

Межгодовая изменчивость и прогноз весенних ледовых явлений на оз. Байкал и водохранилищах Ангарского каскада

© 2017 г. Е.Н. Сутырина

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

ensut78@gmail.com

Inter-annual variability and forecast of the spring ice phenomena on Lake Baikal and reservoirs of the Angara cascade

E.N. Sutyryna

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

ensut78@gmail.com

Received May 8, 2016

Accepted November 14, 2016

Keywords: Arctic Oscillation index, AVHRR, Bratsk reservoir, total disappearance of ice, ice forecasts, Lake Baikal, Ust'-Ilimsk reservoir.

Summary

The study of interannual variability of ice phenomena on large inland waters, as well as the ice forecasts for them are of great practical importance for navigation because any ice on water interferes with navigation. This article presents a description of the developed approach to mapping the stages of melting and destruction of ice cover on Lake Baikal, and the Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs using data from AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) and shows examples of the ice condition maps in the spring. The AVHRR data, obtained for the period 1998–2015, made possible to analyze processes of the ice disappearance on aquatories of the South, Central and North parts of Lake Baikal, and the Bratsk and Ust'-Ilimsk reservoirs including determination of dates of the total ice disappearance (the first ice-free dates) on the reservoirs under investigation: the average, earliest and latest dates, and a range. It has been found that the inter-annual changes of these dates are the opposite to the inter-annual fluctuations of values of the Arctic Oscillation (AO) index, that allows using the AO index as a predictor in regional predictive dependencies.

Using results of analysis of the AO index values, averaged over different time intervals, and the data series of the first dates of the ice-free situations we constructed regional equations allowing to foresee a character of the ice situation with the average earliness from 21 to 33 days. Tests of effectiveness of the proposed predictive dependencies demonstrated a good quality of forecasts of the dates when Southern, Central and Northern parts of Lake Baikal, as well the Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs become totally free of ice.

Поступила 8 мая 2016 г.

Принята к печати 14 ноября 2016 г.

Ключевые слова: Братское водохранилище, индекс Арктической осцилляции, ледовые прогнозы, озеро Байкал, полное очищение ото льда, радиометр AVHRR, Усть-Илимское водохранилище.

По данным радиометра AVHRR изучена изменчивость сроков очищения ото льда акваторий озера Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ с 1998 по 2015 г. Разработаны региональные методики долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения исследуемых акваторий с использованием значений индекса Арктической осцилляции, позволяющие прогнозировать характер развития ледовых явлений со средней заблаговременностью от 21 до 33 суток.

Введение

Озеро Байкал, Братское и Усть-Илимское водохранилища расположены в районе с резко континентальным климатом. Они замерзают в зимний период, как и многие другие водоёмы умеренных широт, и бывают покрыты льдом от четырёх до шести месяцев в году [1–3]. Ледяной покров влияет на условия формирования энергетических потоков в системе «водоём–атмосфера», определяет своеобразие всех элементов режима данных

водных объектов и воздействует на функционирование их экосистем. Ледовый режим оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ тесно связан с погодными условиями, поэтому даты образования и разрушения ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне.

Исследуемые водоёмы судоходны, поэтому исследование межгодовой изменчивости ледовых явлений на этих водоёмах, как и ледовые прогнозы для них, имеет большое практическое значение для навигации [4, 5]. Кроме того, ин-

формация о ледовой обстановке требуется для планомерной перевозки грузов по льду и правильной эксплуатации гидротехнических сооружений. Сведения о ледовом режиме необходимы также для изучения изменений регионального и глобального климата.

Материалы и методы исследований

Размеры оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ (рис. 1) делают обоснованным использование для их изучения данных дистанционного спутникового зондирования. В рамках настоящего исследования для изучения весенних ледовых явлений на оз. Байкал и водохранилищах Ангарского каскада использованы дневные снимки радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за 1998–2015 гг., имеющие безоблачные участки в пределах изучаемых акваторий и составляющие не менее 80%

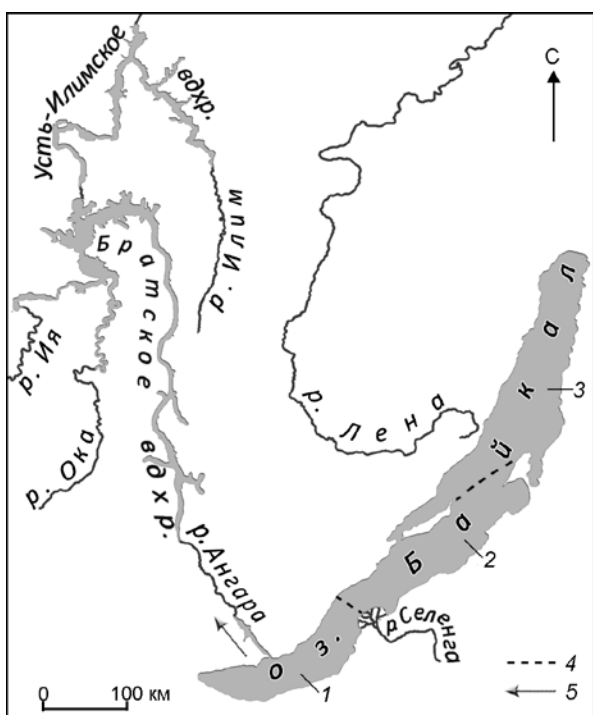


Рис. 1. Географическое расположение водных объектов: 1 – Южная котловина оз. Байкал; 2 – Центральная котловина оз. Байкал; 3 – Северная котловина оз. Байкал; 4 – границы котловин оз. Байкал; 5 – направление течения

