

УДК 574.5(285.2):551.48

ЧУПАКОВ Артём Васильевич, младший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 16 научных публикаций

ПОКРОВСКИЙ Олег Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск), сотрудник Национального центра исследований Франции, лаборатория георесурсов и окружающей среды (г. Тулуза). Автор 216 научных публикаций, в т. ч. 5 монографий

ШИРОКОВА Людмила Сергеевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 93 научных публикаций

ВОРОБЬЁВА Таисия Яркиевна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией пресноводных и морских экосистем Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 67 научных публикаций

ЗАБЕЛИНА Светлана Александровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 62 научных публикаций

КОКРЯТСКАЯ Наталья Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 78 научных публикаций, в т. ч. одной монографии

МОРЕВА Ольга Юрьевна, научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 52 научных публикаций

ЕРШОВА Анна Алексеевна, младший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 6 научных публикаций

ШОРИНА Наталья Валерьевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск), доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин института нефти и газа Северного (Арктического) федерального университета. Автор 42 научных публикаций, в т. ч. 3 учебно-методических пособий

КЛИМОВ Сергей Иванович, научный сотрудник Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 21 научной публикации, в т. ч. одной монографии

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕСНОВОДНОГО МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗ. СВЕТЛОЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)*

В статье представлены первые данные по морфометрическим особенностям и количественным параметрам химической стратификации пресноводного оз. Светлого, находящегося на севере Архангельской области. Исследования проводились в период с декабря 2009 по ноябрь 2011 года. Доказан меромиктический статус железо-марганцевого типа данного водоема. Приведены данные по содержанию O_2 , S^{2-} , Ca, Mg, Na, SO_4^{2-} , Cl, Fe, Mn, растворенного органического углерода (РОУ) и биогенных элементов.

Ключевые слова: меромиктическое озеро, химическая стратификация, сероводород, биогенные элементы, растворенные формы железа и марганца.

Введение. Меромиктические озера относятся к специфическому типу водоемов, которые давно вызывают интерес у исследователей многих стран мира. Наличие химической стратификации, окислительно-восстановительные процессы, протекающие на хемоклине, и многие другие особенности функционирования делают их уникальными объектами исследования для понимания как современных, так и древних водных экосистем [4, с. 191].

Оз. Светлое расположено примерно в 65 км на северо-восток от г. Архангельска и является первым в системе из 5 озер, дающих начало р. Светлой, которая относится к водосборному бассейну Белого моря. По данным геолого-структурного разреза Юго-Восточного Беломорья подстилающие породы в данном районе сформированы четвертичными отложениями ледникового происхождения (мощность 25–30 м), далее алевролитами и песчаниками падунской свиты венда (мощность ≈ 150 м) [12, с. 48].

В данной работе представлен материал, полученный в результате совместных комплекс-

ных исследований лабораторий Пресноводных и морских экосистем, экоаналитических исследований Института экологических проблем Севера УрО РАН и лаборатории Георесурсов и окружающей среды г. Тулузы.

Материалы и методы. Батиметрическая съемка проводилась эхолотом-картплоттером Humminbird 363, частота луча 200 кГц, интервал измерения 5 сек. Датчик картплоттера был прикреплен к навесному транцу надувной гребной лодки из ПВХ и погружен в воду на 20–30 см, скорость движения при проведении съемки не превышала 2,5–3,0 км/ч. Глубина и координаты по GPS были определены в 1895 точках водоема (после выбраковки). Батиметрическая карта и трехмерная модель озерной котловины построены с использованием программного пакета Surfer, метод интерполяции Кригинга.

Отбор проб и измерение основных гидролого-гидрохимических показателей проводили с декабря 2009 по октябрь 2011 года с интервалом в 1-2 мес.

Отбор проб производился поликарбонатным горизонтальным батометром Aquatic Re-

*Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований Север №11-05-98802, грант РФФИ 12-05-91055-НЦНИ, программы инициативных проектов Президиума УрО РАН №12-У-5-1034.

search объемом 5 л, как и в наших исследованиях в озерах Кенозерского национального парка [26, с. 11, 117; 28, с. 68].

Измерение концентрации растворенного в воде кислорода и температуры осуществляли при помощи зонда-оксиметра WTW Oxi 330i. В сентябре, октябре и декабре 2010 года для определения содержания кислорода использовался метод Винклера. Для фиксирования величины водородного показателя использовался рН-метр HANNA HI8314F с термокомпенсацией и комбинированным электродом, погрешность измерения $\pm 0,02$. Удельная электропроводность как функция общей минерализации определялась портативным кондуктометром HANNA HI8733.

Пробы на содержание металлов в растворенной фракции, растворенного органического углерода (РОУ), сульфатов, хлоридов и щелочности фильтровали непосредственно в момент пробоотбора через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм в пробоотборники, заранее подготовленные в «чистой комнате» класса А10000. Пробы на содержание металлов консервировали добавлением 70 % раствора дважды перегнанной сверхчистой азотной кислоты. Металлы были определены без концентрирования на ИСП-МС Agilent 7500. Анализ на хлориды и сульфаты проводился методом ВЭЖХ. Определение концентраций растворенного органического углерода производили методом каталитического сжигания на платиновом катализаторе при 800 °С с инфракрасным детектором CO₂, Shimadzu TOC 6000 (погрешность измерений $\pm 2\%$, предел обнаружения 0,1 мг/л). Щелочность, которая определялась на автоматическом титраторе SCHOTT TA 10^{plus}, далее была пересчитана на неорганический углерод с учетом параметров температуры воды и рН в момент отбора проб, используя константы диссоциации угольной кислоты [26, с. 117; 27, с. 137; 28, с. 68].

