



УДК 556.555; 528.88

Применение спутниковой информации для картографического отображения и анализа распределения гидрофизических характеристик озера Хубсугул*

Е. Н. Сутырина (ensut@rambler.ru)

Аннотация. В статье обсуждаются основные результаты картографирования распределения гидрофизических характеристик оз. Хубсугул по данным радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), отобранном за многолетний период (1999–2012 гг.) из архива телеметрии Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. В рамках настоящего исследования производилось картографирование и анализ пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и разрушения снежно-ледяного покрова в пределах акваторий оз. Хубсугул.

Ключевые слова: оз. Хубсугул, дистанционное зондирование, данные AVHRR, температура поверхности воды, разрушение снежно-ледяного покрова.

Введение

Озеро Хубсугул расположено на севере Монголии во впадине у южных отрогов Саян на высоте 1645 м над у. м. и на 1118 м над уровнем Байкала. Котловина оз. Хубсугул имеет тектоническое происхождение и является южным элементом Байкальской рифтовой зоны.

С Байкалом оз. Хубсугул связан реками Эгийн-Гол и Селенгой.

Озеро Хубсугул имеет длину 136 км. Ширина озера изменяется от 15 до 36,5 км и имеет среднее значение, равное 20,3 км. Средняя глубина равна 139 м, максимальная глубина – 262 м.

Объём воды в оз. Хубсугул составляет 383,3 км³. Площадь водной поверхности – 2760 км² [2; 17; 24].

При изучении оз. Хубсугул, имеющего значительные размеры акватории, данные дистанционного зондирования предоставляют возможность следить за состоянием всего водоёма и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, что невозможно обеспечить с применением только судовых и экспедиционных исследований.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-05-31100, 12-05-00865) и Программы стратегического развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» на 2012–2016 годы

Контроль состояния водоёмов с применением дистанционных методов основан на возможности регистрации современной дистанционной аппаратурой широкого спектра значимых параметров водной среды. В рамках данного исследования производилось картографирование и анализ пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и разрушения снежно-ледяного покрова в пределах акваторий оз. Хубсугул с применением спутниковой информации.

Использованные материалы

В рамках данного исследования были обработаны и проанализированы данные радиометра AVHRR за период с 1999 по 2012 г., отобранные из архива телеметрии Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. Радиометр AVHRR установлен на борту полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – аббревиатура Национального управления США по исследованию океана и атмосферы). Спутники серии NOAA летают на высоте приблизительно 850 км по синхронизированным с Солнцем орбитам.

Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение в пяти спектральных диапазонах: 0,58–0,68 мкм; 0,725–1,0 мкм; 3,55–3,93 мкм; 10,3–11,3 мкм; 11,4–12,4 мкм [12]. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полученное изображение охватывает полосу земной поверхности шириной 2700 км по трассе движения спутника, что обеспечивает полный обзор акватории оз. Хубсугул за один пролет.

Изображения со спутников передаются на Землю в реальном масштабе времени на частоте 1700 МГц в режиме HRPT (High Resolution Picture Transmission). Возможность свободного приема спутниковой информации наземными станциями обеспечивается Всемирной метеорологической организацией (ВМО) согласно концепции «Открытого неба».

Картографирование ледовой обстановки

Исследование ледяного покрова на оз. Хубсугул имеет научное и практическое значение. С точки зрения научных исследований, получение информации о динамике ледяного покрова важно для изучения изменений локального и регионального климата, так как характеристики ледяного покрова чувствительны к климатическим изменениям [26; 28]. С другой стороны, ледяной покров, являясь продуктом взаимодействия атмосферы и гидросферы, сам оказывает существенное влияние на условия формирования энергетических потоков в системе водоем – атмосфера, препятствует ветровому перемешиванию и определяет своеобразие всех элементов режима озера [9, 10]. Ввиду этого изучение динамики ледяного покрова водоемов является необходимым звеном при изучении цепи явлений, протекающих в водоеме [5]. Кроме того, значительный научный интерес представляет изучение самих фазовых переходов воды и льда и влияние этих

процессов на круговорот воды [1]. С практической точки зрения картографическая информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду [4].

В период очищения озера ото льда комбинация инфракрасных и видимых каналов AVHRR позволяет определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова и чистую воду. В данной работе при оценке стадий таяния и разрушения снежно-ледяного покрова на оз. Хубсугул за основу была принята классификация, приведенная В. М. Мишоном [15] и доработанная на основании ряда ведущих исследований радиационных свойств разрушающегося льда и снега [9; 13; 21; 25; 27].