Fig. 1. Geographical locations of water bodies: 1 – South Basin of Lake Baikal; 2 – Central Basin of Lake Baikal; 3 – North Basin of Lake Baikal; 4 – boundaries of Lake Baikal basins; 5 – flow direction

Таблица 1. Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности при различных степенях её стаивания и разрушения [5]

Степень стаивания и разрушения	Характеристика снежно-ледяной поверхности
I	Снег чистый, плотный, мелко- и среднезернистый, сухой.
II	Снег чистый, слабоувлажнённый (начало таяния), плотный, местами появляются отдельные серые пятна (более увлажнённые участки).
III	Снег чистый, днём 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 тёмных пятен.
V	Снег влажный, местами загрязнён, на льду под снегом вода, количество белых (чистый снег), серых и тёмных пятен одинаково.
VI	Снег интенсивно тает, на льду вода, снежная каша. Сплочённость после вскрытия составляет от 7 до 10 баллов.
VII	Снег крупнозернистый, сохраняется на отдельных местах, ледяная поверхность шероховатая, серых или тёмных оттенков. Сплочённость после вскрытия составляет 7 баллов.
VIII	Снежная каша, лёд тёмный, шероховатый, отдельные участки серого цвета. Сплочённость после вскрытия составляет от 5 до 7 баллов.
IX	Лёд тёмный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Сплочённость после вскрытия составляет менее 5 баллов.

всех дневных снимков весеннего периода. Радиометр AVHRR установлен на борту низкоорбитальных околополярных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире.

В весенний период использование данных AVHRR об отражательной способности поверхности позволяет определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова и чистую воду. В настоящей работе при оценке стадий таяния и разрушения снежно-ледяного покрова на исследуемых водоёмах за основу принята классификация В.М. Мишона [6] (табл. 1), доработанная на основании исследований оптических свойств разрушающегося льда и снега [7–9]. В результате для каждого типа, приведённого в табл. 1, установлен диапазон значений альбедо, используемый для дальнейшего составления карт по спутниковым изображениям. Карты ледовой обстановки в период таяния и разрушения ледяного покрова в целях уменьшения влияния

полупрозрачной облачности и бликования поверхности создаются в соответствии с распределением минимальных за день значений нормализованного альбеда первого канала AVHRR.

Для анализа точности предложенной методики классификации использовались не применявшиеся при разработке классификации, но находящиеся в открытом доступе крупномасштабные космofотокарты с метровым и субметровым разрешением, которые обеспечивают фрагментарное покрытие исследуемых акваторий на отдельные даты, а для оз. Байкал использовались и данные наземных исследований в апреле 2015 г. Составлены матрицы классификации и установлено, что точность классификации состояния снежно-ледяной поверхности по исследуемым водоёмам составляет не менее 90%.

Результаты исследований

На рис. 2 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, Братском и Усть-Илимском водохранилищах в мае 2010 и 2012 гг. Данные картографические изображения позволяют отчётливо проследить динамику разрушения ледяного покрова в указанные годы. За период исследования 1998–2015 гг. самый поздний сход льда на всех изучаемых водоёмах наблюдался в 2010 г., а наиболее ранний – в 2012 г. При рассмотрении указанной серии карт видно, что ледовая обстановка на водоёмах из года в год может существенно отличаться даже в схожие сроки. Например, 25 мая в 2010 г. лёд ещё не вскрылся на большей части акватории Северной котловины оз. Байкала, а в 2012 г. в это же время оз. Байкал полностью очистилось ото льда (см. рис. 2, I). 23 мая 2010 г. свободные ото льда участки акваторий в основном наблюдались только в Ийской части Братского водохранилища и верховьях ангарских частей Братского и Усть-Илимского водохранилищ (см. рис. 2, II, III), а в 2012 г. данные водоёмы уже полностью очистились ото льда в первых числах третьей декады мая.

