



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

На тему **Прогноз ледовых явлений в верховьях
реки Оредеж**

Исполнитель Богодухов В.В.

Руководитель Исаев Д.И.

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

Исаев Д.И.

(подпись)

« 15 » июля 2019 г.

Санкт-Петербург
2019



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

На тему **Прогноз ледовых явлений в верховьях
реки Оредеж**

Исполнитель Богодухов В.В.

Руководитель Исаев Д.И.

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

Исаев Д.И.

(подпись)

«_____» _____ 2019 г.

Санкт–Петербург
2019

Оглавление

Введение.....	3
1. Процессы образования ледяного покрова на водоемах.....	4
1.1 Общие сведения о физике процесса	4
1.2 Особенности замерзания рек в различных условиях.....	13
2. Основные климатические характеристики Северо-Западного региона.....	1
2.1 Общая характеристика рек бассейна	15
2.1.1 Рельеф и геология исследуемого участка.....	16
2.1.2 Почвенный покров	16
2.1.3 Растительность	17
2.1.4 Климат	17
2.1.5 Описание реки Оредеж и участка наблюдений	18
2.2 Закономерности замерзания рек региона.....	20
3. Исследование ледовых явлений в верховьях р. Оредеж.....	24
3.1 Материалы наблюдений.....	24
3.2 Особенности ледовых явлений участка реки у базы практики РГГМУ.....	24
4. Обзор методов прогноза замерзания рек.....	24
5. Разработка прогноза	49
Заключение	60
Список используемой литературы	61
Приложение А	64

Введение

Данная выпускная квалификационная работа посвящена прогнозу ледовых явлений на р. Оредеж.

Информация о факте формирования ледяного покрова и его сроках является необходимой для планирования сроков зимней практики на базе практики РГГМУ, понимания и планирования состава задач в конкретных ледовых условиях.

В первой главе данной работы рассматриваются процессы и особенности образования ледяного покрова и нарастания льда в водотоках при различных условиях, изучены физика процесса, условия формирования, типизация. Вторая глава содержит в себе описание и различные характеристики рассматриваемого региона и реки Оредеж, закономерности формирования ледостава на реках региона. В третьей главе приводится информация о наблюдениях на р.Оредеж у базы практики РГГМУ, так же об особенностях образования ледовых явлений. Рассмотрены частные случаи формирования ледяных образований за период 2014-2019 гг по годам. В четвертой главе описаны методы долгосрочных и краткосрочных прогнозов замерзания рек. Пятая глава посвящена непосредственно разработке кратковременного прогноза ледовых явлений с использованием прогноза погоды и соответствующей заблаговременностью, а так же его проверка по фактическим данным.

2. Процессы образования ледяного покрова на водоемах.

2.1 Общие сведения о физике процесса

В реках, в отличие от озер, в связи с равномерным распределением тепла из-за постоянного течения и, как следствие – довольно быстрым остыванием, неравномерность распределения глубин сказывается на характере остывания воды и установления ледостава намного меньше. Но и в водоемах и в водотоках формирование льда происходит в результате теплообмена между водной массой и окружающей средой в осенне-зимний период.

На термический и ледовый режимы оказывают влияние многие факторы, такие как; размеры и глубина водоема, скорости течения, погодные климатические и географические условия и так далее.

Запасы тепла, которые были накоплены водой за летний период, осенью тратятся при теплообмене с атмосферой. Охлаждение воды на поверхности может происходить даже до отрицательных значений – так называемая переохлажденная вода. Чем интенсивнее турбулентное перемешивание в водотоке, тем глубже проникает переохлаждение, вплоть до дна. Обычно оно выражается тысячными или сотыми долями градуса, достигая одной десятой.

Для перехода переохлажденной воды в лед необходимы центры кристаллизации, в качестве которых могут быть снежинки и кристаллики льда, попавшие в воду из атмосферы или образовавшиеся в воде в результате ее движения, взвешенные частицы, находящиеся в воде и пр. Форма и количество образующихся кристаллов зависят от скорости течения

(перемешивания) и погодных условий – чем ниже температура воды, тем больше будет кристаллов, и тем меньше будут их размеры, так как охлаждение будет происходить быстрее.

При условии, что вода охлаждена до температуры замерзания, все тепловые потери формируются только за счет теплоты кристаллизации, поверхность воды свободна и теплообмен с атмосферой носят установившийся характер, то, зная потери тепла в период ледообразования с поверхности воды, можно рассчитать массу льда, приходящегося на единицу площади:

$$= \frac{S}{L_d}, \quad (1.1)$$

где S - теплообмен;

L_d - теплота кристаллизации.

