гидрохимические характеристики состава озер Сибири (Леонова и др., 2007; Страховенко и др., 2010). Биогеохимические особенности озер юга Дальнего Востока России изучены на примере наиболее крупного оз. Ханка (Xiangcan, 1995; Чудаева, 2002), а также припойменных озер нижнего Амура (Шамов и др., 1998; Левшина и др., 2007). Оценке гидрохимических и микробиологических показателей озера лагунного типа побережья Татарского пролива посвящена работа Л.А. Гаретовой и Е.А. Каретниковой (2010). Особенности формирования химического состава вод малых озер Приморского края, существующих в условиях муссонного климата, изучены фрагментарно. Эти объекты представляют теоретический и практический интерес с точки зрения оценки влияния региональных климатических факторов, вследствие существенной антропогенной нагрузки на некоторые из озер, а также в связи с возможностью их рыбохозяйственного использования.

Цель данного исследования — изучение гидрохимических и биогеохимических особенностей малых озер восточного макросклона Сихотэ-Алиня, находящихся под влиянием моря и антропогенной нагрузки различной интенсивности.

Материалы и методы

Водосборные бассейны изучаемых озер (рис. 1) расположены на восточном макросклоне хребта Сихотэ-Алинь и представлены комплексом среднегорно-низкогорных, кедрово-широколиственных и широколиственных ландшафтов. Основная часть восточного макросклона Сихотэ-Алиня сложена эффузивными, интрузивными и вулканогенно-осадочными образованиями верхнего мела и палеогена. Эффузивы представлены комплексами пород среднего и кислого состава (кварцевые порфириды

и липариты, их лавы и туфы); интрузивные разности — гранитоидами палеогена, образующими крупные массивы среди пород эффузивного комплекса (Аржанова, Елпатьевский, 1990). Основная растительная формация водосборов — леса из дуба монгольского и их редколесья*.

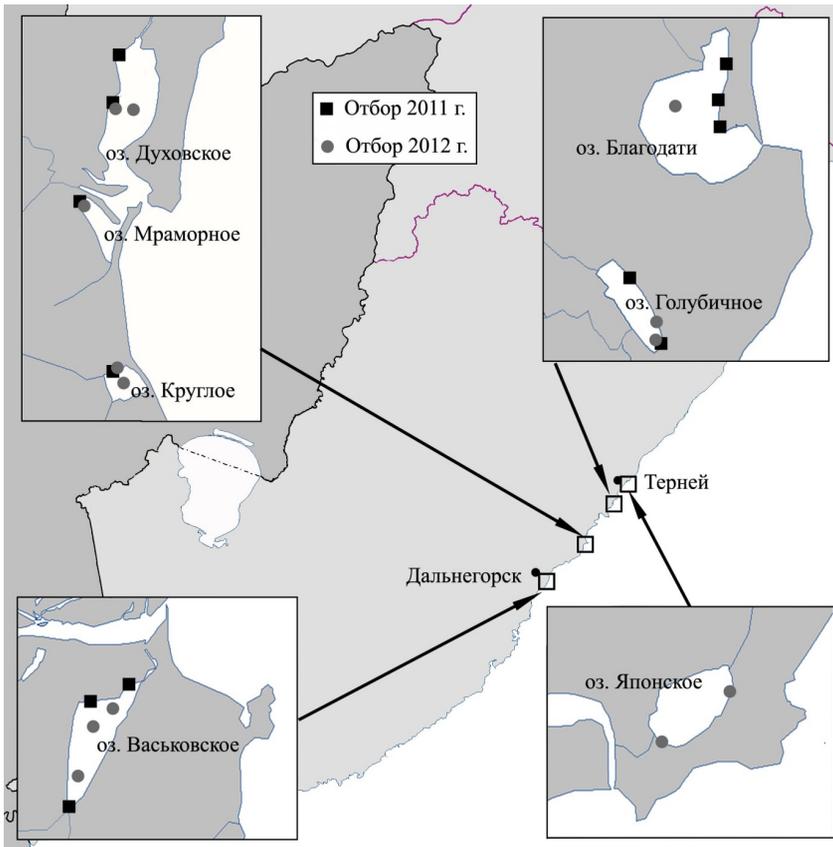


Рис. 1. Карта-схема района работ
Fig. 1. Scheme of the studied area

Климат района исследований умеренно прохладный, избыточно влажный, среднегодовое количество осадков 700–800 мм. Почвы водосборов озер Благодати, Голубичное и Японское, расположенных на территории Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника (САБЗ) — луговые глеевые, торфянисто- и торфяно-глеевые приустьевых частей долин рек. На пологих склонах это дерново-глеевые почвы на глинистом элювии. Почвы водосборов Духовских (Духовское, Мраморное, Круглое) озер относятся в основном к горно-лесным бурым сильноокислым и кислым, лесным бурым глееватым и глеево-оподзоленным; в пойменных ландшафтах это задернованные слоисто-пойменные, задернованные иловато-глеевые, дерново-перегнойные и дерново-торфянисто-глеевые почвы (Иванов, 1976).

Данные по площади акваторий и бассейнов изучаемых озер приводятся в табл. 1**. Площадь болот в водосборных бассейнах озер оценена по топографическим картам масштаба 1 : 25000.

Оз. Благодати — лагунного типа, солоноватое, отделено от бухты Удобной узким перешейком, периодически открывающимся в море протокой. Северо-западная часть озера заболочена. В северную, кутовую часть озера впадает единственный относительно крупный ручей Озерный. Грунт литорали восточного берега от кутовой, более северной, части по мере продвижения к югу меняется с песчано-илистого на каменистый.

* Атлас лесов Приморского края. Владивосток: ДВО РАН, 2005. 76 с.

** Государственный водный реестр. Электронный ресурс: <http://textual.ru/gvr>.

Морфометрические характеристики озер восточного Сихотэ-Алиня

Таблица 1

Table 1

Morphometric features of the lakes in eastern Sikhote-Alin

Озеро	Площадь акватории, км ²	Площадь водосбора, км ²	Удельный водосбор	Площадь болот, км ²	Заболоченность водосбора, %
Васьковское	0,36	15,80	43,9	0,53	3,4
Круглое	0,27	10,30	38,1	0,29	2,8
Голубичное	0,45	6,10	13,6	3,67	60,2
Японское	0,25	7,06	28,2	0,50	7,0
Мраморное	0,37	2,90	7,8	1,07	37,2
Духовское	1,47	180,0	122,4	4,40	2,4
Благодати	2,04	26,20	12,8	5,54	21,1

Практически вся восточная часть литоральной зоны занята полосой водной растительности, в том числе *Scirpus tabernaemontani*, *Potamogeton* sp., *Myriophyllum spicatum*.

Оз. Голубичное — пресное, отделено от оз. Благодати перевалом Голубичным, стока не имеет. Грунт литорали с северной и юго-восточной стороны — каменисто-песчаный, с зарослями *S. tabernaemontani*. Западная часть озера заболочена.

Оз. Японское находится в буферной зоне САБЗ, лагунного типа, пресное, соединено стоковой протокой с р. Серебрянка, впадающей в одноименную бухту. На севере в озеро впадает единственный ручей.

Озера Духовское, Мраморное и Круглое — меромиктические, лагунного типа, находятся в Тернейском районе южнее территории САБЗ, используются для рекреационных целей, их гидрологические особенности и химический состав изучались для перспектив рыбохозяйственного использования*.

Оз. Духовское — солоноватое, сильно вытянутое с севера на юг и юго-восток, соединяется протокой с бухтой Озера. Максимальная глубина озера — около 4,5 м*. В северную, наиболее заболоченную, часть озера впадает крупный ручей Третий Распадок. В южную часть озера впадает р. Кедровка. Грунт литорали северо-западного и западного берега — илисто-песчаный, по мере продвижения на юг сменяется более каменистым.