Из года в год на данных водоёмах наблюдается схожая последовательность разрушения льда и очищения от него исследуемых акваторий. Так, на

оз. Байкал взлом льда начинается вдоль западного побережья Южной котловины, несколько севернее устья р. Ангары, как правило во второй половине апреля. Очищаются ото льда в первую очередь северная часть Южной котловины и южная часть Центральной котловины озера. В последнюю очередь очищается ото льда акватория Северной котловины оз. Байкал, это происходит в третьей декаде мая – первой половине июня (см. рис. 2, I). На Братском и Усть-Илимском водохранилищах интенсивное таяние снежно-ледяного покрова начинается со второй половины апреля, вскрытие на большей части данных акваторий происходит в первой половине мая, полное очищение – во второй половине мая – первой декаде июня (см. рис. 2, II, III). Процессы разрушения льда на ангарских частях Братского и Усть-Илимского водохранилищ, особенно в верховьях указанных акваторий, происходят несколько раньше по сравнению с другими участками данных водоёмов.

В рамках настоящего исследования по спутниковым данным была изучена межгодовая изменчивость сроков очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ. В табл. 2 приведены средние и крайние сроки полного очищения указанных акваторий ото льда и их межгодовая изменчивость, определённые по данным AVHRR за 18-летний период с 1998 по 2015 г. На рис. 3 показан межгодовой ход сроков очищения ото льда исследуемых акваторий за период с 1998 по 2015 г., определённых по данным AVHRR. Между сроками полного очищения Братского и Усть-Илимского водохранилищ и всех котловин оз. Байкал наблюдается тесная или весьма тесная связь с коэффициентами корреляции от 0,72 до 0,97, т.е. характер очищения ото льда оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ имеет общие региональные черты.

Колебания из года в год интенсивности ледовых процессов на исследуемых водоёмах в основном связаны с Сибирским антициклоном [1, 2, 10], влияние которого зависит от общей атмосферной циркуляции в Северном полушарии [1]. Важнейший крупномасштабный атмосферный процесс, определяющий межгодовую изменчивость погодных и климатических условий в высоких и средних широтах Северного полушария в холодное время года, – Арктическая осцилляция (АО – Arctic Oscillation) [11, 12]. Когда ин-

