

Изучение особенностей ледово-термического режима озера Хубсугул с применением данных радиометра AVHRR

Е.Н. Сутырина

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
E-mail: ensut@rambler.ru

Для оценки особенностей ледово-термического режима озера Хубсугул за период с 1998 по 2012 гг. в рамках настоящего исследования были использованы материалы дистанционного спутникового зондирования Земли, так как дистанционное зондирование является незаменимым средством при изучении крупных внутренних водоёмов, к числу которых относится и озеро Хубсугул с площадью акватории в 2760 км².

Исследование главным образом направлено на оценку межгодовой и внутригодовой изменчивости температуры поверхности воды, а также таяния и разрушения снежно-ледяного покрова на озере Хубсугул. С использованием данных радиометра AVHRR были разработаны серии карт температуры поверхности воды и карт, отображающих таяние и разрушение снежно-ледяного покрова на озере Хубсугул за период с 1998 по 2012 гг.

Так как изменчивость и тренд динамики озёрных льдов определяется климатическими условиями, то в ходе настоящего исследования анализировалась связь параметров ледового режима с характеристиками атмосферной циркуляции. Кроме этого исследование показало влияние различных сроков вскрытия озера и очищения его ото льда на распределение температуры поверхности озера в безледоставный период.

Ключевые слова: озеро Хубсугул, данные радиометра AVHRR, ледово-термический режим, межгодовая изменчивость, Северо-Атлантическая осцилляция.

Введение

Хубсугул - пресноводное озеро, расположенное на севере Монголии примерно в 200 км к юго-западу от озера Байкал (Goulden, Boldgiv, 2002). Котловина озера Хубсугул имеет тектоническое происхождение и является южным элементом Байкальской рифтовой зоны.

Озеро Хубсугул имеет 136 км в длину и достигает в ширину до 35 км. Средняя глубина озера равна 139 м, максимальная глубина - 262 м. Объём воды в озере Хубсугул оценивается в 383,3 км³. Площадь водной поверхности - 2760 км² (Enkhtaivan, Soldán, 2008).

При изучении озера Хубсугул, которое имеет значительные размеры акватории, данные дистанционного зондирования дают возможность наблюдать 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.

В рамках данного исследования производилось картографирование и анализ пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и разрушения снежно-ледяного покрова в пределах акваторий озера Хубсугул с применением спутниковой информации.

Использованные данные

В рамках данного исследования для изучения особенностей ледово-термического режима были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2012 гг., 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). Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире.

Изучение ледовой обстановки в период разрушения льда

Исследование ледяного покрова на озере Хубсугул имеет научное и практическое значение. С точки зрения научных исследований, получение информации о динамике ледяного покрова важно для изучения изменений регионального и локального климата, так как характеристики ледяного покрова чувствительны к климатическим изменениям (Robertson et al., 1992). 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 изучаемого водоема (Доронин, 1981). Ввиду этого изучение динамики ледяного покрова водоемов является необходимым звеном при изучении цепи явлений, протекающих в водоеме (Верещагин, 1939). С практической точки зрения картографическая информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду (Верещагин, 1939).

В период очищения озера ото льда использование данных радиометра AVHRR позволяют определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова и чистую воду. В данной работе при оценке стадий таяния и разрушения снежно-ледяного покрова на озере Хубсугул за основу была принята классификация, приведенная В.М. Мишоном (Мишон, 1979) (*табл. 1*). Для картографического отображения ледовой обстановки в период разрушения льда в работе применяются картознаки качественного фона на основе разработанной автором палитры.

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 (рис. 1) и 2012 гг. (рис. 2) с относительно поздними и ранними сроками очищения озера ото льда соответственно.