Оз. Мраморное — солоноватое, отделено от оз. Духовского перешейком, соединено с ним постоянной протокой в устьевой части. Наибольшие глубины, как и у оз. Духовского, находятся в центральной и южной частях акватории и составляют около 4 м. Грунт у северного берега — песчанистый ил с сильным запахом сероводорода, в 2011 г. — с зарослями рдестов (*Potamogeton* sp.) и урути (*M. spicatum*). Эта часть озера располагается в 30 м от грунтового участка дороги Владивосток–Терней и захлавлена автомобильными покрышками.

Оз. Круглое — небольшое, солоноватое, но поверхностный слой воды в летние месяцы ультрапресный, отделено от бухты Озера широкой песчаной косой, соединяется с морем стоковой протокой. Максимальная глубина 7,8 м. В период осеннего перемешивания на глубинах более 5 м у дна наблюдается повышенная соленость*. Грунт литорали галечный и разнозернисто-песчаный, на севере — с редкой растительностью (*S. tabernaemontani*, *Potamogeton* sp.).

Оз. Васьковское находится в Дальнегорском районе Приморского края. Происхождение озерной котловины — тектоническое. Озеро вытянуто с юга на север, пресное, является памятником природы районного значения и используется как источник питьевой воды для пос. Рудная Пристань. В южную часть озера впадает ручей, на севере находится стоковая протока, соединяющаяся с р. Рудной в ее устьевой зоне.

От свинцово-плавильного завода, расположенного в пос. Рудная Пристань и в течение XX столетия загрязнявшего аэральными выбросами низовье долины р. Рудной,

* Разработка биологического обоснования на рыбохозяйственное использование некоторых озер Тернейского района: Духовское, Мраморное, Круглое: отчет о НИР / ТИПРО. № 21718. Владивосток, 1990. 37 с.

оз. Васьковское отгорожено небольшим хребтом, что снижает уровень нагрузки (Аржанова, Елпатьевский, 1990). Однако донные отложения и гидробионты озера содержат повышенные концентрации Zn и Pb (Богатов, Богатова, 2009; Чернова и др., 2014), что указывает на достаточно ошутимое загрязнение водосбора и акватории оз. Васьковского металлами.

Пробы воды были отобраны во второй половине июля в 2011 и 2012 гг. вдоль восточного песчаного берега с севера на юг озер Благодати и Васьковского, в северной и юго-восточной части оз. Голубичного, у северо-западного и западного берега оз. Духовского, в озерах Мраморном и Круглом. Пробы планктона отбирались у восточного берега оз. Благодати, в юго-восточной части оз. Голубичного, у западного берега оз. Духовского, в озерах Мраморном и Круглом (рис. 1).

Синоптическая ситуация летом 2011 и 2012 гг. различалась. Согласно данным метеостанции пос. Рудная Пристань, в Дальнегорском районе, где располагается оз. Васьковское, количество осадков в 2011 и 2012 гг. с февраля по июль составляло соответственно 303 и 384 мм. При этом в течение периода с 1 по 20 июля выпало 136 мм в 2011 г. и 185 мм в 2012 г. (www.gp5.ru). В связи с этим уровень воды в оз. Васьковском в летний период 2011 г. был более низким, чем в 2012 г.

На метеостанции пос. Терней, в районе которой расположены остальные исследованные озера, с февраля по июль 2011 и 2012 гг. выпало соответственно 405 и 295 мм, в течение периода с 1 по 20 июля — 176 и 96 мм. Таким образом, в отличие от Дальнегорского района, первая половина 2011 г. в Тернейском районе была более влажной, чем в 2012 г.

Отбор проб осуществлялся в пластиковые канистры. В 2011 г. — вручную, без использования плавучих средств, из подповерхностного (0,2–0,3 м) горизонта, в точках с глубиной 1,0–1,2 м. В 2012 г. — с резиновой лодки из подповерхностного горизонта, в точках с глубиной 1,0–1,2 м, а также в срединной части озер. В оз. Васьковском, кроме того, отбирали пробы воды с горизонтов 5 и 8 м при помощи батометра Нискина.

В день отбора пробы воды фильтровались с помощью ручного вакуумного насоса через предварительно взвешенный мембранный фильтр (Millipore Dugapore) 0,45 мкм. Величина pH и общая щелочность (HCO_3^-) определялись в нефитрированных пробах по стандартной методике (ГОСТ Р 52963-2008) на pH-метре CG843P, Schott титрованием до pH 4,5. Фильтраты хранили в холодильнике в пластиковой посуде с добавлением HNO_3 до pH 1–2 — для определения металлов и без подкисления — для определения главных ионов и растворенного органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$). В лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН выполняли анализ на содержание анионов SO_4^{2-} , Cl^- на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-10AVP, катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu 6800. Микроэлементы концентрировали в 100 раз жидкостной экстракцией в системе диэтилдитиокарбаминат-Na — хлороформ*, определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu 6800 в пламенном и беспламенном (Cd, Pb) вариантах. Степень извлечения растворенных ионных форм металлов после концентрирования неоднократно проверялась экспериментальным путем методом «введено-найдено» и составляла 85–95 %.

Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ определяли методом термokatалитического окисления с ИК-регистрацией (анализатор TOC-VCPN, Shimadzu).

Величину минерализации находили суммированием главных катионов и анионов (в мг/л). Проверку результатов определения макросостава проводили методом сравнения сумм катионов и анионов (в мг-экв/л). Разница эквивалентов масс катионов и анионов составляла 5–15 % для маломинерализованных и 7–18 % для солоноватых водоемов.

Суммарный микрофито- и зоопланктон отбирали из озер планктонной капровой сетью Апштейна с ячейей 0,1 мм (№ сита 64), облавливая 5 мин поверхностный и подповерхностный слой воды прибрежной полосы с глубиной 1 м, свободной от

* Chelation / Solvent Extraction System for the determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn in natural waters // Applied Geochemistry Research Group. Technical Communication. L. Imperial College of Science and Technology. 1975. Vol. 62. P. 1–24.

высшей водной растительности, с последующей фильтрацией через предварительно взвешенные мембранные фильтры (Millipore Durapore) 0,45 мкм. Отбиралось по одной пробе планктона из каждого озера ежегодно.

Фильтры со взвесью и планктоном высушивали в экспедиционных условиях до воздушно-сухого состояния, в лаборатории — до постоянной массы при температуре 80 °С. Во взвеси и планктоне, после озолоения фильтров в муфеле при $t = 450$ °С, последующего разложения смесью кислот $\text{HF} + \text{HClO}_4$, их выпаривания и перевода влажных солей в 2 % HNO_3 , определяли содержание металлов Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cd, Pb методом ААС (Shimadzu 6800). Правильность определения концентраций металлов во взвеси и планктоне контролировалась холостыми опытами и регулярным анализом стандартного образца BCSS-1, разлагавшегося, как и взвесь. При определении концентрации Pb и Cd методом беспламенной атомизации проводили дополнительный контроль методом стандартных добавок, воспроизводимость которых была не хуже 80–85 %.

Результаты и их обсуждение

Макрокомпонентный состав вод

По классификации А.В. Щербакова (Никаноров, 2008) исследованные озера можно разделить на пресные (Голубичное, Круглое, Японское, Васьковское), с минерализацией 0,03–0,08 г/л, и солоноватые (Благодати, Духовское, Мраморное), с минерализацией 1,48–11,03 г/л (табл. 2). Воды первой группы озер имели нейтральную реакцию среды ($\text{pH} = 6,42\text{--}6,92$), второй — от нейтральной до щелочной ($\text{pH} = 6,82\text{--}8,65$).

