

Е.Н. Сутырина

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ И ОЗЕРЕ ХУБСУГУЛ**

E.N. Sutyryna

**APPLICATION OF THE REMOTE SENSING DATA TO THE STUDY OF
THE FEATURES OF THE DESTRUCTION OF SNOW-ICE COVER OF
LAKE BAIKAL AND LAKE HOVSGOL**

В рамках настоящего исследования по данным радиометра AVHRR проанализирована внутригодовая и межгодовая изменчивость в сроках таяния и разрушения снежно-ледяного покрова озере Байкал и озере Хубсугул. Изучена связь сроков очищения ото льда данных водоемов с параметрами циркуляции атмосферы.

Ключевые слова: оз. Байкал, оз. Хубсугул, данные радиометра AVHRR, ледовый режим, АО, НАО.

Intra-annual and inter-annual variability of the timing of the Lake Baikal and Lake Hovsgol snow-ice cover melting and destruction has been analyzed using AVHRR data in this research. The relation of the timing of the clearance of ice of these water-bodies with the parameters of atmospheric circulation has been studied.

Key words: Lake Baikal, Lake Hovsgol, AVHRR data, ice regime, AO, NAO.

Байкал и Хубсугул — крупные пресноводные озера, котловины которых имеют тектоническое происхождение и являются элементами Байкальской рифтовой зоны. Оз. Хубсугул расположено на севере Монголии примерно в 200 км к юго-западу от оз. Байкал [12]. С Байкалом оз. Хубсугул связано реками Эгийн-Гол и Селенгой.

Площадь зеркала оз. Байкал оценивается по современным данным в 31722 км² [1], площадь водной поверхности оз. Хубсугул составляет около 2760 км² [11].

При изучении оз. Байкал и оз. Хубсугул, которые имеют значительные размеры акваторий, данные дистанционного зондирования дают возможность наблюдать за состоянием всего водоема и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озерах процессах, что невозможно обеспечить с применением только судовых и экспедиционных исследований.

В рамках данного исследования производилось картографирование и анализ состояния снежно-ледяного покрова в период его таяния и разрушения в пределах акваторий оз. Байкал и оз. Хубсугул с применением спутниковой информации.

Так как озера могут рассматриваться как индикаторы, реагирующие на изменения климата и антропогенную деятельность [4], изучение ледовых явлений на оз. Байкал и оз. Хубсугул имеет как научное, так 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 [8, 14].

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 [6]. Ввиду этого изучение динамики ледяного покрова водоемов является необходимым звеном при изучении цепи явлений, протекающих в водоеме [2].

С практической точки зрения картографическая информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду [2].

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 2013 г., отобранные из архива телеметрии Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. 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. Полученное изображение охватывает полосу земной поверхности шириной 2700 км по трассе движения спутника, что обеспечивает полный обзор акваторий изучаемых водных объектов за один пролет.

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 оз. Байкал и оз. Хубсугул за основу была принята классификация, приведенная В.М. Мишоном [7] (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 оз. Байкал в 2010 г. (рис. 1), 2011 г. (рис. 2) и 2012 г. (рис. 3) и оз. Хубсугул в те же годы: 2010 г. (рис. 4), 2011 г. (рис. 5) и 2012 г. (рис. 6).

Данные картографические изображения позволяют отчетливо проследить динамику разрушения ледяного покрова в указанные годы.

В целом процессы разрушения льда на оз. Байкал и оз. Хубсугул протекают в разные сроки. Продолжительность периода исчезновения льда зависит от местоположения водоемов, погодных условий, строения и размеров водных объектов [5]. Несмотря на то, что оз. Хубсугул находится в более низких широтах, чем оз. Байкал, разрушение льда на Хубсугуле происходит позднее, чем на Байкале. Это в том числе обусловлено тем, что оз. Хубсугул расположено на высоте 1188 м над уровнем Байкала.