Таблица 1. Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности при различных степенях ее стаивания и разрушения

Степень стаивания и разрушения	Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности
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, снежная каша. Сплоченность составляет 7–10 баллов
VII	Снег крупнозернистый, сохраняется на отдельных местах; ледяная поверхность шероховатая, серых или темных оттенков. Сплоченность составляет 7 баллов
VIII	Снежная каша, лед темный, шероховатый, отдельные участки серого цвета. Сплоченность составляет 5–7 баллов
IX	Лед темный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Сплоченность составляет 5 баллов

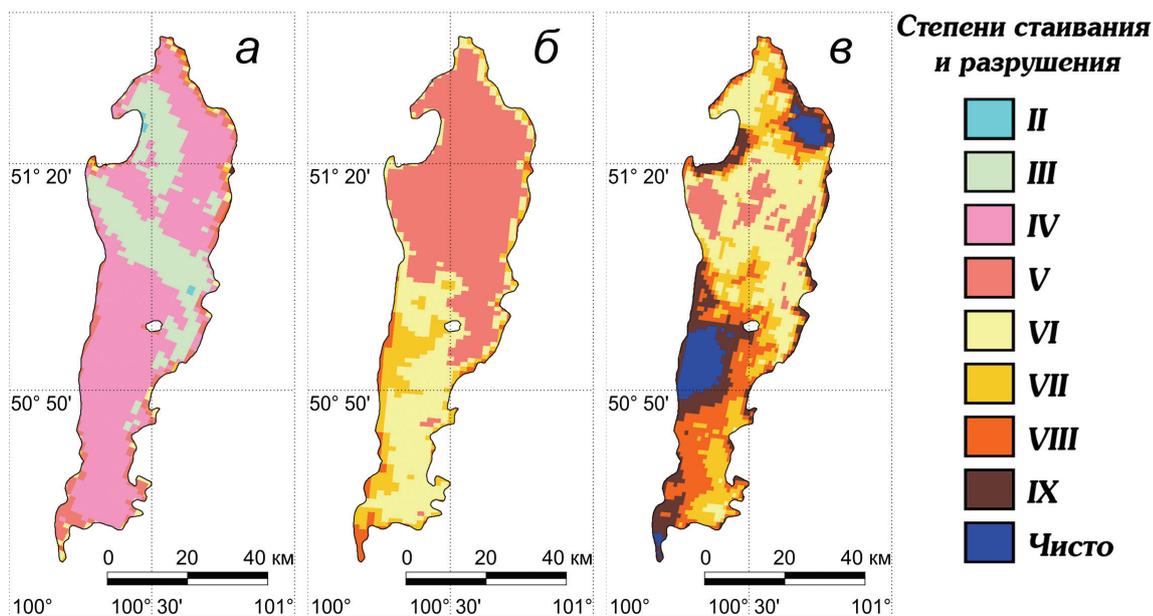


Рис. 1. Состояние снежно-ледяного покрова озера Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2010 г.: а – 3 июня, б – 13 июня, в – 16 июня (II – IX см. в табл. 1)