По классификации О.А. Алекина (Никаноров, 2008) воды пресных озер Васьковского и Круглого, в зависимости от водного режима, принадлежали к хлоридному классу в 2011 г. и гидрокарбонатному в 2012 г., группа натрия. Воды озер Японского и Голубичного относились к гидрокарбонатному классу, группа натрия. Озера Голубичное и Круглое принадлежали к типу I ($\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), а Васьковское и Японское — типу II ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$). Воды солоноватых озер Мраморное, Духовское и Благодати принадлежали к хлоридному классу, группе натрия, тип III, с преобладанием ионов Cl^- над Na^+ (табл. 2).

Таким образом, макрокомпонентный химический состав вод исследованных пресных озер восточного Сихотэ-Алиня является преимущественно хлоридно- или гидрокарбонатно-натриевым. Это отличает данные озера от водоемов гумидной зоны, расположенных на европейской территории РФ, для которых более характерен гидрокарбонатно-кальциевый состав (Моисеенко и др., 2006). Одной из причин такого состава послужило обеднение литогенного субстрата ландшафтов восточного склона Сихотэ-Алиня кальцием (Елпатьевский, 1993), что обуславливает низкие концентрации кальция в пресных водах региона, в частности в исследованной группе озер — 1,99–3,82 мг/л (табл. 2). Причина повышенной концентрации хлорид-ионов, сульфат-ионов и натрия даже в пресных озерах — перенос морских аэрозолей с близлежащих морских акваторий. В стратифицированном оз. Круглом проникновение морских вод происходит за счет дренирования через песчаную перемычку, а также при действующей протоке во время прилива. Так как соленая вода тяжелее пресной, придонная линза солоноватых вод потом сохраняется в озере длительное время, это ведет к повышению концентраций хлорид-ионов, сульфат-ионов и ионов натрия, причем не только в придонных солёных слоях воды, но и в пресных поверхностных.

Химический состав вод солоноватых озер формируется за счет вклада морских вод, которые постоянно (Духовское, Мраморное) или периодически (Благодати) обогащают воды озер макроионами морского происхождения (Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+). В озерах Духовском, Мраморном и Круглом установлена термическая и гидрохимическая стратификация вод*, характерная даже для периода осеннего перемешивания.

Содержание углерода растворенного органического вещества (РОВ) в воде исследованных озер варьировало от 2,0 до 8,2 мг/л, взвешенного — от 0,3 до 2,0 мг/л (табл. 2).

* Разработка биологического обоснования ... (1990).

В озерах Голубичное и Благодати содержание углерода РОВ было самым высоким (5,7–8,2 мг/л) по сравнению с другими озерами как в 2011, так и в 2012 гг., что связано с высокой степенью заболоченности их водосбора (соответственно 21 и 60 %) (см. табл. 1). Оз. Японское находится в промежуточном положении: содержание углерода РОВ — 5,5–5,6 мг/л при 7,0 % заболоченности водосбора (табл. 1).

В особом положении находится оз. Мраморное: при достаточно высоком вкладе болот в его водосборный бассейн (до 37 %) уровень углерода РОВ составлял всего 2,5–3,0 мг/л. Причиной этого может быть низкая величина удельного водосбора (7,8) (табл. 1), что обуславливает пониженное поступление аллохтонного РОВ. Кроме того, сероводородный запах, черный цвет донных осадков и наблюдаемое снижение концентрации кислорода в придонном слое воды и слабый водообмен в оз. Мраморном* свидетельствуют об анаэробных условиях разложения органических веществ, сульфатредукции и осаждении сульфидного железа. Возможно, что в этих условиях происходит соосаждение и выведение из раствора некоторых фракций РОВ. Характерные признаки процесса сульфатредукции были отмечены и в литоральной зоне протоки, соединяющей оз. Благодати с морем, а также в вершинной, кутовой части оз. Духовского.

Растворенные микроэлементы

Содержание растворенных форм всех металлов, кроме Fe и Mn, в озерах восточного Сихотэ-Алиня было в основном ниже 1 мкг/л: Cu — 0,09–0,29, Ni — 0,00–0,58, Zn — 0,27–1,59, Cd — 0,001–0,009, Pb — 0,00–0,17 мкг/л (табл. 3). Содержание Fe в большинстве озер находилось в диапазоне 15–121 мкг/л, и только в озерах Голубичное и Благодати концентрация Fe колебалась в более широких пределах, от 15 до 500 мкг/л. При этом в 2011 г. содержание растворенного Fe в озерах Голубичное и Благодати было значительно выше (266–500 мкг/л), чем в 2012 г. (15–115 мкг/л). Концентрация растворенного Mn в большинстве озер колебалась в диапазоне 0,4–4,2 мкг/л, увеличиваясь до 13,5–37,1 мкг/л в озерах Благодати и Голубичное. Как и для Fe, в этих озерах наблюдался повышенный уровень растворенных форм Mn летом 2011 г. (14,0–37,0 мкг/л) по сравнению с 2012 г. (0,38–1,96 мкг/л).

* Разработка биологического обоснования... (1990).

Таблица 2

Основной химический состав вод озер восточного Сихотэ-Алиня в июле 2011 и 2012 гг., мг/л

Table 2

Chemical composition of ions in water of the lakes in eastern Sikhote-Alin in July 2011–2012, mg/l

Озеро	n	pH	HCO ₃ ⁻	C _{орг} раствор	C _{орг} взвесь	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Σ, г/л	Класс
Васьковское	5	6,65–6,86	9,3–11,6	3,0–5,1	0,31–0,36	3,25–6,30	4,52–6,23	0,56–0,70	0,38–0,66	2,16–3,36	4,80–5,91	0,03	Cl ^{Na} _I
Голубичное	4	6,53–6,92	8,9–15,9	5,7–8,2	–	7,24–10,80	2,79–3,09	1,04–1,21	0,32–0,54	2,04–3,37	7,52–8,81	0,03–0,04	Cl ^{Na} _I
Японское	2	6,42–6,64	12,6	5,5–5,6	1,20	3,66–4,21	3,39–3,62	0,89–0,93	0,30–0,32	3,06–3,82	5,48–5,55	0,03–0,04	Cl ^{Na} _{II}
Круглое	3	6,54–6,64	7,8–10,7	2,0–3,0	2,01	23,60–40,80	5,67–7,09	1,87–2,38	0,81–0,91	1,99–2,23	17,80–19,40	0,06–0,08	Cl ^{Na} _I
Мраморное	2	6,82–7,05	7,0–16,0	2,5–3,0	–	1599,0–1977,0	215,0–377,0	91,30–140,0	16,0–31,40	28,10–35,70	814,0–1259,0	2,79–3,81	Cl ^{Na} _{II}
Духовское	4	7,38–8,08	18,5–20,3	3,8–4,0	0,79	834,0–3188,0	188,0–623,0	226,0–48,90	16,80–26,50	18,70–37,30	402,0–1744,0	1,46–5,86	Cl ^{Na} _{II}
Благодати	4	7,67–8,65	46,4–71,8	6,9–8,0	1,97	1884,0–6365,0	176,0–1008,0	80,10–436,0	28,40–58,0	33,20–64,30	714,0–3123,0	2,99–11,0	Cl ^{Na} _{II}

Примечание. Σ — минерализация; класс — классификация природных вод по О.А. Алекину (Никаноров, 2008); прочерк — не определено.