Для определения концентрации Fe²⁺ использовался фотометрический метод с феррозином (методика и техника пробоотбора адаптированы в ИЭПС УрО РАН) [7; 15; 29; 32].

Определение растворенного сероводорода и биогенных элементов (фосфор, азот, кремний) осуществлялось стандартными фотометрическими методами [8; 10; 11, с. 47, 64, 77, 104].

Результаты и их обсуждение. По своим морфометрическим признакам Светлое можно отнести к малым глубоководным озерам. Максимальная глубина 39 м, площадь зеркала составляет 0,125 км², объем 0,0033 км³.

По построенной нами батиметрической карте и трехмерной модели озерной котловины (рис. 1) видно, что ложе водоема сформировано двумя выраженными депрессиями рельефа, которые условно делят его на две части. Максимальная глубина западной части ≈ 39 м, восточной ≈ 20 м. На мелководном перешейке находится небольшой остров. Соединение озера с остальной системой осуществляется через мелкий короткий ручей в восточной части.

Измерения вертикального распределения значений температуры и концентраций кислорода с интервалом в 1-2 мес. (рис. 2) показали, что сезонные изменения температуры воды отмечаются до глубины около 22 м. В летний период над хемоклином, в слое 15–22 м, наблюдается гомотермия при температуре 3,6–4,0 °С или слабая температурная инверсия до 0,04 °С/м. В зимний период максимальные температуры воды 3,9–4,1 °С отмечаются над хемоклином или в самом хемоклине в слое 20–23 м, ниже хемоклина сохраняется прямая стратификация температуры до глубины 26–27 м с градиентом около 0,07 °С/м. Ниже температура воды в течение всего года находится в пределах 3,5–3,6 °С.

Наблюдается наличие постоянной анаэробной зоны с глубины 18–20 м (в зависимости от сезона) до дна. В октябре 2010 года зафиксировано понижение концентрации кислорода в зоне миксолимниона вследствие произошедшего конвективного перемешивания в период осенней гомотермии, которое, однако, не затронуло горизонты ниже 20 м. Удельная электропроводность на поверхности составляет в течение года 150–250 мкСм/см, а в придонном горизонте 340–380 мкСм/см [13, с. 177]. Мак-