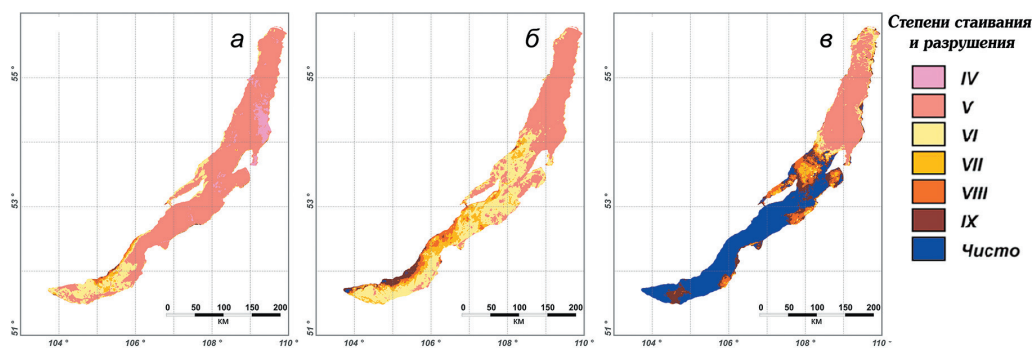


Рис. 1. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2010 г.:
а — 10 мая; б — 17 мая; в — 25 мая (IV–IX см. в табл. 1)

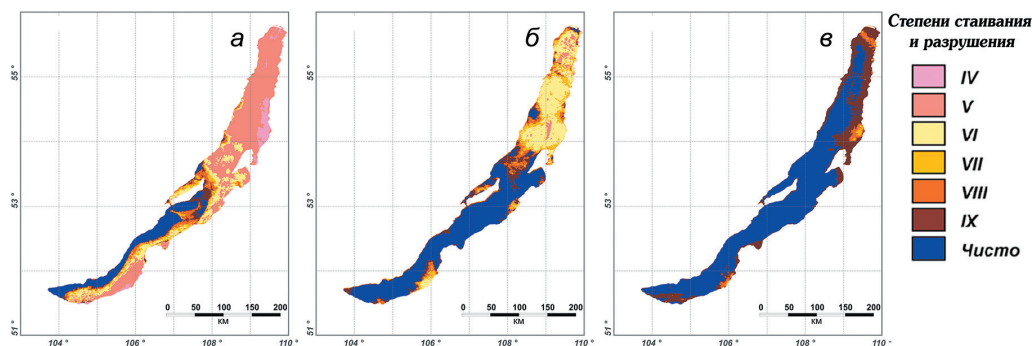


Рис. 2. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2011 г.:
а — 2 мая; б — 15 мая; в — 24 мая (IV–IX см. в табл. 1)

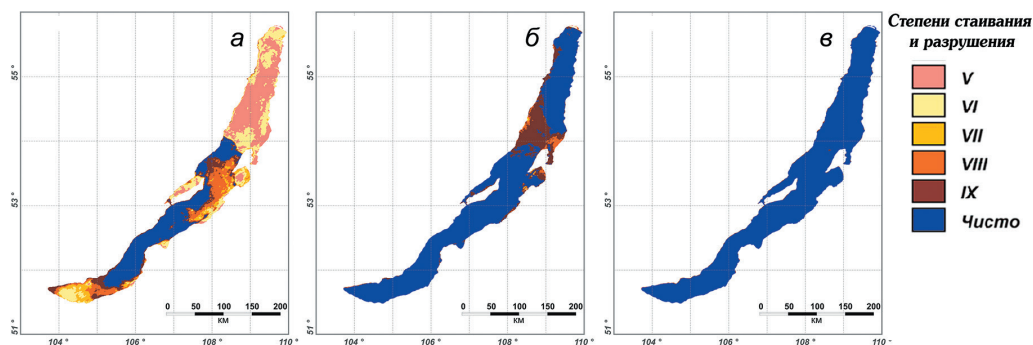


Рис. 3. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2012 г.:
а — 4 мая; б — 14 мая; в — 25 мая (V–IX см. в табл. 1)

