

Расчётная толщина льда на реках севера азиатской части России

Агафонова С. А.¹, кандидат геогр. наук

(Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова),

Банщикова Л. С.², кандидат геогр. наук (Государственный гидрологический институт)

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость максимальных годовых значений толщины льда на реках, расположенных севернее 60° с.ш. в азиатской части России. Получены значения 1 % обеспеченности, проведена оценка возможности использования традиционной методики расчёта толщины льда для неизученных рек в современных климатических условиях.

Ключевые слова: ледовый режим рек, ледяной покров, толщина льда, изменение климата.

The calculated ice thickness on rivers the north of the asian part of Russia

Agafonova S. A.¹, Ph. D. in Geography (Lomonosov Moscow State University),

Banshchikova L. S.², Ph. D. in Geography (State Hydrological Institute)

In this paper, the spatial and temporal variability of the maximum annual values of ice thickness on the rivers located north of 60° N in the Asian part of Russia is considered. The values of 1 % security were obtained, the possibility of using the traditional method of calculating the thickness of ice for unexplored rivers in modern climatic conditions was assessed.

Keywords: river ice, ice cover, ice thickness, climate change.

В суровых климатических условиях ледовые явления на реках наблюдаются большую часть года. Особенности ледового режима требуют учёта при проектировании, строительстве и эксплуатации различных гидротехнических сооружений, при планировании сроков судоходства и зимнего отстоя судов на реках. Ледовыми явлениями (заторами и зажорами) обусловлены повышенные ущербы при наводнениях. Лёд используется в качестве строительного материала для возведения временных сооружений, ледяной покров рек и озёр служит основой для ледовых переправ и зимников.

Важнейшей характеристикой периода ледостава на реках является толщина льда. В ледотехнических задачах значения толщины льда учитываются в расчётах ледовых нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения, оценках несущей способности ледяного покрова при проектировании ледовых переправ. Толщина ледяного покрова к концу ледостава определяет характер вскрытия рек, условия прохождения весеннего ледохода и образования заторов льда [1 – 3].

В данной работе рассматриваются максимальные годовые значения толщины льда на реках. Проанализирована пространственная изменчивость этой величины, получены значения 1 % обеспечен-

ности, проведена оценка возможности использования методики расчёта толщины льда для неизученных рек.

Исследуемая территория ограничена с юга параллелью 60° с.ш. и включает азиатскую часть Арктической зоны России и сопредельные регионы (рис. 1). Климат характеризуется суровой продолжительной зимой и коротким прохладным летом. Сток воды формируется преимущественно в период таяния снежного покрова с добавлением у ряда рек талых вод высокогорных снежников, ледников и наледей. Зимняя межень устойчива, её сток достигает значительных величин у рек Карского моря и снижается до очень малых величин на водосборах моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей вследствие суровых природных условий. Для рек с площадью водосбора менее 1000 км² продолжительность бессточного периода составляет более 200 сут [4, 5].

Ледовый режим рек севера азиатской части России характеризуется устойчивым продолжительным ледоставом. Исключения составляют порожистые участки и истоки из крупных озёр, ледостав также не наблюдается на участках сброса промышленных сточных вод, ниже плотин ГЭС. Для отдельных участков рек (Омолон, Большой Анюй, Малый Анюй и др.), приуроченных к участкам накопления аллювия, в зимний период сохраняются полыньи протяженностью в несколько десятков, а

