



УДК 556.06; 556.555.5

Прогнозирование сроков очищения ото льда крупных внутренних водоемов на территории бассейна р. Ангары с использованием телеконнекционных индексов

Е. Н. Сутырина

Иркутский государственный университет

Аннотация. Приводится описание разработанного метода прогнозирования сроков очищения ото льда крупных внутренних водоемов на территории бассейна р. Ангары с использованием телеконнекционных индексов. Прогнозирование ледовых условий крупных внутренних водоемов имеет большую практическую ценность для планомерного проведения навигации, так как ледяной покров препятствует судоходству. Основная цель настоящего исследования состояла в разработке метода регионального долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения ото льда оз. Хубсугул, акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ с использованием телеконнекционных индексов Арктического колебания АО (Arctic Oscillation) и Североатлантического колебания NAO (North Atlantic Oscillation).

В рамках работы была предварительно изучена специфика очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул, определены сроки наступления прогнозируемого явления на исследуемых водных объектах, их крайние и средние даты и разброс сроков полного очищения.

Установлено, что межгодовые колебания сроков очищения ото льда указанных акваторий находятся в противофазе с межгодовыми колебаниями значений телеконнекционных индексов АО и NAO, что благоприятствует использованию значений данных индексов в качестве предикторов в региональных прогнозных зависимостях.

На основании анализа значений телеконнекционных индексов АО и NAO, осредненных за различные интервалы времени, и массивов данных о сроках полного очищения для всех исследуемых акваторий были установлены прогнозные зависимости, позволяющие предвидеть характер развития ледовых явлений со средней заблаговременностью от 14 до 32 суток.

Оценка эффективности предложенных прогнозных зависимостей показала, что категория качества методик прогнозирования сроков полного очищения Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал была определена как хорошая, категория качества прогнозирования сроков полного очищения Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул – удовлетворительная.

Ключевые слова: Байкал, Хубсугул, Братское водохранилище, Усть-Илимское водохранилище, ледовые прогнозы, АО, NAO.

Введение

Озера Байкал, Хубсугул, Братское и Усть-Илимское водохранилища являются крупнейшими водоемами на территории бассейна р. Ангары и замерзают в зимний период, как и многие другие водоемы умеренных широт. Ледовый режим данных водоемов тесно связан с погодными условиями, в результате чего сроки появления плавучего льда и даты образования и разрушения ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне, что обуславливает актуальность выпуска ледовых прогнозов. Наиболее важными фазами ледового режима, для которых составляются ледовые прогнозы, являются: первое появление льда; образование сплошного ледяного покрова; вскрытие сплошного ледяного покрова; полное очищение ото льда. Прогнозирование ледовых условий крупных внутренних водоемов имеет большую практическую ценность для планомерного проведения навигации, так как ледяной покров препятствует судоходству. Кроме этого, имеется большое количество других пользователей, не связанных с судоходством, но также заинтересованных в ледовых прогнозах [1; 7; 14].

Согласно техническому регламенту Всемирной метеорологической организации (ВМО) прогнозирование будущих характеристик ледового режима по признаку заблаговременности установления наступления будущего события может быть классифицировано как: краткосрочные гидрологические прогнозы, которые охватывают период до 2 суток; среднесрочные гидрологические прогнозы, которые охватывают период от 2 до 10 суток; и долгосрочные гидрологические прогнозы, относящиеся к периоду заблаговременности более 10 суток [14]. Проблема разработки надежных долгосрочных ледовых прогнозов является одной из наиболее трудных в гидрометеорологии и пока не получила вполне удовлетворительного решения. В силу различий в характере атмосферной циркуляции в различных географических районах методы долгосрочных гидрологических прогнозов, очевидно, должны носить региональный характер [6].

При разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов ключевой проблемой является выявление атмосферных процессов, определяющих некоторой заблаговременностью особенности теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой и установление прогностических зависимостей с качественными или количественными показателями (индексами), характеризующими атмосферные процессы [2].

