

Georgy Stepanovich Bordonskiy,
Doctor of Physics and Mathematics,
Chief of the Laboratory of Cryogenesis Geophysics,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru

Alexandr Alexandrovich Gurulev,
Candidate of Physics and Mathematics,
Senior Scientific Employee,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru

Pavel Yuryevich Lukyanov,
Candidate of Technical Sciences,
Leading Programmer,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru

Aleksey Olegovich Orlov,
Researcher,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000, e-mail: Orlov_A_O@mail.ru

Sergey Vasilevich Tsyrenzhapov,
Researcher,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru

Hydrophysical Parameters of the Doroninskoe Lake and the Origins of its Meromixis

The paper discusses some hydrophysical parameters of meromictic soda in the lake Doroninskoe (Zabaikalsky Region), where mineralization reached 36 g/l. The temperature dependence of the water density was measured. It is turned up, that density for this salinity has maximum at $+1.5^{\circ}\text{C}$ in contrast to sea water for which this peculiarity is absent. The origins of the meromixis is founded: there are special temperature dependence of water density, low water transparency and effect of desalination of top water layer in superficial pond after the ice cover melting.

Keywords: the Doroninskoye Lake, meromictic basin, thermocline, chemocline.

Введение

Озеро Доронинское, расположенное в Забайкальском крае, привлекает внимание исследователей в связи с относительно редким химическим составом вод, в которых преобладающими компонентами являются карбонаты и гидрокарбонаты [1; 2; 3]. Его изучение было начато достаточно давно в связи с промышленным использованием по добыче соды в начале прошлого столетия [1]. Несколько десятилетий назад к оз. Доронинское вновь было привлечено внимание в связи с гипотезой академика Г. А. Заварзина о возможной роли содовых водоёмов в происхождении жизни [4]. Были развёрнуты исследования озера и обнаружена меромиксия – отсутствие вертикального перемешивания вод.

Химический состав воды озера изучали в ряде работ, например, [5; 6]. Было установлено сосуществование в воде растворённого сероводорода и кислорода, что оказалось связанным с динамическим равновесием, определяемым жизнедеятельностью сульфат-редуцирующих микроорганизмов.

Геофизические исследования выполняли в работах [2; 7], где впервые изучали микроволновые свойства ледяного покрова, в связи с возможностью дистанционного изучения водоёма [8] и процесса накопления солей на верхней границе льда.

Отсутствие циркуляции вод характерно для пресных водоёмов зимой в период ледостава, что определяется максимумом их плотности при температуре вблизи $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При отсутствии льда ветровые, сейшевые, температурные воздействия приводят к перемешиванию пресноводных водоёмов. Эффект стратификации отсутствует для морской воды, так как для неё исчезает аномалия плотности и имеет место её монотонное возрастание вплоть до температуры кристаллизации около $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вместе с тем, солёность вод оз. Доронинское близка к солёности морской воды 35 ‰. Поэтому до настоящего времени обнаруженная меромиксия вод оз. Доронинское не объяснена, так как неявно предполагалось отсутствие аномалии плотности от температуры. Описание различных меромиктических водоёмов представлено в [9], где, однако, отсутствует информация о водоёме, близком по параметрам к содовому оз. Доронинское.

Цель настоящей работы – на основе имеющихся данных комплексных исследований физических, химических и биологических особенностей оз. Доронинское, а также новых результатов дать качественное объяснение меромиксии данного конкретного водоёма. Свойства содовых водоёмов так же представляют интерес для геохимических исследований [10].

Структурные особенности озера

В литературных источниках отсутствуют полные данные о гидрологических особенностях водоёма и причинах накопления в нём гидрокарбонатов. Не изучена детально и стратификация солей в снежно-ледяном покрове, а также температурная зависимость плотности воды вблизи температуры замерзания. Не исследована важная характеристика – прозрачность воды по глубине, определяющая её разогрев солнечной радиацией и, следовательно, возможности циркуляции вод.