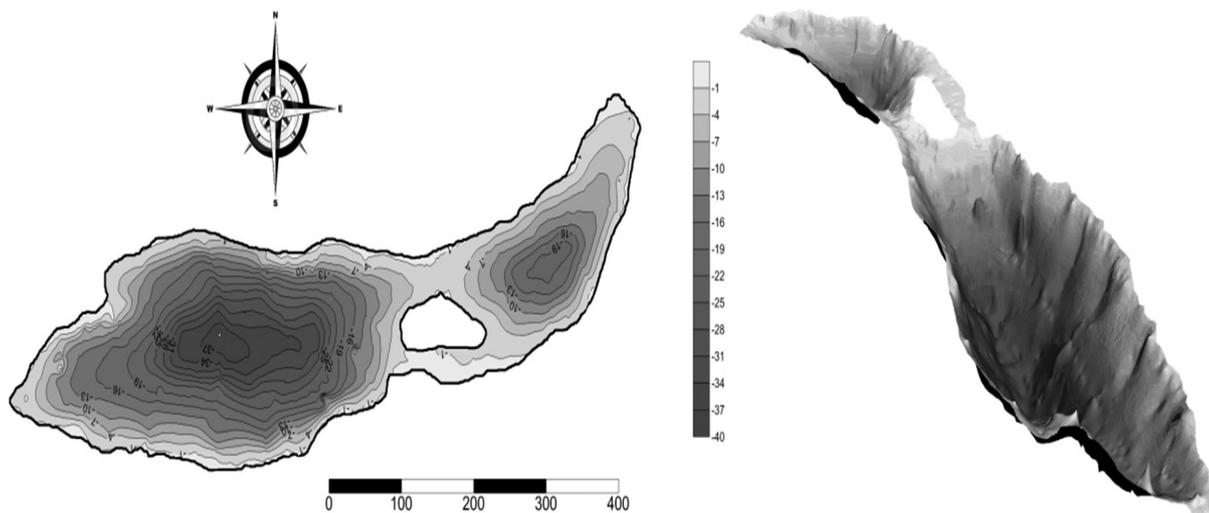


Рис. 1. Батиметрическая карта и трехмерная модель оз. Светлое

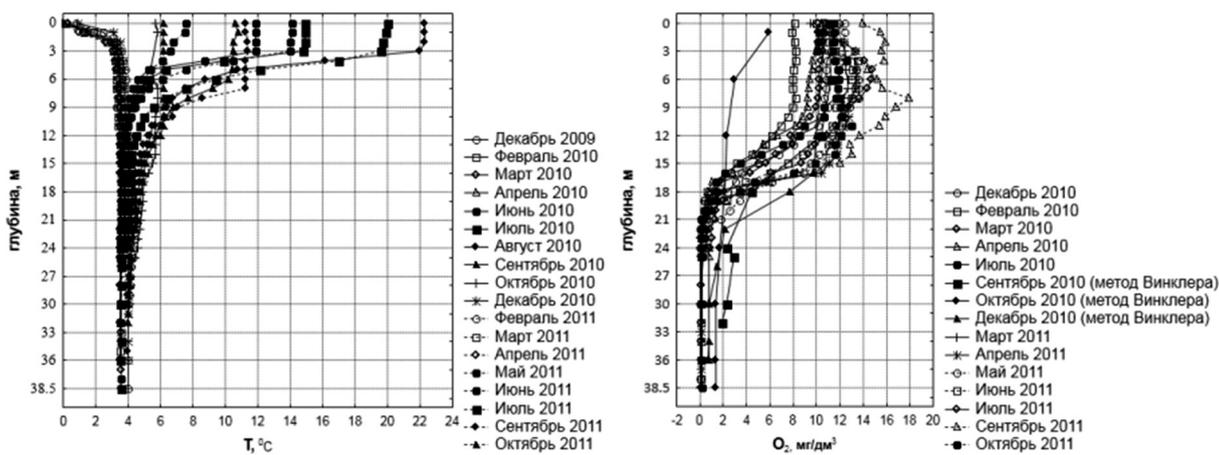


Рис. 2. Вертикальные профили распределения температуры и растворенного кислорода

симальные вертикальные градиенты электропроводности до $30\text{--}40$ (мкСм/см) $\cdot\text{м}^{-1}$ отмечаются в слое $21\text{--}24$ м, среднее значение градиента за исследуемый период в слое $22\text{--}24$ м составляет 22 (мкСм/см) $\cdot\text{м}^{-1}$.

В кислородсодержащих водах озера сероводород обнаруживается эпизодически в микроколичествах – его содержание не превышало в подавляющем большинстве случаев

$0,03\text{--}0,10$ мкМ/дм^3 . Слой совместного присутствия кислорода и сероводорода расположен в зоне хемоклина. Как в зимний, так и в летний период в зоне скачка минерализации, при более дискретном осуществлении пробоотбора, был зафиксирован отчетливо выраженный максимум в распределении сероводорода, следом за которым следовал локальный минимум сульфатов. Затем, на глубине около 30 м, его содер-

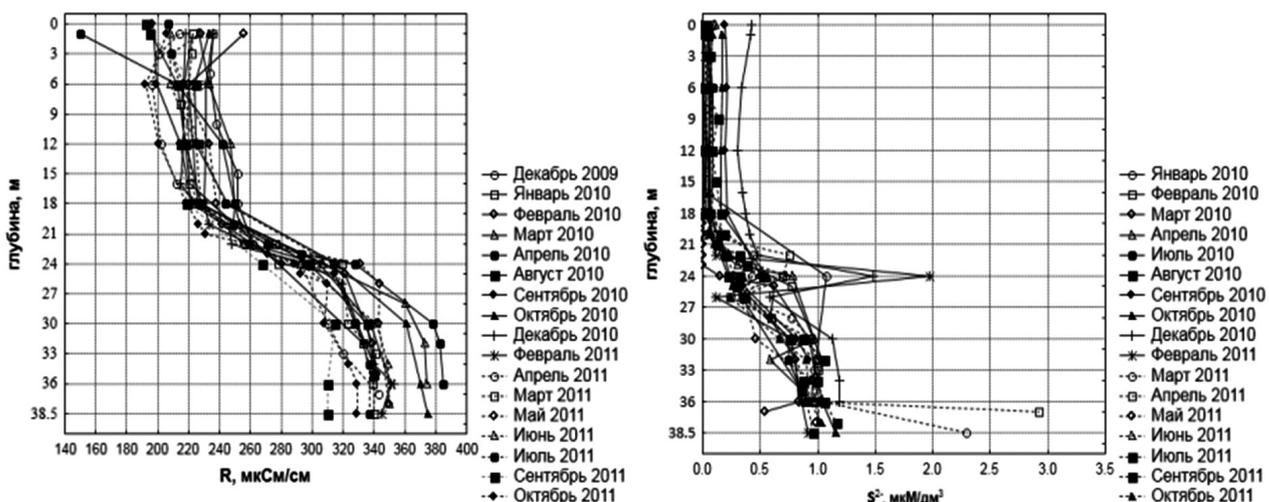


Рис. 3. Вертикальные профили распределения удельной электропроводности и концентрации сероводорода

жание стабилизировалось и оставалось постоянным на уровне порядка 1 мкМ/дм³. Однако эпизодически его концентрация возрастала и доходила до 2,3 и 2,9 мкМ/дм³ в марте и апреле 2011 года соответственно (рис. 3).

Пробы воды в зоне хемоклина (22–24 м) в течение всего периода наблюдений были окрашены в бледно-розовый цвет, обусловленный наличием пурпурных бактерий, развивающихся на границе аэробной и анаэробной зоны. Наибольшая интенсивность окраски этого слоя наблюдалась в зимний период, несмотря на значительную толщину ледового (70 см) и снежного (50 см) покровов. Поскольку развитие анаэробных фототрофных бактерий лимитируется наличием света, с одной стороны, и сульфида в качестве донора электронов, с другой стороны, очевидно, что в оз. Светлом, вследствие высо-

кой прозрачности воды и льда, ледовый покров не препятствует проникновению света в зону хемоклина и развитию пурпурных бактерий [1, с. 61].