Таким образом, целью настоящего исследования стала разработка регионального метода долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения ото льда оз. Хубсугул, акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ с использованием телеконнекционных индексов, т. е. индексов, являющихся показателями повторяющихся, стойких, крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции, с которыми связаны другие природные явления, происходящие на значительном удалении друг от друга [17].

Материалы и методы исследования

Формирование ледовых явлений связано с крупными процессами в атмосфере, развивающимися на громадных пространствах в течение продолжительного времени. В связи со сказанным выше исследования в области долгосрочного прогнозирования ледовых явлений на территории крупных бассейнов в общем случае должны включать следующие задачи [6; 14]:

а) изучение специфики ледовых условий изучаемых водоемов, включающее определение сроков наступления прогнозируемого явления на исследуемых водных объектах, их крайние и средние даты и межгодовую изменчивость;

б) анализ атмосферных процессов, которые влекут вынос холодных и теплых воздушных масс в интересующий район и приводят к образованию или вскрытию ледяного покрова;

в) определение количественных значений переменных, характеризующих атмосферные процессы, и выявление взаимосвязи между ледовыми явлениями и переменными, представляющими соответствующие метеорологические поля;

г) установление закономерностей или признаков, с помощью которых можно предвидеть характер развития ледовых явлений с определенной заблаговременностью;

д) оценку эффективности метода ледового прогноза.

Для разработки региональных методик ледовых прогнозов в рамках настоящего исследования были использованы сроки полного очищения оз. Хубсугул, акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, определенные за период с 1998 по 2015 г. с применением данных радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) по методике, приведённой в [9; 10; 11]. Согласно указанным данным сроки полного очищения указанных водоёмов изменяются в широких пределах. Определенные за восемнадцатилетний период характерные сроки полного очищения ото льда указанных акваторий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные сроки полного очищения ото льда Братского и Усть-Илимского водохранилищ, оз. Хубсугул, акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, определенные за период с 1998 по 2015 г. по данным AVHRR

Характеристика	Братское водохранилище	Усть-Илимское водохранилище	Хубсугул	Южный Байкал	Центральный Байкал	Северный Байкал
Средний срок полного очищения	28 мая	30 мая	14 июня	20 мая	25 мая	31 мая
Дата наиболее раннего полного очищения	14 мая	18 мая	5 июня	9 мая	13 мая	20 мая
Дата наиболее позднего полного очищения	9 июня	9 июня	26 июня	4 июня	7 июня	13 июня
Разброс дат полного очищения, дни	26	22	21	26	25	24

Исследования по общей циркуляции атмосферы, приведенные в [2], показали, что при прогнозах ледовых явлений необходим учет атмосферных процессов над большими районами Северного полушария. Такой учет становится возможным при использовании статистических методов представления метеорологических полей с помощью разложения их по эмпирическим ортогональным функциям. Подобные методы позволяют перейти от использования наблюдений за многомерными полями к небольшому числу укрупненных признаков, индексов, отражающих наиболее существенную информацию исходных метеорологических полей.

В рамках данной работы для характеристики атмосферной циркуляции использованы индексы Арктического колебания АО (Arctic Oscillation) и Североатлантического колебания NAO (North Atlantic Oscillation), полученные на основе разложения на эмпирические ортогональные функции колебаний поля геопотенциала изобарической поверхности 1000 гПа для АО и 500 гПа для NAO для Северного полушария [13; 16], которые характеризуют изменения активности зонального переноса, адвекцию тепла и влаги, крупномасштабные аномалии температуры воздуха и осадков зимой на территории Евразии [5; 8; 12]. В России зависимости параметров ледового режима крупных внутренних водоёмов от значений указанных телеконнекционных индексов исследована в работах С. Г. Каретникова и М. А. Науменко [15], М. Н. Шимараева [8; 12] и др.