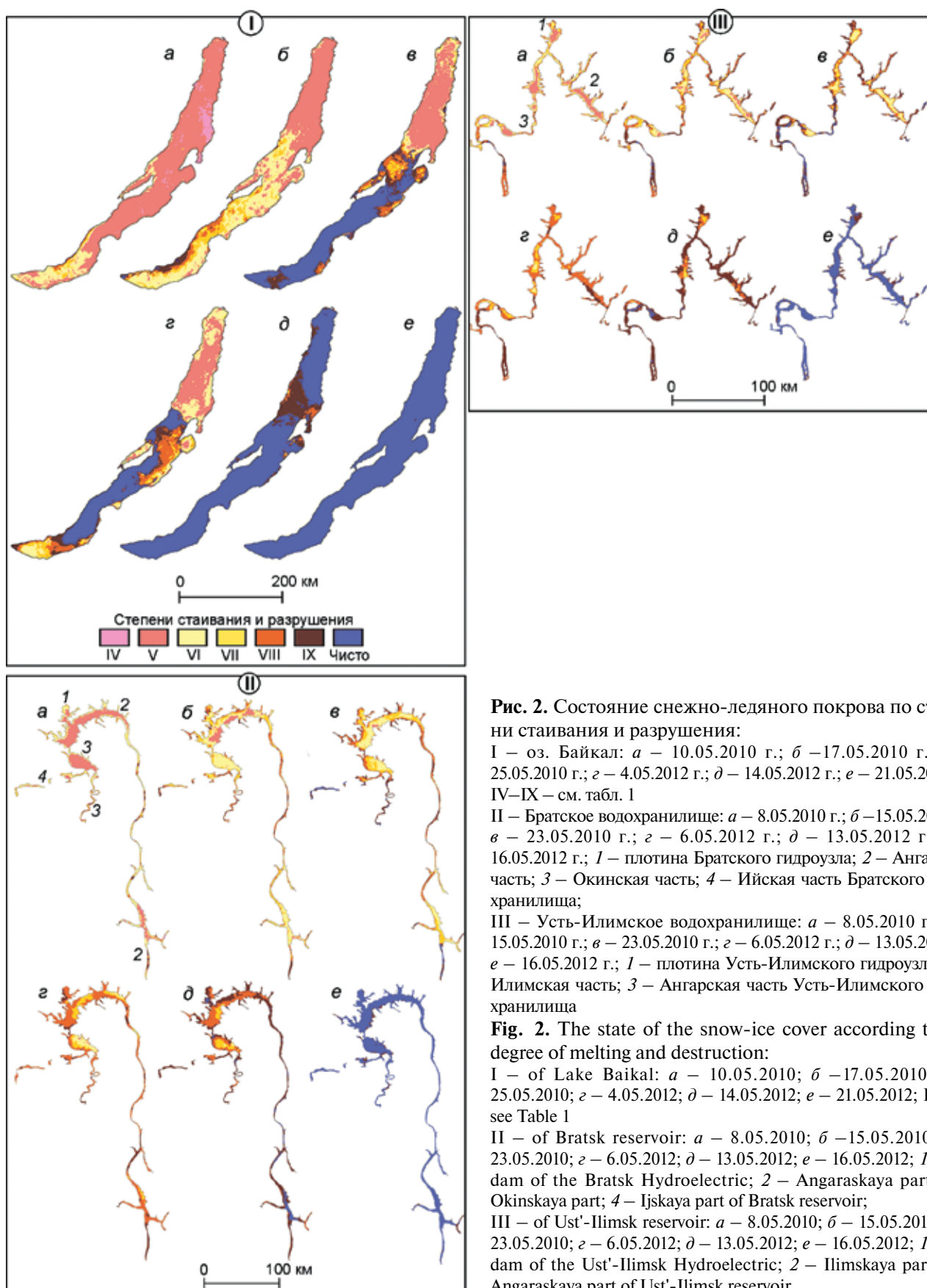


Рис. 2. Состояние снежно-ледяного покрова по степени стаивания и разрушения:

I – оз. Байкал: *а* – 10.05.2010 г.; *б* – 17.05.2010 г.; *в* – 25.05.2010 г.; *г* – 4.05.2012 г.; *д* – 14.05.2012 г.; *е* – 21.05.2012 г.; IV–IX – см. табл. 1

II – Братское водохранилище: *а* – 8.05.2010 г.; *б* – 15.05.2010 г.; *в* – 23.05.2010 г.; *г* – 6.05.2012 г.; *д* – 13.05.2012 г.; *е* – 16.05.2012 г.; 1 – плотина Братского гидроузла; 2 – Ангарская часть; 3 – Окинская часть; 4 – Ийская часть Братского водохранилища;

III – Усть-Илимское водохранилище: *а* – 8.05.2010 г.; *б* – 15.05.2010 г.; *в* – 23.05.2010 г.; *г* – 6.05.2012 г.; *д* – 13.05.2012 г.; *е* – 16.05.2012 г.; 1 – плотина Усть-Илимского гидроузла; 2 – Илимская часть; 3 – Ангарская часть Усть-Илимского водохранилища

Fig. 2. The state of the snow-ice cover according to the degree of melting and destruction:

I – of Lake Baikal: *a* – 10.05.2010; *б* – 17.05.2010; *в* – 25.05.2010; *г* – 4.05.2012; *д* – 14.05.2012; *е* – 21.05.2012; IV–IX see Table 1

II – of Bratsk reservoir: *a* – 8.05.2010; *б* – 15.05.2010; *в* – 23.05.2010; *г* – 6.05.2012; *д* – 13.05.2012; *е* – 16.05.2012; 1 – the dam of the Bratsk Hydroelectric; 2 – Angaraskaya part; 3 – Okinskaya part; 4 – Ijskaya part of Bratsk reservoir;

III – of Ust'-Ilimsk reservoir: *a* – 8.05.2010; *б* – 15.05.2010; *в* – 23.05.2010; *г* – 6.05.2012; *д* – 13.05.2012; *е* – 16.05.2012; 1 – the dam of the Ust'-Ilimsk Hydroelectric; 2 – Ilimskaya part; 3 – Angaraskaya part of Ust'-Ilimsk reservoir

Таблица 2. Сроки полного очищения ото льда Братского и Усть-Илимского водохранилищ, Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал за период с 1998 по 2015 г.

Характеристика	Братское водохранилище	Усть-Илимское водохранилище	Южная котловина оз. Байкал	Центральная котловина оз. Байкал	Северная котловина оз. Байкал
Средний срок полного очищения	29 мая	30 мая	20 мая	26 мая	1 июня
Срок наиболее раннего полного очищения	17 мая	18 мая	9 мая	13 мая	20 мая
Срок наиболее позднего полного очищения	7 июня	9 июня	4 июня	7 июня	13 июня
Разброс сроков полного очищения, дни	21	22	26	25	24
Среднее квадратическое отклонение, дни	7	7	8	7	7

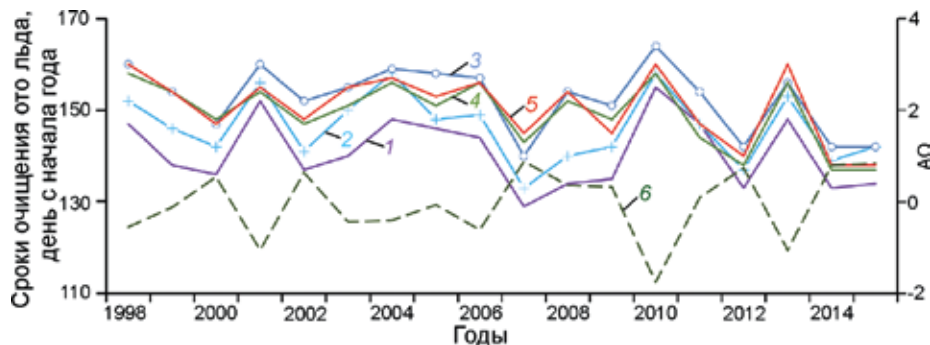


Рис. 3. Межгодовой ход сроков очищения ото льда исследуемых акваторий по данным радиометра AVHRR в сопоставлении с ходом значений индекса АО, осреднённых за период с ноября по апрель. Котловина оз. Байкал: 1 – Южная; 2 – Центральная; 3 – Северная; 4 – Братское водохранилище; 5 – Усть-Илимское водохранилище; 6 – АО