Изменение водородного показателя имеет вариабельную структуру годовой изменчивости: миксолимнион – от 7 до 8,8; хемоклин – от 6,8 до 8; монимолимнион – от 6,8 до 7,6 единиц рН. Самые высокие значения рН для поверхностных горизонтов приурочены к периоду максимальной интенсивности развития фитопланктона. С изменением глубины наблюдается общая тенденция уменьшения данного показателя. На глубинах 24–25 м прослеживается небольшое увеличение значений рН, которое можно связать с жизнедеятельностью анаэробных бактерий.

В таблице приведены усредненные данные по содержанию некоторых макрокомпонентов

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В оз. СВЕТЛОЕ

Горизонт	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na	Ca	Mg	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si
0-5 м	2,5	0,039	0,0463	59	658	554	0,8	0,05	6	0,2	82
SD	0,2	0,023	0,0019	4	65	39	0,5	0,08	4	0,4	14
5-10 м	2,6	0,039	0,0466	59	732	655	0,7	0,04	31	0,2	86
SD	0,2	0,002	0,0012	3	60	40	0,5	0,08	36	0,4	12
10-15 м	2,8	0,039	0,0488	62	721	571	0,8	0,05	5	0,3	103

и биогенных элементов по вертикальному профилю за весь период исследований.

Из данных *таблицы* видно, что в оз. Светлом преобладают гидрокарбонат-анион и кальций, что позволяет отнести, используя классификацию природных вод по химическому составу О.А. Алекина, воды озера к гидрокарбонатным кальциевой группы I-го типа.

Пространственная динамика распределения РОУ имеет тенденцию увеличения концентраций от поверхности к придонным горизонтам с наличием скачкообразного возрастания значений в зоне хемоклина. Среднегодовые концентрации РОУ для поверхностного и придонного горизонтов составляют 0,08 и 0,44 мМ/дм³ соответственно и близки к величинам, характерным для морских вод [14, с. 183].

Круговорот биогенных элементов в озере совершается в результате биохимической деятельности водных организмов и гидрологических процессов. Поскольку перемешивание водных масс в оз. Светлом происходит только в миксолимнионе, круговорот биогенных элементов остается не завершенным. Аммонийный азот, образовавшийся в результате минерализации органических соединений, не окисляется до нитратов в горизонтах монимолимниона. Из-за неполного перемешивания минеральные соединения азота, фосфора и кремния накапливаются в анаэробной зоне озера и практически не поступают в миксолимнион.

Содержание биогенных элементов в миксолимнионе озера, как видно из *таблицы*, невелико и в течение года подвержено сезонным колебаниям. Отмечено их снижение в период вегетации, этим обусловлены высокие значения стандартного отклонения, которые для некоторых биогенных элементов на отдельных горизонтах составляют > 100%. В монимолимнионе озера наблюдались максимальные значения концентраций биогенных элементов, за исключением нитратов [3, с. 188; 6, с. 186; 13, с. 179].

В анаэробной зоне оз. Светлого отчетливо прослеживается наличие постоянно высоких концентраций общего растворенного железа и марганца (фракция < 0,45 мкм) (*рис. 4*). Максимальные уровни содержания были зафиксированы в летне-осенний период 2011 года для железа и в зимний период 2010 года для обоих элементов. В анаэробной зоне ведущая роль в составе общего растворенного железа принадлежит двухвалентной форме (94,2%) [1, с. 60].

Количественно железо и марганец доминируют в слоях монимолимниона над сероводородом и биогенными элементами.

Выводы. В результате двухлетних гидролого-гидрохимических исследований доказан меромиктический железо-марганцевого типа статус оз. Светлого. Химически стратифицированные водоемы обнаружены в Норвегии

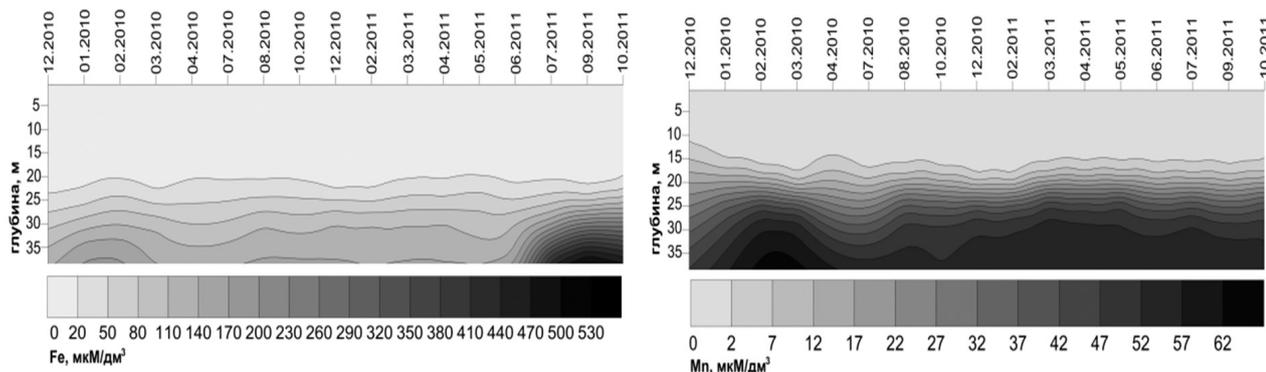


Рис. 4. Диаграммы пространственно-временной динамики концентраций железа и марганца (< 0,45)

[18, 19], Финляндии [17], США [30], Франции [16, 21], Испании [22], Конго [25], России [5, 2], Канаде [20, 23, 24, 31]. Однако по совокупности признаков, характеризующих географическое положение и водную толщю оз. Светлого (низкое содержание РОУ, нейтральный рН, электропроводность 190–380 мкСм/см, низкие концентрации сульфата и сероводорода, преобладание в мимомлимнионе железа над марганцем и сероводородом) данное озеро не имеет известных аналогов в мире. По соотношению удельной электропроводности и содержанию РОУ наиболее похоже на Светлое оз. Char Lake [20], находящееся на севере Канады (74°42' с.ш.).