В ходе анализа данных NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – аббревиатура Национального управления океанов и атмосферы США) о значениях телеконнекционных индексов АО и NAO [13; 16] было выявлено, что изменения активности обоих индексов находят отражение в динамике ледового режима оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ и в меньшей степени оз. Хубсугул. Это может объясняться тем, что оз. Хубсугул расположено, с одной стороны, в более южных широтах, а с другой стороны, находится в районе с более ярко выраженным континентальным климатом и отличающемся местной спецификой погодных явлений. На рис. 1 приведены графики, отображающие изменчивость сроков полного очищения ото льда акваторий оз. Хубсугул, Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, определенных по данным AVHRR, в сопоставлении с межгодовой изменчивостью значений телеконнекционных индексов АО и NAO, осредненных за период с декабря по апрель. Данные графики наглядно иллюстрируют, что межгодовые колебания дат очищения ото льда указанных акваторий находятся в противофазе к межгодовым колебаниям значений индексов АО и NAO, вычисленных с определенной заблаговременностью ко времени полного исчезновения льда на водоемах. Данное обстоятельство показывает возможность использования значений указанных индексов в качестве предикторов в прогнозных зависимостях.

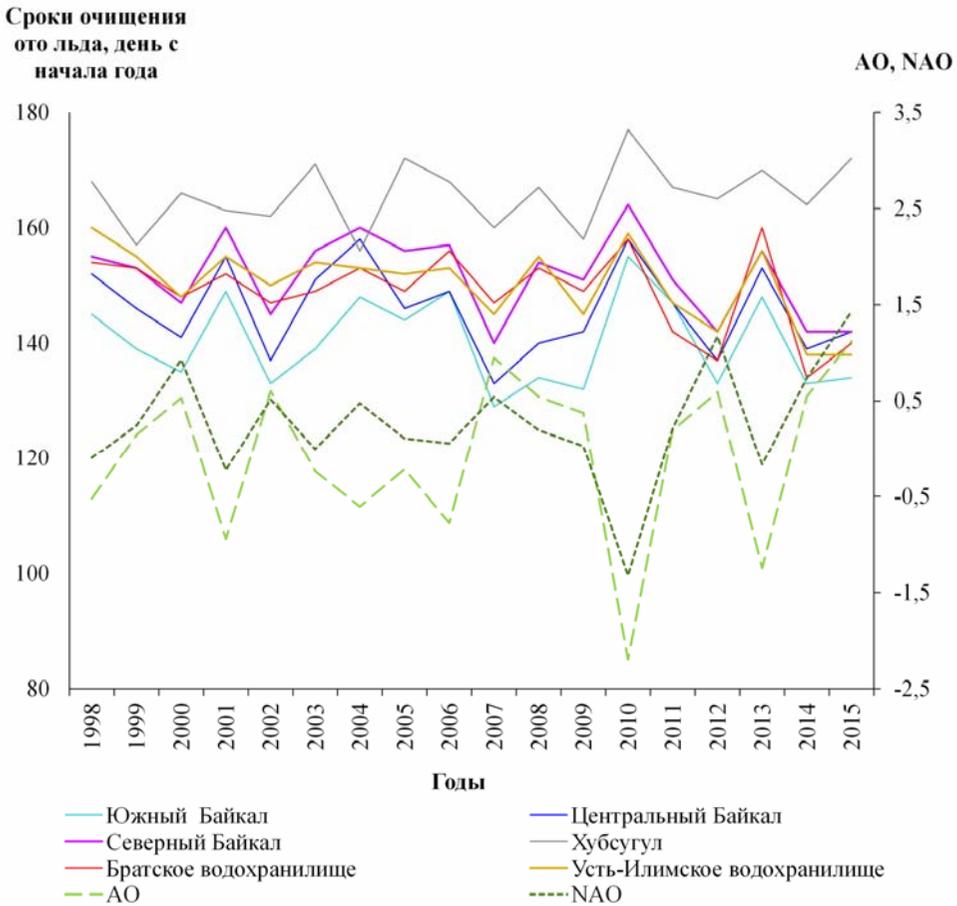


Рис. 1. Межгодовая изменчивость значений телеконнекционных индексов АО и NAO, осредненных за период с декабря по апрель, и сроков полного очищения ото льда исследуемых водоемов

