

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Землянскова А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Изменение ледового режима рек Северо-Востока России // Арктика и Антарктика. 2024. № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.1.69791 EDN: DZOYRH URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69791

Изменение ледового режима рек Северо-Востока России

Землянскова Анастасия Александровна

ORCID: 0000-0002-2249-5708

лаборант, Северо-Восточный государственный университет; младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет

685017, Россия, Магаданская область, г. Магадан, ул. Портовая, 13

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com



Нестерова Наталья Вадимовна

ORCID: 0000-0003-0677-4982

кандидат технических наук

старший преподаватель кафедры Гидрологии суши Института Наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет; младший научный сотрудник, Государственный гидрологический институт

199034, Россия, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7-9

✉ nnesterova1994@gmail.com



Макарьева Ольга Михайловна

ORCID: 0000-0002-2532-4306

кандидат технических наук

заведующий лабораторией, Северо-Восточный государственный университет; ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет

685000, Россия, Магаданская область, г. Магадан, ул. Портовая, 13

✉ omakarieva@yandex.ru



[Статья из рубрики "Климат Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.1.69791

EDN:

DZOYRH

Дата направления статьи в редакцию:

08-02-2024

Дата публикации:

15-02-2024

Аннотация: В экономическом развитии арктических регионов важную роль играет транспортное сообщение и обеспечение труднодоступных населенных пунктов и горнодобывающих предприятий. Зимой в качестве транспортных артерий используются зимники, режим их функционирования зависит от характеристик льда. Зимники оборудуют в России, Канаде, США, Финляндии, Китае. В связи с потеплением климата сроки формирования ледового покрова на реках сдвигаются на более поздние, а весной лед разрушается раньше. Это может сказаться на доставке жизненно важных грузов в отдаленные регионы. По последним прогнозам, предполагается, что тяжелые транспортные средства к концу XXI века не смогут пользоваться данным видом дорог. Цель исследования – анализ изменений характеристик речного ледового покрова рек Северо-Востока. Для этого был собран ряд данных за период 1940–2018 гг. о толщине ледяного покрова по 80 гидрологическим постам, расположенным в бассейнах рек Яна, Индигирка, Колыма, рек Чукотского полуострова и бассейна Охотского моря. Продолжительность непрерывного ряда составила от 2 до 67 лет. Для оценки использовались три статистических непараметрических критерия (Манна-Кендалла, Петтитта и Тейл-Сена). Рассматривались следующие характеристики: максимальная толщина льда и дата его образования, даты достижения толщины льда 60 и 90 см. За рассматриваемый период максимальная толщина льда сократилась в среднем на 40 см, при этом дата достижения максимальных значений остается практически неизменной. Срок формирования речного льда толщиной 60 и 90 см, необходимой для прохождения легкового и грузового транспорта, соответственно, сместился почти месяц. Дата начала ледостава наступает в среднем на 3–4 дня позже, а дата окончания ледостава раньше на 5–8 дней. В среднем продолжительность ледостава сократилась на 5–15 дней. Полученные результаты необходимо учитывать при составлении графика работы автозимников. Это особенно важно для регионов, где сообщение между населенными пунктами и горнодобывающими предприятиями возможно только по речным артериям.

Ключевые слова:

толщина речного льда, Северо-Восток России, ледовый режим рек, зимники, изменения климата, наледи, ледовые явления, арктические регионы, криолитозона, сокращение льда

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда и правительства Магаданской области № 23-17-20011.

Введение

В экономическом развитии Арктических регионов важную роль играет транспортное сообщение. В зимнее время в качестве транспортных артерий используется речная сеть. На Северо-Востоке России в бассейнах рек Яна, Индигирка и Колыма, рек Чукотского полуострова и бассейна Охотского моря прокладывают зимники. Зимник — автомобильная дорога, эксплуатация которой возможна только в зимнее время при отрицательной температуре воздуха. Ледовая переправа прокладывается по льду рек, озер, водохранилищ или морей только после тщательной проверки толщины ледяного

покрова. Зимние дороги функционируют ежегодно в таких странах, как Канада, Китай, США, Россия, Финляндия, Норвегия и Швеция. Для оборудования зимника необходимо знать расчетные нагрузки для разного вида транспортных средств. Строительными нормами установлено, что для проезда по зимнику колесных автомобилей весом 15 и 100 тонн необходим лед толщиной 60 и 195 см, соответственно. В связи с потеплением климата наблюдаются изменения в ледовом режиме рек. Изменяются сроки образования ледового покрова, а также его характеристики. Происходит сокращение сроков эксплуатации зимников. В работе [1] отмечается, что на территории Канады для самых тяжелых транспортных средств проезд по зимникам будет невозможен к концу XXI века.

На территории Северо-Востока России зимники прокладываются по рекам Колыма и Анадырь в конце октября — начале декабря, на реках бассейна Охотского моря — в начале сентября — середине декабря и действуют до конца апреля — начала мая [2]. Зимники проложены также по рекам бассейнов рр. Яна и Индигирка. В Республике Саха (Якутия) протяженность автозимников составляет более 9 тысяч км, они обеспечивают сообщение между центром и улусами, используются для доставки жизнеобеспечивающих товаров. Значительным препятствием для нормального функционирования зимников являются наледи и полыньи.

