

**Ледовый режим озёр Забайкалья в условиях современного потепления**

© 2018 г. В.К. Смахтин

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов,  
Екатеринбург, Россия  
cvk89@mail.ru

**Ice regime of Transbaikalia lakes in the present-day warming**

V.K. Smakhtin

Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Ekaterinburg, Russia  
cvk89@mail.ru

Received May 19, 2017

Accepted November 15, 2017

**Keywords:** *air temperature, climate change, duration of freeze-up, lakes of Transbaikalia, thickness of ice.***Summary**

The problem of the climate change impact on the ice regime of lakes has become topical in view of the revealed (observed) shortening of the freeze-up duration and a decrease in the ice thickness for many years. The relationship between timing and duration of the ice events and climate characteristics had been found. The influence of climate change on the ice regime in the Transbaikalia was previously estimated by the example of the Ivano-Arakhley lakes. In this work we determined the trends of changes of the following parameters: air temperature, the duration of freeze-up and the maximal ice thickness as well as the reliability of these trends on lakes Arakhley, Shakshinsky, Bolshoy Leprindo, Gusinoye, Baunt, Sosnovoye. The least-squares method was used to determine the long-term trends; consistency of the changes in the studied characteristics was evaluated by means of the correlation analysis. The significance of the trends and correlation coefficients was evaluated using Student's *t*-statistics.

**Citation:** Smakhtin V.K. Ice regime of Transbaikalia lakes in the present-day warming. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (2): 225–230. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-225-230

Поступила 10 мая 2017 г.

Принята к печати 15 ноября 2017 г.

**Ключевые слова:** *изменения климата, озёра Забайкалья, продолжительность ледостава, температура воздуха, толщина льда.*

Оценено влияние изменений климата на ледовый режим озёр Забайкалья с 1975 по 2012 г. Современная тенденция повышения температуры воздуха влияет на даты начала и окончания ледостава, формирование максимальной толщины льда и его прирост. Продолжительность ледостава и максимальная толщина льда за многолетний период уменьшились.

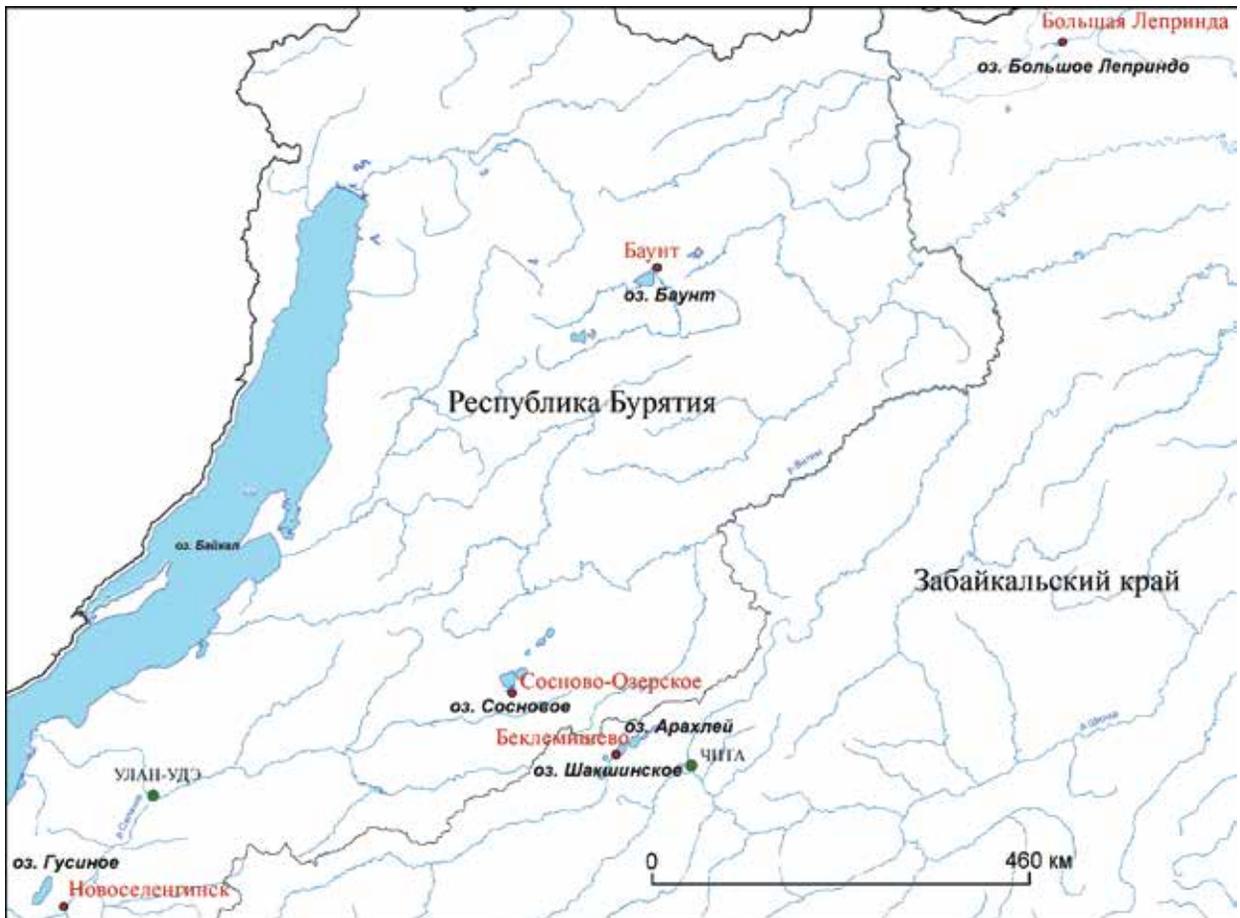
**Введение**

Проблема влияния изменений климата на ледовый режим озёр стала актуальной в связи с установленным сокращением продолжительности ледостава и уменьшением толщины льда в течение длительного времени [1]. Отечественными исследователями также оценено изменение продолжительности ледостава и максимальной толщины ледяного покрова по данным пунктов наблюдений в разных частях страны [2] и установлена связь характерных сроков и продолжительности ледовых явлений с климатическими характеристиками [3]. В Забайкалье влияние изменений климата на ледовый режим оценивалось на примере Иваново-Арахлейских озёр [4], где отмечались сокращение периода с ледовыми явлениями и уменьшение

толщины льда. Цель настоящего исследования – оценить влияние изменений климата на ледовый режим озёр Забайкалья. Для этого необходимо было: а) определить тенденции изменения температуры воздуха, продолжительности ледостава и максимальной толщины льда, а также установить достоверность этих тенденций; б) выяснить влияние температуры воздуха на продолжительность ледостава и максимальную толщину льда.

**Материалы и методы исследования**

Исследования выполнены по данным государственной наблюдательной сети Росгидромета. В качестве объекта исследования выбраны озёра Забайкалья: Арахлей, Шакшинское, Большое Ле-

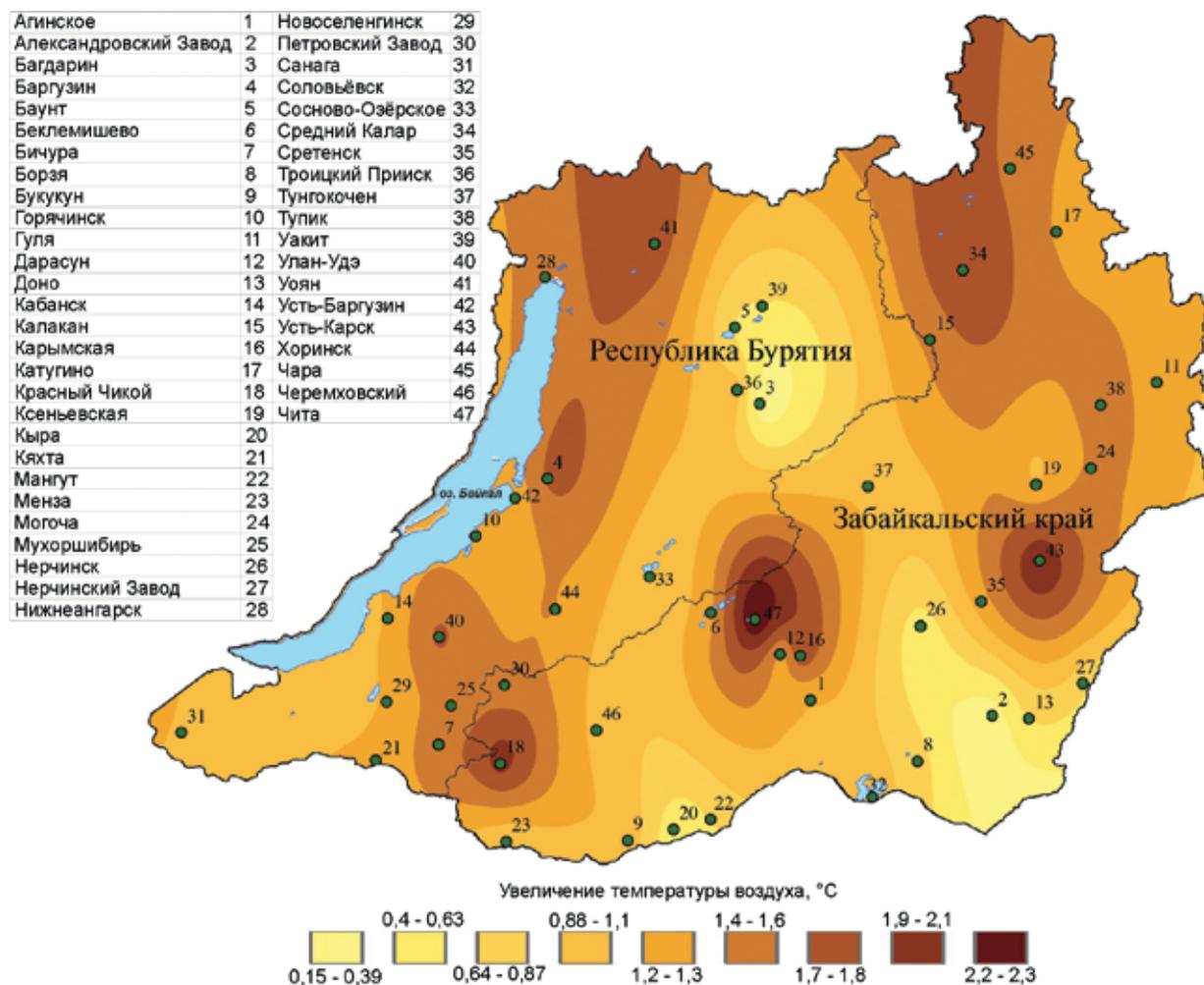


**Рис. 1.** Схема расположения исследуемых озёр Забайкалья и ближайших к ним ГМС  
**Fig. 1.** Scheme of location of the investigated lakes in Transbaikalia and the nearest meteorological stations

принодо, Гусиное, Баунт, Сосновое (рис. 1). Оценка проводилась за период с 1975 по 2012 г., так как именно с середины 1970-х годов отмечается наиболее интенсивное потепление [5]. Задействованы данные о температуре воздуха 47 метеорологических станций (ГМС). Рассматриваемые озёра находятся в зоне резко континентального климата. Для водного режима характерен подъём воды за счёт выпадения атмосферных осадков летом. Максимальных значений уровень воды достигает в августе, на оз. Большое Леприндо – в июле. Половодье не выражено. Меженный период начинается с октября и длится до апреля. Для выявления многолетних тенденций применялся метод наименьших квадратов; согласованность изменений исследуемых характеристик оценивалась с помощью корреляционного анализа [6]. Оценка значимости трендов и коэффициентов корреляции [7] выполнялась с использованием *t*-статистики Стьюдента.

### Результаты исследования и обсуждение

Средняя годовая температура воздуха с 1975 по 2012 г. на территории Забайкалья изменялась от 0 °С на юге и юго-западе (ГМС Кяхта 0,6 °С, Мангут –0,1 °С) до –7,0 ÷ –9,0 °С на северо-востоке (ГМС Чара –7,0 °С, Катугино –9,4 °С). В многолетнем колебании средняя годовая температура воздуха характеризуется положительными трендами, наибольшая часть которых (43 ГМС из 47) достоверны при 5%-м уровне значимости. Максимальное увеличение средней годово́й температуры воздуха с 1975 по 2012 г. отмечено в Чите (2,3 °С), минимальное – в Багдарине (0,3 °С). Начало ледостава озёр Забайкалья в среднем приходится на конец октября – начало ноября, окончание – на конец мая – начало июня. Следовательно, температуру воздуха, влияющую на ледовый режим озёр, необходимо было анализировать за период с октября по июнь.



**Рис. 2.** Распределение по территории Забайкалья изменения средней температуры воздуха за период октябрь–июнь с 1975 по 2012 г. по данным 47 ГМС

**Fig. 2.** The distribution of the average temperature of the Transbaikalian territory over the period October–June from 1975 to 2012 according to the information of 47 meteorological stations

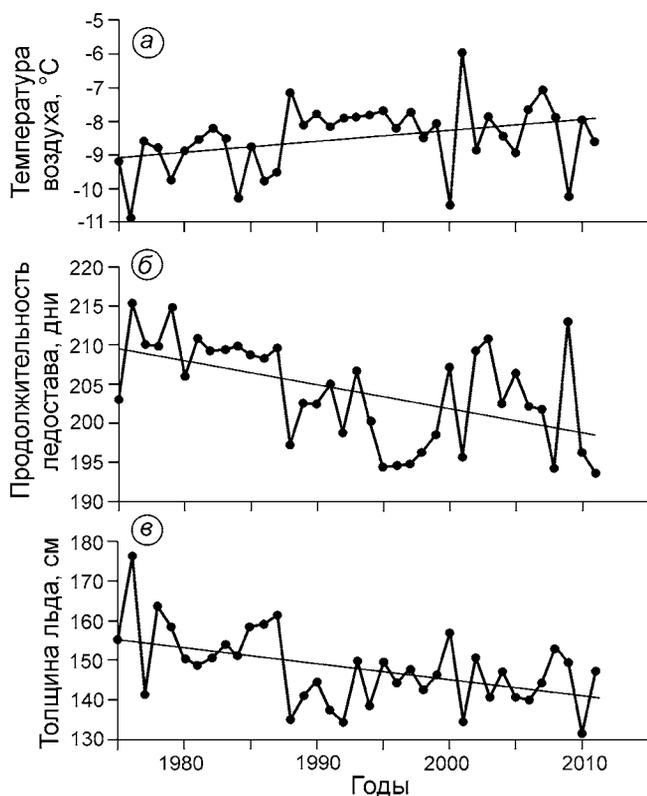
Средняя температура воздуха за октябрь–июнь с 1975 по 2012 г. несколько возрастает. Значительное увеличение (на 1,7–1,8 °С) отмечается в районе озёр Арахлей, Шакшинское и Большое Леприндо. Для озёр Гусиное и Сосновое рост за многолетний период составляет 0,88–1,1 °С, в районе расположения оз. Баунт – 0,67–0,87 °С. Распределение трендов по территории Забайкалья показано на рис. 2.

При анализе температуры воздуха в декабре установлено, что за многолетний период она снизилась по 46 ГМС. В январе температура воздуха возросла по 29 ГМС, а снизилась – по 18 ГМС. В феврале температура воздуха увеличилась на всех 47 ГМС. В среднем по Забайкалью с 1975 по 2012 г. температура воздуха за октябрь–июнь по-

высилась на 1,2 °С (рис. 3), данный тренд достоверен при 5%-м уровне значимости.

*Продолжительность ледостава* озёр Забайкалья изменяется от 165 дней в юго-западной части территории (оз. Гусиное) до 226 дней на северо-востоке (оз. Большое Леприндо). Ряды продолжительности ледостава достаточно согласованы между собой (табл. 1), средний коэффициент корреляции равен 0,44. Наименьшей согласованностью характеризуется изменение продолжительности ледостава озёр Арахлей и Большое Леприндо ( $R = 0,13$ ), наибольшей – озёр Шакшинское и Сосновое ( $R = 0,79$ ).

Максимальная *толщина льда* меняется по территории от 137 см (оз. Гусиное) до 166 см (оз. Баунт). При оценке изменения рядов мак-



**Рис. 3.** Изменение параметров за многолетний период по озёрам Забайкалья:

*a* – средней температуры воздуха за период октябрь–июнь; *b* – средней продолжительности ледостава; *v* – средней максимальной толщины льда; прямая – линия тренда

**Fig. 3.** Changes parameters over a long period of time along the lakes of the Transbaikal:

*a* – the average air temperature over the period October–June; *b* – the average duration of the freeze-up; *v* – the average maximum thickness of ice; straight line shows the trend

симальной толщины льда не выявлено выраженной согласованности: 93% коэффициентов корреляции не относятся к значимым. Согласованность проявилась только между рядами максимальной толщины льда озёр Шакшинское и Арахлей ( $R = 0,42$ ).

Для оценки влияния изменений климата на продолжительность ледостава и максимальную толщину льда озёр Забайкалья использовались данные о температуре воздуха по ГМС, расположенным либо на берегу озёр, либо в непосредственной близости от них: Беклемишево (для озёр Арахлей и Шакшинское), Большая Лепринда (оз. Большое Леприндо), Новоселенгинск (оз. Гусиное), Баунт (оз. Баунт), Сосново-Озерское (оз. Сосновое). Рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 2) между датами начала

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции между рядами изменения продолжительности ледостава за период с 1975 по 2012 г.

Озеро	Арахлей	Шакшинское	Леприндо	Гусиное	Баунт
Шакшинское	0,63				
Бол. Леприндо	0,13	0,38			
Гусиное	0,29	0,41	0,47		
Баунт	0,41	0,56	0,31	0,49	
Сосновое	0,50	0,79	0,32	0,31	0,59

ледостава и температурой воздуха в октябре  $R_1$ , а также между датами окончания ледостава и температурой воздуха в апреле (для оз. Большое Леприндо в мае)  $R_2$ . Все коэффициенты корреляции – значимые, следовательно, температура воздуха сильно влияет на продолжительность ледостава. После установления ледостава в октябре–ноябре на озёрах Забайкалья лёд начинает нарастать наиболее интенсивно. На конец ноября приходится 35% максимальной толщины льда. В последующие месяцы прирост льда происходит с последовательным затуханием интенсивности: в декабре – 23%, январе – 21%, феврале – 15%, марте – 6%. В среднем, по озёрам Забайкалья максимальных значений толщина льда достигает в марте, затем лёд начинает таять.

Основное влияние на формирование максимальной толщины льда оказала температура воздуха в феврале. Коэффициент корреляции между изменением максимальной толщины льда и изменением средней температуры воздуха в феврале по озёрам был равен: Шакшинское  $-0,28$ ; Большое Леприндо  $-0,47$ ; Сосновое  $-0,31$ ; Гусиное  $-0,28$ . По озёрам Арахлей и Баунт коэффициенты корреляции незначимы. При анализе изменения рядов суммы отрицательных температур на изменение максимальной толщины льда коэффициенты корреляции по озёрам составили: Шакшинское  $-0,30$ ; Большое Леприндо  $-0,52$ ; Сосновое  $-0,40$ , Гусиное  $-0,42$ . По озёрам Арахлей и Баунт коэффициенты корреляции равны  $-0,09$  и  $-0,08$  соответственно.

При оценке влияния температуры воздуха на месячный прирост толщины льда установлено, что основное значение имеет температура в марте и апреле. Коэффициент корреляции между изменением средней температуры воздуха в апреле и изменением прироста толщины льда в этом месяце равен по озёрам: Шакшинское  $-0,57$ ,

Таблица 2. Коэффициенты корреляции зависимости изменения дат начала и окончания ледостава от температуры воздуха за период с 1975 по 2012 г.\*

Озеро	$R_1$	$R_2$
Арахлей	0,74	-0,49
Шакшинское	0,56	-0,74
Бол. Леприндо	0,36	-0,62
Гусиное	0,49	-0,55
Баунт	0,76	-0,41
Сосновое	0,57	-0,39

\* $R_1$  – коэффициент корреляции между датами начала ледостава и температурой воздуха в октябре;  $R_2$  – коэффициент корреляции между датами окончания ледостава и температурой воздуха в апреле (для оз. Большое Леприндо – в мае).

Арахлей -0,30, Большое Леприндо -0,35, Баунт -0,28. По озёрам Сосновое и Гусиное коэффициенты корреляции незначимы. Коэффициент корреляции между изменением средней температуры воздуха в марте и приростом толщины льда за этот период составляет: по озёрам Шакшинское -0,41, Арахлей -0,36, Большое Леприндо -0,29, Баунт -0,63, Сосновое -0,72; по оз. Гусиное коэффициент корреляции незначимы.

Средние даты достижения максимальной толщины льда по озёрам следующие: Баунт – 6 апреля; Гусиное – 13 марта; Большое Леприндо и Шакшинское – 25 марта; Сосновое – 28 марта; Арахлей – 29 марта. Дата достижения максимальных значений толщины льда сместилась по озёрам следующим образом: Большое Леприндо – на 27 дней, Шакшинское – на 25 дней, Баунт – на 2 дня, Арахлей – на 1 день в сторону более позднего наступления; по оз. Гусиное – на 17 дней в сторону более раннего наступления, по оз. Сосновое смещения не произошло.

Анализ изменения *прироста толщины льда* по месяцам за многолетний период показал следующее: на озёрах Шакшинское и Сосновое прироста льда с декабря по апрель уменьшался, а на оз. Арахлей в феврале и марте, наоборот, увеличивался. По оз. Большое Леприндо в декабре, январе и феврале тренд положительный, в марте и апреле – отрицательный. По оз. Баунт отрицательные тренды отмечаются в феврале и апреле; по оз. Гусиное в декабре и январе тренд отрицательный, а в феврале и марте – положительный (табл. 3).

В рассматриваемые годы отмечается уменьшение *продолжительности ледостава* (табл. 4).

Таблица 3. Смещение дат (дни) нарастания толщины льда по месяцам за период с 1975 по 2012 г.

Озеро	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Шакшинское	-5	-26	-11	-13	-59
Арахлей	-13	-14	2	7	-14
Бол. Леприндо	14	8	2	-16	-16
Баунт	3	2	-13	8	-19
Сосновое	-1	-3	-14	-5	-35
Гусиное	-	-1	-7	12	16

Даты начала ледостава в среднем по озёрам Забайкалья сместились в сторону более позднего замерзания на четыре дня, даты окончания ледостава – в сторону более раннего разрушения на семь дней. Максимальным уменьшением продолжительности ледостава характеризуется оз. Большое Леприндо (22 дня), минимальным – оз. Гусиное (6 дней). Тренд по оз. Гусиному не достоверен при 5%-м уровне значимости, все остальные – достоверны. В среднем по озёрам Забайкалья за 38 лет продолжительность ледостава сократилась на 11 дней.

Большинство озёр характеризуется достоверными отрицательными трендами изменения максимальной толщины льда (см. табл. 4). Так, за многолетний период на оз. Шакшинское уменьшение составило 53 см, а на оз. Сосновое – 23 см. Положительный тренд отмечается лишь на оз. Гусиное: здесь за период с 1975 по 2012 г. максимальная толщина льда увеличилась на 22 см, причём этот тренд достоверен. В среднем по озёрам Забайкалья за 38 лет максимальная толщина льда уменьшается. Многолетние колебания средней температуры воздуха за октябрь–июнь и изменения продолжительности ледостава и максимальной толщины льда имеют разнонаправленные тенденции (см. рис. 3).

## Выводы

С 1975 по 2012 г. температура воздуха за октябрь–июнь возросла на 1,2 °С. Ледостав на озёрах Забайкалья происходил на четыре дня позже, а вскрывались озёра ото льда на семь дней раньше, т.е. продолжительность ледостава в среднем сократилась на 11 дней. Несколько уменьшилась и максимальная толщина льда. Эти тренды достоверны при 5%-м уровне значимости.

Таблица 4. Изменение продолжительности ледостава и максимальной толщины льда на озёрах Забайкалья за период с 1975 по 2012 г.

Озеро	Смещение дат начала ледостава в сторону более позднего замерзания, дни	Смещение дат окончания ледостава в сторону более раннего разрушения, дни	Средняя продолжительность ледостава, дни	Уменьшение продолжительности ледостава, дни (значимое/незначимое)	Максимальная толщина льда, см	Изменение максимальной толщины льда за 1975–2012 гг., см (значимое/незначимое)
Арахлей	4	6	201	10(знач.)	141	–20(знач.)
Шакшинское	3	7	209	10(знач.)	141	–53(знач.)
Бол. Леприндо	11	11	226	22(знач.)	159	–11(незнач.)
Гусиное	4	2	165	6(незнач.)	137	22(знач.)
Баунт	2	6	213	8(знач.)	166	–7(незнач.)
Сосновое	4	7	211	11(знач.)	143	–23(знач.)

Температура воздуха в октябре оказывает влияние на даты начала ледостава ( $0,36 \leq R \leq 0,76$ ), а в апреле–мае – на даты окончания ледостава ( $-0,39 \leq R \leq -0,74$ ). Формирование максимальной толщины льда обусловлено многолетним изменением температуры в феврале ( $-0,28 \leq R \leq -0,47$ ). Влияние температуры воз-

духа подтверждается также коэффициентами корреляции между изменением суммы отрицательных температур холодного периода и изменением рядов максимальной толщины льда ( $-0,30 \leq R \leq -0,52$ ). Значительно воздействует на таяние льда температура воздуха в марте ( $-0,28 \leq R \leq -0,57$ ) и апреле ( $-0,29 \leq R \leq -0,72$ ).

### Литература

1. Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingston D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuglinski V.S. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // *Science*. 2000. V. 289. P. 1743–1746.
2. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. Геология. География*. 2014. № 3. С. 32–45.
3. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера в условиях нестационарности регионального климата // *Изв. Русского геогр. об-ва*. 2011. Т. 143. № 3. С. 50–54.
4. Обязов В.А. Гидрологический режим озер Забайкалья в условиях меняющегося климата (на примере Ивано-Арахлейских озер) // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2011. № 3. С. 4–14.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: изд. Росгидромета, 2014. 1009 с.
6. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: изд. РГГМУ, 2007. 279 с.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 814 с.

### References

1. Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingston D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuglinski V.S. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science*. 2000, 289: 1743–1746.
2. Vuglinskiy V.S. Assessment of change in water bodies ice regime characteristics for different regions of the country in modern climate conditions. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. Herald of the Saint Petersburg University. Series 7. *Geology. Geography*. 2014, 3: 32–45. [In Russian].
3. Salo Yu.A., Nazarova L.E. Multiannual variability of the Onega lake ice regime in conditions of variability of regional climate. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Proc. of the Russian Geographical Society. 2011, 143 (3): 50–54. [In Russian].
4. Obyazov V.A. Hydrological regime of the Trans-Baikal lakes in the conditions of the changing climate (Ivano-Arakhleysky lakes as a study case). *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2011, 3: 4–14. [In Russian].
5. Vtoroy otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Second estimation report on climate changes and their consequences on the territory of Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2014: 1009 p. [In Russian].
6. Sikan A.V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2007: 279 p. [In Russian].
7. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. Applied mathematical statistics. Moscow: Fizmatlit, 2006. 814 p. [In Russian].