Основные результаты

Анализ массивов данных о сроках полного очищения, определенных по информации AVHRR, и значений телеконнекционных индексов АО и NAO, осредненных за различные интервалы времени, для всех исследуемых акваторий позволил автору предложить прогнозные полиномиальные зависимости третьей степени:

$$D = a_1 X^3 + a_2 X^2 + a_3 X + a_4, \quad (1)$$

где D – срок полного очищения акватории ото льда, день с начала года; a_1 , a_2 , a_3 , a_4 – определенные методом наименьших квадратов региональные наборы регрессионных коэффициентов, день с начала года (приведены в табл. 2); X – предиктор, в качестве которого при прогнозировании сроков полного очищения акваторий Южной, Центральной и Северной котловин

оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ выступает телекорреляционный индекс АО, осредненный за различные интервалы времени (см. табл. 2), а в случае оз. Хубсугул выступает индекс NAO, осредненный за декабрь – май.

Таблица 2

Характеристики прогнозных зависимостей для определения сроков полного очищения ото льда Братского и Усть-Илимского водохранилищ, оз. Хубсугул, акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал

Характеристика прогнозной зависимости	Братское водохранилище	Усть-Илимское водохранилище	Хубсугул	Южный Байкал	Центральный Байкал	Северный Байкал
a_1 , день с начала года	0,84	-2,24	8,77	0,87	0,55	-3,57
a_2 , день с начала года	-3,07	-5,65	6,46	0,29	-1,48	-7,31
a_3 , день с начала года	-7,56	-6,74	-15,5	-10,07	-10,52	-7,32
a_4 , день с начала года	150,04	152,4	165,72	140,02	146,4	154,32
Предиктор X	АО	АО	NAO	АО	АО	АО
Период осреднения предиктора	ноябрь – апрель	ноябрь – апрель	декабрь – май	декабрь – апрель	ноябрь – апрель	ноябрь – апрель
Диапазон значений предиктора	[-1,8; 0,9]	[-1,8; 0,9]	[-1,4; 1,3]	[-2,2; 1,2]	[-1,8; 0,9]	[-1,8; 0,9]
Средняя заблаговременность прогнозов, суток	29	31	14	20	26	32
Наибольшая заблаговременность прогнозов, суток	40	40	26	35	38	44
S/σ	0,62	0,50	0,58	0,38	0,44	0,26
Обеспеченность допустимой погрешности прогнозов p	0,76	1,00	1,00	0,94	0,94	1,00
Категория качества методики прогнозирования	удовлетворительная	удовлетворительная	удовлетворительная	хорошая	хорошая	хорошая

Выпуск ледовых прогнозов по предложенному методу может быть осуществлен 1 мая для Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ и 1 июня для оз. Хубсугул. Средняя заблаговременность прогнозов по предложенному методу составляет от 14 (оз. Хубсугул) до 32 суток (акватория Северной котловины

оз. Байкал), наибольшая заблаговременность прогнозов доходит до 44 суток (см. табл. 2).

Для разработанных прогнозных зависимостей была выполнена оценка их эффективности. Ниже на рис. 2 представлены прогнозируемые сроки очищения Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул ото льда в сопоставлении с наблюдаемыми сроками их очищения. Расположение точек на биссектрисе первой четверти координатной плоскости или в непосредственной близости от неё иллюстрирует правдоподобность полученных результатов.