Ледовый режим рек имеет важное значение для бассейнов северных рек, их экосистем и экономического развития арктической промышленности и транспорта [3, 4]. Формирование ледового режима определяется целым рядом факторов, среди которых водность, тип питания реки, теплообмен водной массы с атмосферой, батиметрия и строение русла [5].

В данный момент в мире широко обсуждается будущее влияние потепления климата на изменения ледового режима рек [3, 4]. По оценкам службы Росгидромет1), на сибирских реках к 2039 г. ожидается сокращение периода ледостава на 20—27 дней и уменьшение максимальной толщины льда на 20—40%. По мнению Shiklomanov and Lammers [6] в настоящее время необходимы более точные исследования при использовании детальных данных наблюдений на реках меньшего размера.

В мировой практике для исследования ледового режима рек широко используются спутниковые наблюдения [7]. В работе прогнозируется уменьшение сезонной продолжительности ледового покрова в среднем на 6 дней на 1° повышения средней глобальной приземной температуры воздуха. Использование спутниковых данных MODIS позволили идентифицировать пространственные и временные закономерности изменения ледового покрова в бассейнах рек Макензи, Лена, Обь и Енисей за период 2000–2014 гг. [8]. Все статистически значимые временные тенденции отрицательны, что также указывает на общий сдвиг в сторону уменьшения продолжительности ледостава.

На территории исследовательского водосбора р. Танана (Аляска), установлено, что таяние льда усиливается за счет увеличения гидравлического градиента, увеличения подъема грунтовых вод, повышения температуры воздуха, повышения температуры грунтовых вод и увеличения высоты снежного покрова [9]. Ожидается, что потепление климата в регионах с прерывистой многолетней мерзлотой увеличит поступление грунтовых вод в реки, уменьшит температурный градиент между атмосферой и поверхностью раздела лед-вода и увеличит толщину снежного покрова.

Целью исследования является анализ изменений характеристик ледового режима рек

Северо-Востока России (1940–2018 гг.) на основе разработанной базы данных.

Объект исследования

Территория Северо-Востока России включает бассейны рек Яна, Индигирка, Колыма, бассейны рек Чукотского полуострова и Охотского моря (рис. 1). Рельеф местности сложный и разнообразный. Он представлен высокогорьями, которые плавно сменяются низкогорьями, внутренними впадинами и др. [\[2, 10\]](#).

Климат внутренних районов Северо-Востока суровый, резко континентальный, при приближении к морским побережьям становится мягче. Средняя годовая температура воздуха на станции Оймякон (726 м) составляет -15,7°, а в — Магадане (118 м) -2,8°. Наиболее холодным является январь -46,4° (Оймякон), ближе к морю температура повышается до -16,4° (Магадан). Самый теплый месяц — июль. Средняя многолетняя температура июля по станции Оймякон составляет +14,9°, в Магадане +11,8°. Холодный период продолжается с октября по апрель, а теплый — с мая по сентябрь.

Режим выпадения осадков на территории неоднородный, он находится под воздействием циклонической активности. Выделяют холодный (октябрь—апрель, май) и теплый (май, июнь—сентябрь) периоды выпадения твердых и жидких осадков соответственно. Годовая сумма осадков достигает 600 мм на берегах Охотского и Берингова морей (688 мм, м/с Сунтар-Хаята, 2068 м; 561 мм, м/с Магадан), а в низовье р. Колыма меньше 200 мм. На большей части территории годовая сумма осадков находится в пределах 300 мм. Оценка количества осадков затруднена, так как большинство метеостанций находится в долинах рек на небольших высотах, отсутствует информация о количестве осадков в горах, на высоте более 1500 м. В летний период, преимущественно в июле, наблюдается максимум выпадения осадков.

Образование снежного покрова в некоторых районах начинается уже в сентябре. Максимальная высота отмечается в марте-апреле, по всей территории она практически не превышает 100 см, в среднем составляет 30—50 см. Во второй половине мая устойчивый снежный покров разрушается. Число дней со снежным покровом составляет 210—240 суток. Максимальный запас воды в снежном покрове колеблется от 50 до 200 мм [\[2, 10\]](#).

Многолетняя мерзлота — важный компонент природной системы Северо-Востока России, только на побережье Охотского моря она прерывистая, ее мощность не превышает 0,2—0,3 м, здесь встречаются острова талых пород. Талики также встречаются в бассейне р. Колыма. На этой территории и на водоразделах Чукотского нагорья мощность многолетней мерзлоты составляет 300—400 м. Мощность многолетнемерзлых пород в высокогорных районах бассейнов рек Яна и Индигирка может достигать более 450 м, в долинах рек до 180 м. Мощность деятельного слоя составляет 0,3—2 м [\[11\]](#).