Для картографического отображения ледовой обстановки в период разрушения льда в работе применяются картознаки качественного фона на основе разработанной автором палитры.

На рис. 1 в качестве примера приведены полученные в результате анализа спутниковых изображений AVHRR карты, на которых отображено состояние снежно-ледяного покрова по степени его стаивания и разрушения на озере Хубсугул в 2010 и 2012 гг.

Несмотря на то, что оз. Хубсугул находится в более низких широтах, чем озеро Байкал, разрушение льда на Хубсугуле происходит позднее, чем на Байкале. В среднем сроки очищения оз. Хубсугул ото льда приходится на середину июня. При этом наблюдается значительная межгодовая изменчивость в сроках разрушения льда и очищения от него озера, что можно видеть на представленных картографических изображениях (см. рис. 1).

При рассмотрении серии карт на рис. 1 можно отчетливо проследить динамику разрушения ледяного покрова в 2010 и 2012 гг., при этом видно, что ледовая обстановка на озере существенно отличается в указанные годы.

В начале июня 2010 г. (см. рис. 1, *а*) снежно-ледяной покров на озере только начинает таять – лед ещё покрыт чистым увлажненным снегом, и на поверхности имеется около 10–30 % серых и темных пятен, в следующие две недели снежно-ледяной покров интенсивно тает (см. рис. 1, *б, в*), но и к середине июня (см. рис. 1, *в*) озеро очищается ото льда лишь на незначительных частях акватории. Дальнейшие спутниковые наблюдения позволили зафиксировать отдельные ледовые явления в озере даже в третьей декаде июня 2010 г.

В 2012 г. (см. рис. 1, *г, д, е*) таяние льда на озере, согласно спутниковым наблюдениям, укладывалось в средние сроки. Уже в начале июня 2012 г. (см. рис. 1, *е*) оз. Хубсугул наполовину очистилось ото льда, на оставшейся части акватории снежно-ледяной покров практически везде вскрылся и интенсивно разрушается.

Такое различие в сроках разрушения льда на озере может объясняться более низкими температурами воздуха в районе Хубсугула весной 2010 г. Например, по данным реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction / The National Center for Atmospheric Research – аббревиатура Центра исследования окружающей среды и Национального центра атмосферных исследований США), среднее значение температуры воздуха в апреле 2010 г. на 4,6 °С ниже среднего значения в апреле 2012 г.