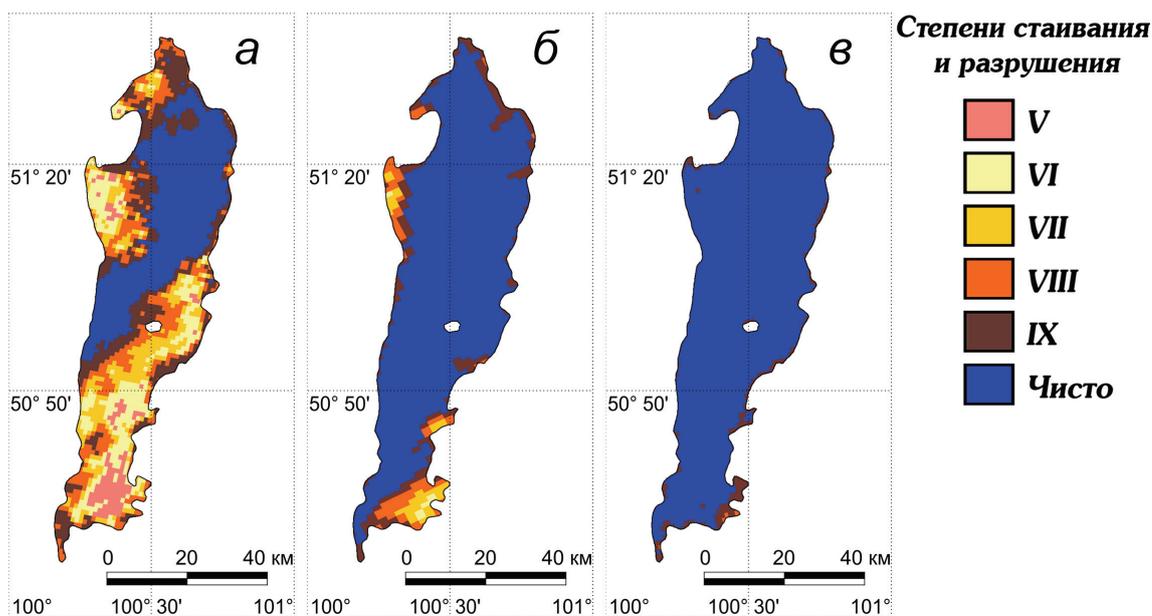


Рис. 2. Состояние снежно-ледяного покрова озера Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2012 г.: а – 6 июня, б – 9 июня, в – 12 июня (V – IX см. в табл. 1)

Несмотря на то, что озеро Хубсугул находится в более низких широтах, чем озеро Байкал, разрушение льда на Хубсугуле происходит позднее, чем на Байкале. В среднем очищение озера Хубсугул ото льда происходит к середине июня. При этом наблюдается значительная межгодовая изменчивость в сроках разрушения льда и очищения от него озера, что можно видеть на представленных картографических изображениях. Различия наблюдаются как в сроках взлома льда и очищения от него озера, так и в пространственном распределении льда в разных стадиях разрушения по акватории.

При рассмотрении серии карт на рис. 1 и рис. 2 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. Так в начале июня 2010 г. (рис. 1а) 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, но и к 16 июня 2010 г. (рис. 1в) 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. (рис. 2) наблюдался значительно более ранний сход льда: уже в начале июня 2012 г. озеро уже наполовину очистилось ото льда, к 10 июня 2012 г. лед наблюдался только в отдельных заливах, а 12 июня 2012 г. - встречался точечно.

На рис. 3а приведен ход и тренд изменчивости сроков очищения озера ото льда, определенных по данным AVHRR в различные годы за весь период исследования. В це-

лом с 1998 по 2012 г. сроки очищения озера ото льда изменялись от 05 июня в 2004 г. до 24 июня в 2010 г. При этом за период исследования наблюдается тенденция к увеличению сроков очищения озера ото льда.