¹ sv_ice@list.ru

² gu_ggi@mail.ru

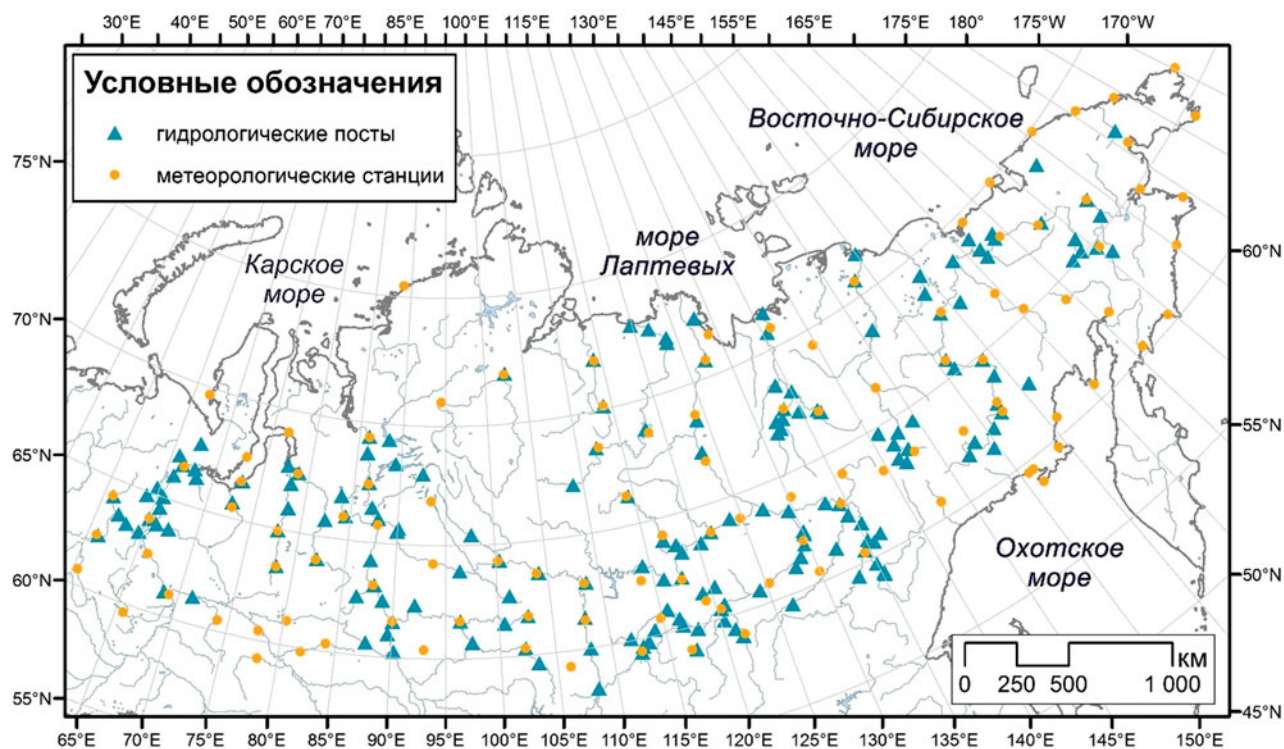


Рис. 1. Исследуемая территория

иногда и сотен километров [6]. Средняя продолжительность ледостава на реках исследуемой территории — от 170 сут на Средней Оби до 250 сут на севере Средней и Восточной Сибири [7].

Ледяной покров на реках исследуемой территории нарастает преимущественно в течение всего ледоставного периода и часто достигает максимальных годовых значений в последний месяц перед началом весеннего ледохода. Интенсивность нарастания льда к концу ледостава снижается. Например, в бассейне Лены в среднем к концу ноября толщина льда достигает 25 % от максимальных годовых значений, а к концу декабря — 50 % и более [8].

Условия формирования толщины льда меняются по территории. Для районов с относительно высокими суммами твёрдых осадков возможно образование снежного льда (например, реки Западной Сибири). Для средних и малых рек важную роль играют промерзание отдельных участков, снижение скоростей течения, выход воды на лёд и образование речных наледей. Для больших рек заметная локальная неоднородность толщины льда может быть обусловлена ветровым перераспределением снега на льду (выдуванием его с поверхности ледяного покрова). Для Восточной Сибири и северо-востока территории на реках с особыми гидрогеологическими условиями нередко отмечаются пониженные значения толщины льда [8 – 11].

Современные климатические изменения наблюдаются и для исследуемой территории. Причём потепление в приземной атмосфере в Арктике выра-

жено гораздо сильнее, чем в среднем по земному шару. В регионе растёт повторяемость зимних оттепелей, раннего схода снега, выпадение жидких и смешанных осадков в период залегания снежного покрова. Это явление получило название “арктическое усиление” [12].

Ледовые характеристики рек меняются вслед за изменениями климатических условий и водного режима. Для незарегулированных участков рек сокращение продолжительности ледостава происходит преимущественно за счёт смещения сроков вскрытия рек в сторону более ранних. Статистически значимые изменения сроков вскрытия отмечаются на реках Обь, Надым, Пур, Таз, Енисей, Лена, Яна и Колыма в нижнем течении. После 1990 г. сокращение продолжительности ледостава для рек Западной Сибири составляет 8 – 10 сут, для остальной территории — 3 – 5 сут [13]. Изменения ледового режима рек исследуемого региона связаны также с антропогенной деятельностью, прежде всего с влиянием ГЭС (Красноярской ГЭС на р. Енисей, каскада Вилюйских ГЭС на р. Вилюй, каскада Колымских ГЭС на р. Колыма).