Поэтому, прежде всего, были выполнены измерения ряда гидрофизических параметров и составлена подробная карта глубин водоёма. Выполнены измерения распределения температуры и солёности по глубине и по акватории озера. Ранее аналогичные измерения другими исследователями выполнялись только в отдельных точках [5; 6]. Впервые проведены измерения прозрачности вод по глубине в трёх различных спектральных интервалах. При измерениях прозрачности был обнаружен слой с экстремально низкой прозрачностью толщиной порядка десяти сантиметров, находящийся вблизи хемоклина. Положение этого слоя было исследовано с помощью эхолота по акватории озера. Кроме того, проведены микроволновые радиометрические исследования снежно-ледяного покрова, а также получены радиолокационные изображения с разрешением 3 м для поиска возможных источников подтока вод и особенностей структуры льда.

Результаты измерений

На рис. 1 представлена карта глубин озера, полученная с использованием эхолота при его установке на моторную лодку.



Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Доронинское по состоянию на сентябрь 2013 г.

В наиболее глубокой части озера установлена особенность в виде вытянутого образования увеличенной глубины приблизительно на 0,5 м. Возможно, что озеро в данной области питается подземными водами.

Неожиданной оказалась зависимость плотности воды оз. Доронинское от температуры для значения солёности $S = 36.6 \text{ ‰}$. Результаты измерений приведены на рис. 2.

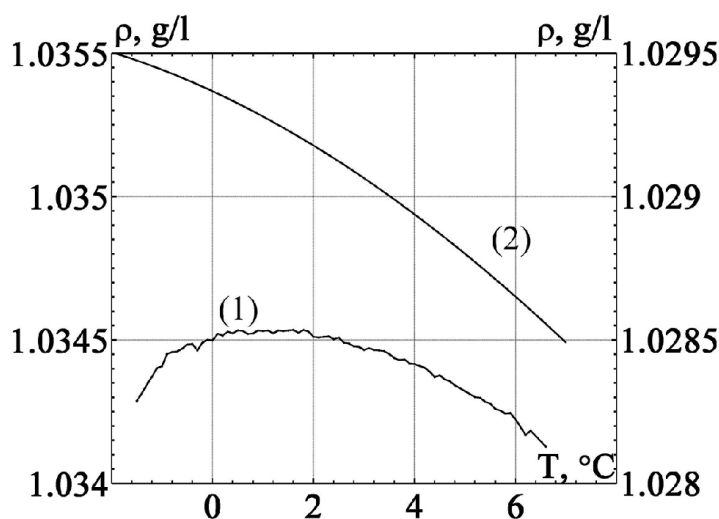


Рис. 2. Температурная зависимость плотности воды (ρ) для оз. Доронинское (1) и морской воды (2) при близких солёностях. Слева шкала для плотности воды оз. Доронинское, справа для морской

Для сравнения на рисунке приведены аналогичные зависимости для морской воды ($S \sim 35 \text{ ‰}$). Как известно, температура замерзания раствора уменьшается с ростом концентрации соли, как $\Delta T \sim k \cdot m$ [11], где ΔT – понижение температуры фазового перехода

воды, k – криоскопическая константа воды, m – моляльность раствора. В случае воды оз. Доронинское и морской воды ΔT оказываются близкими, однако вода содового водоёма, как следует из измерений, имеет существенное отличие другого свойства – её плотность имеет максимум при $+1,5^\circ\text{C}$ и слабо изменяется в интервале $0 \div +2^\circ\text{C}$. Основной состав воды содового озера по данным [6] следующий: Na^+ – 23 %; CO_3^{2-} – 23 %; HCO_3^- – 22 %; Cl^- – 17 %.

Содовая вода оз. Доронинское с установленной плотностной зависимостью от температуры создаёт конвекцию при охлаждении водоёма – близкой к водоёму с пресной водой. Однако особенностью этой воды является больший перепад значения плотности от максимальной до её значения в точке фазового перехода. Этот перепад в 1,5 раза больше, чем для случая пресной воды; то есть содовая вода более устойчива в стратифицированном состоянии, чем пресная.

Выполненное лабораторное измерение плотности находится в согласии с натурными измерениями температуры водоёма в течение года – рис. 3, её температура не понижается в придонном слое ниже $+0,5^\circ\text{C}$.