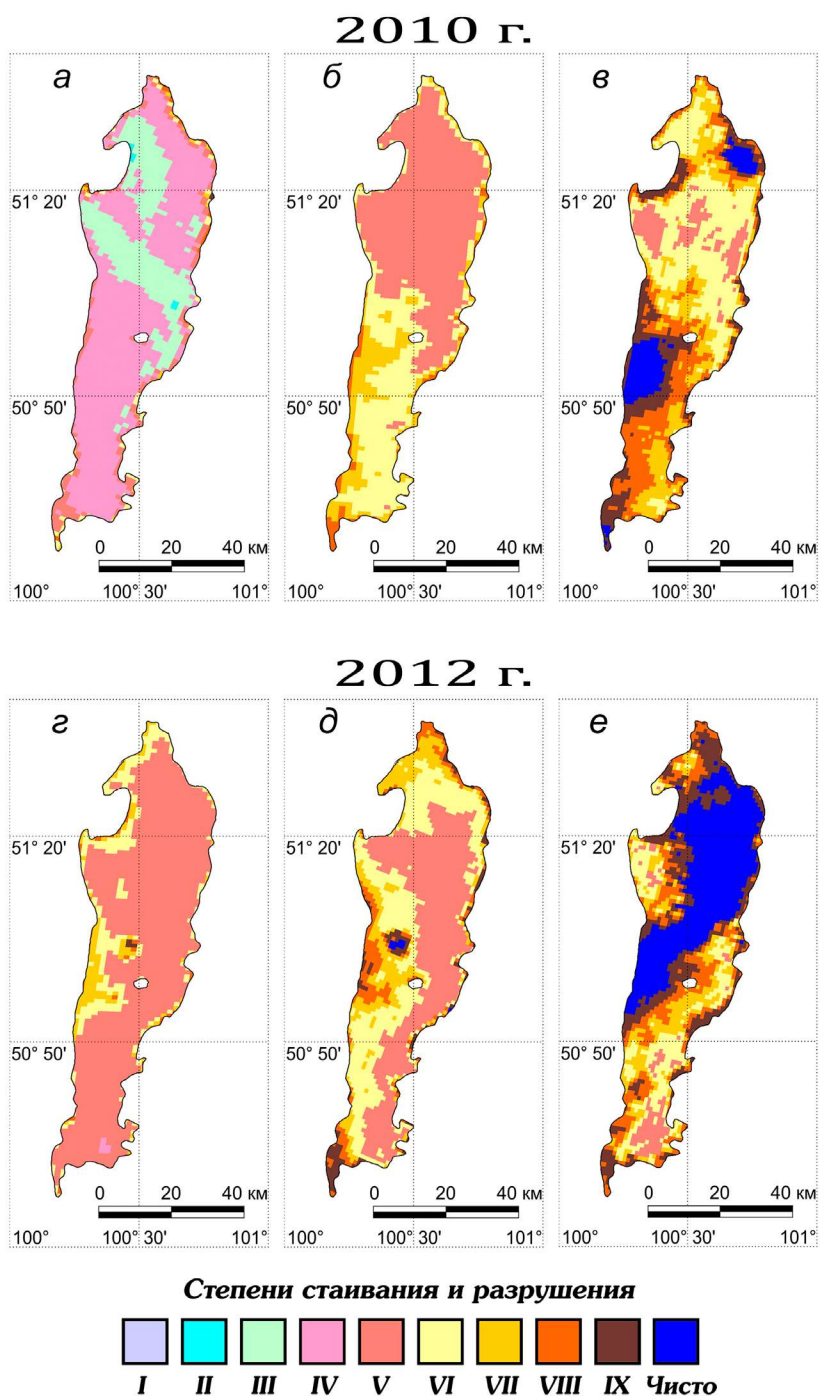


Рис. 1. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2010 г. (а – 3 июня, б – 13 июня, в – 16 июня) и 2012 г. (г – 15 мая, д – 25 мая, е – 6 июня):

I – снег чистый, плотный, мелко- и среднезернистый, сухой;

II – снег чистый, слабоувлажненный (начало таяния), плотный; местами появляются отдельные серые пятна (более увлажненные участки);

III – снег чистый, днем местами появляется вода; количество серых пятен составляет 10–20 % видимой поверхности;

IV – снег чистый, влажный, начинает оседать, переходит в крупнозернистый; на поверхности около 30 % серых и темных пятен;

V – снег влажный, местами загрязнен, на льду под снегом вода; количество белых (чистый снег), серых и темных пятен одинаково;

VI – снег интенсивно тает, на льду вода и снежная каша. После вскрытия просветы чистой воды между льдинами занимают менее 30 % площади;

VII – снег крупнозернистый, сохраняется на отдельных местах; ледяная поверхность шероховатая, серых или темных оттенков. Просветы чистой воды между льдинами занимают около 30 % площади;

VIII – снежная каша, лед темный, шероховатый, отдельные участки серого цвета. Просветы чистой воды между льдинами занимают 40–50 % площади;

IX – лед темный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Просветы чистой воды занимают более 50 % площади

Картографирование распределения температуры поверхности воды

Информация о пространственно-временном распределении температуры поверхности воды необходима для оценки накопления и расхода тепла водной массой в результате ее теплообмена с атмосферой и ледом озера, расчета теплового баланса, разработки методов прогноза сроков вскрытия и замерзания водоема [9; 15; 22]. Температура воды является важнейшим параметром, позволяющим выявить климатические изменения [7; 11; 18]. В связи с этим постоянный мониторинг и оперативное картографирование температуры поверхности воды необходимы при изучении регионального и локального изменения климата.

Температура поверхности воды может использоваться для наблюдения за глубинными разломами, так как они являются зонами повышенной проницаемости земной коры и служат проводящими путями растворов и газов, как правило, более высокотемпературных по сравнению с поверхностью дна озера, что приводит к уникальным современным явлениям и процессам, в том числе появлению аномалий в распределении температуры поверхности воды [3].