Речная сеть Северо-Востока имеет сложный рисунок. Многолетняя мерзлота в горных районах способствовала образованию многорукавности. Горные реки характеризуются каменистыми руслами, изобилующими порогами. На равнинных территориях долины рек очень широкие, сложены аллювием, им свойственно свободное меандрирование. Реки характеризуются режимом с весенним половодьем, сильными летними и осенними дождевыми паводками. Зимняя маловодность на всех реках продолжительна (6—8 месяцев), многие малые и средние реки промерзают до дна. На территории Северо-Востока России широко распространены наледи, общая площадь которых, по современным оценкам, составляет 4529 км², а объем — 10,6 км³. Средняя наледность

бассейнов рек, в котором ведутся наблюдения за стоком, колеблется от 0,2 до 1,4%. Максимальна она в частных водосборах р. Индигирки [12].

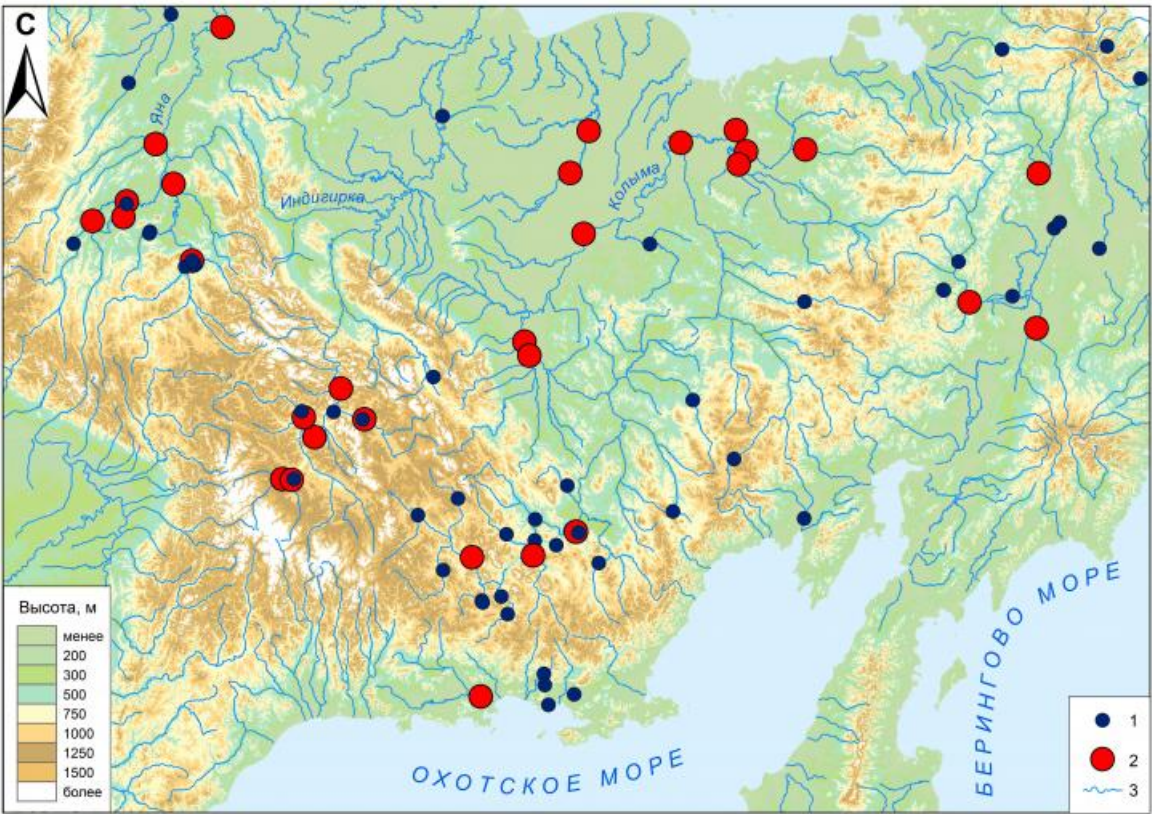


Рис. 1. База данных о толщине льда на реках Северо-Востока России.

1 — гидрологические посты, которые занесены в базу данных; 2 — гидрологические посты, по данным которых был проведен анализ; 3 — реки.

Материалы и методы

Для оценки изменений был собран ряд данных за период 1940–2018 гг. о толщине ледяного покрова по 80 гидрологическим постам, расположенных в бассейнах рек Яна, Индигирка, Колыма, рек Чукотского полуострова и бассейна Охотского моря. Площади водосборов составляют от 18,3 до 635 000 км², а продолжительность непрерывного ряда — от 2 до 67 лет (рис. 2, таблица 1).

Таблица 1. Период наблюдений на гидрологических постах, выбранных для анализа ледового покрова рек Северо-Востока России.