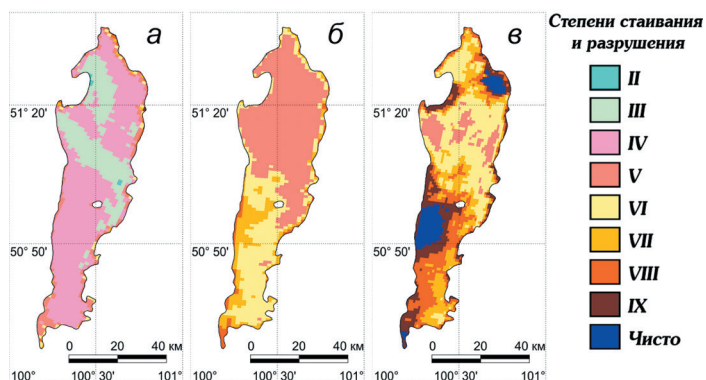


Рис. 4. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени таяния и разрушения в 2010 г.:
а — 3 июня; б — 13 июня; в — 16 июня (II–IX см. в табл. 1)

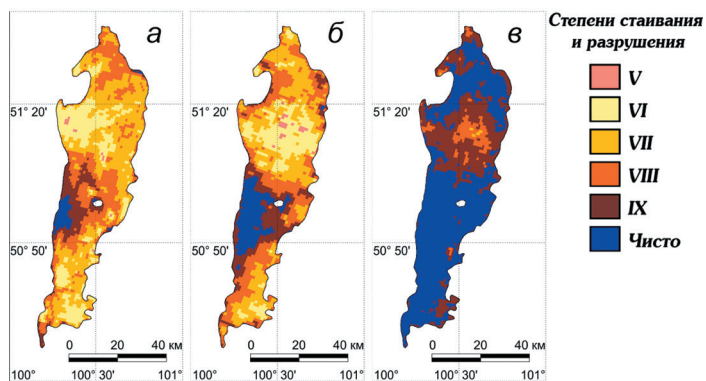


Рис. 5. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени таяния и разрушения в 2011 г.:
а — 5 июня; б — 10 июня; в — 13 июня (V–IX см. в табл. 1)

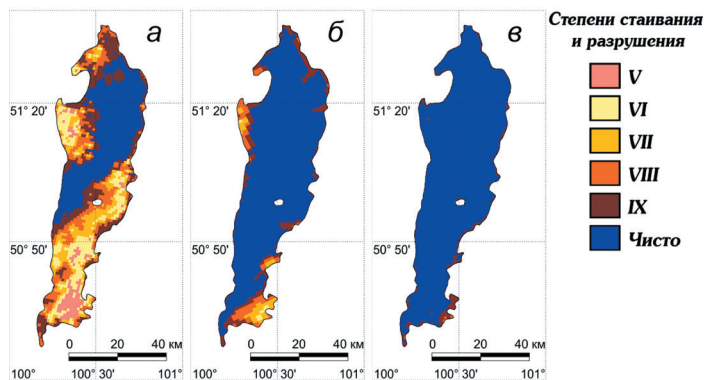


Рис. 6. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени таяния и разрушения в 2012 г.:
а — 6 июня; б — 9 июня; в — 12 июня (V–IX см. в табл. 1)

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, слабо увлажненный (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 от 7 до 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 от 5 до 7 баллов
IX	Лед темный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Сплоченность составляет 5 баллов

При очищении указанных водоемов ото льда наблюдается значительная межгодовая изменчивость, 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.

В 2010 г. наблюдался наиболее поздний сход льда за период исследования как на оз. Байкал, так и на оз. Хубсугул. В 2011 г. сроки очищения акваторий ото льда близкие к средним. В 2012 г. наблюдается значительно более ранний сход льда, как на Байкале, так и на Хубсугуле.

На рис. 7 приведен ход изменчивости сроков очищения ото льда оз. Хубсугул (за период с 1998 по 2012 г.) и Южного, Центрального и Северного бассейнов оз. Байкал (за период с 1998 по 2013 г.), определенных по данным AVHRR.