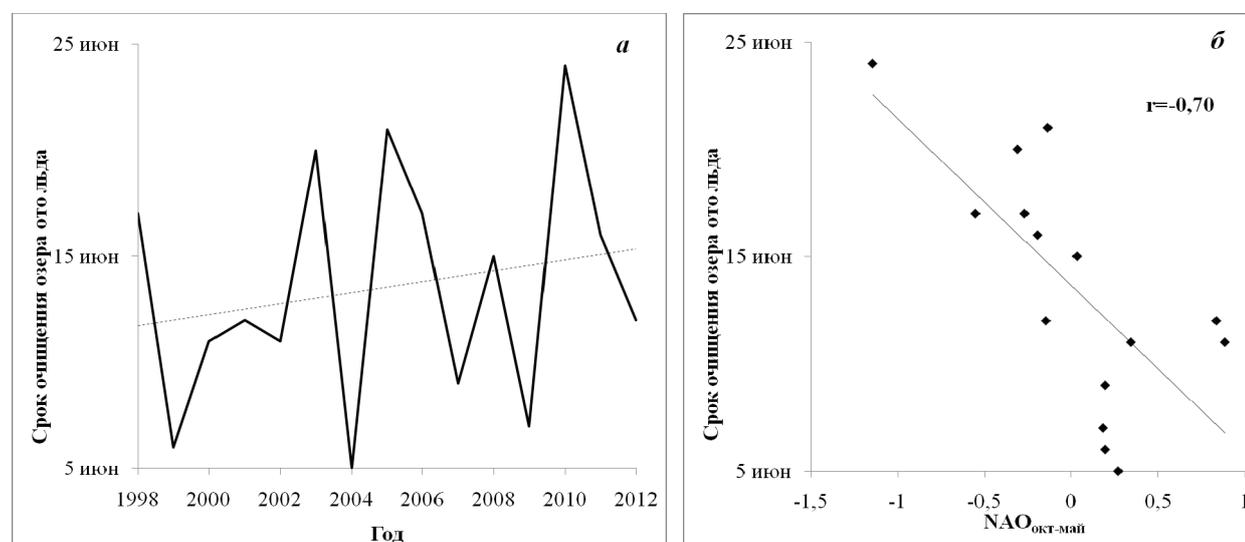


Рис. 3. Ход и тренд изменчивости сроков очищения озера ото льда по данным AVHRR за период с 1998 по 2012 г. (а), связь между средними за период с октября по май значениями индекса Северо-Атлантической осцилляции сроками очищения озера Хубсугул ото льда (б)

Такое различие в сроках разрушения льда и очищения от него озера может объясняться тем, что озеро Хубсугул, расположенное почти в центре азиатской части Евразийского континента, испытывает влияние климата, в том числе проявляющееся в изменениях процессов теплообмена озера с атмосферой. Структура колебания климата в регионе озера Хубсугула, как и во всем Северном полушарии, включает крупномасштабные аномалии, вызываемые изменением циркуляции атмосферы. В качестве показателей активности зональной циркуляции, с которой связана адвекция в район озера Хубсугул тепла и влаги с воздушными массами из Атлантического океана, может быть принят индекс Северо-Атлантической осцилляции NAO (North Atlantic Oscillation). Индекс NAO характеризуется разностью аномалий приведенного к уровню моря атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом (Шимараев, Старыгина, 2010). В холодную часть года положительная стадия NAO сопровождается аномалиями низкого давления в полярной области и высокого давления в субтропических широтах, более сильными западными ветрами и положительными аномалиями температуры в тропосфере средних широт (Шимараев, 2007). В связи с этим в работе анализировались данные NOAA по индексу NAO (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>) и было выявлено, что изменения активности NAO находят отражение в динамике ледового режима, в том числе и в сроках очищения озера ото льда.

На *рис. 3б* можно увидеть, что между средними за период с октября по май значениями индекса Северо-Атлантической осцилляции $NAO_{\text{окт-май}}$ и сроками очищения озера ото льда имеется значимая связь со значением коэффициента корреляции равным $-0,70$.

Изучение особенностей распределения температуры поверхности воды

Информация о пространственно-временном распределении температуры поверхности воды необходима для оценки накопления и расходования тепла водной массой в результате ее теплообмена с атмосферой и ложем озера, расчета теплового баланса, разработки методов прогноза сроков вскрытия и замерзания водоема (Мишон, 1979). Температура воды в озере также играет значительную роль в возникновении и поддержании циркуляции и перемешивания в озере (Граньков, Мильшин, 2004). Помимо этого температура воды является важнейшим параметром, позволяющим выявить климатические изменения (Нелепо и др., 1985). В связи с этим постоянный мониторинг и оперативное картографирование температуры поверхности воды необходимы при изучении регионального и локального изменения климата.

Для оценки и картографического отображения температуры поверхности воды озера Хубсугул в виду отсутствия массивов синхронных наземных и спутниковых наблюдений для данного водного объекта использовались нелинейные алгоритмы тематической обработки данных AVHRR с определенными автором региональными наборами регрессионных коэффициентов для различного времени суток и различного времени года (Сутырина, 2012). В рамках данного исследования были разработаны файлы палитр на основании дискретной шкалы для картографического отображения температуры поверхности воды озера Хубсугул с помощью картознаков количественного грид-отображения.

В результате проделанной работы для условий открытого водоёма были составлены серии электронных карт температуры поверхности воды озера Хубсугул за период с 1998 по 2012 гг. Ниже, в качестве примера, приведены серии тематических карт, полученные путем дешифрирования спутниковых снимков AVHRR. На сериях карт представлено распределение температуры поверхности воды озера Хубсугул в 2010 г. (*рис. 4*) и 2012 г. (*рис. 5*). На данных картах, как в и случае с разрушением льда, прослеживается существенная межгодовая изменчивость в распределении температуры на поверхности озера.