Водоем, характеризующийся более чем десятикратным преобладанием растворенного двухвалентного железа над сульфидами в мо-

нимолимнионе при нейтральном рН, может являться современным аналогом раннепротерозойских (древнее 2,5–2,4 млрд лет), богатых железом и бедных сульфидами водоемов. Это обстоятельство открывает возможность наиболее адекватных исследований биогеохимических циклов элементов, протекавших в раннепротерозойских низкосульфидных высокожелезистых океанах.

Круглогодичная доступность озера в пределах циркумполярного региона и специфика физико-химических параметров водной толщи дают возможность проведения беспрецедентных исследований протекания процессов сульфатредукции, аноксигенного фотосинтеза и трансформации вещества на Red/Ox геохимических барьерах пресноводных экосистем в условиях северных широт.

Список литературы

1. Биогеохимические исследования системы стратифицированных озер реки Светлая (водосборный бассейн Белого моря) / Н.М. Кокрятская, С.А. Забелина, К.В. Титова и др. // Геология морей и океанов: материалы XVIII междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии, Москва, 14–18 ноября 2011 года. М., 2011. Т. 4. С. 58–62.
2. Гидрохимические и микробиологические особенности озера Могильного / В.В. Сапожников, Н.В. Аржанова, О.В. Титов // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. №1. С. 58–66.
3. *Ершова А.А., Морева О.Ю., Чупаков А.В.* Оценка содержания неорганических форм азота в разнотипных озерах Архангельской области // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: материалы V всерос. симпозиума с междунар. участием, Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 года. Петрозаводск, 2012. С. 187–189.
4. Меромиктическое пресноводное озеро Светлое / А.В. Чупаков, О.С. Покровский, Л.С. Широкова, Н.М. Кокрятская и др. // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: тез. докл. IV междунар. науч. конф., Нарочь, 12–17 сентября 2011 года. Минск, 2011. С. 191–192.
5. Микробные процессы циклов углерода и серы в озере Шира (Хакасия) / Н.В. Пименов, И.И. Русанов, О.В. Карначук и др. // Микробиология. 2003. Т. 72, № 2. С. 259–267.
6. *Морева О.Ю., Ершова А.А., Чупаков А.В.* Содержание соединений фосфора и кремния в малых озерах Северо-Запада России (Архангельская область) // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. С. 184–187.
7. Определение растворенных форм железа в морской воде с помощью феррозина / М.Ю. Кононец, С.В. Пахомова, А.Г. Розанов, М.А. Проскурнин // Журн. аналит. химии. 2002. Т. 57, № 7. С. 704–708.
8. ПНД Ф 14.1:2.4-95. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. М., 1995.