ID	Река – название поста	S	Y	N	G
01001	р. Колыма - с. Оротук	42600	1957	61	-
01010	р. Колыма - п. Усть-Среднекан	99400	1957	61	2001
01018	р. Колыма - пос. Зырянка	287000	1957	61	1964
01176	р. Бохапча - в 5.4км от устья	13600	1957	61	2003, 2008–2009
01397	р. Малый Анюй - с. Островное	30000	1957	61	1958, 1976–1977, 1999–2001
01398	р. Малый Анюй - с. Анюйск	121000	1957	61	-
01407	р.				1997. 2004–

01497	р. Анадырь - пос. Новый Еропол	47300	1957	61	2013
01504	р. Майн - с. Ваеги	18600	1957	61	-
01508	р. Энмываам (Эньмувеем) – ГМС Эньмувеем (с.Мухоморное)	11400	1957	61	1967
01566	р. Тауй - с. Талон	25100	1957	61	-
01578	р. Ясачная - с. Нелемное	32000	1972	46	-
01596	р. Большой Анюй - ГМС Константиновская	49600	1978	40	-
01801	р. Колыма - г. Среднеколымск	361000	1957	61	1964
01802	р. Колыма - Колымское	413000	1965	53	-
01805	р. Колыма - р.п. Черский	635000	1940	78	1960–1965, 1996–2002
03414	р. Яна-Верхоянск	45300	1951	67	-
03424	р. Сартанг - Бала	16700	1951	67	-
03430	р. Дулгалах - Томтор	23900	1951	67	-
03443	р. Адыча - Усть-Чаркы	52800	1956	62	1959
03445	р. Адыча - Юрдук-Кумах	89600	1951	67	-
03483	р. Бытантай - Асар	40000	1951	67	-
03488	р. Индигирка - Юрты	51100	1956	62	-
03489	р. Индигирка - Индигирский	83500	1958	60	-
03499	р. Сунтар - устье р. Сахарынья	7680	1955	63	1963, 1965, 1968, 1971, 1973– 1976
03503	р. Агаякан - ГМС Агаякан	7630	1952	66	-
03507	р. Эльги - 5.0 км выше устья р. Артык-Юрях	17600	1951	67	1972, 1973, 1980
03518	р. Нера - пос. Ала-Чубук	22300	1961	57	1973, 1975
03861	р. Яна - п.ст. Юбилейная (Казачье)	224000	1951	67	-
03881	р. Алазея - г. Аргахта	17700	1961	57	1965, 1972
03882	р. Алазея - с. Андрюшкино	29000	1961	57	1965, 1967, 1995–2004

*ID — номер поста; S — площадь водосбора, км²; Y — год начала наблюдений; N — период наблюдений (до 2018 г. включительно); G — годы, в которые наблюдения не проводились.

Информация 1936–2008 годов была оцифрована по данным «Государственного водного кадастра» [13-15], 2008–2018 годов получена на сайте АИС ГМВО²⁾.

Для оценки изменений толщины льда на реках Северо-Востока по разработанной базе данных [16] использовались три статистических непараметрических критерия (Манна-Кендалла, Петтитта и Тейл-Сена). На различных по площади водосборах в данной работе были отобраны репрезентативные ряды. Выбраны следующие критерии репрезентативности: 1) длина анализируемого ряда более 20 лет; 2) разница в количестве значений до 1980 и после 1980 не превышает 50%; 3) наличие данных в

современный период (после 2000 г.). Всего для территории Северо-Востока России проанализированы данные 30 гидрологических постов по следующим характеристикам: максимальная толщина льда, дата формирования максимальной толщины, а также изменение даты формирования толщины льда 60 и 90 см. Данные величины обусловлены строительными нормами для проезда колесных автомобилей массой 15 и 35 тонн соответственно при кратковременной оттепели (температура воздуха 0 и выше)³.