Содержание растворенных металлов в воде озер восточного Сихотэ-Алиня
в июле 2011 и 2012 гг., мкг/л

Concentrations of metals dissolved in water for the lakes of eastern Sikhote-Alin
in July 2011–2012, µg/l

Озеро	D	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb
Васьковское	1,85–2,70	0,24–0,27	20,5–37,1	0,00–0,13	0,52–3,24	0,79–1,59	0,004–0,006	0,03–0,15
Круглое	1,69–5,11	0,14–0,16	15,3–31,0	0,00	0,46–1,80	0,38–0,52	0,003–0,006	0,00–0,07
Голубичное	3,87–4,02	0,09–0,21	34,9–500,0	0,00–0,03	0,38–13,50	0,34–0,55	0,001–0,003	0,00–0,16
Японское*	1,60–3,33	0,18–0,24	16,2–92,3	0,02–0,03	0,40–2,67	0,27–0,37	0,001–0,002	0,02
Мраморное	2,84–3,10	0,19–0,22	15,8–29,3	0,13–0,18	0,75–1,62	0,34–0,55	0,006–0,009	0,02–0,17
Духовское	1,73–8,20	0,21–0,25	26,8–121,0	0,04–0,58	1,32–4,18	0,31–0,47	0,003–0,004	0,00–0,12
Благодати	1,94–8,41	0,17–0,29	14,8–266,0	0,00–0,28	0,57–37,10	0,31–0,55	0,001–0,002	0,01–0,11
Реки восточного Сихотэ-Алиня ¹	–	0,32±0,16	14,7±11,6	< 0,10	2,5±2,9	1,54±1,91	0,008±0,006	0,039±0,038
Оз. Пиазекзно, P+V ²	–	15,0	60	–	32,5	58,2	1,1	18,0
Реки мира ³		1,48	66	0,80	34,0	0,6	0,080	0,079

Примечания. Прочерк — нет данных; количество проб — как в табл. 2; D — количество взвешенного вещества, мг/л; P+V — суммарное содержание металла в растворенной и взвешенной форме; 0,00 — аналитический ноль. * Наши данные 2012 г. ¹ Данные В.М. Шулькина с соавторами (2009). ² Данные Radwan с соавторами (1990). ³ Trace elements ... (2003).

Вероятно, что наличие повышенных концентраций Fe и Mn в воде озер Благодати и Голубичное в 2011 г. по сравнению с 2012 г. связано с различием количества осадков при общем высоком уровне заболоченности водосборов этих водоемов. Как отмечалось выше, летом 2011 г. количество осадков на водосборе этих озер было в 1,5 раза выше, чем в 2012 г., что способствовало большему вкладу болотных вод, обогащенных Fe и Mn, в питание озер. Повышенная концентрация Fe в болотных водах обусловлена большей его подвижностью в восстановительной среде, комплексообразованием с РОВ на заболоченном водосборе и стабильностью образованных комплексов в озерных водах. Повышение концентрации Mn связано с восстановительными условиями на заболоченных водосборах, при которых этот элемент более растворим (Перельман, 1975).

В целом полученные нами в водах малых озер восточного Сихотэ-Алиня концентрации Cu, Ni и Cd находятся в диапазоне уровней содержания, определенном для поверхностных водотоков этого района ранее (табл. 3). Концентрации Fe и Mn в основном тоже сопоставимы, кроме озер с заболоченным водосбором (Благодати, Голубичное). Концентрации Zn в озерах оказались несколько ниже или равны, а Pb — выше или равны речным.

Низкие концентрации макро- и микроэлементов в поверхностных водных объектах, в том числе в озерах, связаны с формированием этих вод за счет атмосферных осадков, которые незначительно трансформируются, проходя через почвенно-биотический блок ландшафтов и грубообломочный слой продуктов выветривания плотных коренных пород — устойчивых к выветриванию эффузивных вулканических пород (Елпатьевский, 1993).

Металлы во взвеси и планктоне

Концентрации металлов во взвеси озер восточного Сихотэ-Алиня составляли (в порядке увеличения, мкг/г сух. массы) 0,1–2,1 Cd, 6,7–30,0 Cu, 6,9–56,1 Ni, 16,8–246,0 Zn, 11,6–325,0 Pb; содержание Mn и Fe (%) — соответственно 0,03–0,43 и 1,13–6,51 (табл. 4). Пресные озера заметно отличались от солоноватых лишь по содержанию Mn во взвеси: 0,16–0,43 % во взвеси пресных озер против 0,03–0,16 % для солоноватоводных. Повышенная концентрация Mn (0,31 %) во взвеси солоноватого оз. Благодати в более водный 2011 г. связана с более интенсивным поступлением восстановленного элемента из заболоченной части водосбора. Кроме того, взвешенное вещество оз. Васьковского содержало повышенные концентрации Zn, Pb, Cd.

Если сравнивать содержание металлов во взвеси изученных озер и рек восточного Сихотэ-Алиня (Чудаева, Чудаев, 2011), то в озерной взвеси концентрации Fe, Zn, Cd, Pb и Ni сопоставимы с речной (табл. 4), а концентрации Cu — в 2 раза ниже. Концентрации Mn во взвеси пресноводных озер выше, чем в речной, солоноватых — сопоставимы с ней.

По сравнению с реками Мира (Гордеев, Лисицын, 1978; Савенко, 2006) содержание Mn во взвеси озер выше, остальных металлов — ниже таковых (табл. 4). Исключение составляет Pb во взвеси оз. Васьковско-го, концентрация которого здесь значительно выше, чем среднее содержание в реках Мира (табл. 4).

Значительная часть металлов, мигрирующих во взвеси, в реках восточного Сихотэ-Алиня находится в подвижной форме, которая может извлекаться в раствор при изменении параметров среды (Чудаева, 2002), благодаря чему эта часть металлов может легко встраиваться в содержимое клеток планктонных организмов. Поэтому содержание взвешенных форм металлов, наряду с растворенными должно учитываться при рассмотрении вопросов миграции металлов по пищевой цепи.

Фитопланктон озер восточного Сихотэ-Алиня представляет собой в основном комплекс диатомовых водорослей (Medvedeva, 2001). В период наших работ биомасса микрофитопланктона в верхнем метровом слое воды озер восточного Сихотэ-Алиня в основном преобладала над биомассой

Таблица 4

Концентрации металлов во взвеси (В) и планктоне (П) озер восточного Сихотэ-Алиня в июле 2011, 2012 гг., мкг/г сух. массы

Table 4

Concentrations of metals in suspension (B) and plankton (П) for the lakes of eastern Sikhote-Alin in July 2011–2012, µg/g of dry weight