На серии карт (*рис. 4*) видно, что в результате более позднего очищения озера ото льда в 2010 г. имеет место более поздний прогрев поверхности озера и смещение сроков, когда на поверхности в открытой части озера наблюдались максимальные значения температуры, по отношению к годам, когда озеро очищалось ото льда раньше, как например, в 2012 г. (*рис. 5*). Можно отметить, что влияние позднего очищения озера ото льда на рас-

пределение температуры на поверхности воды наиболее прослеживается в июне, июле и в первых двух декадах августа. В сентябре, октябре и ноябре в годы с различными сроками схода льда значения температуры воды на поверхности уже достаточно близкие.

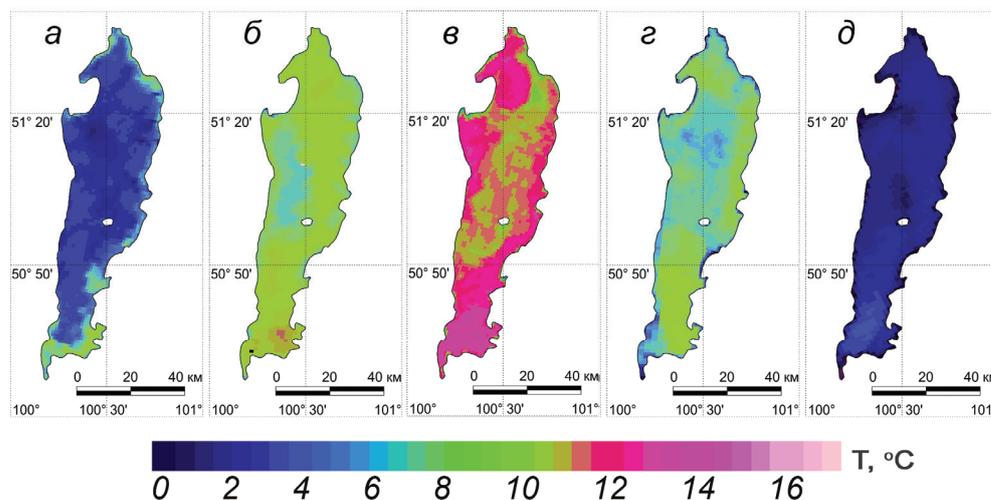


Рис. 4. Распределение температуры поверхности воды озера Хубсугул в 2010 г.: а – 5 июля, б - 8 августа, в – 30 августа, г – 9 октября, д – 7 ноября

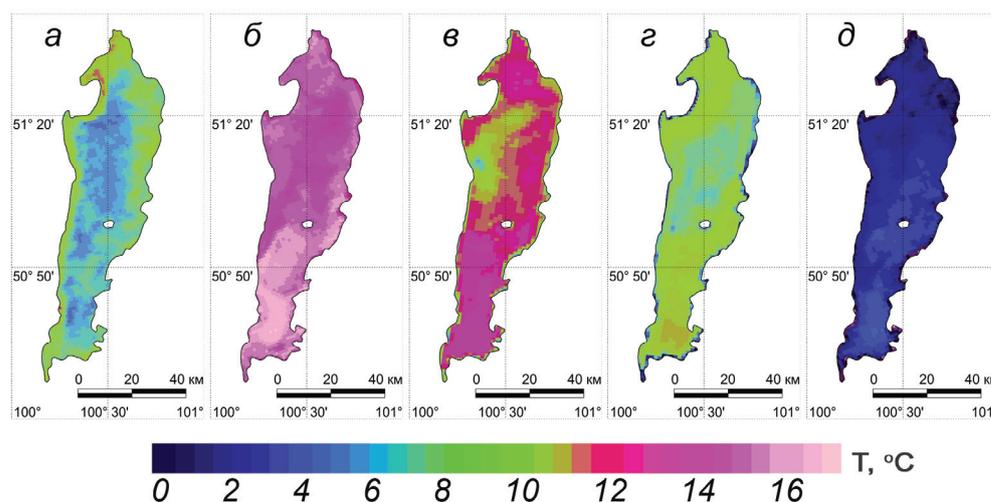


Рис. 5. Распределение температуры поверхности воды озера Хубсугул в 2012 г.: а – 25 июня, б - 8 августа, в – 2 сентября, г – 8 октября, д – 10 ноября