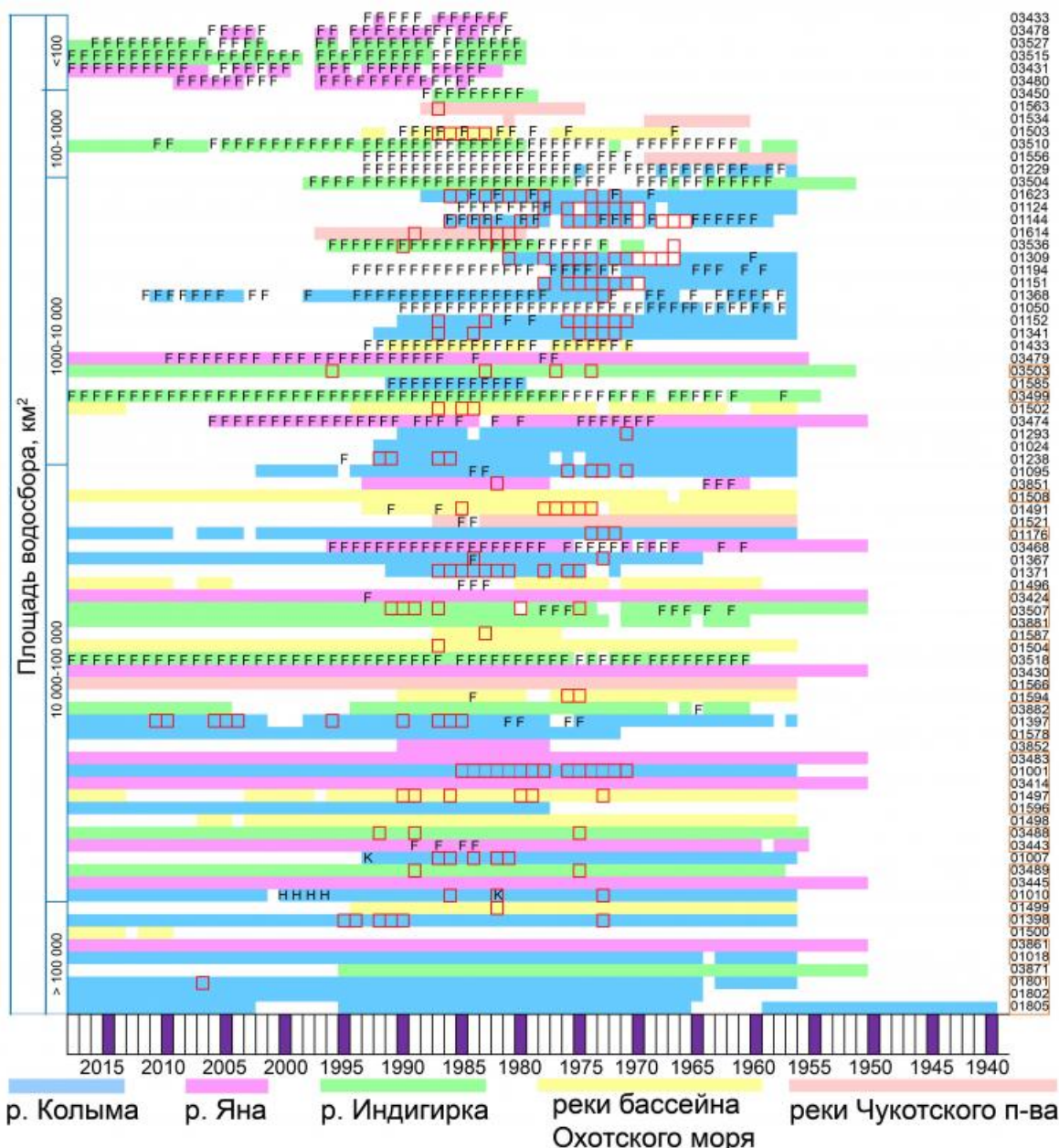


Рис. 2. Наличие данных о ледовом режиме малых, средних и крупных рек Северо-Востока России.

Примечание: оранжевый прямоугольник — анализируемый ряд (см. таблица. 2); F — река промерзла до дна; красный квадрат — выход наледных вод на поверхность речного льда; H — на толщину льда оказывает влияние строительство Усть-Среднеканской ГЭС; K — на толщину льда оказывает влияние сброса воды из Колымского водохранилища.

Результаты исследования

По результатам анализа данных 30 гидрологических постов было установлено, что максимальная толщина льда на реках Северо-Востока сократилась, в среднем она стала

меньше на 25,5 см. Наибольшие изменения наблюдаются на посту 01001 (находится выше водохранилища). За период 1957–2018 гг. максимальная толщина льда на этом участке уменьшилась на 108 см. Также, выявлены случаи, когда толщина льда в современный период больше. Например, на посту 03483 за период 1951–2018 гг. она увеличилась на 59 см или на 36%.

Средняя дата формирования максимальной толщины льда не изменилась, однако на некоторых постах наблюдаются значительные отклонения, например, на постах 01504 и 01566 в сторону позднего и раннего образования на 40 дней соответственно (таблица 2).

Анализ дат формирования толщины льда 60 см показал, что на 9 из 30 постов дата достижения этой величины не изменилась, а в среднем по всем анализируемым постам сместилась на 23 дня, максимально на 37 дней. На посту 01504 наоборот отмечается ранее образование льда такой толщины (на 12 дней раньше). Аналогичная картина выявлена для толщины льда 90 см. На 7 постах дата образования льда толщиной 90 см не изменилась, среднее отклонение по всем постам составляет 33 дня. Максимально позднее формирование льда 90 см отмечается на посту 01578 (63 дня позже от средней даты образования).

На 13 постах отмечается статистически значимый тренд в сторону позднего образования льда толщиной 60 см, такой же тренд для толщины льда 90 см (9 постов). Тренд на уменьшение максимальной толщины льда прослеживается на 9 постах. Анализ также показывает, что на этих постах с сокращением максимальных размеров толщины льда увеличивается время формирования толщины льда, пригодной для проезда автотранспорта. Более раннее становление льда толщиной 90 см наблюдается на 3 постах (на 14, 23 на 49 дней), что также может быть связано с образованием наледей, которые являются важным фактором, осложняющим функционирование зимних ледовых трасс. Толщина льда 145 и 195 см на реках образуется не каждый год, в связи с чем анализ ряда невозможен. Отмечено, что чем больше толщина льда, тем больше выражено смещение дат.

Таблица 2. Изменение характеристик ледового покрова рек с длительным рядом наблюдений до 2018 г.