Fig. 3. Inter-annual variability of the timing of the final disappearance of all ice on the investigated water areas according AVHRR data in comparison with variability of AO index; averaged for the period from November to April: Basin of Lake Baikal: 1 – South; 2 – Central; 3 – North; 4 – Bratsk reservoir; 5 – Ust'-Ilimsk reservoir; 6 – AO

декс АО находится в положительной фазе, кольцо сильных ветров, циркулирующих вокруг Северного полюса, ограничивает поступление более холодного воздуха из полярных регионов. В отрицательной фазе индекса АО этот пояс ветров становится слабее и больше искажается, что способствует более лёгкому проникновению на юг холодных арктических воздушных масс и увеличению штормов в средних широтах [11].

В России зависимость параметров ледового режима крупных внутренних водоёмов от значений различных телеконнекционных индексов исследовалась в работах [13–15] и др. В ходе настоящего исследования также проанализирована связь сроков очищения водоёмов ото льда по данным AVHRR как с индексом АО, так и с рядом других телеконнекционных индексов по информации NOAA [12] и с отдельными метеоэлементами по данным реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center of Atmospheric Research) [16]. При этом сроки очищения ото льда сопоставлялись

со значениями телеконнекционных индексов и метеоэлементов, осреднённых за различные периоды времени, частично или полностью включающих осеннее и предледоставное охлаждение, ледостав, период таяния и разрушения льда.

Наиболее выраженная связь сроков очищения ото льда всех котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ наблюдается с индексом АО, осреднённым за период с ноября по апрель, со значениями коэффициента корреляции, достигающими $-0,83 \div -0,91$. Кроме того, наблюдается заметная или тесная связь сроков очищения данных акваторий с индексами NAO (North Atlantic Oscillation) и SCAND (Scandinavia), осреднёнными за период с ноября по май или с декабря по май, с корреляцией, достигающей $-0,68 \div -0,83$ и $0,56 \div 0,75$ соответственно. С индексами EATL/WRUS (East Atlantic/West Russia) и Polar/Eurasia связь сроков очищения слабая или умеренная.

Величина коэффициента корреляции сроков очищения ото льда со значениями приземной тем-

пературы воздуха, осреднённой за период с октября по май, достигает $-0,74$ для Южной котловины и $-0,72$ для Центральной котловины оз. Байкал, характеризуя связь как тесную. Для Северной котловины оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ связь сроков очищения ото льда со средней за октябрь–май приземной температурой воздуха весьма заметная, с коэффициентом корреляции $-0,58 \div -0,65$. Связь сроков очищения с осреднёнными за ноябрь–апрель или декабрь–апрель значениями высоты изобарической поверхности 500 ГПа в районе действия Сибирского антициклона соответствует тесной связи для всех котловин оз. Байкал и заметной – для Братского и Усть-Илимского водохранилищ со значениями коэффициента корреляции $-0,64 \div -0,81$.

На рис. 3 видно, что межгодовые колебания сроков очищения ото льда изучаемых акваторий в целом находятся в противофазе к межгодовым колебаниям осреднённых за период с ноября по апрель значений индекса АО. Влияние на ледовый режим характера атмосферного переноса, отражённого в значениях АО, обусловлено формированием полей давления, температуры воздуха, ветра, влажности и т.д. [13, 17].

Установлено, что связь сроков полного очищения ото льда на всех исследуемых акваториях, имеющих достаточно большие площади, с показателем атмосферной циркуляции АО значительно лучше выражена, чем при использовании информации о ледовых явлениях, собранной на отдельных гидрометеостанциях, как, например, в работе [13]. Это можно объяснить более выразительным вкладом локальных факторов в специфику ледового режима на непосредственно прилегающих к постам участках акватории, что показывает необходимость использования спутниковой информации о ледовых условиях на всей акватории для адекватной оценки связи параметров ледового режима с параметрами атмосферной циркуляции.

Региональный метод прогнозирования сроков полного очищения ото льда

Согласно техническому регламенту Всемирной метеорологической организации (ВМО), долгосрочные гидрологические прогнозы относятся к периоду заблаговременности более десяти суток [5]. Проблема разработки надёжных долго-

срочных ледовых прогнозов – одна из наиболее трудных задач в гидрометеорологии, которая пока не получила вполне удовлетворительного решения [18]. При разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов к ключевой проблеме относится исследование атмосферных процессов, диагностирующих с определённой заблаговременностью особенности теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой. Следующий этап – установление прогностических зависимостей между прогнозируемым элементом ледового режима и показателями (индексами), характеризующими атмосферные процессы [19].