Озеро	Fe, %		Mn, %		Zn		Cu		Ni		Pb		Cd	
	В	П	В	П	В	П	В	П	В	П	В	П	В	П
Васьковское	1,76–2,82	1,47	0,28–0,43	0,10–0,11	161,0–246,0	271–721	7,06–21,10	7,60–24,30	19,4–48,3	3,5–11,9	219,0–325,0	40,2–329,0	0,34–2,10	1,44–3,16
Голубичное	5,78–6,51	1,19–2,56	0,22–0,32	0,05–0,13	63,5–138,0	55–129	8,70	3,91–13,40	7,2–36,4	6,4–11,9	20,9–117,0	21,8–28,5	0,30–1,50	0,27–0,87
Круглое	2,11–2,93	1,50–2,20	0,16–0,24	0,07–0,08	117,0–130,0	107–172	10,6–30,0	13,80	6,9–56,1	24,3	53,3–85,1	49,5–106,8	0,46–0,77	0,43
Японское*	3,64–3,77	2,02	0,31–0,34	0,23	49,7–51,3	141	6,70–11,40	4,27	25,9	9,8	33,6–59,2	32,3	0,25–1,03	1,90
Мраморное	1,13–1,60	1,88	0,07–0,16	0,05	75,8–91,3	247	10,60–16,10	50,60	14,3	Н.о.	45,7–250,0	201,0	0,44–1,08	2,40
Духовское	2,24–3,49	1,66–2,51	0,04–0,08	0,03–0,07	60,6–128,0	105–351	6,73–16,50	12,20–15,30	9,2–24,5	11,2–15,1	37,4–77,1	48,3–96,0	0,10–0,94	0,58–5,22
Благодаги	1,45–2,15	1,61–3,90	0,03–0,31	0,08–0,30	16,8–30,0	119–389	9,70–10,40	6,20–30,60	9,0–52,9	15,7–37,5	11,6–136,0	41,4–100,9	0,32–1,49	0,21–3,14
Кольяновское ¹	–	0,48	–	0,02	–	109	–	84,0	–	5,2	–	–	–	0,43
Горькое ¹	–	0,14	–	0,002	–	54	–	5,1	–	2,6	–	–	–	0,32
Пиаязкно ²	–	0,22	–	0,13	–	822	–	11,3	–	–	–	–	–	0,20
Реки восточного Сихотэ-Алиня ³	3,2–5,5 (4,3)	–	0,06–0,16 (0,12)	–	61,1–225,0 (145,0)	–	25,9–72,0 (37,3)	–	26,9–49,1 (33,2)	–	11,1–96,2 (33,8)	–	0,18–1,97 (0,68)	–
Реки мира ⁴	5,1**	–	0,11**	–	343 (240)	–	98 (74)	–	75,8 (61,3)	–	89,0 (55,3)	–	3,2 (1,1)	–

* Данные 2012 г. ** Данные В.В. Гордеева, А.П. Лисицына (1978). ¹ Зоопланктон озер Алтая (Леонова, 2005). ² Общий планктон мезотрофного (рН = 7,3) оз. Пиаязкно, восточная Польша (Radwan et al., 1990). ³ Данные В.А. Чудаева (2011). ⁴ Данные В.С. Савенко (2006), среднее арифметическое (среднее геометрическое).

зоопланктона, так как цвет фильтров после фильтрования проб планктона был зеленым. Только в июле 2012 г. проба планктона из оз. Васьковского была представлена белой массой ветвистоусых ракообразных. Другие данные о зоопланктоне этого озера в литературе отсутствуют. Про зоопланктон в Духовских озерах известно, что он беден в качественном отношении (коловратки, веслоногие), но биомасса его достигает 0,3–3,5 г/м³*. В зоопланктоне заповедных озер по численности доминировали науплии веслоногих ракообразных и циклопы (оз. Голубичное), науплии веслоногих ракообразных и коловратки (оз. Благодати — Барабанщиков, Колпаков, 2005).

Так же как и концентрация металлов в воде и взвеси, содержание элементов в планктоне характеризует состояние окружающей среды в сравнительно короткий отрезок времени, равный периоду жизненного цикла планктонных организмов, и применяется для обнаружения кратковременного загрязнения природных вод (Леонова, Бычинский, 1998). Тем не менее содержание микроэлементов в клетках планктона — это параметр интегральной оценки уровня загрязнения водоема, так как организмы включают металлы в состав своих ферментных систем, связывают в прочные белковые комплексы, заключают в нерастворимые гранулы. В связи с этим они не способны так же быстро, как водная среда, менять свой химический состав.

В планктоне озер восточного Сихотэ-Алиня содержание металлов (мкг/г сухой массы) варьировало в пределах 0,21–5,22 Cd, 3,90–50,60 Cu, 3,50–37,50 Ni, 55,0–721,0 Zn, 21,8–329,0 Pb; содержание Mn и Fe (%) — соответственно 0,03–0,30 и 1,19–3,90 (табл. 4). Как и во взвеси оз. Васьковского, в планктоне этого озера концентрации Zn, Pb и Cd были существенно выше таковых из других озер. Концентрации металлов также повышены в планктоне из оз. Мраморного. Возможно, это связано с тем, что западная часть озера непосредственно граничит с автомобильной дорогой с достаточно интенсивным движением.

Практически во всех исследованных озерах содержание Fe и Mn во взвеси больше, чем в планктоне. Исключение составляют озера Мраморное и Благодати, где концентрации Fe и Mn во взвеси и в планктоне достаточно близки (табл. 4). Содержание Ni и Pb во взвешенном веществе также выше или равно содержанию этих металлов в планктоне. Содержание Zn в планктоне сопоставимо (Голубичное, Круглое) или больше такового во взвеси. Концентрации Cu в планктоне могут быть и больше, чем во взвеси (оз. Мраморное), и меньше (оз. Японское), и близки друг другу (все остальные озера) (табл. 4).

Концентрации металлов в планктоне для всех исследованных озер восточного Сихотэ-Алиня в целом выше (Fe, Zn, Ni, Pb, Cd) либо равны (Mn, Cu), чем таковые для озер, приводимые рядом исследователей (Radwan et al., 1990; Леонова, 2005). Исключение составляют содержание Zn в планктоне оз. Пиазекзно — в 4 раза больше — и содержание Cu в оз. Колыванском — в 6 раз больше, чем озерах восточного Сихотэ-Алиня (табл. 4). Очевидно, повышенные концентрации микроэлементов отражают региональные особенности геохимии водных объектов.

Живые организмы способны к сохранению своей внутренней среды (в том числе и концентрации микроэлементов) согласно своим видовым потребностям в условиях динамично меняющихся факторов среды в природных циклах. Однако при выходе какого-либо фактора за пределы нормальных сезонных и других циклических колебаний, например при наличии загрязнения микроэлементами, гомеостаз организмов нарушается и происходит срыв механизмов регуляции и накопление элементов до опасных концентраций.

Сравнение содержания металлов в планктоне озер восточного Сихотэ-Алиня и среде его обитания показало, что достоверная связь наблюдается только между концентрацией Cd в планктоне и взвеси, планктоне и сумме растворенных и взвешенных форм элемента в воде (соответственно $r = 0,79$, $r = 0,68$, $n = 12$ — рис. 2).

* Разработка биологического обоснования ... (1990).

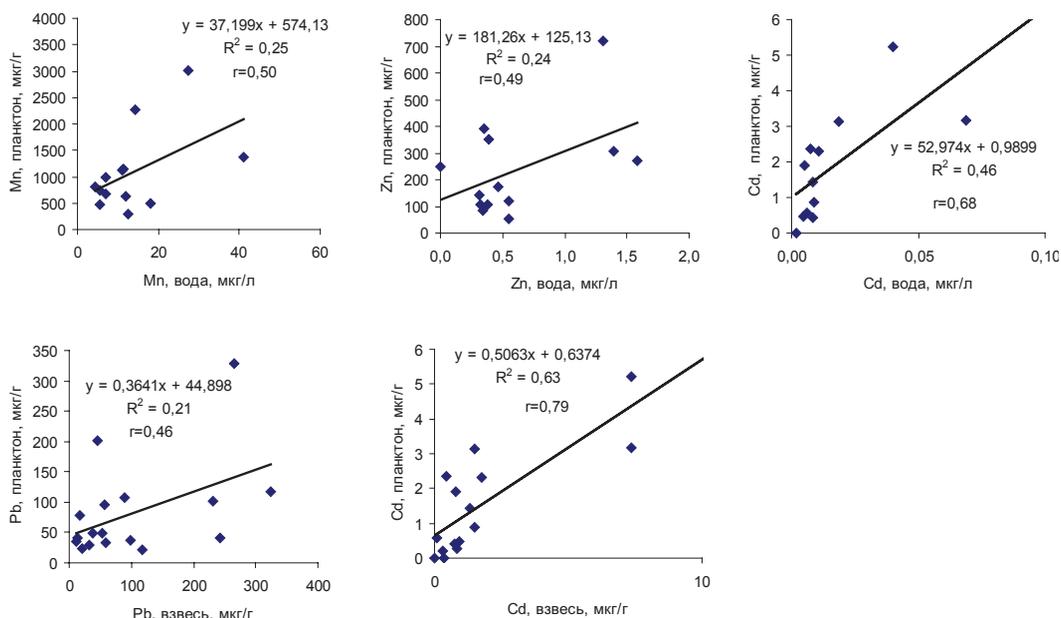


Рис. 2. Зависимость между содержанием Mn, Zn и Cd в воде (сумма растворенных и взвешенных форм) и планктоне, Pb и Cd во взвеси и планктоне. R^2 — коэффициент аппроксимации, r — коэффициент линейной корреляции