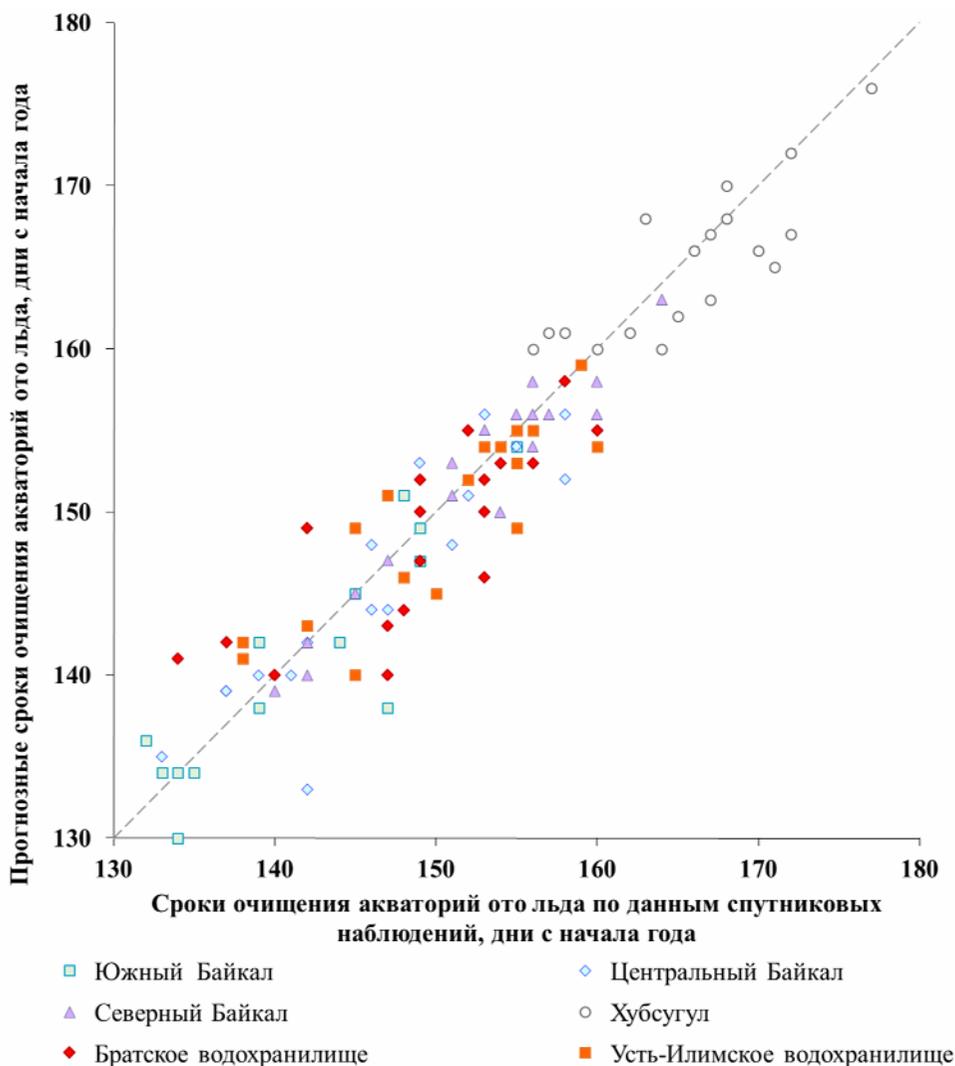


Рис. 2. Сопоставление прогнозируемых сроков полного очищения водоемов ото льда со сроками, определенными по данным спутниковых наблюдений

Более строго качество предложенных прогнозных зависимостей устанавливается по отношению S/σ , где S – средняя квадратическая погрешность проверочных прогнозов, суток; σ – среднее квадратическое отклонение прогнозируемого значения элемента от среднего, суток.

Эти параметры являются показателями эффективности и точности прогнозирования, так как показывают выигрыш в распределении погрешностей, который дает метод прогнозирования по сравнению с распределением погрешностей при принятии ожидаемой величины по ее норме или норме изменения за период заблаговременности прогноза [3].

При длине ряда от 15 до 25 лет, что соответствует восемнадцатилетней длине ряда, используемого в рамках данного исследования, прогнозная методика считается хорошей, если $S/\sigma \leq 0,45$, и считается удовлетворительной, если $0,46 \leq S/\sigma \leq 0,75$. Уменьшение соотношения S/σ свидетельствует о повышении точности прогнозирования [3].

Также оправдываемость ледовых прогнозов устанавливается сопоставлением ошибок прогноза с допустимой погрешностью. Прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка меньше или равна допустимой погрешности. Понятие допустимой погрешности прогнозирования является условным, так как назначение ее величины определяется современным состоянием возможностей составления прогнозов. Величина допустимой погрешности прогнозов наступления весенних явлений согласно [3] может быть установлена равной 6 суткам, однако согласно другим представлениям может быть определена как 1/2 от среднего значения заблаговременности составляемых прогнозов [4].