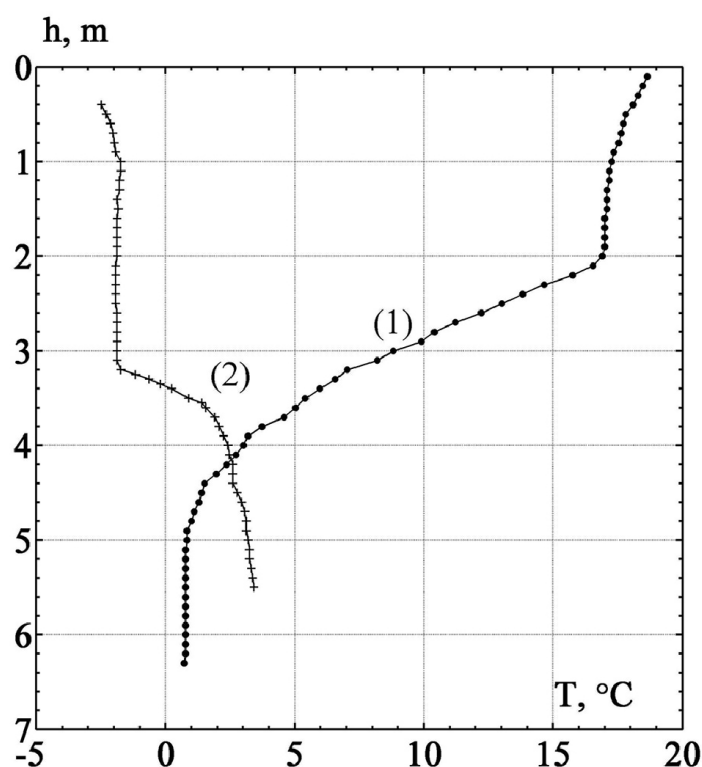


Рис. 3. Распределение температуры (Т) воды от глубины (h)
Даты измерений 1 – 17.06.2013; 2 – 20.12.2013.

Причём в летнее время наблюдается характерный резкий переход температуры от более высоких к более низким значениям, который слабее выражен в зимнее время. Такая резкая стратификация отсутствует в пресноводных водоёмах.

Другая причина, определяющая стратификацию, связана с характером прозрачности вод озера. На рис. 4 представлены результаты измерений прозрачности воды по методике, приведённой в [12].

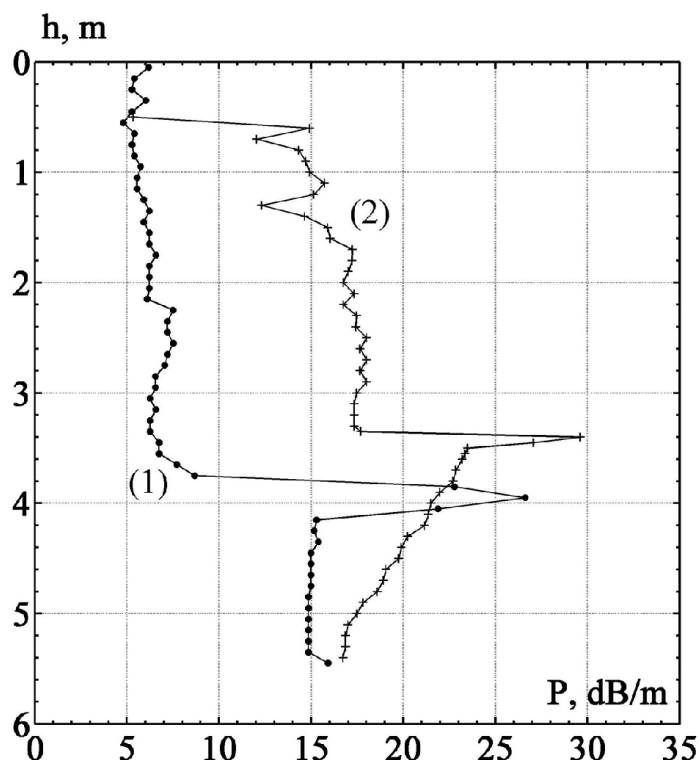


Рис. 4. Зависимость погонного затухания интенсивности светового излучения в воде оз. Доронинское (P) от глубины (h). Даты измерений: 1 – 11.07.2013; 2 – 12.02.2014.