Номер поста	Изменение максимальной толщины льда, см	Изменение максимальной толщины льда, %	Отклонение от средней даты достижения максимума, пентады	Срок достижения 60 см льда	Срок достижения 90 см льда
01001	-108	-53	0	16	17
01010	<u>16</u>	<u>14</u>	0	27	<u>-14</u>
01018	7.1	7.4	0	0	0
01176	-15	-14	0	29	0
01397	-12	-8.3	0	39	29
01398	-18	-18	0	27	19
01497	18	14	<u>3</u>	21	0
01504	<u>55</u>	<u>59</u>	<u>9</u>	-12	19
01508	-24	-30	-5	16	59
01566	-34	-35	-8	0	-17
01578	-16	-14	<u>4</u>	30	64
01596	-3.5	-4.0	-2	32	45

01801	-31	-29	0	38	40
01802	-26	-19	-2	19	24
01805	-30	-21	0	24	33
03414	-22	-16	0	12	36
03424	-22	-16	0	28	28
03430	<u>26</u>	<u>16</u>	0	0	0
03443	<u>35</u>	<u>23</u>	0	0	<u>-23</u>
03445	-25	-11	0	0	0
03483	<u>59</u>	<u>36</u>	0	0	<u>-49</u>
03488	-24	-11	0	0	0
03489	-98	-52	-2	16	37
03499	-7.3	-8.0	0	0	0
03503	<u>98</u>	<u>39</u>	<u>3</u>	0	-13
03507	-13	-8.8	4	21	9
03518	<u>111</u>	<u>90</u>	<u>17</u>	0	17
03861	-38	-25	0	19	32
03881	-5.3	-5.0	0	0	0
03882	-21	-16	0	0	6

**Ячейки, заполненные серым цветом, соответствуют статистически значимым трендам при $p < 0,10$; при $p < 0,05$ — жирным шрифтом; при $0,05 < p < 0,10$ — курсивом; подчеркнутый — положительный тренд для максимальной толщины льда и отрицательный для количества дней достижения 90 см*

На 12 из 30 исследуемых постах наблюдается значимое сокращение максимальной толщины ледового покрова при уровне значимости $p < 0,10$. В среднем уменьшение составляет 38,9 см (27%) и изменяется от 16 см (14%) (р. Ясачная — с. Нелемное, бассейн р. Колымы) до 108 см (53%) (р. Колыма — с. Оротук). Уменьшение максимальной толщины льда не сопровождается сдвигом даты наступления этого максимума (таблица 2). Только на двух постах (03489, р. Индигирка — Индигирский) и 01566 (р. Тауй — с. Талон) происходит сдвиг даты на 10 и 40 дней соответственно.

На 7 постах наблюдается увеличение толщины ледового покрова со средним значением 57 см (40%). Максимальное увеличение зафиксировано в бассейне р. Нера — пос. Ала-Чубук (03518) и достигает 113 см или 90%. Положительное отклонение от средней даты достижения максимальной толщины наблюдается на 4 рассматриваемых постах. В целом, увеличение ледового покрова происходит в бассейнах рр. Яна и Индигирка. В то же время, для всех постов в указанных бассейнах наблюдаются более низкие величины толщины льда в периоды 1964–1967 и 2007 гг., что в целом совпадает с годами резкого увеличения стока [17].

Важную роль в формировании ледового покрова играют наледи, образующиеся в створах постов. Так максимальные изменения в максимальной толщине льда наблюдаются именно на постах, на которых наблюдаются наледные явления, причем для таких постов свойственны как уменьшение льда (например, пост 03489, р. Индигирка — Индигирский), так и увеличение (пост 03503, р. Агаякан — ГМС Агаякан). В бассейне р. Колыма — с. Оротук (01001) изменение в толщине ледового покрова зависит от антропогенного фактора, т.к. данные искажены в связи со строительством Усть-Среднеканской ГЭС.

Обсуждение

В основном исследования изменений максимальной толщины ледового покрова, сроков осеннего становления льда и его весеннего разрушения проводятся на крупных реках. Для северных районов наблюдаются разнонаправленные тенденции изменений ледового режима [18], которые могут варьироваться как в зависимости от региона, так и в пределах речных систем [8]. Но в целом они указывают на значимое смягчение ледового режима, причем изменения максимальной толщины льда за последний 30-летний период происходят более интенсивно по сравнению с изменениями продолжительности ледостава [19]. Так для рек Арктической территории России уменьшение толщины ледового покрова составило в основном 10—20% [19].

В работе [6] констатируются статистически значимые негативные тренды максимальной толщины льда на реках Сибири. На реках Колыма и Яна отмечены отрицательные тренды максимальной толщины льда (13 и 33 см соответственно) и уменьшение длительности ледостава в среднем на 8 дней.

Для территории Республики Саха (Якутия) на отдельных реках, таких как Лена, Чара, Учур, изменение характеристик ледового режима существенно, а на других (Тимптон, Нюкжа) проявляется пока достаточно слабо [20]. В среднем продолжительность ледостава уменьшается на 5—15 дней. Дата начала ледостава наступает в среднем на 3—4 дня позже, а дата окончания ледостава раньше на 5—8 дней. Интересно, что для территории Якутии средние значения максимального уровня воды в начале ледостава возросли на 51—83 см, что, по мнению авторов [20], связано с увеличением продолжительности шугохода и объема шуги в условиях более поздних дат начала образования ледового покрова.