Поскольку изменения активности индекса АО отражаются в динамике ледового режима оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, то в качестве предиктора в прогнозных зависимостях можно использовать значения указанного индекса. В результате исследования на основании анализа массивов данных о сроках полного очищения, определённых по данным AVHRR за 1998–2015 гг., и значений телеконнекционных индексов АО, осреднённых за различные интервалы времени, автором настоящей статьи были предложены:

а) прогнозные зависимости линейного вида для Южной и Центральной котловин оз. Байкал (1)

$$\tau = \zeta_0 + \zeta_1 X \text{ и} \quad (1)$$

б) полиномиальные зависимости для условий Братского, Усть-Илимского водохранилищ и Северной котловины оз. Байкал (2)

$$\tau = \zeta_0 + \zeta_1 X + \zeta_2 X^2 + \zeta_3 X^3, \quad (2)$$

где τ – срок полного очищения акватории ото льда, день с начала года; X – предиктор, в качестве которого выступает индекс АО, осреднённый за различные периоды, которые указаны в табл. 3; ζ_0 – ζ_3 , – полученные с использованием метода наименьших квадратов региональные наборы регрессионных коэффициентов, день с начала года (см. табл. 3).

Выпуск ледовых прогнозов для Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ по предложенному методу может быть сделан 1 мая. Средняя заблаговременность прогнозов по предложенному методу составляет от 21 (акватория Южной котловины оз. Байкал) до 33 суток (акватория Северной котловины оз. Байкал); наибольшая заблаговременность прогнозов достигает 44 суток (см.

Таблица 3. Характеристики прогнозных зависимостей для определения сроков полного очищения ото льда исследуемых акваторий*

Характеристика прогнозной зависимости	Братское водохранилище	Усть-Илимское водохранилище	Южная котловина оз. Байкал	Центральная котловина оз. Байкал	Северная котловина оз. Байкал
ζ_0 , день с начала года	151,13	152,73	140,64	145,60	155,79
ζ_1 , день с начала года	-9,18	-7,10	-8,24	-8,77	-6,61
ζ_2 , день с начала года	-3,45	-6,34	—	—	-8,75
ζ_3 , день с начала года	-0,26	-2,37	—	—	-4,37
Период осреднения предиктора	Ноябрь–апрель	Ноябрь–апрель	Декабрь–апрель	Ноябрь–апрель	Ноябрь–апрель
Средняя заблаговременность прогнозов, сутки	30	31	21	26	33
Наибольшая заблаговременность прогнозов, сутки	38	40	35	38	44
Величина ρ	0,89	0,89	0,91	0,90	0,95
Обеспеченность допустимой погрешности прогнозов p , %	94,4	100,0	94,4	94,4	94,4
Коэффициент прогностической информативности	0,83	0,84	0,85	0,87	0,92

*Категория качества методики прогнозирования – хорошая.

табл. 3). Качество предложенных прогнозных зависимостей устанавливалось по формуле

$$\rho = (1 - (S/\sigma)^2)^{0,5},$$

где ρ – индекс корреляции; S – среднеквадратическая погрешность проверочных прогнозов, сутки; σ – среднеквадратическое отклонение прогнозируемого значения элемента от среднего, сутки [20–22].

При длине ряда 18 лет, используемого в рамках исследования, прогнозная методика считается хорошей, если $\rho \geq 0,89$, и удовлетворительной – если $0,66 \leq \rho < 0,89$. Значения ρ для исследуемых зависимостей составило от 0,89 до 0,95 (см. табл. 3). В соответствии с оправдываемостью ледовых прогнозов существует ещё один не менее важный критерий определения категории качества методики прогнозирования – величина обеспеченности допустимой погрешности прогнозов p , %. Прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка меньше или равна допустимой погрешности. Согласно [22], величина допустимой погрешности прогнозов наступления весенних явлений в рамках настоящего исследования принята равной $0,674\sigma$, или пяти суткам. В соответствии с этой величиной на рис. 4 область, отвечающая оправдавшимся прогнозам, лежит между двумя наклонными пунктирными линиями. Прогнозная методика хорошая, если величина обеспеченности допустимой погрешности прогнозов $p \geq 82\%$, и удовлетворительной, если $60 \leq p \leq 81\%$ [20, 21]. Величина p составила более 94% для всех предложенных зависимостей (см. табл. 3).