Fig. 2. Relationships between the concentrations of Mn, Zn and Cd in water (sum of dissolved and suspended forms) and plankton and between the concentrations of Pb and Cd in suspended solid and plankton. R^2 — coefficient of determination for linear approximation, r — coefficient of correlation

Отсутствие связи между накоплением остальных металлов планктоном и их содержанием в воде и взвеси свидетельствует о том, что наблюдаемая концентрация элементов в озерах восточного Сихотэ-Алиня не ведет к их активной аккумуляции в живом веществе.

Геохимические особенности оз. Васьковского

Акватория оз. Васьковского расположена на территории Дальнегогорского района, специализирующегося на добыче и переработке полиметаллических и боросиликатных руд. Озеро находится в зоне возможного влияния аэротехногенных выбросов закрытого в 2009 г. свинцовоплавильного завода в пос. Рудная Пристань. Преобладающий атмосферный перенос не способствовал загрязнению озера, однако ветры других направлений, а также атмосферные осадки в течение длительного времени (с 1932 г.) приносили на водосбор оз. Васьковского определенное количество антропогенных аэрозолей, загрязненных металлами. В результате донные отложения, водная растительность и моллюски озера накапливали повышенные концентрации Pb, Zn и Cd (Чернова и др., 2014), причем Pb в донных осадках присутствовал в количествах, превышающих величины, при которых не наблюдаются биологические эффекты*.

Уровни концентраций растворенных металлов в оз. Васьковском и других исследованных озерах не различаются, однако взвесь и планктон обогащены Zn, Pb и Cd по сравнению с другими озерами восточного Сихотэ-Алиня (табл. 4), что свидетельствует о продолжающемся антропогенном влиянии на акваторию и водосбор озера, вероятно, за счет разноса загрязнений, накопившихся в почвах нижнего течения р. Рудной. В то же время суммарное количество этих металлов в растворенной и взвешенной формах в воде из оз. Васьковского составляло 1,09–2,18 мкг/л Zn, 0,011–0,098 мкг/л Cd и 0,55–0,70 мкг/л Pb, что существенно ниже предельно допустимых концентраций этих металлов для питьевых вод (соответственно 5,0; 0,001 и 0,03 мг/л — СанПиН 2.1.4.1074-01).

* Interim sediment quality guidelines. Environment Canada. Ottawa, Ontario: Ecosystem Conservation Directorate, Guidelines Branch, 1995. 35 p.

Наблюдение за содержанием металлов в разных горизонтах водного столба оз. Васьковского показало, что количество взвеси, растворенных и взвешенных металлов на горизонтах 5 и 8 м было выше, чем в поверхностном слое, а содержание растворенного кислорода и органического углерода (растворенного и взвешенного) снижалось (рис. 3, 4). В то же время по макроионам стратификация воды в оз. Васьковском практически отсутствовала (рис. 3).

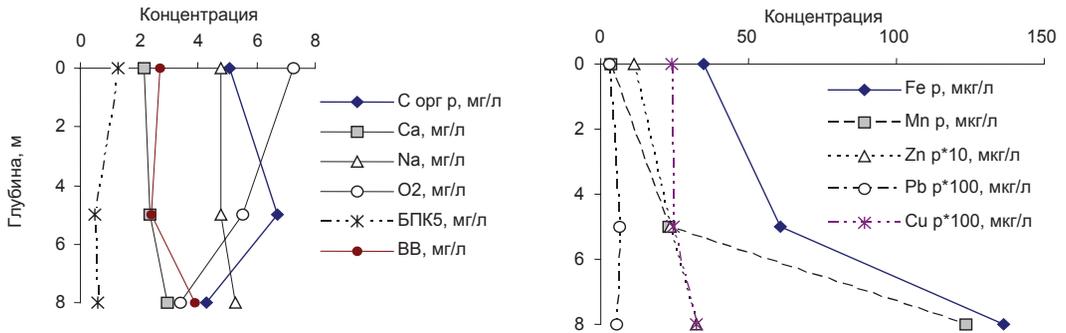


Рис. 3. Изменение макро- и микроэлементного состава вод оз. Васьковского с глубиной в июле 2012 г.: $C_{орг\ p}$ — углерод растворенного органического вещества; O_2 — растворенный кислород; $BПК_5$ — 5-суточное биохимическое потребление кислорода; BB — взвешенное вещество; $Fe\ p$, $Mn\ p$ — растворенные железо, марганец; $Zn\ p*10$ — 10-кратная концентрация растворенного Zn; $Pb\ p*100$, $Cu\ p*100$ — 100-кратные концентрации растворенных Pb и Cu

Fig. 3. Concentrations of macro- and microelements in Lake Vaskovskoe in July 2012, by depths: $C_{орг\ p}$ — dissolved organic matter in carbon units; O_2 — dissolved oxygen; $BПК_5$ — biochemical oxygen demand in 5 days; BB — suspended solid; $Fe\ p$, $Mn\ p$ — dissolved Fe, Mn; $Zn\ p*10$ — 10-fold dissolved Zn; $Pb\ p*100$, $Cu\ p*100$ — 100 fold dissolved Pb and Cu

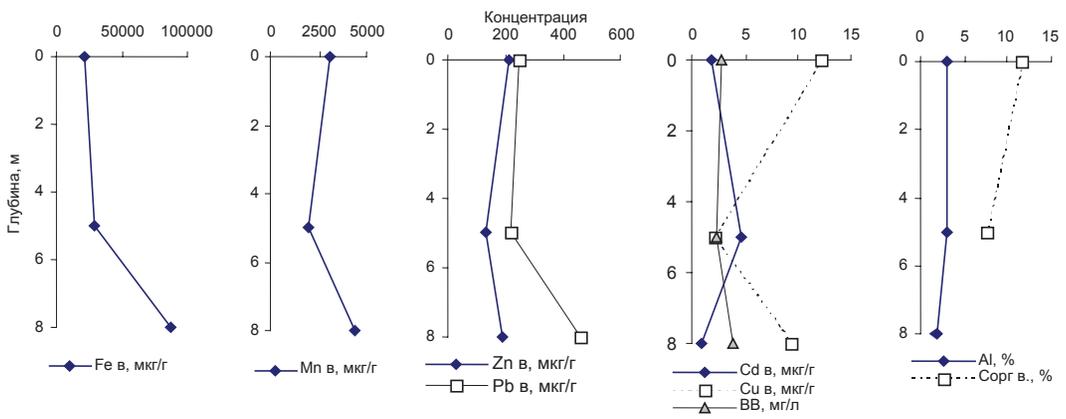


Рис. 4. Изменение содержания металлов и органического вещества во взвеси оз. Васьковского с глубиной в июле 2012 г.