Для рек бассейна Верхнего Енисея даты установления сплошного ледостава сдвинулись на более поздние сроки в среднем на 10 дней, а процесс разрушения ледяного покрова начинается на 10—18 дней раньше. Причем выявлено статистически значимое сокращение общей продолжительности ледостава на реках со средней высотой бассейна менее 1500 м. Основные причины этих изменений, по мнению автора [5], общее увеличение водности осенней и зимней межени, с которым связан рост теплозапаса водной массы, а также уменьшение толщины ледового покрова в результате снижения отрицательных зимних температур воздуха.

Для Забайкалья дата окончания ледостава в среднем сдвинулась на более ранний срок на 3 дня. Смещение дат на более поздние сроки на 1—10 дней произошло в 21% створов. Не изменились даты только в 4% створов. За 50-летний период максимальная толщина льда на большинстве реках уменьшилась (в четверти створов ее уменьшение составило более 30 см) [21].

Для территории рек арктической зоны Западной Сибири по данным 40 гидрологических постов (1936–2014 гг.) расчеты показали отсутствие статистически значимых изменений в ледовом режиме [22].

Изменение дат замерзания рек и величины максимальной толщины льда сильнее зависит от температуры воздуха, чем от водности рек [18, 21]. В работе [23] указывают на то, что сход ледового покрова значительно зависит от температуры воздуха, в то время как процессы замерзания льда осенью имеют более сложную природу и показывают ограниченную корреляцию с метеорологическими условиями. В. В. Паромов и Л. Н.

Шантыкова [5] утверждают, что наблюдаемый сдвиг дат появления сплошного ледостава зависит в основном от динамического фактора.

В работах [24, 25] представлена гипотеза о воздействии речного льда на меженный сток. Так в более холодные зимы, при значительной толщине льда, расход воды в небольших речных бассейнах уменьшается, а в менее суровые зимы происходит уменьшение толщины речного льда и сохранение более высокого стока. В то же время Shiklomanov and Lammers [6] не подтвердили данную теорию и не обнаружили существенной корреляции между максимальной толщиной речного льда и средним стоком рек в ноябре-апреле.

Таким образом, результаты исследования динамики толщины льда на реках Северо-Востока согласуются с общей тенденцией изменения природной среды во всем мире.

Заключение

Проведен анализ динамики толщины льда на реках Северо-Востока страны на основе разработанной базы данных за период 1940–2018 гг. За последние пятьдесят лет произошло значимое смещение дат формирования толщины льда, для 60 см — в среднем на 24 дня (12–36 дней) на 13 из 30 гидрологических постов, для 90 см — на 38 дней (17–64 дней) на 9 постах. Более раннее становление льда 90 см наблюдается на 2 постах (на 14 и на 49 дней), что также связано с образованием наледей, которые являются фактором, осложняющим функционирование зимних ледовых трасс.

Освоение новых территорий и транспортировка полезных ископаемых реализуется благодаря зимним дорогам. К тому же затраты на создание зимних дорог может быть в разы ниже, чем поддержание постоянной всесезонной транспортной артерии. Сокращение сроков функционирования зимников может повлечь за собой значительный экономический ущерб.

По результатам проведенной работы на реках Северо-Востока России дата начала использования естественных транспортных артерий может сдвинуться на месяц и более. Необходимо учитывать этот фактор при составлении графика работы автозимников и применять методы искусственного намораживания толщины льда на реках для увеличения сроков их использования. Это особенно важно для регионов, где сообщение между населенными пунктами и горнодобывающими предприятиями возможно только по речным артериям.

Ссылки на нормативные документы:

- 1) Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, т. 1 и т. 2. — Росгидромет, М., 2008. URL: <http://climate2008.igce.ru>
- 2) <https://gmvo.skniivh.ru>
- 3) ВСН-137-89

Библиография

1. Mullan D., Swindles G., Patterson T., Galloway J., Macumber A., Falck H., Crossley L., Chen J., Pisaric M. Climate change and the long-term viability of the World's busiest heavy haul ice road // Theoretical and Applied Climatology. 2017. Vol. 129. Pp. 1089–1108.