В ней использовался погружаемый датчик с источником света на светодиодах и фотодатчики. Расстояние между датчиками составляло 5 см. На графиках рис. 4 приведено отношение интенсивности света в воде на данной глубине к измеренной интенсивности света в воздухе, пересчитанное на длину пути в 1 м (погонное затухание). Затухание приведено в децибелах. Общее затухание (ослабление) падающего из верхнего полупространства света с глубиной определяется интегрированием по этому параметру. Графики показывают низкую прозрачность воды. На глубине менее 3 м, где наблюдали хемоклин (резкое изменение солёности), общее ослабление солнечного излучения достигает 17 дБ, то есть интенсивность падающего сверху света ослаблена в 50 раз. В зимнее время это ослабление ещё больше. Очевидно, что основная доля солнечного излучения поглощается в верхнем слое до хемоклина.

При нагревании верхнего слоя воды его плотность уменьшается, что и приводит к отсутствию перемешивания, то же имеет место при охлаждении воды ниже $+0.5$ °C. Причина низкой прозрачности оз. Доронинское связана с наличием в воде частиц органического происхождения, а также с гидрогенным минералообразованием [13; 14]. Слой повышенной концентрации взвеси органического происхождения представлен на рис. 5 по данным эхолотационных измерений.

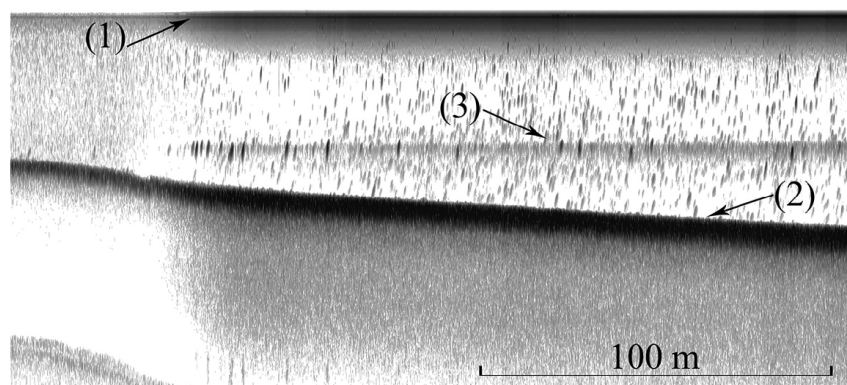


Рис. 5. Пример записи эхолота: (1) – поверхность воды; (2) – дно; (3) – область повышенного отражения по данным эхолота вблизи хемоклина. Дата измерений: 05.09.2013.

Интересно отметить, что его расположение от поверхности не зависело от глубины озера, а сигнал эхолота убывал при продвижении к береговой зоне, где глубина озера сравнивалась с глубиной хемоклина. Отсюда можно сделать вывод, что главный фактор нахождения этих слоёв – температура воды, которая, в свою очередь, определяется потоком проникающей солнечной радиации.

Выполнено также исследование распределения соли по высоте ледяного и снежного покровов. В течение зимы наблюдали существенное изменение концентрации солей в слое между снегом и льдом. К концу периода ледостава в марте в слое льда толщиной ~ 1 см содержание соли достигало ~ 10 г/кг, в снежном покрове ~ 100 г/кг при относительно постоянном среднем содержании соли во льду ~ 3 г/кг. Эти данные также указывают на значительную роль тепловых потоков, создаваемых солнечной радиацией, на структурирование верхних слоёв содового озера.

Обсуждение полученных результатов

Результаты исследований гидрофизических, химических и биологических параметров показывают, что оз. Доронинское характеризуется выраженными процессами структурообразования, характерными особенностями которого является стратификация слоёв по минерализации – меромиксия с повышенной концентрацией солей в более глубокой части водоёма, а также движение кристаллов солей в верхний слой ледяного покрова в зимнее время.

Общая причина такой ситуации – существование переменного потока энергии, поступающей в систему извне, определяемого суточными и сезонными вариациями интенсивности приземной солнечной радиации. Поступающая радиация нагревает преимущественно верхние слои водной среды, подавляя циркуляцию вод, так как плотность её, как показали наши измерения, максимальна в интервале $0 \div +2$ °C. Мутность воды определяется как минералообразованием, так и фотосинтетическими процессами, приводящими к особой биоте озера.

Небольшие глубины озера (до 6 м) оказываются сравнимыми с толщиной ледяного покрова, который может достигать 1.5 м в холодные зимы. Образование льда приводит к росту подлёдной минерализации и появлению второго хемоклина. При этом минерализация озера выравнивается по глубине, однако нарушения меромиксии не происходит, так как температура замерзания содовой воды при концентрациях солей $25 \div 30$ г/л ниже 0 °C, а при такой солёности и температурах плотность не является максимальной (рис. 2), то есть этот подлёдный слой не опускается ко дну.