Fig. 4. Metals and $C_{орг}$ concentrations in the suspended solids in Lake Vaskovskoe in July 2012, by depths

Известно, что для озер с глубиной более 3 м характерна термическая стратификация, т.е. отсутствует полное перемешивание слоев. Последствием стратификации становится неоднородность химического состава воды разных горизонтов. Наиболее ярко это проявляется в различиях концентраций не главных ионов, а растворенных газов, биогенов и микроэлементов (Горбунов, 2007), что характерно и для оз. Васьковского.

Вероятно, хороший кислородный режим, по крайней мере в поверхностном слое, способствует окислению органического вещества, переводу растворенных соединений тяжелых металлов во взвешенное состояние, а высокая скорость седиментации взвешенных частиц, о чем свидетельствует малая мутность — 2–4 мг/л, благоприятствует освобождению вод озера от микроэлементов. При этом в придонном слое из-за недостатка кислорода могут создаваться восстановительные условия, что объясняет

повышение содержания растворенных форм металлов с глубиной. Макроионы также освобождаются в процессе окисления органического вещества, однако их концентрации в растворе на порядки выше, поэтому их изменения с глубиной не столь заметны.

Особенности химического и микроэлементного состава озер восточного Сихотэ-Алиня и Восточно-Европейской равнины

Полученные данные по химическому составу вод малых озер восточного Сихотэ-Алиня могут быть сопоставлены с результатами, полученными для незагрязненных маломинерализованных (электропроводность 8–117 мкСм/см) с рН 4,2–7,7 озер европейской части России, приуроченных к районам распространения магматических и метаморфических пород Балтийского щита (Моисеенко и др., 2006; Моисеенко, Гашкина, 2007). Основанием для такого сравнения служат близость климатических характеристик и определенное сходство геологической основы.

Однако растительный покров ландшафтов восточного Сихотэ-Алиня отличается от таежного региона европейской части России: водосборы озер юга Дальнего Востока РФ представлены широколиственными лесами с преобладанием дубняков, сменяющимися прибрежными равнинами с луговой и кустарниковой растительностью (Елпатьевский, 1993).

Как установили в своей работе Т.И. Моисеенко с соавторами (2006), на территориях с гумидным климатом гидрохимические параметры вод озер достаточно близки, что подтверждается и нашими исследованиями по озерам восточного Сихотэ-Алиня. Азональные факторы, способные влиять на формирование химического состава озерных вод — антропогенная нагрузка, особенности литогенного субстрата, рельеф, морфометрия озер и, в случае с приморскими регионами, влияние моря. Озера восточного Сихотэ-Алиня расположены на территории со сходным геологическим строением и рельефом, с низким уровнем антропогенной нагрузки, но имеют разную морфометрию, происхождение, удельный водосбор и степень заболоченности бассейна.

Как уже было отмечено выше, макросостав озер восточного Сихотэ-Алиня отличается от озер Восточно-Европейской равнины преобладанием азональных вод хлоридно-натриевого типа за счет влияния моря. Благодаря воздушному переносу морских аэрозолей воды озер также обогащены сульфатами (табл. 5).

Содержание ряда растворенных металлов (Fe, Mn, Zn) в водах озер восточного Сихотэ-Алиня, как пресных, так и солоноватоводных, также укладывается в диапазон концентраций этих элементов в водах таежного региона европейской части России. Концентрации Ni (до 0,058 мкг/л) и Pb (0,007–0,170 мкг/л) находятся на нижней границе диапазона, приводимого Т.И. Моисеенко и Н.А. Гашкиной (2007) (соответственно < 0,2–4,8 и < 0,1–1,1 мкг/л). Концентрации Cd и Cu в озерах восточного Сихотэ-Алиня существенно ниже, чем в озерах таежных районов Восточно-Европейской равнины (соответственно < 0,05–0,61 и 0,20–4,40 мкг/л) (табл. 5).

Как уже отмечалось выше, причины обедненности макро- и микроэлементами озерных вод юга Дальнего Востока РФ — атмосферное питание и быстрое перемещение атмосферных вод по почвенному профилю и через толщу устойчивых к выветриванию плотных коренных пород.

Выводы

Основные факторы формирования макро- и микроэлементного состава озер восточного Сихотэ-Алиня — гумидный климат, особенности горных пород, устойчивых к выветриванию и бедных кальцием, преобладание питания маломинерализованными атмосферными осадками. К этим факторам добавляются азональные — близость к морской среде, степень заболоченности водосборов.

Содержание растворенных форм металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni) в водах малых озер восточного Сихотэ-Алиня сопоставимо и даже ниже, чем в соответствующих по минерализации, рН, составу главных ионов и литогенной основе незагрязненных малых озерах Восточно-Европейской равнины. В вопросе формирования concentra-

Таблица 5

Сравнительная оценка параметров таежных и лесных мезотрофных озер европейской части России (Моисеенко, Гашкина, 2007) и восточного Сихотэ-Алиня, июль 2011, 2012 гг.

Table 5

Comparative estimation of parameters for boreal and forest mesotrophic lakes in the European part of Russia (from: Моисеенко, Гашкина, 2007) and in eastern Sikhote-Alin (in July 2011, 2012)

Компонент химического состава	Озера европейской части России		Озера восточного Сихотэ-Алиня	
	Таежная зона	Лесная зона	Пресные	Солоноватые
pH	<u>6,8</u> 4,2–7,7	<u>7,4</u> 4,5–8,5	<u>6,65</u> 6,42–6,92	<u>8,06</u> 6,82–8,65
χ , мкСм/см	<u>30</u> 8–117	<u>122</u> 14–330	<u>42,8</u> 31,1–109,0	<u>2300</u> 2200–4020
$C_{\text{орг}}$, мг/л	<u>7,7</u> 1,6–24,9	<u>9,9</u> 4,2–32,2	<u>3,9</u> 2,0–7,09	<u>5,5</u> 3,0–8,0
$S (=S-SO_4^{2-})$, мг/л	<u>0,9</u> 0,2–4,3	<u>1,5</u> 0,2–14,1	<u>1,66</u> 0,93–2,36	<u>126</u> 39–336
Cl ⁻ , мг/л	<u>1,1</u> 0,2–13,5	<u>1,6</u> 0,4–24,0	<u>7,24</u> 3,25–40,80	<u>1977</u> 834–6365
$C_{\text{неорг}} (=C_{\text{Алк}})$, мг/л	<u>2,0</u> 0–10,1	<u>14,3</u> 0,6–37,3	<u>2,60</u> 1,75–3,50	<u>4,50</u> 1,55–15,90
K ⁺ , мг/л	<u>0,7</u> 0,1–3,7	<u>0,9</u> 0,2–8,1	<u>0,42</u> 0,30–0,91	<u>28,4</u> 16,0–58,0
Ca ²⁺ , мг/л	<u>2,4</u> 0,2–10,0	<u>18,0</u> 2,4–68,0	<u>2,70</u> 1,99–3,37	<u>35,7</u> 18,7–64,3
Mg ²⁺ , мг/л	<u>0,9</u> 0,1–5,5	<u>3,4</u> 0,5–14,4	<u>0,93</u> 0,56–2,38	<u>140,0</u> 48,9–436,0
Na ⁺ , мг/л	<u>1,7</u> 0,4–10,4	<u>1,5</u> 0,4–14,1	<u>5,91</u> 4,80–19,40	<u>1259</u> 402–3123
Mn, мкг/л	<u>9,1</u> 0,3–125,0	<u>12,3</u> 0,1–144,0	<u>1,28</u> 0,38–13,50	<u>1,51</u> 0,57–37,10
Fe, мкг/л	<u>142,0</u> 2,8–3300,0	<u>96,5</u> < 2,0–1100,0	<u>34,8</u> 15,3–500,0	<u>29,0</u> 14,8–266,0
Cu, мкг/л	<u>0,6</u> 0,2–4,4	<u>0,7</u> < 0,5–15,6	<u>0,22</u> 0,09–0,27	<u>0,21</u> 0,17–0,29
Zn, мкг/л	<u>0,9</u> 0,2–25,0	<u>1,0</u> < 0,2–45,6	<u>0,53</u> 0,27–1,59	<u>0,47</u> 0,31–10,60
Cd, мкг/л	<u>0,05</u> < 0,05–0,61	<u>0,05</u> < 0,05–1,77	<u>0,003</u> 0,001–0,015	<u>0,002</u> 0,001–0,014
Pb, мкг/л	<u>< 0,1</u> < 0,1–1,1	<u>0,4</u> < 0,1–3,3	<u>0,052</u> 0,001–0,160	<u>0,019</u> 0,003–0,168
Ni, мкг/л	<u>0,5</u> < 0,2–4,8	<u>0,3</u> < 0,2–15,6	<u>0,004</u> 0,00–0,127	<u>0,127</u> 0,00–0,584

Примечание. Над чертой — медиана, под чертой — диапазон концентраций.