Температура поверхности воды является важной характеристикой состояния экосистемы озера. Она характеризует сезонные изменения состояния стратификации водной толщи. Дважды в год, в периоды весенней и осенней конвекции, она близка к температуре перемешанного слоя [16]. Кроме этого, температура играет значительную роль в возникновении и поддержании циркуляции и перемешивания в озере [8; 10].

Пространственно-временные изменения температуры воды являются также одним из важнейших показателей биологической продуктивности акватории, на которую она оказывает как прямое, так и косвенное влияние. Температура воды определяет условия местообитания озерной флоры и

фауны [23]. Также температура воды является одним из определяющих параметров газообмена между водной средой и атмосферой [14].

Для оценки и картографического отображения температуры поверхности воды оз. Хубсугул ввиду отсутствия массивов синхронных наземных и спутниковых наблюдений для данного водного объекта использовались составленные автором для оз. Байкал региональные алгоритмы тематической обработки данных AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток и в различное время года [19; 20]. В рамках данного исследования были разработаны файлы палитр на основании дискретной шкалы для картографического отображения температуры поверхности воды оз. Хубсугул с помощью картознаков количественного грид-отображения.

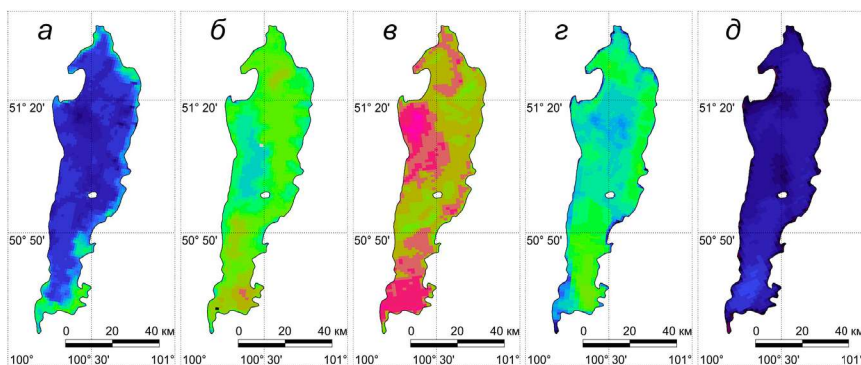
В результате проделанной работы для условий открытого водоёма были составлены серии электронных и анимационных карт температуры поверхности воды оз. Хубсугул за период с 1999 по 2012 г. Ниже, в качестве примера, приведены серии тематических карт, полученные путем дешифрирования спутниковых снимков AVHRR (рис. 2). На сериях карт представлено распределение температуры поверхности воды оз. Хубсугул в 2010 г. и 2012 г. На данных сериях карт, как и в случае с разрушением льда, прослеживается существенная межгодовая изменчивость в распределении температуры на поверхности озера.

На серии карт видно, что в результате более позднего очищения озера ото льда в 2010 г. (см. рис. 2, *а, б, в*) наблюдается более поздний прогрев поверхности озера. Максимум температур воды на поверхности оказывается смещённым с первой половины августа на конец августа – начало сентября (см. рис. 2, *в*). При этом максимальные значения температуры воды на поверхности озера в 2010 г. (см. рис. 2, *в*) оказались существенно ниже максимальных значений температуры поверхности в 2012 г. (см. рис. 2, *ж*). Вместе с тем существенной разницы в значениях температуры воздуха летом 2010 и 2012 гг. в районе оз. Хубсугул по данным реанализа NCEP/NCAR, не наблюдается, и более того температура воздуха в июне и июле в 2010 г. была даже выше соответствующих значений температуры воздуха в 2012 г.

При анализе серии карт видно, что значения температуры воды на поверхности достаточно близкие в сентябре, октябре и ноябре в годы с различными сроками схода льда.

Таким образом, наибольшее влияние позднего очищения озера ото льда в распределении температуры на поверхности воды прослеживается в июне, июле и августе, продолжая сказываться также в сентябре и октябре, и только в ноябре перед началом становления льда это влияние уже практически не проявляется.

2010 г.



2012 г.