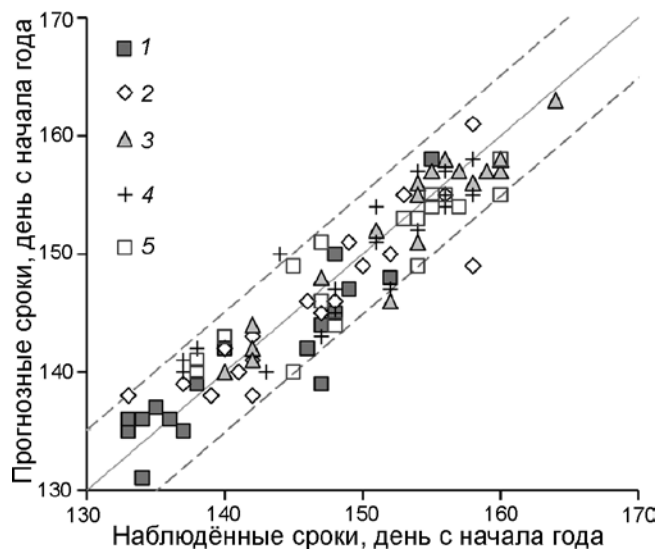


Рис. 4. Сопоставление прогнозируемых сроков полного очищения акваторий ото льда со сроками, определёнными по данным спутниковых наблюдений: Котловина оз. Байкал 1 – Южная; 2 – Центральная; 3 – Северная; 4 – Братское водохранилище; 5 – Усть-Илимское водохранилище

Fig. 4. A comparison of the predicted timing of the final disappearance of all ice on the water areas with the timing defined with satellite observations: Basin of Lake Baikal: 1 – South; 2 – Central; 3 – North; 4 – Bratsk reservoir; 5 – Ust'-Ilimsk reservoir

Расчёт указанных показателей, значения которых приведены в табл. 3, проводился по исходному ряду, поэтому дополнительно была оценена временная устойчивость прогностических зависимостей методом «выбрасываемых точек» [22]. Этот

метод состоит в определении прогностического уравнения при исключении из ряда от одного до пяти лет и в составлении по полученным уравнениям проверочных прогнозов для исключённых лет. Исключая из ряда последовательно каждый последующий год, получают весь ряд прогнозируемых значений и рассчитывают коэффициент корреляции данных величин с фактическими значениями за те же годы. Полученная величина коэффициента корреляции называется коэффициентом прогностической информативности и служит показателем временной устойчивости зависимостей. Достаточно устойчивыми и применимыми на практике считаются прогностические зависимости со значениями коэффициента прогностической информативности не менее 0,6 [22]. Значения коэффициента прогностической информативности составили от 0,83 до 0,92 (см. табл. 3), что демонстрирует временную устойчивость полученных в работе зависимостей.

По указанным показателям категория качества методик прогнозирования сроков полного очищения ото льда Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ была определена как хорошая (см. табл. 3), что показывает возможность применения разработанного метода регионального долгосрочного прогнозирования и его дальнейшего внедрения в оперативную практику для выпуска ледовых прогнозов.

Заключение

В рамках выполненного исследования с применением данных AVHRR изучены региональные особенности очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водо-

хранилищ, определены крайние и средние даты, а также разброс сроков полного очищения данных акваторий ото льда, величина которого для исследуемых водных объектов составила от 21 до 26 дней. Установлено, что межгодовые колебания сроков очищения ото льда указанных акваторий находятся в противофазе к межгодовым колебаниям значений индекса АО, вычисленного с определённой заблаговременностью ко времени полного исчезновения льда на водоёмах. Это даёт возможность использовать значения данного телеконнекционного индекса в качестве предиктора в региональных прогностических зависимостях.

В результате исследования установлены прогностические зависимости полиномиального вида со средней заблаговременностью от 21 до 33 суток для всех изучаемых акваторий. Оценка эффективности предложенных прогностических зависимостей по нескольким параметрам показала, что категория качества методик прогнозирования сроков полного очищения Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ определена как хорошая. Указанное обстоятельство позволяет применить разработанный метод регионального долгосрочного прогноза и в дальнейшем внедрить его в оперативную практику ледовых прогнозов. Отметим, что для увеличения заблаговременности ледовых прогнозов предложенный метод можно совершенствовать с применением прогностических значений телеконнекционных индексов.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, проект № 12-05-31100, и госконтракта ФЦП № 02.740.11.0335.

Acknowledgments. The study was partially supported by RFBR, project No. 12-05-31100, FTP state contracts No. 02.740.11.0335.

Литература

1. Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.: Наука, 1965. 374 с.
2. Магомедов М.М. Природа Усть-Илимского района. Иркутск: изд. Ин-та географии СО РАН, 2003. 143 с.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Вып. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 596 с.
4. Савельев Б.А. Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоёмов. М.: Изд-во МГУ, 1963. 540 с.

References

1. Verbolov V.I., Sokol'nikov V.M., Shimaraev M.N. *Gidrometeorologicheskiiy rezhim i teplovoy balans ozera Baikal*. Weather conditions and heat balance of the Lake Baikal. Moscow: Nauka, 1965. 374 p. [In Russian].
2. Magomedov M.M. *Priroda Ust'-Ilimskogo rayona*. The nature of the Ust-Ilim region. Irkutsk: Institute of Geography, Siberian Branch of RAS, 2003. 143 p. [In Russian].
3. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR*. Surface water resources of the USSR. V. 16. Is. 2. Leningrad: Hydro-meteoizdat, 1972. 596 p. [In Russian].