Материалы и методы. В работе использовались данные о максимальной за год толщине льда на 165 гидрологических постах и данные о температуре воздуха, осадках и высоте снежного покрова на 74 метеостанциях сети Росгидромета за период с 1951 по 2019 г. (рис. 1). Для анализа выбирались действующие посты на средних и больших реках, с площадью водосбора более 5000 км². Посты нерав-

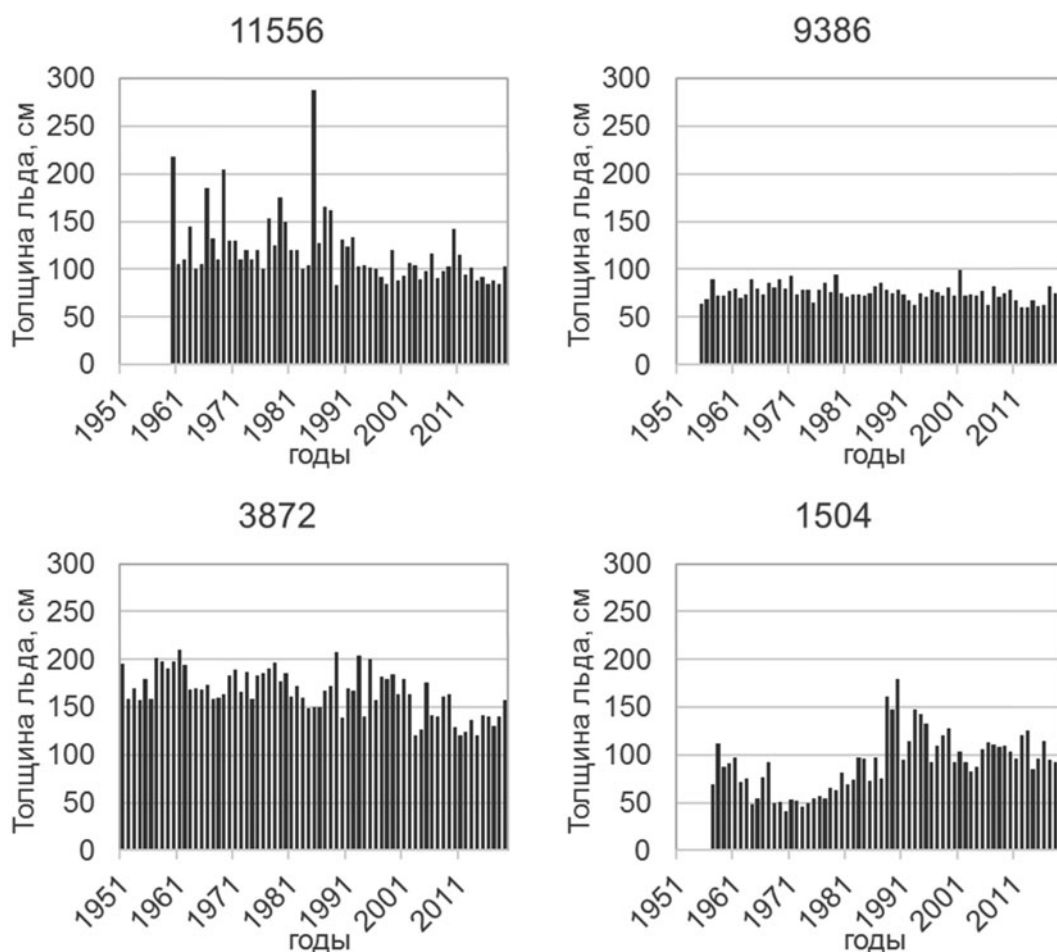


Рис. 2. Хронологический ход максимальной годовой толщины льда: 11556 – р. Сосья – пгт Харп, 9386 – р. Подкаменная Тунгуска – пос. Чемдальск, 3872 – р. Индигирка – п. Чокурдах, 1504 – р. Майн – с. Ваеги

номерно распределены по территории. Действующие посты практически отсутствуют на севере Средней Сибири. Кроме того, данные постов на северо-востоке территории содержат большое число пропусков наблюдений, которые не подлежат восстановлению. Часть постов здесь законсервирована, часть переведена в сезонные с наблюдениями только с мая по октябрь.