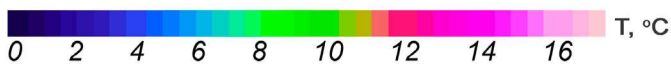
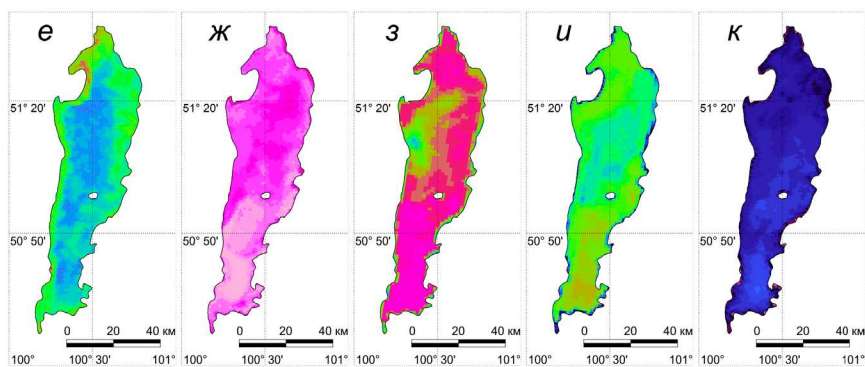


Рис. 2. Распределение температуры поверхности воды оз. Хубсугул в 2010 г. (а – 5 июля, б – 8 августа, в – 1 сентября, г – 9 октября, д – 7 ноября) и 2012 г. (е – 25 июня, ж – 8 августа, з – 2 сентября, и – 11 октября, к – 10 ноября)

Выводы

В ходе проведенного исследования по данным радиометра AVHRR составлены серии электронных и анимационных карт гидрофизических характеристик поверхностного слоя оз. Хубсугул за 1999–2012 гг.

По полученным в ходе исследования картографическим материалам проанализирована внутригодовая и межгодовая изменчивость пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и стадий

таяния и разрушения снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул. Проведено исследование влияния поздних сроков вскрытия озера и очищения его ото льда на распределение температуры поверхности озера в навигационный период.

Полученные на основании обработки спутниковых данных в ходе настоящего исследования систематические данные о пространственно-временном распределении температуры поверхности оз. Хубсугул за период с 1999 по 2012 г. могут служить для изучения многих лимнологических процессов и лучшего понимания озерной гидродинамики.

Концепция применения данных дистанционного зондирования к изучению температурного и ледового режима озера позволяет проводить более детальный анализ пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и разрушения снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул, чем при съёмке наземными средствами. С применением результатов дешифрирования спутниковых изображений становится возможной реализация карт контроля состояния водных объектов, что в условиях возрастающей антропогенной нагрузки на водоемы [6] является своевременным и актуальным.

Позитивный опыт построения и использования в работе систем обработки и представления спутниковой информации выявил перспективность этого рода деятельности и высокую заинтересованность в спутниковых данных как для проведения фундаментальных исследований, так и для решения различных прикладных задач, в том числе, задач охраны окружающей среды.

Список литературы

1. *Алексеев В. Р.* Криогенная метаморфизация природных вод и ее роль в круговороте веществ / В. Р. Алексеев, А. В. Иванов // Докл. ин-та географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР, 1976. – № 49. – С. 31–40.
2. Атлас озера Хубсугул [Карты]. – М. : ГУГК, 1989. – 119 с.
3. *Бондур В. Г.* Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей. – М. : Азбука-2000, 2006. – Вып. 3., Т. 2. – С. 177 – 183.
4. *Верболов В. И.* Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / В. И. Верболов, В. М. Сокольников, М. Н. Шимараев. – М. : Наука, 1965. – 374 с.
5. *Верещагин Г. Ю.* Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала / Г. Ю. Верещагин // Тр. Байкал. лимнол. станции. – 1939. – Т. 9. – С. 5 – 8.
6. *Вологжина С. Ж.* Особо охраняемые природные территории побережья озера Байкал / С. Ж. Вологжина // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 50–60.