9. Распределение и состав взвеси в озерах Кенозерского национального парка Архангельская область) / К.В. Филина, В.П. Шевченко, Н.М. Кокрятская, А.В. Чупаков // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. URL: www.science-education.ru/106-950 (дата обращения: 08.01.2013).
10. РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д., 2010.
11. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М., 2003.
12. Система Белого моря. Т. 1. Природная среда водосбора Белого моря / отв. ред. А.П. Лисицын. М., 2010.
13. Чупаков А.В., Морева О.Ю., Покровский О.С. Биогенный и микроэлементный (К, Сг, Mn, Fe, Co, As, Rb, Sr, Zr) режим озера Светлое (водосборный бассейн Белого моря) // *Геология морей и океанов*. С. 176–180.
14. Чупаков А.В., Широкова Л.С., Покровский О.С. Сезонная динамика содержания растворенного органического углерода в контрастных озерах Архангельской области // *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах*. С. 182–184.
15. Solubility Product of Siderite (FeCO_3) as a Function of Temperature (25–250°C) / P. Benezeth, J.L. Dandurand, J.C. Harrichoury et al. // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 265 (15). P. 3–12.
16. Bura-Nakic E., Viollier E., Jezequel D. Reduced Sulfur and Iron Species in Anoxic Water Column of Meromictic Crater Lake Pavin (Massif Central, France) // *Chemical Geology*. Vol. 266. P. 311–317.
17. Hakala A. Mermixis as a Part of Lake Evolution – Observations and a Revised Classification on True Meromictic Lakes in Finland // *Boreal Environment Research*. 2004. Vol. 9. P. 37–53.
18. Hogve D. Chemical Stratification and Stability of Meromictic Lakes in the Upper Romerike District // *Scgweiz. Z. Hydrol.* 1980. Vol. 42/2. P. 171–195.
19. Idem. Cycling of Iron, Manganese, and Phosphate in a Meromictic Lake // *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42(4). P. 635–647.
20. Coupled Landscape-lake Evolution in High Arctic Canada / P. Hove, C. Belzile, J.A.E. Gibson, W.F. Vincent // *Can. J. Earth Sci.* 2006. № 43. P. 533–546. doi: 10.1139/E06-003.
21. Michard G., Pepe M., Sarazin G. Geochemical Study of a Crater Lake (Pavin Lake, France): Trace-element Behaviour in the Monimolimnion // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 125. P. 61–72.
22. Miracle M.R., Miracle E., Pedros-Alio C. Biological Studies of Spanish Meromictic and Stratified Karstic Lakes // *Limnetica*. 1992. Vol. 8. P. 59–77.
23. Overmann J., Thomas Beatty J. The Sulfur Cycle in the Chemocline of a Meromictic Salt Lake // *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41(1). P. 147–156.
24. Characterization of a Dense, Purple Sulfur Bacterial Layer in a Meromictic Salt Lake / J. Overmann, J. Thomas Beatty, K.J. Hall // *Limnol. Oceanogr.* 1991. Vol. 36(5). P. 846–859.
25. Physical and Biogeochemical Limits to Internal Nutrient of Meromictic Lake Kivu / N. Pasche, C. Dinkel, B. Müller // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54(6). P. 1863–1873.
26. Size Fractionation of Trace Elements in a Seasonally Stratified Boreal Lake: Control of Organic Matter and Iron Colloids / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.A. Zabelina et al. // *Aquatic Geochemistry*. 2012. Vol. 18. № 2. P. 115–139. doi: 10.1007/s10498-011-9154-z.
27. Dissolved, Suspended, and Colloidal Fluxes of Organic Carbon, Major and Trace Elements in the Severnaya Dvina River and Its Tributary / O.S. Pokrovsky, J. Viers, L.S. Shirokova et al. // *Chemical Geology*. 2010. Vol. 273. P. 136–149. doi:10.1016/j.chemgeo.2010.02.018.
28. Diurnal Variations of Trace Metals and Heterotrophic Bacterioplankton Concentration in a Small Boreal Lake of the White Sea Basin / L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, J. Viers // *Ann. Limnol.* 2010. Vol. 46. P. 67–75. doi: 10.1051/limn/2010011.
29. Stookey L.L. Ferrozine – A New Spectrophotometric Reagent for Iron // *Analytical Chemistry*. 1970. Vol. 42. № 7. P. 779–781.
30. Chemical and Isotopic Balances for a Meromictic lake / T. Takahashi, W. Broecker, Li Y. Hui, D. Thurberg. P. 272–292. URL: http://wap.aslo.org/lo/toc/vol_13/issue_2/0272.pdf (дата обращения: 22.10.2012).

31. A Methane Bubble Curtain in Meromictic Sakinaw Lake, British Columbia / S. Vagle, J. Hume, F. McLaughlin et al. // *Limnol. Oceanogr.* 2010. Vol. 55(3). P. 1313–1326.

32. *Violleer E., Inglett P.W., Hunter K.* The Ferrozine Method Revisited: Fe(II) / Fe(III) Determination in Natural Waters // *Applied Geochemistry.* 2000. Vol. 15. P. 785–790.

References

1. Kokryatskaya N.M., Zabelina S.A., Titova K.V., Chupakov A.V., Vorontsova O.N., Filina K.V. Biogeochemicheskie issledovaniya sistemy stratifitsirovannykh ozer reki Svetlaya (vodosbornyy basseyn Belogo morya) [Biogeochemical Studies of Stratified Lakes of the River Svetlaya (Catchment Basin of the White Sea)]. *Geologiya morey i okeanov. Materialy XVIII mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoy geologii* [Geology of Seas and Oceans. Proc. 18th Int. Conf. (School) on Marine Geology]. Moscow, 14–18 November 2011. Moscow, 2011, vol. 4, pp. 58–62.

2. Sapozhnikov V.V., Arzhanova N.V., Titov O.V., Torgunova N.I., Rusanov I.I. *Gidrokhimicheskie i mikrobiologicheskie osobennosti ozera Mogil'nogo* [Hydrochemical and Microbiological Features of Lake Mogilnoe]. *Vodnye resursy*, 2001, vol. 28, no.1, pp. 58–66.

3. Ershova A.A., Moreva O.Yu., Chupakov A.V. Otsenka sodержaniya neorganicheskikh form azota v raznotipnykh ozerakh Arkhangel'skoy oblasti [Assessment of Inorganic Nitrogen Forms in Different-Type Lakes of the Arkhangelsk Region]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: materialy V vseros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem* [Organic Matter and Biogenic Elements in Inland and Sea Waters: Proc. 5th Int. Symp.]. Petrozavodsk, 10–14 September 2012. Petrozavodsk, 2012, pp. 187–189.

4. Chupakov A.V., Pokrovskiy O.S., Shirokova L.S., Kokryatskaya N.M., Moreva O.Yu., Klimov S.I., Zabelina S.A., Vorob'eva T.Ya. Meromikticheskoe presnovodnoe ozero Svetloe [Meromictic Freshwater Lake Svetloe]. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody: tez. dokl. IV mezhdunar. nauch. konf.* [Lake Ecosystems: Biological Processes, Anthropogenic Transformation, Quality of Water. Proc. 4th Int. Sci. Conf.]. Naroch, 12–17 September 2011. Minsk, pp. 191–192.

5. Pimenov N.V., Rusanov I.I., Karnachuk O.V., Rogozin D.Yu., Bryantseva I.A., Lunina O.N., Yusupov S.K., Parnachev V.P., Ivanov M.V. Mikrobnyye protsessy tsiklov ugleroda i sery v ozere Shira (Khakasiya) [Microbial Processes of the Carbon and Sulfur Cycles in Lake Shira (Khakasia)]. *Mikrobiologiya*, 2003, vol. 72, no. 2, pp. 259–267.