5. Guide to Hydrological Practices. 2009. № 168. V. II. Geneva: World Meteorological Organization. 302 p.
6. Мишон В.М. Гидрофизика. Воронеж: изд. Воронежского гос. ун-та, 1979. 308 с.
7. Доронин Ю.П. Взаимодействие атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 288 с.
8. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии: Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 640 с.
9. Petrov M., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Solar radiation and albedo regime in ice-covered lakes: Early spring // Proc. of the 8th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Lund, 2004. P. 31–38.
10. Воропай Н.Н., Гагаринова О.В., Ильичева Е.А., Кичигина Н.В., Максютова Е.В., Бальбина А.С., Осипова О.П. Гидроклиматические исследования Байкальской природной территории. Новосибирск: Гео, 2013. 187 с.
11. <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao/> Arctic Oscillation (AO) [Электронный ресурс].
12. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> Northern Hemisphere Teleconnection Patterns [Электронный ресурс].
13. Сизова Л.Н., Куимова Л.Н., Шимараев М.Н. Влияние циркуляции атмосферы на ледово-термические процессы на Байкале в 1950–2010 годы // География и прир. ресурсы. 2013. № 2. С. 74–82.
14. Сутырина Е.Н. Применение материалов дистанционного зондирования для изучения особенностей разрушения снежно-ледяного покрова на озере Байкал и озере Хубсугул // Уч. зап. Российского гос. гидромет. ун-та. 2014. № 34. С. 85–92.
15. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years // Hydrological Processes. 2011. V. 25. P. 2859–2867.
16. http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/db_search/SearchMenus.pl Search for Gridded Climate Data at PSD [Электронный ресурс].
17. Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и прир. ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
18. Попов Е.Г. Основы гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 296 с.
19. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах. Л.: изд. Ленинградского гидромет. ин-та, 1986. 50 с.
20. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб.: изд. РГГМУ, 2007. 436 с.
21. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 192 с.
22. РД 52.27.284–91. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
4. Savel'ev B.A. Stroenie, sostav i svoystva ledyanogo pokrova morskikh i presnykh vodoemov. Structure, composition and properties of ice cover of sea and freshwater reservoirs. Moscow State University, 1963: 540 p. [In Russian].
5. Guide to Hydrological Practices. No. 168. V. II. Geneva: World Meteorological Organization, 2009: 302 p.
6. Mishon V.M. Gidrofizika. Hydrophysics. Voronezh State University, 1979: 308 p. [In Russian].
7. Doronin Ju.P. Vzaimodeystvie atmosfery i okeana. The interaction of the atmosphere and ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 288 p. [In Russian].
8. Matveev L.T. Kurs obshhey meteorologii. Fizika atmosfery. Course of general meteorology. Atmospheric Physics. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1976: 640 p. [In Russian].
9. Petrov M., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Solar radiation and albedo regime in ice-covered lakes: Early spring. Proc. 8th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Lund. 2004: 31–38.
10. Voropai N.N., Gagarinova O.V., Il'icheva E.A., Kichigina N.V., Maksyutova E.V., Balybina A.S., Osipova O.P. Gidroklimaticheskie issledovaniya Baikal'skoy prirodnoy territorii. Hydroclimatological studies of the Baikal natural territory. Novosibirsk: Geo, 2013. 187 p. [In Russian].
11. <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao/> Arctic Oscillation (AO) [Electronic resource].
12. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> Northern Hemisphere Teleconnection Patterns [Electronic resource].
13. Sizova L.N., Kuimova L.N., Shimaraev M.N. The influence of atmospheric circulation on ice-thermal processes in Lake Baikal in 1950–2010. *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2013, 2: 74–82. [In Russian].
14. Sutyryna E.N. 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. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University. 2014, 34: 85–92. [In Russian].
15. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years. *Hydrological Processes*. 2011, 25: 2859–2867.
16. http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/db_search/SearchMenus.pl Search for Gridded Climate Data at PSD [Electronic resource].
17. Shimaraev M.N., Starygina L.N. Circulation factors of changes in ice-thermal regime of Lake Baikal (1968–2007). *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2010, 3: 62–68. [In Russian].
18. Popov E.G. *Osnovy gidrologicheskikh prognozov*. Foundations of hydrological forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 296 p. [In Russian].
19. Georgievskiy Yu.M. *Kratkosrochnye i dolgosrochnye prognozy ledovykh yavleniy na rekakh, ozerakh i vodokhranilishchakh*. Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs. Leningrad: LGMI, 1986: 50 p. [In Russian].
20. Georgievskiy Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskie prognozy*. Hydrological forecasts. Saint-Petersburg: RGGMU, 2007: 436 p. [In Russian].
21. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov*. Manual on forecast service. Sec. 3. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1962. 192 p. [In Russian].
22. *RD 52.27.284–91. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov*. Guidelines for the production (operational) testing of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 150 p. [In Russian].