7. *Герман М. А.* Космические методы исследования в метеорологии / М. А. Герман. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.
8. *Граньков А. Г.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела / А. Г. Граньков, А. А. Мильшин. – М. : Физматлит, 2004. – 168 с.
9. *Доронин Ю. П.* Взаимодействие атмосферы и океана : учеб. пособие / Ю. П. Доронин. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 288 с.
10. *Здоровеннова, Г. Э.* Термическая структура мелководного озера в период ледостава: внутрисезонная и межгодовая изменчивость : дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27: защищена 18.04.2007 / Галина Эдуардовна Здоровеннова. – СПб. : 2007. – 179 с.
11. Исследование океана из космоса / Б. А. Нелепо [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1985. – 168 с.
12. *Кашкин В. Б.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухонин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
13. *Кондратьев К. Я.* Спектральные оптические характеристики тающего ледяного покрова (на примере Онежского озера и Белого моря) / К. Я. Кондратьев, В. П. Власов, В. В. Мелентьев // Комплексный дистанционный мониторинг озер. – Л. : Наука, 1987. – С. 211–217.
14. *Мизандронцев И. Б.* Газообмен между водной средой и атмосферой (на примере Байкала) / И. Б. Мизандронцев, К. Н. Мизандронцева // Вод. ресурсы, 1995. – № 22 (4). – С. 439–445.
15. *Мишон В. М.* Гидрофизика : учеб. пособие / В. М. Мишон. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. – 308 с.
16. Особенности распределения характеристик экосистемы пелагиали Байкала в период весенней конвекции / Н. Г. Гранин [и др.]. – Красноярск : Ин-т биофизики СО РАН, 1991. – 54 с.
17. Сейсмопрофилирование осадков озера Хубсугул / А. П. Федотов [и др.] // Докл. Акад. наук, 2002. – Т. 382, № 2. – С. 261–263.
18. Спутниковая гидрофизика / Б. А. Нелепо [и др.]. – М. : Наука, 1983. – 256 с.
19. *Сутырина Е. Н.* Картографическое отображение и анализ распределения гидрофизических характеристик озера Байкал с применением данных дистанционного спутникового зондирования : монография / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ. – 2012. – 131 с.
20. *Сутырина Е. Н.* Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал / Е. Н. Сутырина // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 240–251.
21. *Шерстянkin П. П.* Экспериментальные исследования подледного светового поля озера Байкал / П. П. Шерстянkin. – М. : Наука, 1975. – 92 с.
22. *Шимараев, М. Н.* Элементы теплового режима озера Байкал / М. Н. Шимараев. – Новосибирск : Наука, 1977. – 150 с.
23. *Bolgrien, D. W.* Delineation of the hydrodynamics of Lake Michigan and Lake Baikal using satellite-derived surface temperatures : A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for Degree of Doctor of Philosophy / D. W. Bolgrien; The Univ. of Wisconsin-Milwaukee, 1993. – 170 p.
24. *Enkhtaivan, S.* Mayflies of the Lake Hovsgol Region, Mongolia / S. Enkhtaivan, T. Soldán // International Advances in the Ecology, Zoogeography, and Sys-

tematics of Mayflies and Stoneflies. – Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 2008. – P. 103–115.

25. Radiative characteristics of ice-covered fresh and brackish-water bodies / Helgi Arst [et al.] // Proc. Estonian Acad. Sci. Geol. – 2006. – Vol. 55, N 1. – P. 3–23.

26. *Robertson, D. M.* Lake ice records used to detect historical and future climatic changes / D. M. Robertson, R. A. Ragotskie, J. J. Magnuson // Climatic changes, 1992. – No. 21. – P. 407 – 427.

27. Solar radiation and albedo regime in ice-covered lakes: Early spring / M. Petrov [et al.] // Proc. 8th Workshop on Physical Processes in Natural Waters; Edited by L. Bengtsson and O. A. Maher. – Lund, 2004 – P. 31 – 38.

28. *Wynne, R. H.* Satellite observation of lake ice as a climate indicator: initial results from statewide monitoring in Wisconsin / R. H. Wynne, T. M. Lillesand // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993. – N 59 (6). – P. 1023 – 1031.

The use of satellite remote sensing data for the mapping and analysis of the Lake Hovsgol hydrophysical characters

E. N. Sutyryna

Annotation. The basic results of the Lake Hovsgol hydrophysical characters mapping with AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) data, selected for the long-time period (1999–2012) from archive of telemetry of the Center of space monitoring of Institute of solar-terrestrial physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, have been discussed in this paper. The mapping and analysis of distribution of water surface temperatures and stages of destruction of a snow-ice cover within water areas of the Lake Hovsgol have been carried out in this study.

Key words: Lake Hovsgol, remote sensing, AVHRR data, water surface temperature, destruction of a snow-ice cover

*Сутырина Екатерина Николаевна
кандидат географических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–10–72*

*Sutyryna Ekaterina Nikolaevna
Ph. D. of Geography, Assistant professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel. : (3952) 52–10–72*