На сети гидрологических постов программа наблюдений за ледовыми условиями на реках включает ежедневные визуальные наблюдения за ледовой обстановкой, а также измерения толщины льда, шуги и высоты снега на льду 10, 20 числа и в последний день месяца, по указанию гидрологической станции — каждые 5 дней. Согласно [14] толщина льда измеряется у берега и на середине реки, место измерения выбирается таким образом, чтобы полученные данные соответствовали толщине льда на большом протяжении реки. Источником метеорологической информации послужила база данных АИСОРИ (Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации), размещенная на платформе ВНИИГ-МЦД [15].

В работе использовались статистические методы анализа данных с проверкой рядов на соответ-

ствие статистическим гипотезам (при уровне значимости $\alpha = 5\%$) с помощью критериев Диксона, Смирнова — Грабса, Фишера (F-test) и Стьюдента (t-test). Значения максимальной толщины льда 1% обеспеченности были определены по сглаженным эмпирическим кривым. Также для постов, для которых ближайшая метеостанция расположена на расстоянии менее 50 км, рассчитаны средние значения толщины льда и 1% обеспеченности как для неизученных рек по методике, изложенной в [16].

Результаты. Максимальные годовые значения толщины льда меняются в широких пределах по территории и год от года (рис. 2). На юге исследуемой территории (реки Северная Сосьва, верховья Подкаменной и Нижней Тунгуски) средние значения максимальной толщины льда не превышают 75 см, для большей части севера Западной Сибири, р. Енисей, рек Средней и Восточной Сибири южнее 65° с.ш., а также северо-востока территории — не более 1,0–1,5 м. Средние значения более 1,5 м характерны для Нижней Лены, рек бассейна Яна и Индигирка.

Для Западной и Средней Сибири в пределах исследуемой территории толщина льда к концу ледостава превышает 1,5 м менее чем в 25% случаев,

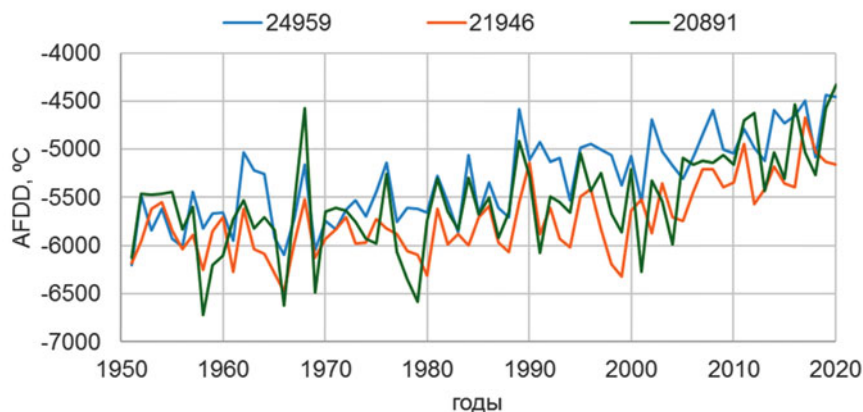


Рис. 3. Сумма отрицательных температур воздуха (AFDD): 24959 – г. Якутск, 21946 – п. Чокурдах, 20891 – с. Хатанга

для низовий Лены, Индигирки и в бассейне Яны — в более половины случаев [11].

Как уже было отмечено, нарастание ледяного покрова — это совокупность нескольких процессов: кристаллизации воды на нижней поверхности, образования снежного льда при перегрузке снегом и замерзания наледной воды [10]. Суммы отрицательных температур воздуха характеризует прежде всего процесс образования кристаллического льда. Для исследуемой территории при сравнении двух периодов (1951 – 1990 гг. и 1991 – 2019 гг.) сокращение сумм отрицательных температур составляет 5 – 10 %, или от 200 до 600 °C (рис. 3). Наиболее выраженное сокращение суммы отрицательных

температур (%) зафиксировано для мс Бор, Няк-символь, Тарко-Сале и Якутск.