В целом для оз. Хубсугул сроки очищения акватории ото льда изменялись от 5 июня в 2004 г. до 24 июня в 2010 г. Для Южного бассейна оз. Байкал сроки за период исследования варьировали от 7 мая в 2007 г. до 4 июня в 2010 г., для Центрального бассейна — от 13 мая в 2007 г. до 7 июня в 2010 г., для Северного бассейна — от 20 мая в 2007 г. до 13 июня в 2010 г.

Такое различие в сроках разрушения льда и очищения от него акваторий озер может объясняться тем, что изучаемые водоемы, расположены почти в центре азиатской части Евразийского континента, испытывают существенное влияние климата, в том числе проявляющееся в изменениях процессов теплообмена озер с атмосферой.

Структура колебания климата в регионе оз. Байкал и оз. Хубсугул, как и во всем Северном полушарии, включает крупномасштабные аномалии, вызываемые изменением циркуляции атмосферы [10].

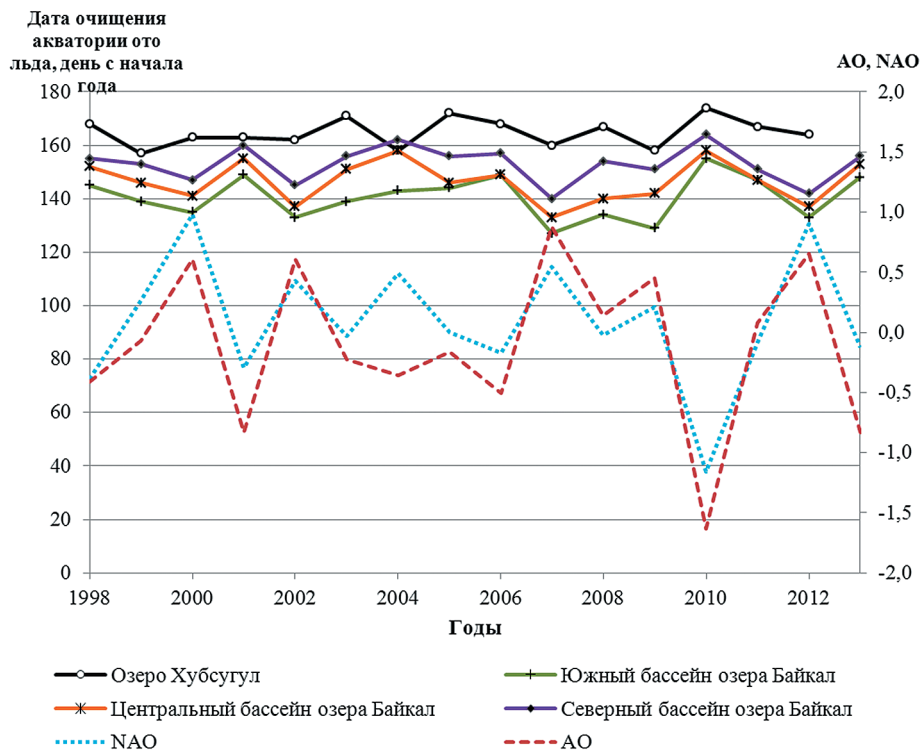


Рис. 7. Ход изменчивости сроков очищения оз. Хубсугул, Южного, Центрального и Северного бассейна оз. Байкал ото льда по данным AVHRR, в сопоставлении с ходом параметров АО и NAO, осредненных за период с ноября по май

В рамках данного исследования была проанализирована связь сроков очищения водоемов ото льда с показателями активности атмосферной циркуляции, с которыми связана адвекция тепла и влаги в район оз. Байкал и оз. Хубсугул с воздушными массами из Атлантического океана, и в качестве которых в рамках данного исследования используется индекс Северо-Атлантической осцилляции NAO (North Atlantic Oscillation), а также индекс Арктической осцилляции АО (Arctic Oscillation). В России зависимость параметров ледового режима крупных внутренних водоемов от значений указанных телеконнекционных индексов исследовалась в работах С.Г. Каретникова и М.А. Науменко [13], М.Н. Шимараева [9] и др.

В ходе анализа данных NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration — аббревиатура Национального управления США по исследованию океана и атмосферы)

по индексу АО и индексу NAO было выявлено, что изменения активности обоих индексов находят отражение в динамике ледового режима оз. Байкал и в меньшей степени оз. Хубсугул.