6. Moreva O.Yu., Ershova A.A., Chupakov A.V. Soderzhanie soedineniy fosfora i kremniya v malykh ozerakh Severo-Zapada Rossii (Arkhangel'skaya oblast') [Phosphorus and Silicon Content in the Small Lakes of the North-West of Russia (Arkhangelsk Region)]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh* [Organic Matter and Biogenic Elements in Inland and Sea Waters], pp. 184–187.

7. Kononets M.Yu., Pakhomova S.V., Rozanov A.G., Proskurnin M.A. Opredelenie rastvorenykh form zheleza v morskoy vode s pomoshch'yu ferrozina [Determination of Soluble Iron Species in Seawater Using Ferrozine]. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2002, vol. 57, no. 7, pp. 704–708.

8. PND F 14.1:2.4 – 95. *Kolichestvennyy khimicheskyy analiz vod. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii nitrat-ionov v prirodnykh i stochnykh vodakh fotometricheskim metodom s salitsilovoy kislotoy* [Federal Environmental Regulation 14.1:2.4 – 95. Quantitative chemical analysis of water. Method of measuring mass concentration of nitrate ions in natural and waste waters using the photometric method with salicylic acid]. Moscow, 1995. 20 p.

9. Filina K.V., Shevchenko V.P., Kokryatskaya N.M., Chupakov A.V. Raspreделение i sostav vzvesi v ozerakh Kenozerskogo natsional'nogo parka (Arkhangel'skaya oblast') [Distribution and Composition of Suspension in the Lakes of Kenozero National Park (Arkhangelsk Region)]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 6. Available at: www.science-education.ru/106-950 (accessed 8 January 2013).

10. RD 52.24.450-2010. *Massovaya kontsentratsiya serovodoroda i sul'fidov v vodakh. Metodika izmereniy fotometricheskim metodom s N, N-dimetil-n-fenilendiaminom* [Ruling Document 52.24.450-2010. Mass concentration of hydrogen sulfide and sulfides in the water. Measuring by the photometric method with N,N-dimethyl-n-phenylenediamine]. Rostov-on-Don, 2010. 9 p.

11. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana* [Guidelines for chemical analysis of sea and fresh water under environmental monitoring of fishery water bodies and promising areas for harvesting in the World Ocean]. Moscow, 2003. 202 p.

12. *Sistema Belogo morya. T. 1. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya* [White Sea System. Vol. 1. Natural Environment of the White Sea Catchment Area]. Ed. A.P. Lisitsyn. Moscow, 2010. 480 p.

13. Chupakov A.V., Moreva O.Yu., Pokrovskiy O.S. Biogenny i mikroelementnyy (K, Cr, Mn, Fe, Co, As, Rb, Sr, Zr) rezhim ozera Svetloe (vodosbornyy basseyn Belogo morya) [Biogenic and Microelement (K, Cr, Mn, Fe, Co, As, Rb, Sr, Zr) Regime of Lake Svetloe (Catchment Basin of the White Sea)]. *Geologiya morey i okeanov: materialy XVIII mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoy geologii* [Geology of Seas and Oceans. Proc. 18th Int. Conf. (School) on Marine Geology]. Moscow, 14–18 November 2011. Moscow, 2011, vol. 4, pp. 176–180.

14. Chupakov A.V., Shirokova L.S., Pokrovskiy O.S. Sezonnaya dinamika sodержaniya rastvorenno go organicheskogo ugleroda v kontrastnykh ozerakh Arkhangel'skoy oblasti [Seasonal Dynamics of Dissolved Organic Carbon Content in Diverse Lakes of the Arkhangel'sk Region]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh* [Organic Matter and Biogenic Elements in Inland and Sea Waters], pp. 182–184.

15. Benezeth P., Dandurand J.L., Harrichoury J.C. Solubility Product of Siderite (FeCO₃) as a Function of Temperature (25–250°C). *Chemical Geology*, 2009, vol. 265 (15), pp. 3–12.

16. Bura-Nakic E., Viollier E., Jezequel D., Thiman A., Ciglenčki I. Reduced Sulfur and Iron Species in Anoxic Water Column of Meromictic Crater Lake Pavin (Massif Central, France). *Chemical Geology*, vol. 266, pp. 311–317.

17. Hakala A. Mermixis as a Part of Lake Evolution – Observations and a Revised Classification on True Meromictic Lakes in Finland. *Boreal Environment Research*, 2004, vol. 9, pp. 37–53.

18. Hogve D. Chemical Stratification and Stability of Meromictic Lakes in the Upper Romerike District. *Scgweiz. Z. Hydrol.*, 1980, vol. 42/2, pp. 171–195.

19. Hogve D. Cycling of Iron, Manganese, and Phosphate in a Meromictic Lake. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, vol. 42 (4), pp. 635–647.

20. Hove P., Belzile C., Gibson J.A.E., Vincent W.F. Coupled Landscape-Lake Evolution in High Arctic Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 2006, no. 43, pp. 533–546. doi: 10.1139/E06-003

21. Michard G., Pepe M., Sarazin G. Geochemical Study of a Crater Lake (Pavin Lake, France): Trace-Element Behaviour in the Monimolimnion. *Chemical Geology*, 1995, vol. 125, pp. 61–72.