Изменения значений толщины льда при сравнении двух периодов (1951 – 1990 гг. и 1991 – 2019 гг.) в целом не согласуются с изменениями температур воздуха. Для отдельных постов отмечается увеличение средних значений максимальной толщины льда (разница составляет около 30 см), что требует дополнительных исследований и проверки данных на наличие нарушений неоднородности, связанных, например, с изменением створа измерений толщины льда или хозяйственной деятельностью. Среди створов, для которых толщина льда уменьшается в последние годы, статистически значимые нарушения стационарности (по критерию

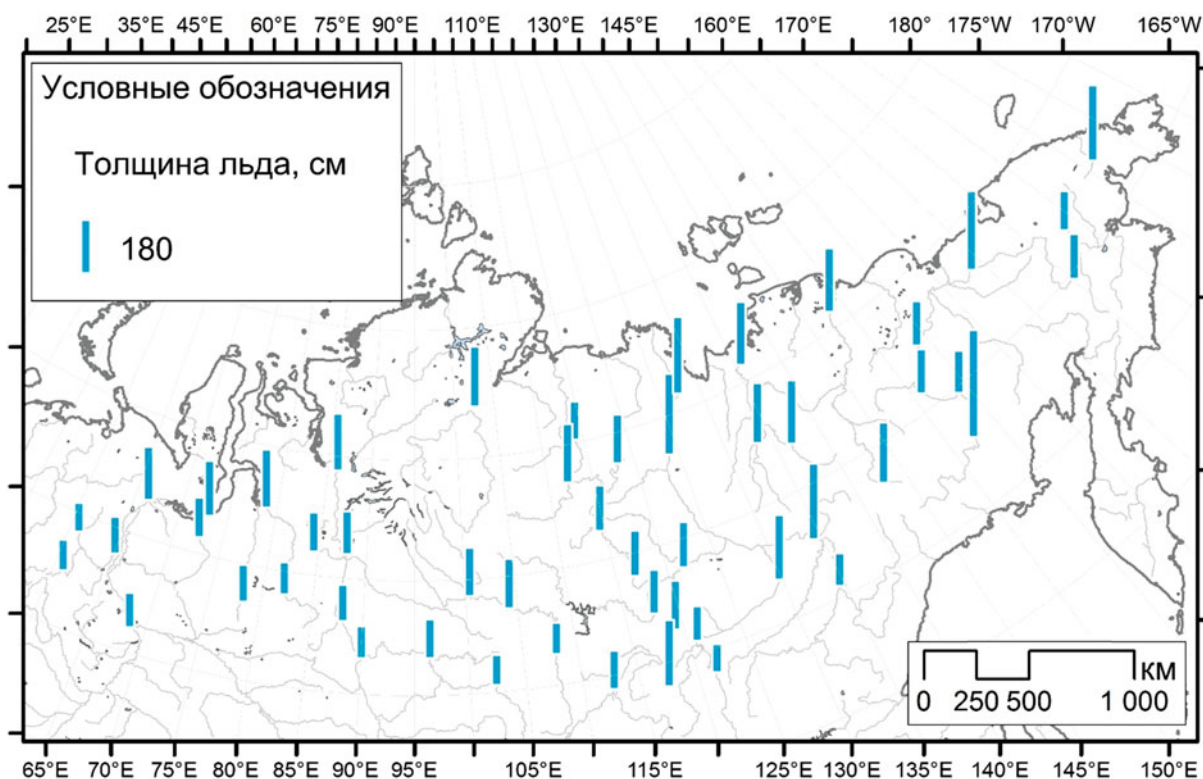


Рис. 4. Толщина льда 1 % обеспеченности

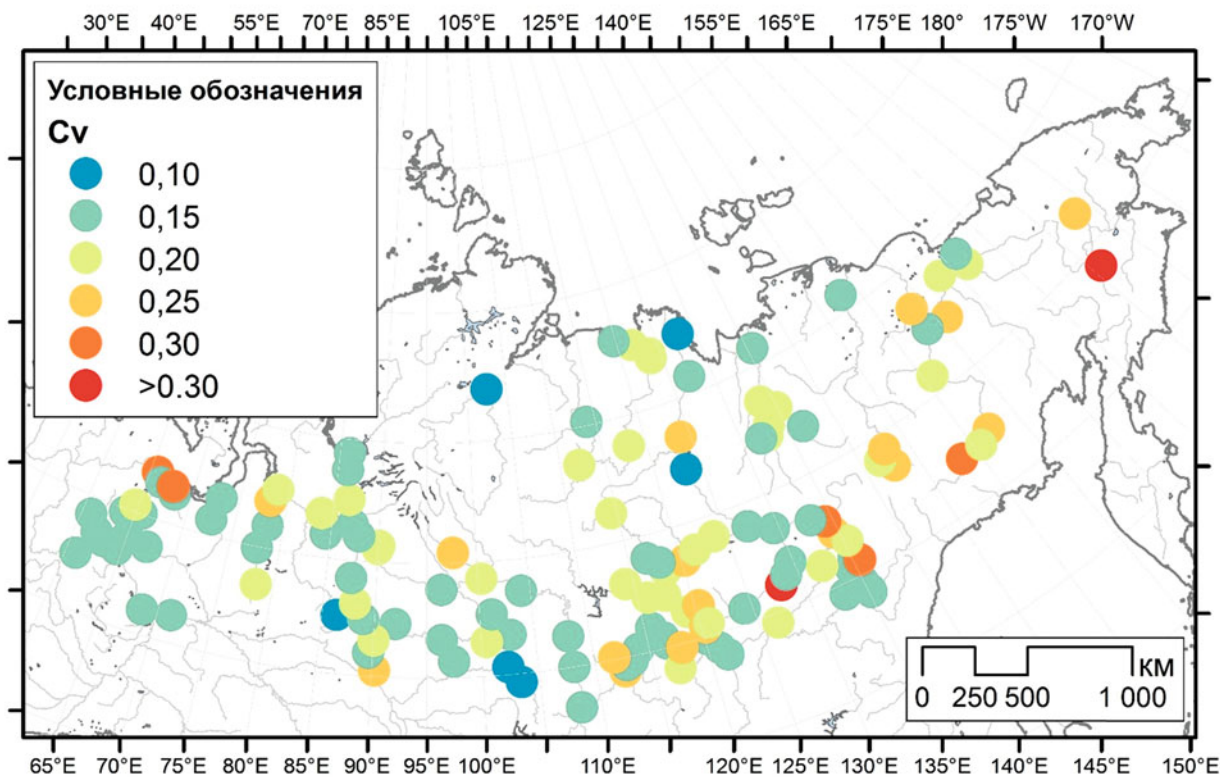


Рис. 5. Коэффициент вариации максимальной толщины льда

Стьюдента) отмечены лишь для отдельных постов в бассейне Колымы, на реках Лена, Оленёк, Индигирка и Пур.

В условиях нарушения однородности и стационарности рядов значения 1 % обеспеченности были определены по сглаженным эмпирическим кривым. Наименьшие значения характерны для рек Западной Сибири: 100 – 125 см для Северной Сосьвы, верховьев Пура и Таза. Также значения менее 1,5 м отмечаются в верховьях Лены, на Енисее и притоках. Для верховий Колымы, Нижней Лены, рек Малый Анюй (с. Островное) и Амгуэма (пос. Амгуэма, 87-й км) толщина льда 1 % обеспеченности превышает 2,5 м (рис. 4). В среднем величина толщины льда 1 % обеспеченности в 1,5 раза больше среднемноголетних значений, для бассейна Колымы и северо-востока территории это отношение несколько выше (~1,7).

Среднеквадратическое отклонение максимальной толщины льда для исследуемых рядов меняется от 10 до 60 см. Наибольшие значения характерны для рек Восточной Сибири и северо-востока территории (верховья Колымы, Индигирки, Оленёк), наименьшие — для рек Нижняя и Подкаменная Тунгуска, Северная Сосьва, Надым и др. Повышенные значения среднеквадратического отклонения отмечаются для створов, расположенных в более суровых условиях (со средней величиной суммы отрицательных температур – 5000 °С и

ниже), но чётких пространственных закономерностей не наблюдается. Коэффициент вариации рядов максимальной толщины льда составляет для большей части территории 0,15 – 0,20, для отдельных створов — до 0,40. Хотя и прослеживаются некие закономерности пространственного распределения этой характеристики, выделение районов с одинаковыми значениями затруднительно (рис. 5).