Если бы состав соли соответствовал составу морской воды, то в этот период возникала бы гравитационная циркуляция вод. Нарушение меромиксии возможно в короткий период начала таяния льда, когда подлёдная температура может превысить значение около 0 °C,

когда плотность воды выравнивается по глубине. Этот эффект наблюдали в апреле в некоторые годы. При таянии льда в весенний период верхний слой оказывается распреснённым, его плотность понижается по сравнению с солёной нижележащей водой, что приводит к восстановлению меромиксии. Последующий разогрев верхнего слоя воды $\sim 2 - 3$ м стабилизирует меромиксию.

Выводы

Отсутствие перемешивания воды оз. Доронинское по глубине связывается со следующими основными причинами:

1. Существованием особого характера температурной зависимости плотности воды озера, в химическом составе которого преобладают карбонаты и гидрокарбонаты (масса их анионов составляет ~ 70 % массы всех анионов), с экстремумом плотности воды в интервале температур $0 \div +2^\circ\text{C}$ (при 1.5°C $\rho = 1.029$ г/л для концентрации солей 36.6 г/л).

2. Геологическим строением водоема – его небольшими глубинами до 6 м, плоским дном, а также климатическими особенностями региона – образованием ледяного покрова, толщина которого сравнима с глубиной водоёма. При образовании льда и его последующим таянием возникает распреснённый более лёгкий слой воды $\sim 2 \div 3$ м (в соответствии с полученными результатами измерений – рис. 2).

3. Высокой мутностью воды озера, сформированной процессами жизнедеятельности микроорганизмов и гидрогенным минералообразованием. Погонное затухание солнечного излучения составляет по измерениям в летнее время 5–10 дБ/м (интенсивность падает в 3–10 раз на метр), в результате чего солнечная радиация практически полностью поглощается в слое воды ~ 3 м. Разогрев верхних распреснённых слоёв воды подавляет влияние ветрового перемешивания (высота волн ~ 0.5 м) и стабилизирует плотностную стратификацию вод озера.

Таким образом, полученные результаты позволяют дополнить качественную оценку возможности появления меромиксии в водоёмах различных климатических зон. В первую очередь меромиксия зависит от наличия максимума плотности воды вблизи температуры её замерзания. Однако этого фактора ещё недостаточно для устойчивой стратификации водоёмов, что видно на примере пресноводных озёр небольших глубин. По-видимому, дополнительными факторами являются:

1) разность плотности в экстремальной точке и точке замерзания (что определяется химическим составом воды);

2) отношение глубины и толщины ледяного покрова (для водоёмов с ледяным покровом в зимний период), что создаёт опреснение верхнего слоя воды после таяния льда;

3) пониженная прозрачность воды, определяемая биологическими и гидрохимическими процессами, приводящая к нагреванию слоя водоёма выше хемоклина.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории водных экосистем ИПР-ЭК СО РАН за оказанную помощь при проведении натурных исследований.

Список литературы

1. Франк-Каменецкий А. Г. Промышленная эксплуатация Доронинского содового озера. Сибирский краевой научно-исследовательский съезд. Т. II. Доклады секции «Недра». Новосибирск, 1928. С. 271–279.

2. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. Миграция солевых включений в ледяных покровах озёр Забайкалья // Известия АН. Серия географическая. 2000. № 4. С. 98–102.