2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат. 1969. 282 с.
3. *Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuglinsky V.S.* Historical trends in lake and river cover in the Northern Hemisphere // *Science*. 2000. Vol. 289. Pp.1743–1746.
4. *Beltaos S., Prowse T.* River ice hydrology in a shrinking cryosphere // *Hydrological Processes: An International Journal*. 2009. Vol. 23, no 1. Pp. 122–144.
5. *Паромов В.В., Шантыкова Л.Н.* Изменение характеристик ледового режима рек бассейна Верхнего Енисея // *Лед и снег*. 2010. № 2. С. 102–106.
6. *Shiklomanov A., Lammers R.* River ice responses to a warming Arctic-Recent evidence from Russian rivers // *Environmental Research Letters*. 2014. Pp. 9. 10.1088/1748-9326/9/3/035008.
7. *Yang X., Pavelsky T., Allen G.* The past and future of global river ice // *Nature*. 2020. Vol. 577. Pp. 69-73. 10.1038/s41586-019-1848-1.
8. *Cooley S.W., Pavelsky T.M.* Spatial and temporal patterns in Arctic River ice breakup revealed by automated ice detection from MODIS imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175, Pp. 310–322. doi: 10.1016/j.rse.2016.01.004
9. *Jones Ch., Kielland K., Hinzman L.* Modeling groundwater upwelling as a control on river ice thickness // *Conference: 19th International Northern Research Basins Symposium and Workshop At: Southcentral Alaska, USA*. 2013. Pp. 107-115.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеиздат. 1972. 651 с.
11. *Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 515 с.*
12. *Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, Н.В. Нестерова, А.А. Осташов, А.А. Землянскова; ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Новосибирск: СО РАН. 2021. 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5*
13. *Гидрологический ежегодник. Том 8. Вып. 0-7. Бассейн морей Лаптевых и Восточно-Сибирского до р. Колымы (1936-1980) // Якутское управление гидрометеорологической службы, г. Якутск.*
14. *Гидрологический ежегодник. Том 8. Выпуск 8. Том 9. Выпуск 7. В-Сибирское, Чукотское, Берингово, Тихий океан (1957-1980) // Колымское управление гидрометеорологической службы, г. Магадан.*
15. *Государственный водный кадастр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество, Выпуски 16–17 Ежегодное издание. 1981–2007 гг.*
16. *Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Землянскова А.А.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620268 (от 12.02.2021) «Толщина льда и высота снега на малых, средних и больших реках Северо-Востока (бассейны рек Яна, Индигирка, Колыма, Анадырь, бассейны рек Охотского моря и Чукотского п-ва) 1940-2018 гг.».
17. *Makarieva O., Nesterova N., Post D., Sherstyukov A., Lebedeva L.* Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Pp. 1635–1659.
18. *Гинзбург Б.М.* Сроки замерзания и вскрытия рек в конце XX века и возможные изменения в XXI веке // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 12. С. 88-97.

19. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2014. №3. С. 32-45.
20. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 55. С. 86-98.
21. Обязов В.А., Смахтин В.К. Влияние изменений климата на речной сток в зимний период в Забайкалье // Метеорология и гидрология. 2013. №7. С. 95-102.
22. Агафонова С.А. Ледовый режим рек арктической зоны Западной Сибири в современных климатических условиях // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 25-33. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.2.22649
23. Newton A.M.W., Mullan D. Climate change and Northern Hemisphere Lake and river ice phenology from 1931-2005 // The Cryosphere. 2021. Vol. 15. Pp. 2211-2234. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2211-2021>
24. Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. №9. С. 92-99.
25. Джамалов Р.Г., Потехина Е.В. Природно-климатические и антропогенные причины изменения подземного стока бассейна Лены // Георазрез. 2010. № 1. С. 1-25

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, прогноз развития гидрологических процессов и изменение ледового режима рек Северо-Востока России в в связи с изменениями погодно-климатических условий в современный период.

Методология исследования, в статье указаны что автором был собран ряд данных для составления базы данных за 58 лет по 80 гидрологическим постам бассейна рек полигона исследования, информация за 62 года была оцифрована по данным «Государственного водного кадастра», а за период 2008–2018 годов получена на сайте АИС ГМВО2), а также анализ карты, литературных данных и фондовых материалов. Из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов статистического анализа, в частности для оценки изменений толщины льда на реках по разработанной базе данных использовались три статистических непараметрических критерия (Манна-Кендалла, Петтитта и Тейл-Сена).

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации об экономическом развитии Арктических регионов и роли транспортное сообщение в зимнее время в качестве транспортных артерий используется речная сеть. На Северо-Востоке России в бассейнах рек прокладывают зимники - автомобильная дорога, эксплуатация которой возможна только в зимнее время при отрицательной температуре воздуха. Ледовая переправа прокладывается по льду рек, озер, водохранилищ или морей только после тщательной проверки толщины ледяного покрова. В этой связи исследование авторов по динамике формирования ледяного покрова и возможности его использования в современных условиях изменения погодных климатических условий является весьма актуальной.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований констатирована динамика изменения за последние пятьдесят лет как

значимое смещение дат формирования толщины льда, для 60 см — в среднем на 24 дня (12—36 дней) на 13 из 30 гидрологических постов, для 90 см — на 38 дней (17—64 дней) на 9 постах. Более раннее становление льда связано с образованием наледей, которые являются фактором, осложняющим функционирование зимних ледовых трасс.. Это является важным дополнением в развитии геокриологии и имеет важное практическое значение.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена иллюстративным материалом, отражающим процесс статистического моделирования. Статья иллюстрирована визуализированными картой, таблицами и рисунком.

Однако есть ряд пожеланий, в частности:

Автору статьи следовало бы более подробно остановиться на анализе взаимосвязи изменения среднемесячных температур за теплый и холодный периоды года, при этом учитывая, что повышение температур сказывается на гляциальных процессах.

Интересный аргументированные табличные данные можно было бы визуализировать в форме диаграмм и логика структурных схем.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.