Среди гидрологических постов вне зоны влияния водохранилищ были выбраны створы, для которых ближайшая метеостанция расположена в радиусе 50 км. Для этих постов (63 створа) рассчитаны средняя толщина льда и толщина льда 1 % обеспеченности как для неизученных рек. Методика, изложенная в [16], учитывает для расчёта средней толщины льда h л сумму отрицательных температур за период от ледостава до начала снеготаяния и среднюю за зимний период высоту снега по ближайшей метеостанции. Среднее квадратическое отклонение принимается равным $0,15h$ л, коэффициент асимметрии для исследуемой территории $C_s = 1$.

Рассчитанные значения сравнивались со значениями, полученными по эмпирическим кривым. Для 24 постов ошибка расчёта средней толщины льда и толщины льда 1 % обеспеченности составила менее 10 %, для 13 постов — более 30 %. Причём высокие значения ошибок обусловлены ошиб-

ками расчёта и среднего значения, и среднего квадратического отклонения.

Выводы

Для севера азиатской части России условия формирования максимальных годовых значений толщины льда различны по территории. Кроме климатических важную роль играют локальные факторы, определяющие условия перераспределения снега на льду, промерзание отдельных участков, образование речных наледей и полыней. Среднеквадратическое отклонение максимальной толщины льда для исследуемых рядов меняется от 10 до 60 см, коэффициент вариации — от 0,15 до 0,20, для отдельных створов — до 0,40. Наблюдаемые климатические изменения для исследуемой территории выражаются в уменьшении сумм отрицательных температур воздуха на 5–10 %, или на 200–600 °С. Изменения значений толщины льда не согласуются с изменениями температур воздуха, для отдельных створов наблюдается рост средних значений. Статистически значимые нарушения стационарности (по критерию Стьюдента) отмечены в бассейне Колымы, на реках Лена, Оленёк, Индигирка и Пур. Расчёты максимальной годовой толщины льда 1 % показали, что эти величины в среднем в 1,5 раза больше среднемноголетних значений. Для верховий Колымы, Нижней Лены, рек Малый Аной (с. Островное) и Амгуэма (пос. Амгуэма, 87-й км) толщина льда 1 % обеспеченности превышает 2,50 м, на реках Западной Сибири — 1,00–1,25 м.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова № 121051400038-1.

Список литературы

1. Шаталова И. Н., Трегуб Г. А. Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. — СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2013. — 452 с.
2. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. — М.: РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2015. — 348 с.
3. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — М.: Минстрой России, 2018. — 101 с.
4. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. — М.: ГЕОС, 2007. — 585 с.
5. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек российской Арктики / Н. Л. Фролова, Д. В. Магрицкий, М. Б. Киреева и др. // Вопросы географии. — М.: Кодекс, 2018. Т. 145. С. 233–251.
6. Аржакова С. К. Зимний сток рек криолитозоны России. — СПб.: РГТМУ, 2001. — 209 с.
7. Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century / S. A. Agafonova, N. A. Frolova, G. V. Surkova, K. P. Koltermann // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2017. Vol. 10. No. 4. P. 4–15.
8. Агафонова С. А., Колий В. М. Формирование ледяного покрова на реках Ленского бассейна // Труды VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». — Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2019. Т. 1. С. 138–141.
9. Агафонова С. А. Ледовый режим рек арктической зоны Западной Сибири в современных климатических условиях // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 25–33.
10. Чижов А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 126 с.
11. Агафонова С. А., Баницикова Л. С. Региональные особенности формирования ледяного покрова на реках Арктической зоны России // Сборник трудов V Юбилейной Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л. Н. Карлина. — М., 2021. С. 3–10.
12. Суркова Г. В., Крылов А. А. Изменение гидротермических климатических ресурсов Арктики на фоне потепления XXI века // Арктика и Антарктика. 2017. № 1. С. 47–61.
13. Agafonova S. A., Vasilenko A. N. Hazardous ice phenomena in rivers of the Russian Arctic zone under current climate conditions and the safety of water use // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 43–51.
14. Наствления гидрометеорологическим станциям и постам. — Л.: Гидрометиздат, 1975. Вып. 2. Ч. 2: Гидрологические наблюдения на постах. — 264 с.
15. Специализированные массивы для климатических исследований АИСОРИ. — <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>.
16. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). — М.: ГК «Трансстрой», 1992. — 412 с.