Это может объясняться тем, что Хубсугул расположен с одной стороны в более южных широтах, а с другой стороны находится в районе с более ярко выраженным континентальным климатом и отличающимся местной спецификой погодных явлений.

Для оз. Байкал более выражена связь ледовых явлений с индексом АО, для оз. Хубсугул более выражена связь с индексом NAO, что также может объясняться расположением оз. Байкал в более северных широтах.

Наиболее выраженная связь сроков очищения оз. Байкал ото льда наблюдается со средними значениями индексов АО и NAO за периоды с ноября по май, а для оз. Хубсугул — с октября по май, что хорошо согласуется с внутригодовым распределением значений температуры воздуха в соответствующих районах.

В связи со сказанным выше в табл. 2 приведены значения коэффициента корреляции между сроками очищения акватории ото льда и индексами АО и NAO, осредненными для случая оз. Хубсугул за период с октября по май, а для Байкала — за период с ноября по май.

Таблица 2

Значения коэффициента корреляции между сроками очищения акватории ото льда и параметрами циркуляции атмосферы АО и NAO

Акватория	АО	NAO
Оз. Хубсугул	–0,592	–0,692
Южный бассейн оз. Байкал	–0,910	–0,755
Центральный бассейн оз. Байкал	–0,903	–0,664
Северный бассейн оз. Байкал	–0,900	–0,729

В работе установлено, что для достаточно большого водного объекта с площадью зеркала в тысячи квадратных километров связь с показателями атмосферной циркуляции сроков разрушения льда на всей исследуемой акватории будет значительно более выраженной, чем при использовании информацией о ледовых явлениях, собранной на одной из гидрометеостанций, расположенной в непосредственной близости от изучаемой акватории, как, например, приведено в работе [9].

Что можно объяснить более явным вкладом от влияния местных факторов при анализе информации по отдельному посту и соответственно меньшей связью ледовых явлений, зафиксированных на гидрометеостанции, с параметрами крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Полученные в ходе исследования материалы могут быть использованы для уточнения информации о ледовом режиме оз. Байкал и в особенности оз. Хубсугул, при разработке прогнозов сроков очищения акваторий ото льда, для анализа влияния изменения климата на параметры ледового режима изучаемых водоемов и решения ряда других фундаментальных и прикладных задач.

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

Литература

1. *Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Шерстянкин П.П.* Гидрографические исследования озера Байкал и их использование в цифровой картографии. // Навигация и гидрография, 2005, вып. 20–21, с. 77–86.
2. *Верещагин Г.Ю.* Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала. // Труды Байкальской лимнологической станции, 1939, т. 9, с. 5–8.
3. *Граньков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. — М.: Физматлит, 2004. — 168 с.
4. *Догановский А.М.* Уровненный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2007, № 1, с. 103–110.
5. *Догановский А.М.* Гидрология суши (общий курс). — СПб.: РГГМУ, 2012. — 524 с.
6. *Доронин Ю.П.* Взаимодействие атмосферы и океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 288 с.
7. *Мишон В.М.* Гидрофизика. — Воронеж: изд-во ВГУ, 1979. — 308 с.
8. *Солощук П.В.* Изменение климата и ледовых условий водной системы Финский залив-Невская губа-река Нева в осенне-зимний период за последние 15 лет. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 14, с. 34–41.
9. *Шимараев М.Н.* Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала. // География и природные ресурсы, 2007, № 4, с. 54–60.
10. *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.
11. *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.
12. *Goulden C.E., Boldgiv B.* Lake Hövsgöl, Mongolia: The Blue Pearl of Mongolia. // SIL News, 2002, vol. 36, p. 1–4.
13. *Karetnikov S., Naumenko M.* Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years. // Hydrological Processes, 2011, vol. 25, p. 2859–2867.
14. *Robertson D.M., Ragotskie R.A., Magnuson J.J.* Lake ice records used to detect historical and future climatic changes. // Climatic changes, 1992, № 21, p. 407–427.