22. Miracle M.R., Miracle E., Pedros-Alio C. Biological Studies of Spanish Meromictic and Stratified Karstic Lakes. *Limnetica*, 1992, vol. 8, pp. 59–77.

23. Overmann J., Thomas Beatty J. The Sulfur Cycle in the Chemocline of a Meromictic Salt Lake. *Limnol. Oceanogr.*, 1996, vol. 41 (1), pp. 147–156.

24. Overmann J., Thomas Beatty J., Hall K.J., Pfennig N., Northcote T.G. Characterization of a Dense, Purple Sulfur Bacterial Layer in a Meromictic Salt Lake. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, vol. 36 (5), pp. 846–859.

25. Pasche N., Dinkel C., Müller B., Schmid M., Wüest A., Wehrli B. Physical and Biogeochemical Limits to Internal Nutrient of Meromictic Lake Kivu. *Limnol. Oceanogr.*, 2009, vol. 54 (6), pp. 1863–1873.

26. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Zabelina S.A., Vorobiova T.Ya., Moreva O.Yu., Chupakov A.V., Shorina N.V., Kokryatskaya N.M., Audry S., Viers J., Zoutien C., Freydier R. Size Fractionation of Trace Elements in a Seasonally Stratified Boreal Lake: Control of Organic Matter and Iron Colloids. *Aquatic Geochemistry*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 115–139. doi: 10.1007/s10498-011-9154-z.

27. Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S., Shevchenko V.P., Filipov A.S., Dupré B. Dissolved, Suspended, and Colloidal Fluxes of Organic Carbon, Major and Trace Elements in the Severnaya Dvina River and Its Tributary. *Chemical Geology*, 2010, vol. 273, pp. 136–149. doi:10.1016/j.chemgeo.2010.02.018.

28. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Viers J., Klimov S.I., Moreva O.Yu., Zabelina S.A., Vorobiova T.Ya., Dupré B. Diurnal Variations of Trace Metals and Heterotrophic Bacterioplankton Concentration in a Small Boreal Lake of the White Sea Basin. *Ann. Limnol.*, 2010, vol. 46, pp. 67–75. doi: 10.1051/limn/2010011.

29. Stookey L.L. Ferrozine – A New Spectrophotometric Reagent for Iron. *Analytical Chemistry*, 1970, vol. 42, no. 7, pp. 779–781.

30. Takahashi T., Broecker W., Hui Li Y., Thurber D. *Chemical and Isotopic Balances for a Meromictic Lake*. Available at: http://wap.aslo.org/lo/toc/vol_13/issue_2/0272.pdf (accessed 22 October 2012).

31. Vagle S., Hume J., McLaughlin F., MacIsaac E., Shortreed K. A Methane Bubble Curtain in Meromictic Sakinaw Lake, British Columbia. *Limnol. Oceanogr.*, 2010, vol. 55 (3), pp. 1313–1326.

32. Violleer E., Inglett P.W., Hunter K., Roychoudhury A.N., Capellen P. The Ferrozine Method Revisited: Fe(II) / Fe(III) Determination in Natural Waters. *Applied Geochemistry*, 2000, vol. 15, pp. 785–790.

Chupakov Artem Vasilyevich

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Pokrovsky Oleg Sergeevich

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia);
The National Center for Scientific Research (Toulouse, France)

Shirokova Lyudmila Sergeevna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Vorobyeva Taisiya Yarkievna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Zabelina Svetlana Aleksandrovna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Kokryatskaya Natalya Mikhaylovna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Moreva Olga Yuryevna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Ershova Anna Alekseevna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Shorina Natalya Valeryevna

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;
Institute of Oil and Gas, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russia)

Klimov Sergey Ivanovich

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

HYDROCHEMICAL PROPERTIES OF FRESHWATER MEROMICTIC LAKE SVETLOE (ARKHANGELSK REGION)

The paper presents the first data on the morphometric characteristics and quantitative parameters of the chemical stratification of freshwater Lake Svetloe, located in the north of the Arkhangelsk Region.

The researches were conducted from December 2009 to November 2011. The meromictic status of this water body was proved. Data on the content of O₂, S²⁻, Ca, Mg, Na, SO₄²⁻, Cl, Fe, Mn, dissolved organic carbon (DOC) and nutrients were presented.

Keywords: meromictic lake, chemical stratification, hydrogen sulfide, nutrients, dissolved forms of iron and manganese.

Контактная информация:

Чупаков Артём Васильевич
e-mail: artem.chupakov@gmail.com

Покровский Олег Сергеевич
e-mail: oleg@imtg.obs-mip.fr

Широкова Людмила Сергеевна
e-mail: LShirikova@yandex.ru

Воробьёва Таисия Яркиевна
e-mail: Vtais@yandex.ru

Забелина Светлана Александровна
e-mail: svetzabelina@gmail.com

Кокрятская Наталья Михайловна
e-mail: Nkokr@yandex.ru

Морева Ольга Юрьевна
e-mail: МарусR1@yandex.ru

Ершова Анна Алексеевна
e-mail: nurka90@bk.ru

Шорина Наталья Валерьевна
e-mail: nvshorina@yandex.ru

Климов Сергей Иванович
e-mail: Kliopa@atnet.ru

Рецензенты – *Шевченко В.П.*, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН (Москва); *Коробов В.Б.*, доктор географических наук, директор Северо-Западного отделения Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа института нефти и газа Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова