
**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 556.535.5

**ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕК ЗАБАЙКАЛЬЯ В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА**

© 2014 г. В. А. Обязов, В. К. Смахтин

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672014 Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 521

E-mail: obviaf@mail.ru

Поступила в редакцию 4.03.2013 г.

Представлены результаты исследований ледового режима рек Забайкалья и его зависимости от изменений климата. Определены величины изменений за многолетний период сроков начала и окончания ледостава, его продолжительности, максимальной толщины льда. Выявлены основные факторы, их определяющие. Выполнена оценка зависимости основных параметров ледового режима от температуры воздуха и величины речного стока.

Ключевые слова: ледовый режим, ледостав, толщина льда, температура воздуха, речной сток.

DOI: 10.7868/S0321059614030134

Повышение приземной температуры воздуха, происходящее в последние десятилетия как в глобальном масштабе, так и на территории Российской Федерации, оказывает влияние на многие природные процессы, в том числе и на гидрологический режим рек [7]. Поскольку наиболее чувствительный к потеплению его элемент — ледовый режим, то крайне важным становится выявление многолетних изменений продолжительности ледостава и толщины ледяного покрова. Эти исследования имеют также большое практическое значение, особенно в условиях Сибири. От изменений сроков начала и окончания ледостава, толщины льда зависит продолжительность действия автомаников, ледовых переправ, а также навигации на реках.

Немногочисленные исследования, проведенные в некоторых регионах России, указывают на изменения ледового режима рек. Так, например, на р. Северная Двина и ее притоке р. Сухоне отмечено уменьшение продолжительности ледостава, хотя на большинстве рек этого бассейна существенных изменений сроков начала и окончания ледовых явлений не произошло [1]. Кроме того, на Северной Двине отмечается уменьшение толщины ледяного покрова, как и на реках Алдан и Ловать [2]. По оценке [7], на сибирских реках к 2039 г. ожидается сокращение периода ледостава на 20–27 сут и уменьшение максимальной толщины льда на 20–40%.

Ледовый режим рек зависит от изменений теплового баланса, важную роль в котором играет теплообмен с атмосферой. В связи с этим в настоящей работе поставлена задача оценки многолетних изменений ледового режима рек и их зависимости от изменений температуры воздуха. Однако различные объемы воды по-разному реагируют на изменения теплового баланса. Чем больше объемы речного стока, тем больше тепловая инерция, и наоборот. Соответственно, изменения стока будут влиять на сроки установления и разрушения ледостава, на его продолжительность, толщину льда, что потребовалось учесть в данном исследовании.

В качестве объекта исследования выбраны реки Забайкалья, на большинстве из них более полугода отмечаются ледовые явления. Реки Забайкалья относятся к трем бассейнам. Бассейн Амура занимает преимущественно юго-восточную, бассейн Лены — северо-восточную, бассейн Енисея — западную часть Забайкалья (рис. 1).

В исследовании использовались данные 67 гидрологических постов и 48 метеорологических станций государственной наблюдательной сети Росгидромета за период с 1958/1959 по 2007/2008 гг. С целью выявления многолетних тенденций изменений гидрологических и климатических параметров применялся метод наименьших квадратов. Согласованность изменений исследуемых характеристик оценивалась с помощью корреля-

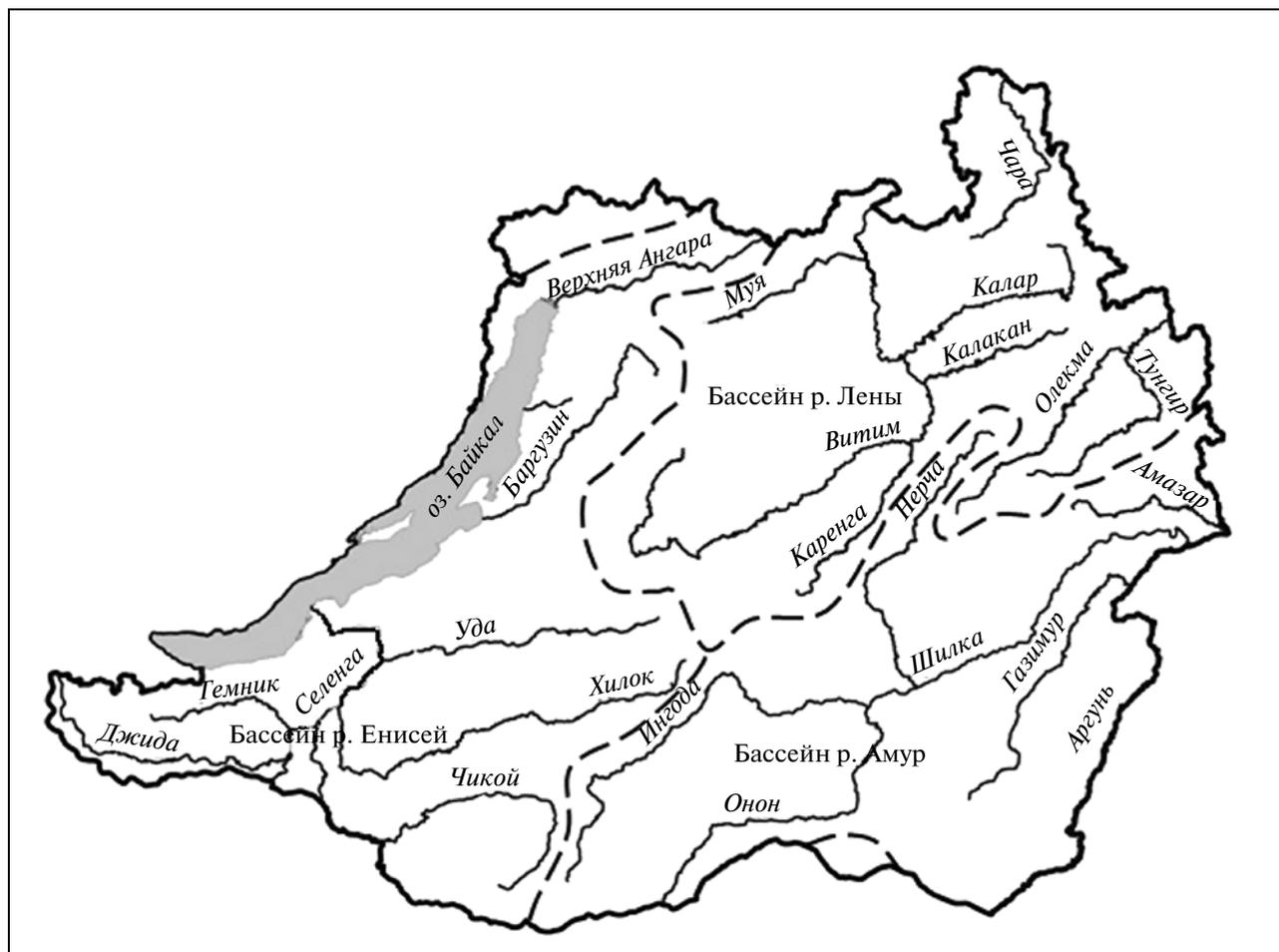


Рис. 1. Карта-схема бассейнов рек территории Забайкалья (по [6]).

ционного анализа. Оценка значимости трендов и коэффициентов корреляции выполнялась с использованием t -статистики Стьюдента.

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Практически на всей территории Забайкалья средняя многолетняя температура воздуха отрицательная. Наименьших значений (ниже -6°C) она достигает в северо-восточных районах (бассейны рек Витим и Чары). Южнее и западнее их температура повышается. В восточной части Забайкалья изотермы располагаются квазиширотно, в западной — в результате влияния оз. Байкал их направление меняется на меридиональное, в южной — широтная зональность нарушается за счет влияния орографии. Наиболее теплые районы — бассейны рек Онон и Селенги, где средняя годовая температура составляет от 0 до 0.7°C . Среднее многолетнее ее значение в холодный пе-

риод года (октябрь—апрель) изменяется по территории от -8.5 до -22.4°C .

Температура воздуха в Забайкалье с середины XX в. повышается [4], при этом увеличивается продолжительность теплого периода [5]. За 50-летний период температура воздуха в холодную часть года увеличилась по территории в среднем на 1.8°C (рис. 2). В ее изменениях отмечается неравномерность. С 1958/1959 по 1987/1988 гг. колебания температуры происходили в диапазоне от -13 до -18°C при среднем значении -14.9°C и практически полном отсутствии тренда. Затем произошло резкое ее повышение, и следующее десятилетие характеризовалось высоким фоном температур. Их значения не опускались ниже -14°C , а среднее за период значение составило -13.2°C . При этом изменчивость температуры воздуха в этом временном отрезке уменьшилась относительно предыдущего 30-летнего периода в два раза. В последующий 10-летний период (1998/1999—

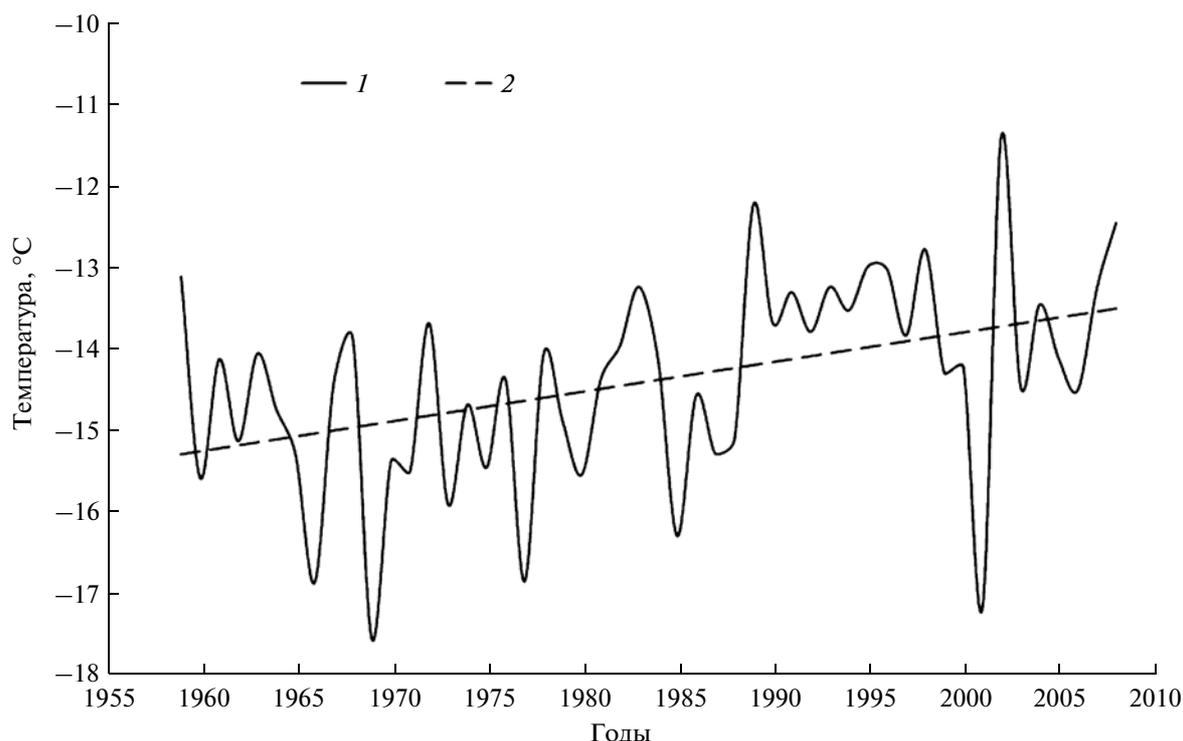


Рис. 2. Многолетние изменения осредненной по Забайкалью средней температуры воздуха холодного периода (октябрь–апрель). 1 – исходный ряд; 2 – линейный тренд.

2007/2008 гг.) средняя температура понизилась до -13.9°C при существенном увеличении межгодовой изменчивости: в этот период входят как самый теплый (2001/2002 гг.) год, так и один из самых холодных (2000/2001 гг.). Несмотря на некоторое снижение, фон температур остается достаточно высоким. За исключением зимнего сезона 2000/2001 гг., средняя температура воздуха холодного периода не понижалась ниже -14.5°C .

В холодный период года наибольшим увеличением температуры воздуха отличается февраль. На $1.4\text{--}1.7^{\circ}\text{C}/(50\text{ лет})$ меньшие величины трендов – в марте, апреле и ноябре. Наименьшее увеличение температуры воздуха приходится на декабрь, октябрь и январь. Тренды в эти месяцы статистически недостоверны (таблица).

Изменения февральской температуры в большой степени определяют характер колебаний температуры в холодный период. Коэффициент корреляции между рядами средних месячных температур в феврале и рядами средних температур в октябре–апреле превысил 0.7. Однако некоторое понижение температур в холодный период обусловлено не только февральскими температурами, но и их тенденциями в другие месяцы.

Анализ пространственного распределения трендов средних за холодный период температур воздуха показывает, что наибольшие его значения, превышающие $2.5^{\circ}\text{C}/(50\text{ лет})$, характерны для северо-восточных районов Забайкалья, преимущественно в правобережной части бассейна р. Витим. Наименьшие величины трендов

Оценки линейного тренда осредненных по Забайкалью средних месячных температур воздуха с 1958/1959 по 2007/2008 гг.

| Месяц | Величина тренда, $^{\circ}\text{C}/(50\text{ лет})$ | Оценка достоверности тренда при 5%-м уровне значимости |
|---------|---|--|
| Октябрь | 1.2 | Недостоверен |
| Ноябрь | 1.9 | Достоверен |
| Декабрь | 0.8 | Недостоверен |
| Январь | 1.0 | Недостоверен |
| Февраль | 3.6 | Достоверен |
| Март | 2.2 | Достоверен |
| Апрель | 2.1 | Достоверен |

($\leq 1.5^\circ\text{C}/(50 \text{ лет})$) приходится на южные районы Восточного Забайкалья. Подобное распределение трендов с некоторыми локальными изменениями проявляется во все месяцы холодного периода года.

ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЛЕДОСТАВА, ДАТ ЕГО НАЧАЛА И ОКОНЧАНИЯ

Ледостав на реках Забайкалья устанавливается в октябре–ноябре. В начале второй декады октября, как правило, льдом покрываются реки бассейна р. Лены (средняя дата – 22 октября). На некоторых из них в отдельные годы это происходит уже в первой пятидневке октября. К концу октября ледостав устанавливается на реках Амурского бассейна (средняя дата – 30 октября). Позже других покрываются льдом реки бассейна р. Енисея (средняя дата – 3 ноября). Такое распределение в большей степени обусловлено пространственными изменениями температуры воздуха в осенние месяцы. Однако на сроки замерзания существенное влияние оказывают также размеры рек. На больших реках ледовый покров устанавливается значительно позднее, чем на малых, даже если створы расположены в непосредственной близости друг от друга. Например, на р. Шилке, имеющей площадь водосбора 200000 км², ледяной покров в среднем устанавливается на 16 дней позже, чем на ее притоке р. Верхняя Луббья, площадь водосбора которой составляет 226 км². Аналогичная ситуация отмечается в створах р. Онон–с. Бытэв и р. Учирка–с. Бытэв, где площади водосборов различаются в сто раз, а даты – на 15 дней.

Вскрытие большинства рек происходит в апреле. В мае вскрываются, как правило, реки Ленского бассейна. В отдельные годы окончание ледостава на некоторых из них отмечается в июне. В среднем ледяной покров разрушается в бассейне Амура 25 апреля, в бассейне Енисея – 29 апреля и в бассейне Лены – 8 мая. Распределение дат вскрытия рек по территории Забайкалья в общем согласуется с пространственным распределением температуры воздуха в весенние месяцы. Но, в отличие от сроков установления ледостава, сроки его разрушения не зависят от размеров рек.

Продолжительность ледостава на реках Забайкалья за многолетний период изменяется в широких пределах: от 125–135 до 220–230 дней. Даже в одном створе она варьирует от года к году в пределах 30–60 дней. Ее распределение по территории в целом соответствует пространственному распределению средней температуры в холодный период: наибольшая продолжительность отмечает-

ся на северо-востоке региона, в направлениях на юг и на запад она уменьшается, достигая наименьших значений в юго-западной его части (нижнее течение р. Селенги, южные притоки оз. Байкал). Средняя продолжительность ледостава на реках бассейна Енисея составляет 171, бассейна Амура – 180, бассейна Лены – 202 дня. Наибольшая средняя многолетняя продолжительность ледостава отмечается на р. Чаре у с. Чара (208 дней), а наименьшая – в створе р. Мысовка–г. Бабушкин (149 дней).

Даты начала и окончания ледостава на реках Забайкалья, а также его продолжительность за исследуемый период изменились.

В среднем по территории даты начала ледостава сдвинулись на 5 дней позднее. На разных реках эти изменения существенно различаются как по величине, так и по знаку. В 77% створов ледостав стал устанавливаться позднее на 1–19 дней, смещение его начала на более ранние даты произошло в 15% створов и составило от 1 до 8 дней. В 8% створов даты не изменились. Почти в половине случаев (48%) тренды недостоверны при 5%-м уровне значимости.

При анализе зависимости смещений дат начала ледостава от изменений температуры воздуха и стока были использованы данные за октябрь, когда большинство рек покрывается льдом. Анализ показал, что изменение дат замерзания рек несколько сильнее зависит от температуры воздуха, чем от стока. Коэффициент корреляции между датами и температурами ($R_{D,t}$) превысил значение 0.5 в 46% створов, а между датами и стоком ($R_{D,Q}$) – в 43% створов. При этом $R_{D,t}$ оказался недостоверным при 5%-м уровне значимости в трех створах, $R_{D,Q}$ – в 11 створах. Совместное влияние обоих факторов несколько больше и оценивается множественными коэффициентами корреляции ($R_{D,t,Q}$), значения которых – в среднем на 0.05 больше, чем парных коэффициентов корреляции. Причем в большинстве створов, где отмечается смещение дат на более поздние сроки, преобладает влияние температуры воздуха, а в створах, где ледостав стал устанавливаться раньше, – величины стока.

Зависимость изменений средних по территории Забайкалья дат начала ледостава от осредненных соответствующим образом значений температуры воздуха и стока воды характеризуется достаточно высокими коэффициентами корреляции: $R_{D,t} = 0.80$ и $R_{D,Q} = 0.68$ при $R_{D,t,Q} = 0.90$. Следовательно, изменение температуры воздуха в большей степени повлияло на изменение дат установления

ледостава при значимом влиянии на них изменений величины стока.

Дата окончания ледостава в среднем по Забайкалью сдвинулась на более ранний срок на 3 дня. При этом в 75% створах ледостав стал заканчиваться раньше на 1–14 дней. Не изменились даты в 4% створов. Смещение дат на более поздние сроки на 1–10 дней произошло в 21% створов. Лишь в 30% створов тренды достоверны при 5%-м уровне значимости.

При анализе влияния на даты вскрытия рек температуры воздуха и стока использовались данные за апрель, когда на большинстве рек разрушается ледяной покров. Изменение дат окончания ледостава в большей степени зависит от температуры воздуха, чем от величины стока. $R_{D,t}$ в 24% створов превышает 0.70 и в 68% – 0.50, в то время как $R_{D,Q}$ только соответственно в 3 и 52% створов превосходит эти значения. Кроме того, в 19% створов $R_{D,Q}$ недостоверен при 5%-м уровне значимости, а $R_{D,t}$ недостоверен только в 6% створов.

Преобладающее влияние температуры воздуха выявляется и при рассмотрении пространственно осредненных ежегодных значений исследуемых параметров. Зависимость изменений дат конца ледостава от колебаний температуры воздуха оценивается коэффициентом $R_{D,t} = -0.89$, а от колебаний стока – $R_{D,Q} = -0.61$.

Изменения дат начала и окончания ледостава, соответственно, привели к изменениям его продолжительности. Она уменьшилась в подавляющем количестве створов (85%), в 58% которых уменьшение составляет от 1 до 9 дней, а в двух створах (4%) – более 20 дней. В 9% створов ледостав, наоборот, стал более продолжительным, причем в одном створе увеличение превысило 10 дней. Не изменилась продолжительность ледостава в 6% створов. Выявленные тренды достоверны при 5%-м уровне значимости только в 55% створов.

На большинстве рек (61%) продолжительность ледостава уменьшилась за счет как более позднего его установления, так и более раннего вскрытия. В 15% створов на более поздние сроки сместились как начало, так и окончание ледостава. При этом продолжительность ледостава уменьшилась, за исключением двух створов. В шести створах (9%) обе даты сместились на более ранние сроки, что в трех створах привело к уменьшению продолжительности ледостава, в одном – к увеличению, а в двух – она не изменилась. Продолжительность увеличилась в основном за счет более раннего установления и более позднего разрушения ледяного покрова (5% створов). Другие

варианты соотношения изменений дат начала и окончания ледостава приходятся на 10% створов.

Изменение территориально осредненных показателей продолжительности ледостава за полувековой период составило 8 дней. Оценка их зависимости от температуры воздуха показала, что связь эта существенна. Наибольшая корреляция продолжительности ледостава отмечается со средней температурой воздуха за период октябрь–апрель и выражается коэффициентом корреляции, равным -0.65 . Многолетние их изменения, аппроксимированные полиномом третьей степени, имеют противоположные тенденции (рис. 3). Высокую степень зависимости продолжительности ледостава от температуры воздуха подтверждает наблюдающаяся “зеркальность” их графического изображения.

По оценкам Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, в первой четверти XXI в. температура воздуха зимой на территории Забайкалья повысится на $1.0–1.5^{\circ}\text{C}$ [3]. В этот же период ожидается повышение водности рек, обусловленное цикличностью речного стока [6]. Оба эти фактора будут способствовать дальнейшему смещению дат установления ледостава на более поздние сроки, а его разрушения – на более ранние, что, соответственно, приведет к уменьшению продолжительности ледостава.

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Для оценки многолетних изменений толщины льда не представилось возможности использовать данные по всем 67 створам в связи промерзанием большинства рек до дна. Наибольшее число непромерзающих рек относится к бассейну Енисея. В Амурском бассейне не перемерзают только самые крупные реки – Шилка, Ингода и Онон, а в бассейне Лены – только р. Чара. На отдельных реках образуется многослойный ледяной покров значительной мощности, обусловленный наледями. Ряды таких рек из анализа исключались ввиду их нерепрезентативности, в результате исследование изменений толщины льда выполнено по 23 створам.

Максимальная толщина льда на реках Забайкалья (как правило, в марте) составляет в среднем за многолетний период от 70 до 150 см. Ее значения, не превышающие 100 см, характерны для рек бассейна Енисея, впадающих в оз. Байкал. На некоторых реках, например на Чаре, толщина льда превышает 200 см, в отдельные годы – 302–389 см. Но, как уже указывалось, подобные величины

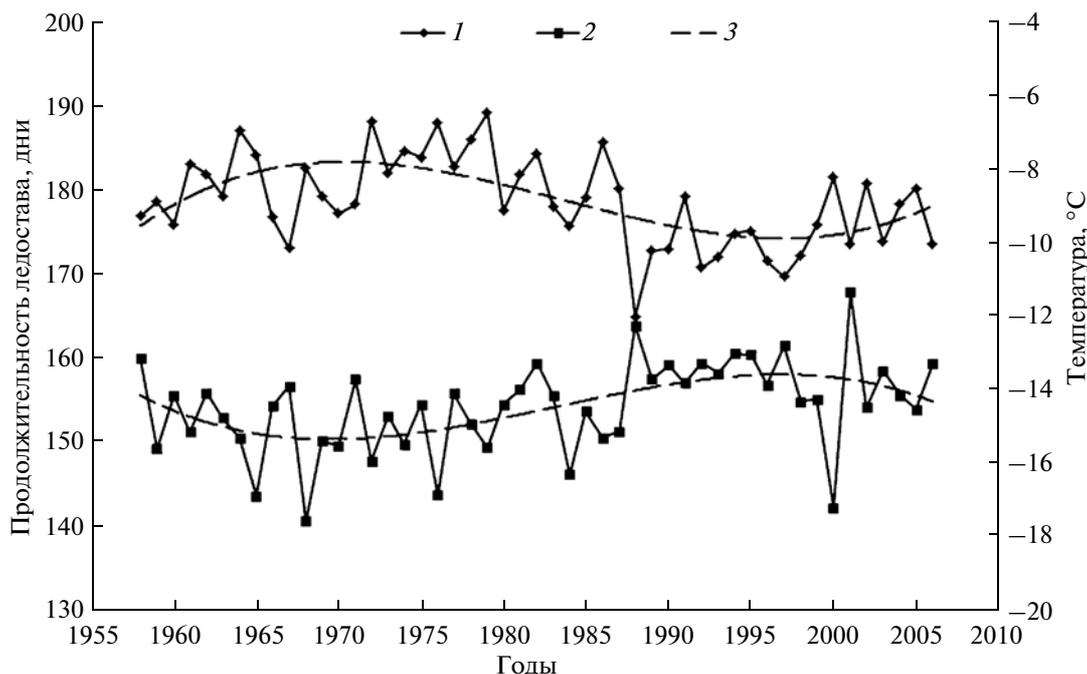


Рис. 3. Многолетние изменения осредненных по территории Забайкалья продолжительности ледостава (1), температуры воздуха за октябрь–апрель (2) и их полиномиальные тренды (3).

обусловлены наледями, и ряды таких рек в дальнейшем не анализировались.

На большинстве рек наибольшая из максимальных толщин льда за анализируемый период достигала 100–200 см, а в двух створах она превысила 200 см. Наименьшая из максимальных толщин льда в подавляющем числе створов – в пределах 40–100 см.

Толщина ледяного покрова значительно меняется не только по территории, но и от года к году. Более чем на одной трети створов амплитуда ее межгодовых изменений превышает 100 см. Почти в половине створов она находится в пределах от 50 до 100 см.

За 50-летний период максимальная толщина льда на большинстве рек уменьшилась. В четверти створов ее уменьшение составило более 30 см. Еще в четверти створов оно оценивается в пределах от 10 до 30 см. Изменения от 0 до –10 см/(50 лет) отмечены в 44% створов. В одном створе зафиксировано увеличение толщины льда на 4 см. Относительные изменения толщины льда – в пределах от 4 до 32%. Все тренды, по модулю составившие менее 10 см за 50 лет, недостоверны при 5%-м уровне значимости.

Изменение толщины льда на большинстве рек согласуется с изменениями температуры воздуха. Наибольшая согласованность характерна для из-

менений максимальной толщины льда и средней температуры за период октябрь–март. При этом в 78% створов коэффициенты корреляции достоверны при 5%-м уровне значимости. Из средних месячных температур наибольшее влияние на максимальную толщину льда оказывает температура февраля. В 56% створов значение коэффициента корреляции, оценивающего эту связь, больше, чем в другие месяцы. Меньше, чем в другие месяцы, коэффициент корреляции, характеризующий зависимость толщины льда от температуры в марте, несмотря на то, что, как правило, в этом месяце толщина льда достигает максимальных значений. Указанная закономерность обусловлена, вероятно, термической инерцией.

Согласованность пространственно осредненных межгодовых изменений температуры воздуха и максимальной толщины льда характеризуется коэффициентом корреляции, равным –0.76. Существенная обратная зависимость толщины льда от температуры воздуха подтверждается противоположными тенденциями их многолетних изменений (рис. 4).

Повышение температуры воздуха повлияло не только на изменения максимальной толщины льда. Анализ ее декадных значений за два периода: 1958/59–1987/88 и 1988/89–2006/07 гг., отличающихся по температуре воздуха (рис. 2), показал, что практически во всех исследованных ство-

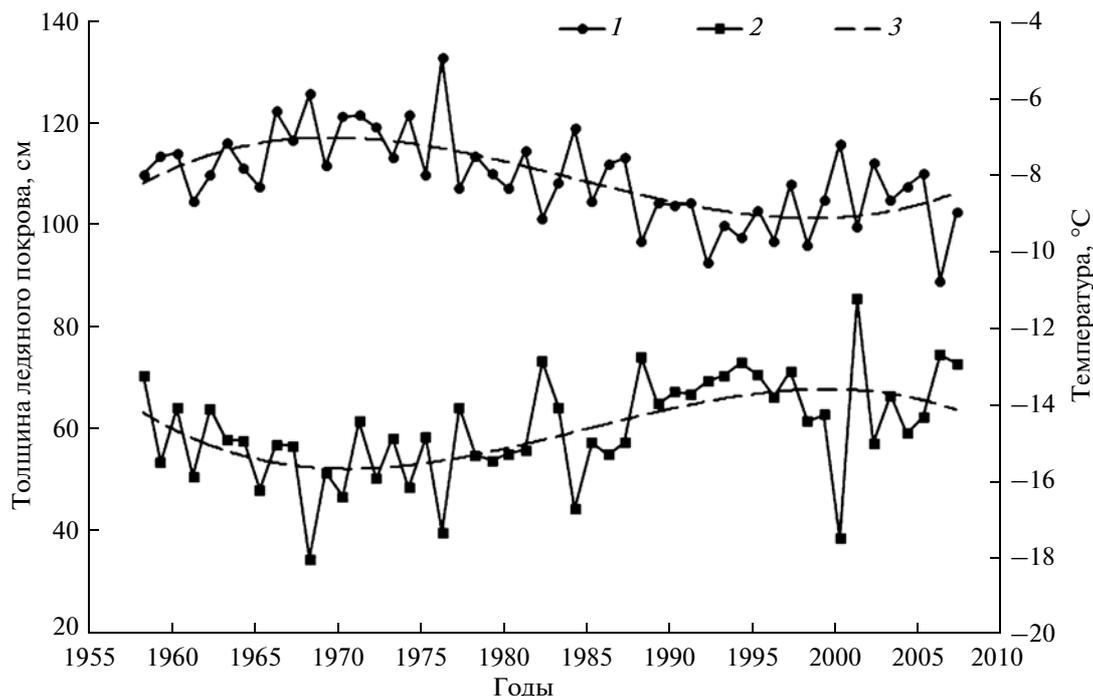


Рис. 4. Многолетние изменения осредненных по территории Забайкалья толщины ледяного покрова (1), температуры воздуха за октябрь–апрель (2) и их полиномиальные тренды (3).

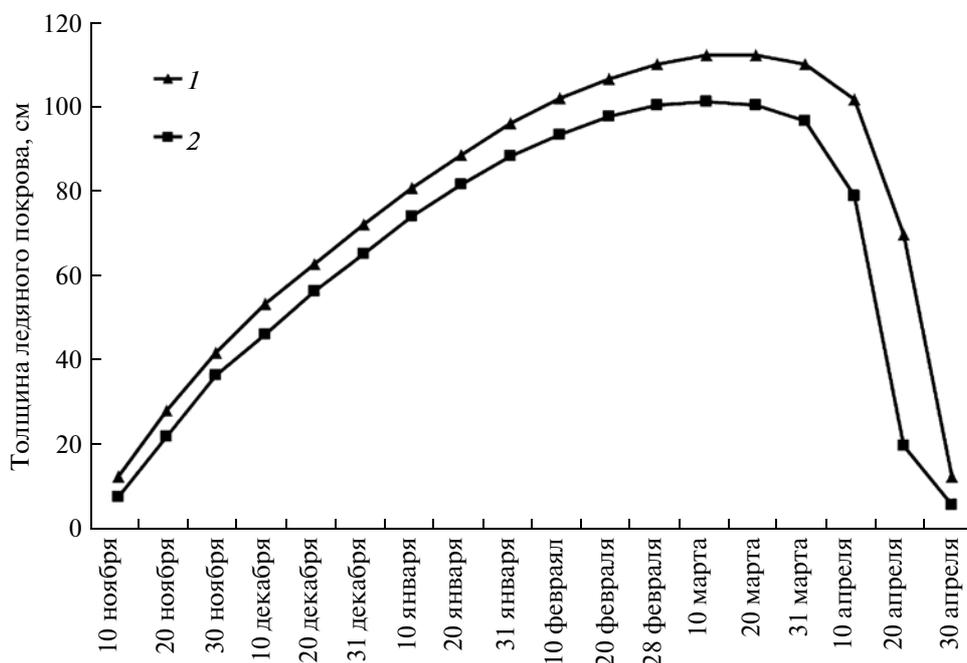


Рис. 5. Декадные изменения толщины ледяного покрова, осредненные по территории Забайкалья за периоды 1958/1959 – 1987/1988 гг. (1) и 1988/1989 – 2006/2007 гг. (2).

рах толщина льда стала меньше за весь период ледостава. Данный вывод подтверждается и при анализе совмещенных графиков внутригодовых изменений осредненных по створам значений

толщины льда (рис. 5). Кроме толщины льда, изменились и даты наступления ее максимальных значений. В среднем по Забайкалью даты сместились на более ранние сроки на одну декаду.

Исследование показало, что влияние величины стока на максимальную толщину льда существенно меньше, чем температуры воздуха. Наибольшая зависимость максимальной толщины от величины речного стока отмечается в марте. В 50% створов значения коэффициентов корреляции, характеризующих эту связь, статистически достоверны при 5%-м уровне значимости. Коэффициент корреляции между рядами пространственно осредненных их значений составил -0.68 .

Учитывая, что рост температуры воздуха в ближайшие годы продолжится [3], следует ожидать уменьшения толщины ледяного покрова на большинстве рек Забайкалья.

ВЫВОДЫ

На территории Забайкалья в период с 1958/1959 по 2007/2008 гг. в холодный период года (октябрь–апрель) произошло повышение температуры воздуха в среднем на 1.8°C , однако ее тренды в декабре, октябре и январе статистически недостоверны. Наибольшее увеличение характерно для февраля, которое составило $3.6^{\circ}\text{C}/(50 \text{ лет})$.

Продолжительность ледостава в среднем по Забайкалью за полувековой период уменьшилась на 8 дней. На большинстве рек ее уменьшение произошло за счет как более позднего установления, так и более раннего разрушения ледяного покрова. Изменения сроков начала и окончания ледостава обусловлены, в основном, повышением температуры воздуха и в несколько меньшей степени колебаниями речного стока. В связи с предполагаемым повышением температуры воз-

духа в зимний период и увеличением водности рек до конца первой четверти XXI в. ожидается уменьшение продолжительности ледостава.

Повышение температуры воздуха в зимний период привело к уменьшению толщины льда на большинстве рек Забайкалья на 4–32%. Учитывая прогнозируемый рост температуры воздуха, следует ожидать дальнейшего уменьшения максимальной толщины льда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 2. С. 141–149.
2. Гуревич Е.В. Влияние ледяного покрова на взаимодействие поверхностных и подземных вод. Автореф. ... дис. канд. геогр. наук. СПб.: ГГИ, 2010. 20 с.
3. Меццарская А.В., Обязов В.А., Богданова Э.Г. и др. Изменение климата Забайкалья во второй половине XX века по данным наблюдений и ожидаемые его изменения в первой четверти XXI века // Тр. ГГО. 2009. Вып. 559. С. 32–57.
4. Обязов В.А. Изменения климата в Забайкалье // Матер. XIII науч. совещ. географов Сибири и Дальнего Востока. Иркутск: ИГ СО РАН, 2007. Т. 2. С. 97–98.
5. Обязов В.А. Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 34–39.
6. Обязов В.А., Смахтин В.К. Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз // Вод. хозяйство России. 2012. № 1. С. 63–72.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: НИЦ Планета, 2008. Т. 1. 228 с.; Т. 2. 289 с.