В соответствии с оправдываемостью ледовых прогнозов существует ещё один не менее важный критерий определения категории качества методики прогнозирования, которым является величина обеспеченности допустимой погрешности прогнозов p . Прогнозная методика является хорошей, если $p \geq 0,82$, и считается удовлетворительной, если $0,60 \leq p \leq 0,81$ [3].

В рамках данного исследования для проверки качества прогнозирования был выбран первый вариант величины допустимой погрешности прогнозов, равной 6 суткам, при которой результаты оценки обеспеченности допустимой погрешности прогнозов приведены в табл. 2.

При выборе второго варианта определения величины допустимой погрешности прогнозов эта величина составила бы от 7 (для оз. Хубсугул) до 16 суток (для акватории Северной котловины оз. Байкал), что соответствовало бы обеспеченности допустимой погрешности прогнозов $p = 1,0$ для всех приведенных методик.

В результате проведенного анализа с учётом указанных выше параметров категория качества методик прогнозирования сроков полного очищения Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал была определена как хорошая, категория качества прогнозирования сроков полного очищения Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул определена как удовлетворительная.

Выводы

В рамках проведенного исследования были изучены региональные особенности очищения ото льда акваторий Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул, определены сроки наступления прогнозируемого явления на исследуемых водных объектах, их крайние и средние даты и разброс сроков полного очищения, величина которого составила для исследуемых водных объектов от 21 до 26 дней.

Было определено, что межгодовые колебания сроков очищения ото льда указанных акваторий находятся в противофазе к межгодовым колебаниям значений индексов АО и НАО, вычисленных с определенной заблаговременностью ко времени полного исчезновения льда на водоемах, что обуславливает возможность использования значений данных телеконнекционных индексов в качестве предикторов в региональных прогнозных зависимостях.

Кроме этого, в итоге проведения исследования на основании анализа массивов данных о сроках полного очищения, определенных по информации радиометра AVHRR, и значений телеконнекционных индексов АО и НАО, осредненных за различные интервалы времени, для всех исследуемых акваторий автором были установлены прогнозные зависимости полиномиального вида, позволяющие предвидеть характер развития ледовых явлений со средней заблаговременностью от 14 до 32 сут.

В результате оценки эффективности предложенных прогнозных зависимостей по нескольким показателям было установлено, что категория качества методик прогнозирования сроков полного очищения Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал была определена как хорошая, категория качества прогнозирования сроков полного очищения Братского и Усть-Илимского водохранилищ и оз. Хубсугул определена как удовлетворительная. Указанное обстоятельство показывает возможность применения разработанного метода регионального долгосрочного прогнозирования и его дальнейшего внедрения в оперативную практику для выпуска ледовых прогнозов.

Следует отметить, что в будущем для увеличения заблаговременности ледовых прогнозов возможно усовершенствование предложенного метода с применением прогнозных значений телеконнекционных индексов.

Список литературы

1. *Верболов В. И.* Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / В. И. Верболов, В. М. Сокольников, М. Н. Шимараев. – М. : Наука, 1965. – 374 с.
2. *Георгиевский Ю. М.* Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах : учеб. пособие / Ю. М. Георгиевский. – Л. : Изд-во ЛГМИ, 1986. – 50 с.
3. *Георгиевский Ю. М.* Гидрологические прогнозы : учебник / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. – 436 с.
4. *Микова К. Д.* Ледовый режим Воткинского водохранилища и методики его прогноза : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / К. Д. Микова. – Пермь, 2007. – 23 с.
5. *Панин Г. Н.* Особенности климатических изменений в средних и высоких широтах Северного полушария [Электронный ресурс] / Г. Н. Панин, Т. Ю. Выру-

чалкин, И. В. Соломонова // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика, 2010. – Вып. 2(2). – С. 1–13. – URL: http://oilgasjournal.ru/vol_2/articles/8.html.

6. *Попов Е. Г.* Основы гидрологических прогнозов : учебник / Е. Г. Попов. – Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1968. – 296 с.

7. *Савельев Б. А.* Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоемов / Б. А. Савельев. – М. : Изд-во МГУ, 1963. – 540 с.