ций микроэлементов в растворенной форме в малых озерах восточного Сихотэ-Алиня главную роль играет геологическое строение водосборов. Исключение составляют растворенные формы Fe и Mn, концентрация которых в большей степени контролируется ландшафтными особенностями водосбора (заболоченностью) и водным режимом, который определяет вариации вклада болотных вод.

Содержание взвешенных форм микроэлементов определяется составом горных пород водосбора и антропогенной нагрузкой. Несмотря на повышенную металлоносность пород восточного Сихотэ-Алиня, концентрация во взвеси озер региона ниже, чем среднее содержание во взвеси рек мира для всех металлов, кроме марганца.

Связь между содержанием металлов в фитопланктоне и воде озер восточного Сихотэ-Алиня обнаружена только для кадмия. Это указывает на близкий к фоновому уровень концентрации в озерных водах других изученных металлов.

В наиболее антропогенно измененном оз. Васьковском, используемом как источник питьевого водоснабжения и испытывающем фоновое аэротехногенное загрязнение

от горнорудных производств Дальнегорского района, не наблюдается повышенных концентраций растворенного Рb, хотя концентрации свинца во взвеси в нем повышены по сравнению с другими изученными озерами. Однако сумма обеих форм элемента в воде не превышает предельно допустимых концентраций в питьевой воде.

Авторы выражают благодарность аналитикам ТИГ ДВО РАН Н.Н. Богдановой, Г.А. Власовой, Т.Л. Примак за помощь в пробоподготовке и определении металлов, ионов макросостава и биогенных элементов. Выражаем благодарность сотрудникам заповедника к.б.н. Е.А. Пименовой, к.б.н. Е.В. Потихе, И.А. Нестеровой за организацию работы на территории САБЗ.

Работа частично поддержана грантом ОНЗ РАН №12-1-ОНЗ-22.

Список литературы

- Аржанова В.С., Елпатьевский П.В.** Геохимия ландшафтов и техногенез : монография. — М. : Наука, 1990. — 194 с.
- Барабанщиков Е.И., Колпаков Е.В.** Видовой состав зоопланктона двух приморских озер Сихотэ-Алинского заповедника // Результаты охраны и изучения природных комплексов Сихотэ-Алиня : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию со дня образования Сихотэ-Алинского государственного заповедника. — Владивосток, 2005. — С. 127–131.
- Богатов В.В., Богатова Л.В.** Аккумуляция тяжелых металлов пресноводными гидробионтами в горнорудном районе юга Дальнего Востока России // Экология. — 2009. — № 3. — С. 202–208.
- Гаретова Л.А., Каретникова Е.А.** Гидрохимические и микробиологические показатели в оценке экологического состояния малых эстуарных систем (на примере оз. Токи, Татарский пролив) // Изв. ТИПРО. — 2010. — Т. 162. — С. 294–305.
- Горбунов М.Ю.** Вертикальная стратификация водных масс в малых озерах лесостепного Поволжья // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2007. — Т. 9, № 4. — С. 973–986.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.** Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // ДАН СССР. — 1978. — Т. 238, № 1. — С. 225–228.
- Елпатьевский П.В.** Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах : монография. — М. : Наука, 1993. — 253 с.
- Иванов Г.И.** Почвообразование на юге Дальнего Востока : монография. — М. : Наука, 1976. — 198 с.
- Левшина С.И., Шамов В.В., Ким В.И.** Органическое вещество в воде припойменных озер нижнего Амура // Вод. ресурсы. — 2007. — Т. 34, № 5. — С. 596–603.
- Леонова Г.А.** Оценка современного экологического состояния озер Алтайского края по биогеохимическим критериям // Электронный журнал «Исследовано в России». — 2005. — 091/050125. — С. 954–972: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/091.pdf>.
- Леонова Г.А., Богуш А.А., Бычинский В.А., Бобров В.А.** Оценка биодоступности и потенциальной опасности химических форм тяжелых металлов в экосистеме озера Большое Яровое (Алтайский край) // Экол. химия. — 2007. — Т. 16, № 1. — С. 18–28.
- Леонова Г.А., Бычинский В.А.** Гидробионты Братского водохранилища как объекты мониторинга тяжелых металлов // Вод. ресурсы. — 1998. — Т. 25, № 5. — С. 603–610.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.** Распределение микроэлементов в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Вод. ресурсы. — 2007. — Т. 34, № 4. — С. 454–468.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Кудрявцева Л.П. и др.** Зональные особенности формирования химического состава вод малых озер на территории Европейской части России // Вод. ресурсы. — 2006. — Т. 33, № 2. — С. 163–180.
- Никаноров А.М.** Гидрохимия : учебник. — Ростов н/Д. : НОК, 2008. — 461 с.
- Перельман А.И.** Геохимия ландшафта : монография. — М. : Высш. шк., 1975. — 341 с.
- Савенко В.С.** Химический состав взвешенных наносов рек мира : монография. — М. : Геос, 2006. — 175 с.
- Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н., Восель Ю.С.** Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 11. — С. 1501–1514.
- Чернова Е.Н., Лобас Л.А., Ковалев М.Ю., Лысенко Е.В.** Особенности распределения тяжелых металлов в компонентах водных экосистем памятников природы — озер Благодати, Васьюковское (Приморский край) и Азабачье (Камчатский край) // Вод. ресурсы. — 2014. — Т. 41, № 3. — С. 312–318.

Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока : монография. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 392 с.

Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности химического состава воды и взвесей рек Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. — 2011. — Т. 30, № 2. — С. 102–119.

Шамов В.В., Осипенко Б.В., Мещенин И.Г. Оценка современного экологического состояния оз. Болонь // Биогеохимические и гидроэкологические исследования на Дальнем Востоке. — Владивосток : Дальнаука, 1998. — Вып. 7. — С. 116–132.

Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // Вод. ресурсы. — 2009. — № 4. — С. 428–439.

Medvedeva L.A. Biodiversity of aquatic algal communities in the Sikhote-Alin Biosphere Reserve (Russia) // Cryptogamie, Algol. — 2001. — Vol. 22, № 1. — P. 60–100.

Radwan S., Kowalik W., Kornijow R. Accumulation of heavy metals in a lake ecosystem // The Science of the Environment. — 1990. — Vol. 96. — P. 121–129.

Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry. Surface and ground water, weathering, and soils / ed. J.I. Drever. — Oxford : Elsevier-Pergamon, 2003. — Vol. 5, chap., 5.09. — P. 225–272.

Xiangcan J. Lakes in China. Research of their environment. Vol. 2. — Beijing : China Ocean Press, 1995. — 482 p.

Поступила в редакцию 9.04.14 г.