3. Lukyanov P. Y., Petrov O. I., Gurulev A. A., Orlov A. O. et al. All Season Observations of Meromictic Regime at Lake Doroninskoye // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2014. V. 88. Supp. 1. P. 20–22.
4. Заварзин Г. А., Жилина Т. Н. Содовые озёра – природная модель древней биосферы континентов // Природа. 2000. № 2. С. 45–55.
5. Замана Л. В., Борзенко С. В., Бордонский Г. С., Крылов С. Д. [и др.]. Кремний в ледяном покрове озер Забайкалья // Доклады РАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 248–251.
6. Борзенко С. В., Замана Л. В. Восстановленные формы серы в рапе содового озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Геохимия. 2011. № 3. С. 268–276.
7. Бордонский Г. С., Гурулев А.А., Кантемиров Ю.И., Орлов А.О. [и др.]. Радиолокационное исследование ледяного покрова озера Доронинского // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 289–297.
8. Бордонский Г. С. Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоёмов. Новосибирск. Наука. 1990. 104 с.
9. Boehrer V., Schultze M. Stratification of lakes // Reviews of Geophysics. V. 46. Iss. 2. 27 p.
10. Шварцев С. Л., Исупов В. П., Владимиров А. Г., Колпакова М. Н. [и др.]. Литий и уран в бессточных озёрах Западной Монголии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 1. С. 43–48.
11. Слейбо У., Персонс Т. Общая химия. М.: Наука, 1976. 552 с.
12. Lukyanov P. Y., Petrov O. I., Schegrina K. A. Synergistic structures of meromictic lakes ice covers of Transbaikalia // Issues of Geography and Geocology. 2014. № 2. P. 20–25.
13. Belkova N. L., Matyugina E. B. Vertical distribution of bacteria in Doroninskoe lake (Zabaikalie, Russia): Paradigm of Dominance // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2014. V. 88. Supp. 1. P. 53–55.
14. Юргенсон Г. А., Серебренникова Н. В., Котова Е. Н. Гейлюссит Доронинского содового озера, Восточное Забайкалье, Россия // Литосфера. 2011. № 2. С. 128–134.

References

1. Frank-Kamenetskii A. G. Promyshlennaya ekspluatatsiya Doroninskogo sodovogo ozera. Sibirskii kraevoi nauchno-issledovatel'skii s"ezd. T. II. Doklady sektsii «Nedra». Novosibirsk, 1928. S. 271–279.
2. Bordonskii G. S., Krylov S. D. Migratsiya solevykh vklyuchenii v ledyanykh pokrovakh ozer Zabaikal'ya // Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya. 2000. № 4. S. 98–102.
3. Lukyanov P. Y., Petrov O. I., Gurulev A. A., Orlov A. O. et al. All Season Observations of Meromictic Regime at Lake Doroninskoye // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2014. V. 88. Supp. 1. P. 20–22.
4. Zavarzin G. A., Zhilina T. N. Sodovye ozera – prirodnyaya model' drevnei biosfery kontinentov // Priroda. 2000. № 2. S. 45–55.

5. Zamana L. V., Borzenko S. V., Bordonskii G. S., Krylov S. D. [i dr.]. Kremnii v ledyanom pokrove ozer Zabaikal'ya // Doklady RAN. 2005. T. 401. № 2. S. 248–251.
6. Borzenko S. V., Zamana L. V. Vosstanovlennye formy sery v rape sodovogo ozera Doroninskoe (Vostochnoe Zabaikal'e) // Geokhimiya. 2011. № 3. S. 268–276.
7. Bordonskii G. S., Gurulev A.A., Kantemirov Yu.I., Orlov A.O. [i dr.]. Radiolokatsionnoe issledovanie ledyanogo pokrova ozera Doroninskogo // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 4. S. 289–297.
8. Bordonskii G. S. Teplovoe izluchenie ledyanogo pokrova presnykh vodoemov. Novosibirsk. Nauka, 1990. 104 s.
9. Boehrer B., Schultze M. Stratification of lakes // Reviews of Geophysics. V. 46. Iss. 2. 27 p.
10. Shvartsev S. L., Isupov V. P., Vladimirov A. G., Kolpakova M. N. [i dr.]. Litii i uran v besstochnykh ozerakh Zapadnoi Mongolii // Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya. 2012. T. 20. № 1. S. 43–48.
11. Sleibo U., Persons T. Obshchaya khimiya. M.: Nauka. 1976. 552 s.
12. Lukyanov P. Y., Petrov O. I., Schegrina K. A. Synergistic structures of meromictic lakes ice covers of Transbaikalia // Issues of Geography and Geocology. 2014. № 2. P. 20–25.
13. Belkova N. L., Matyugina E. B. Vertical distribution of bacteria in Doroninskoe lake (Zabaikalie, Russia): Paradigm of Dominance // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2014. V. 88. Supp. 1. P. 53–55.
14. Yurgenson G. A., Serebrennikova N. V., Kotova E. N. Geilyussit Doroninskogo sodovogo ozera, Vostochnoe Zabaikal'e, Rossiya // Litosfera. 2011. № 2. S. 128–134.

Статья поступила в редакцию 19.04.2015