8. *Сизова Л. Н.* Влияние циркуляции атмосферы на ледово-термические процессы на Байкале в 1950–2010 гг. / Л. Н. Сизова, Л. Н. Куимова, М. Н. Шимараев // География и природ. Ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 74–82.

9. *Сутырина Е. Н.* Изучение особенностей ледово-термического режима озера Хубсугул с применением данных радиометра AVHRR / Е. Н. Сутырина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 190–199.

10. *Сутырина Е. Н.* Применение материалов дистанционного зондирования для изучения особенностей разрушения снежно-ледяного покрова на озере Байкал и озере Хубсугул / Е. Н. Сутырина // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. – 2014. – № 34. – С. 85–92.

11. *Сутырина Е. Н.* Применение материалов дистанционного зондирования Земли для анализа связи характеристик ледово-термического режима крупных внутренних водоемов с параметрами атмосферной циркуляции / Е. Н. Сутырина // Тр. XXIV Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-24. – Иркутск, 2014. – Т. 3 – С. 246–249.

12. *Шимараев М. Н.* Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала / М. Н. Шимараев // География и природ. ресурсы. – 2007. – № 4. – С. 54–60.

13. Arctic Oscillation (AO) [Electronic resource]. – URL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml.

14. Guide to Hydrological Practices [Electronic resource] // WMO, 2009. – Vol. 2, N 168. – 302 p. – URL: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_II_en.pdf.

15. *Karetnikov S.* Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years / S. Karetnikov, M. Naumenko // Hydrological Processes. – 2011. – Vol. 25. – P. 2859–2867.

16. North Atlantic Oscillation (NAO) [Electronic resource]. – URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>.

17. Teleconnection Introduction [Electronic resource]. – URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/teleintro.shtml>.

Predicting the Timing of the Final Disappearance of all Ice on Large Inland Water Bodies in the Angara River Watershed Using Teleconnection Indices

E. N. Sutyryna

Irkutsk State University

Abstract. The description of developed method of predicting the dates of the final disappearance of all ice on large inland water bodies in the Angara River watershed using teleconnection indices are presented in this paper. Ice forecasts for huge inland water bodies are of great practical value for navigation since ice prevents shipping. The main objective of this study has been to develop a regional technique of long-term ice forecasts of the

dates of the final disappearance of all ice on Lake Hovsgol, water areas of South, Central and North basins of Lake Baikal, Bratsk and Ust'-Ilimsk reservoirs, using teleconnection indices AO (Arctic Oscillation) and NAO (North Atlantic Oscillation).

As a part of this work the features of the final ice disappearance on Lake Hovsgol, South, Central and North basins of Lake Baikal, Bratsk and Ust'-Ilimsk reservoirs have been previously determined, including estimating of the timing of occurring of phenomena in the target water bodies, their average and extreme dates and ranges.

It has been found that the inter-annual variation of the timing of the final disappearance of all ice on these water bodies are in antiphase with the inter-annual fluctuations of the values of teleconnection indices AO and NAO, this circumstance favors to the use of values of these indices as predictors of regional forecasting relation.

Also as a result of the research, the regional relationships for ice forecasts have been determined based on the analysis of values of teleconnection indices AO and NAO, averaged over different time intervals, and data array of the timing of the final disappearance of all ice on water area under investigation. These predictive relationships permit to anticipate the nature of ice phenomena with an average lead time of 14 up to 32 days.

As a result of evaluation of the accuracy of the proposed predictive dependencies it has been found that the category of quality of methods of forecasting of the timing of complete disappearance of all ice on South, Central and North Basins of the Lake Baikal has been identified as a good, the category of quality of methods of forecasting of final disappearance of all ice on the Bratsk and Ust'-Ilimsk reservoirs and Lake Hovsgol has been determined as satisfactory.

Keywords: Lake Baikal, Lake Hovsgol, Bratsk reservoir, Ust'-Ilimsk reservoir, ice forecasts, AO, NAO.

*Сутырина Екатерина Николаевна
кандидат географических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-72
e-mail: ensut78@gmail.com*

*Sutyryna Ekaterina Nikolaevna
Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 52-10-72
e-mail: ensut78@gmail.com*