На рис. ба приведен многолетний ход и тренд изменчивости максимальных температур на поверхности озера в открытой его части, наблюдаемых по спутниковым данным. По данному графику видно, что с 1998 по 2012 гг. максимальные температуры в открытой части акватории менялись от 12,1 до 19,9 °С. При этом за период исследования наблюдается тренд к уменьшению максимальных температур на поверхности данного водоема. Сроки, когда на поверхности в открытой части озера наблюдались максимальные значения температуры также существенно варьируют и за период исследования изменялись с 18 июля в 1999 г. до 30 августа в 2010 г. Из рис. бб видно, что существует выраженная связь со значением коэффициента корреляции равным -0,81 между сроками, когда наблю-

далась максимальная температура в открытой части акватории, и ее значением. При этом сами сроки, когда наблюдалась максимальная температура в открытой части акватории, имеют значимую связь со сроками очищения озера ото льда (рис. 6в) со значением коэффициента корреляции равным 0,77.

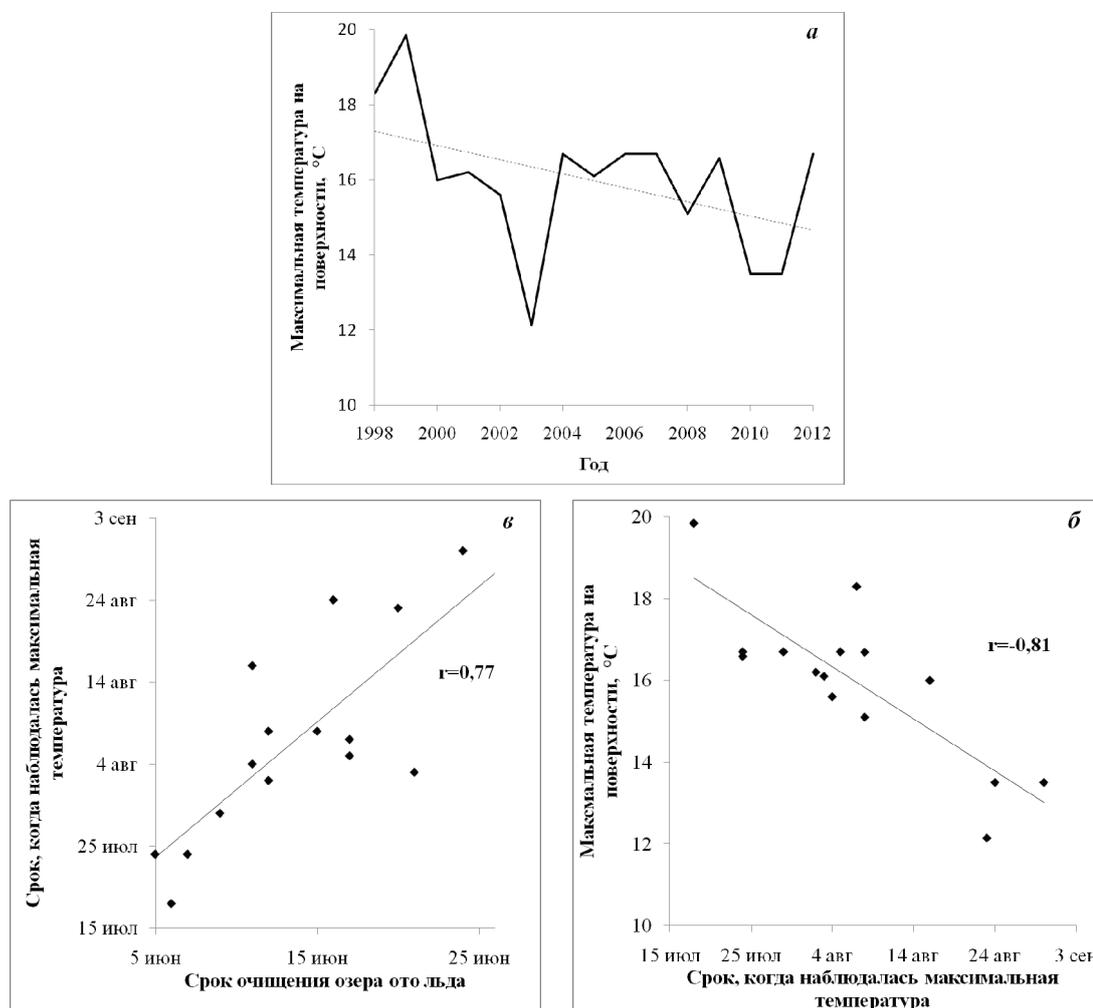


Рис. 6. *Ход и тренд изменчивости максимальных температур на поверхности озера Хубсугул в открытой части по данным AVHRR с 1998 по 2012 г. (а), связь между сроками, когда наблюдалась максимальная температура в открытой части акватории, и ее значением (б), связь сроков, когда наблюдалась максимальная температура в открытой части акватории со сроками очищения озера ото льда (в)*

Заключение

В ходе проведенного исследования по данным радиометра AVHRR составлены серии карт гидрофизических характеристик поверхностного слоя озера Хубсугул за 1998–2012 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 озера Хубсугул. В представленной работе проведено исследование влияния позд-

них сроков вскрытия озера и очищения его ото льда на распределение температуры поверхности озера в безледоставный период. Также исследована зависимость сроков очищения озера ото льда от параметров Северо-Атлантической осцилляции.

Рядом авторов (Tsolmon et al., 2002; Оюунгэрэл, 2011) выявлено негативное изменение теплового баланса в пределах водосборной площади озера Хубсугул в том числе в результате хозяйственной деятельности, сопровождающееся возрастанием температур на поверхности суши и протаиванием мерзлоты. Однако, по материалам данного исследования в пределах самой акватории озера за период с 1998 по 2012 гг. скорее прослеживаются тенденции к увеличению сроков, когда озеро очищается ото льда, и к снижению максимальных температур, наблюдаемых на поверхности в открытой части водоема. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на внутренние водоемы, в том числе посредством воздействия на их водосборы, реализация карт контроля состояния водных объектов по результатам дешифрирования спутниковых изображений должна быть продолжена и в последующий период для получения более репрезентативных материалов. Кроме того для увеличения точности измерений, проводимых на основании анализа спутниковых снимков, в дальнейшем планируется сбор наземной калибровочной информации и разработка региональных методик непосредственно для озера Хубсугул.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-31100 мол_а) и программы стратегического развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» на 2012–2016 годы.

Литература

1. *Верещагин Г.Ю.* Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала // Труды Байкальской лимнологической станции. 1939. Т. 9. С. 5–8.
2. *Граньков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит. 2004. 168 с.
3. *Доронин Ю.П.* Взаимодействие атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат. 1981. 288 с.
4. *Мишон В.М.* Гидрофизика. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. 308 с.
5. *Нелепо Б.А., Коротяев Г.К., Суетин В.С., Терехин Ю.В.* Исследование океана из космоса. Киев: Наукова думка, 1985. 168 с.
6. *Оюунгэрэл Б.* Отражение глобального потепления в изменении озера Хубсугул // Вестник бурятского государственного университета. 2011. № 4. С. 190–192.
7. *Сутырина Е.Н.* Картографическое отображение и анализ распределения гидрофизических характеристик озера Байкал с применением данных дистанционного спутникового зондирования. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2012. 131 с.
8. *Шимараев М.Н.* Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 54–60.
9. *Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н.* Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
10. *Enkhtaivan S., Soldán T.* Mayflies of the Lake Hovsgol Region, Mongolia // International Advances in the Ecology, Zoogeography, and Systematics of Mayflies and Stoneflies. Berkeley and Los Angeles: University of California Press. 2008. P. 103–115.
11. *Goulden C.E., Boldgiv B.* Lake Hövsgöl, Mongolia: The Blue Pearl of Mongolia // SIL News. 2002. Vol. 36. P. 1–4.

12. Robertson D.M., Ragotskie R.A., Magnuson J.J. Lake ice records used to detect historical and future climatic changes // *Climatic changes*. 1992. No. 21. P. 407–427.
13. Tsolmon R., Tateishi R., Tetuko J. A method to estimate forest biomass and its application to monitor Mongolian Taiga using JERS-1 SAR data // *Int. Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23. P. 4971–4978.

A study of the peculiarities of the Lake Hovsgol ice-thermal regime using AVHRR data

E.N. Sutyryna

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

E-mail: ensut@rambler.ru

In order to investigate the ice-thermal regime features of the Lake Hovsgol for 1998 through 2012 satellite remote sensing data have been used in this research. Remote sensing is known to be very useful in studies of water bodies like the Lake Hovsgol with huge surface area of 2760 sq. km.

The investigation concentrates mainly on the estimation of the intra-annual and inter-annual variability of water surface temperature and snow-ice cover melting and destruction on the Lake Hovsgol.

For the period from 1998 till 2012, surface temperature charts and snow-ice melting and destruction charts were compiled using AVHRR data.

Since variability and trends in lake ice dynamics are determined by climate conditions, the relation of Lake Hovsgol ice regime parameters with characteristics of atmospheric circulation was considered.

Also, this study has shown the impact of the different timing of opening and clearance of ice on surface temperature distribution of the lake during ice-free period.

Keywords: Lake Hovsgol, AVHRR data, ice-thermal regime, inter-annual variability, North Atlantic Oscillation.

References

1. Vereshchagin G.Yu., *Raboty Baikalskoi limnologicheskoi stantsii po izucheniyu ledyanogo pokrova Baikala* (The works of the Baikalsk Limnological station on the study of the ice cover of the Lake Baikal), *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii*, 1939, Vol. 9, pp. 5–8.
2. Gran'kov A.G., Mil'shin A.A., *Vzaimosvyaz' radioizlucheniya sistemy okean atmosfera s teplovymi i dinamičeskimi protsessami na granitse razdela* (The relationship of the radio emission of the ocean-atmosphere system with thermal and dynamic processes at the interface), Moscow.: Fizmatlit, 2004, 168 p.
3. Doronin Yu.P., *Vzaimodeistvie atmosfery i okeana* (The interaction of the atmosphere and ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 288 p.
4. Mishon V.M., *Gidrofizika* (Hydrophysics), Voronezh: Izdatel'stvo VGU, 1979, 308 p.
5. Nelepo B.A., Korotaev G.K. Suetin V.S., Terekhin Yu.V. *Issledovanie okeana iz kosmosa* (The study of the ocean from space), Kiev: Naukova dumka, 1985, 168 p.
6. Oyuungerel B., Otrazhenie global'nogo potepeniya v izmenenii ozera Khubsugul (The reflection of the global warming in the changes of the Lake Hovsgol), *Vestnik buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 4, pp. 190–192.
7. Sutyryna E.N., *Kartograficheskoe otobrazhenie i analiz raspredeleniya gidrofi-zicheskikh kharakteristik ozera Baikala s primeneniem dannykh distantsionnogo sputnikovogo zondirovaniya* (The cartographic mapping and analysis of distribution of hydrophysical characteristics of the Lake Baikal with the use of satellite remote sensing data), Irkutsk: Izdatel'stvo IGU, 2012, 131 p.
8. Shimaraev M.N., Tsirkulyatsionnye faktory izmenenii ledovo-termicheskogo rezhima Baikala (Circulation factors of changes in ice-thermal regime of the Lake Baikal), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2007, No. 4, pp. 54–60.
9. Shimaraev M.N., Starygina L.N. Zonal'naya tsirkulyatsiya atmosfery, klimat i gidrologicheskie protsessy na Baikale (1968–2007gg.) (The zonal circulation of the atmosphere, climate and hydrological processes at the Lake Baikal (1968–2007)), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2010, No. 3, pp. 62–68.
10. Enkhtaivan S., Soldán T., Mayflies of the Lake Hovsgol Region, Mongolia, *International Advances in the Ecology, Zoogeography, and Systematics of Mayflies and Stoneflies*, Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 2008, pp. 103–115.
11. Goulden C.E., Boldgiv B., Lake Hövsgöl Mongolia: The Blue Pearl of Mongolia, *SIL News*, 2002, Vol. 36, pp. 1–4.
12. Robertson D.M., Ragotskie R.A., Magnuson J.J., Lake ice records used to detect historical and future climatic changes, *Climatic changes*, 1992, No. 21, pp. 407–427.