Кристаллики льда, образовавшиеся в воде, при всплывании на поверхность напоминают пятна жира, что вызвано их формой – пластинчатая и иглообразная. Именно по этой причине такой лед носит название сало.

Так как при волнении происходит перемешивание масс воды, процесс замерзания затягивается. При спокойной же воде для смерзания кристаллов в монолитный ледяной покров достаточно одной безветренной морозной ночи.

При анализе условий установления ледостава необходимо принимать во внимание отличие процесса ледообразования и формирования ледостава.

Ледообразование – появление плавучего льда, происходит при кристаллизации воды в данном сечении в любой его точке, в том числе и на дне. Образование же ледостава – сплошного ледяного покрова, может происходить не только за счет замерзания воды на поверхности, но в том числе и за счет смерзания принесенного течением и всплывающих масс льда, заберегов.

По характеру формирования ледяного покрова можно выделить два типа – статический и динамический.

Статический тип замерзания характерен для участков небольших рек, небольших по площади с малыми глубинами озер, водохранилищ. Ледостав начинается заберегов, что вызвано, во-первых более быстрым выхолаживанием воды из-за небольших глубин; и во-вторых, течениями, не позволяющими льду образовываться в центре водотока. В спокойных условиях замерзания забереги обладают небольшой начальной толщиной и ровной поверхностью. По мере охлаждения водных масс за счет роста заберегов от берега к открытой части водного объекта происходит их смыкание – начинается образование отдельных ледяных перемычек на реках, как правило в местах с небольшими скоростями течения. В безветренную погоду нарастание льда может быть ускорено за счет того, что сало, плавающее в открытой части водоема, смерзается. Дальнейшее нарастание льда снизу зависит от теплоотдачи со льда в атмосферу, покрывает ли снег ледяной покров, а так же от физических свойств воды.

При динамическом типе формирования ледостава за счет интенсивного перемешивания остывание происходит по всей глубине, что приводит к переохлаждению всей толщи воды. Общее количество образующегося при этом донного и внутриводного льда может быть весьма значительным, временами даже превышающим объемы поверхностного льда. Скопления донного льда могут увеличивать интенсивность ледохода, всплывая на поверхность из-за притока тепла от ложа. Смерзание шуги, образований из осколков заберегов, сала, снежуры, всплывшего льда приводит в итоге к образованию сплошного ледяного покрова. Данный тип характерен для участков рек с быстрым течением. Продолжительность периода от первых ледовых образований до установления ледостава удлиняется за счет воздействия течения и ветрового перемешивания, которые усложняют образование ледостава.

После обработки материал, полученного экспериментальным путем, Н.М. Сокольниковым для прямолинейных участков потока с глубинами не более 4-5 м и скоростями от 0,2 до 2 м/с при отсутствии интенсивного ледохода была получена зависимость вида

$$b_3 = -a \left(\frac{H+1}{uH} \right) \sum t, \quad (1.2)$$

где b_3 - ширина заберегов, м;

H - средняя глубина под заберегами, м;

u - поверхностная скорость течения у кромки заберега, м/с;

$\sum t$ - сумма отрицательных средних суточных температур воздуха;

a - эмпирический коэффициент.

Согласно методике В.А. Рымши и Р.В. Донченко, длительность установления ледостава определяется отношением отдачи тепла с поверхности воды в атмосферу и интенсивностью ее турбулентного перемешивания. Данное соотношение характеризуется величиной P_z – количеством теплоты, выделившимся при кристаллизации переохлажденной воды в 1 см^3 на глубине z , и определяемым по формуле:

$$P_z = \frac{S}{\sqrt{\lambda_T m}} \left(\frac{\text{ch}[(H-z)/\sqrt{\lambda_T m}] - k \text{ch}(z/\sqrt{\lambda_T m})}{\text{sh}(H/\sqrt{\lambda_T m})} \right), \quad (1.3)$$

где S - теплоотдача с поверхности воды;

λ_T - коэффициент турбулентной теплопроводности

m - эмпирический параметр, являющийся отношением температуры переохлажденной воды к теплоте, выделяемой при ее кристаллизации;

h - глубина потока;

z - переменная глубина потока, отсчитываемая от поверхности

k - коэффициент, характеризующий отношение прихода тепла через дно водоема (Q_d) к теплоотдаче с водной поверхности (S)

Как правило, значение Q_d мало, следовательно, коэффициентом k , а также содержащим его вычитаемым в числителе можно пренебречь.

Для поверхностного слоя воды – z , стремящегося к нулю, формула (1.3) с достаточной степенью точности принимает вид:

$$P_0 = \frac{S}{\sqrt{\lambda_T m}}. \quad (1.4)$$

Распределение коэффициента P_z по глубине в зависимости от коэффициента турбулентной теплопроводности λ_T приведено на рисунке ниже:

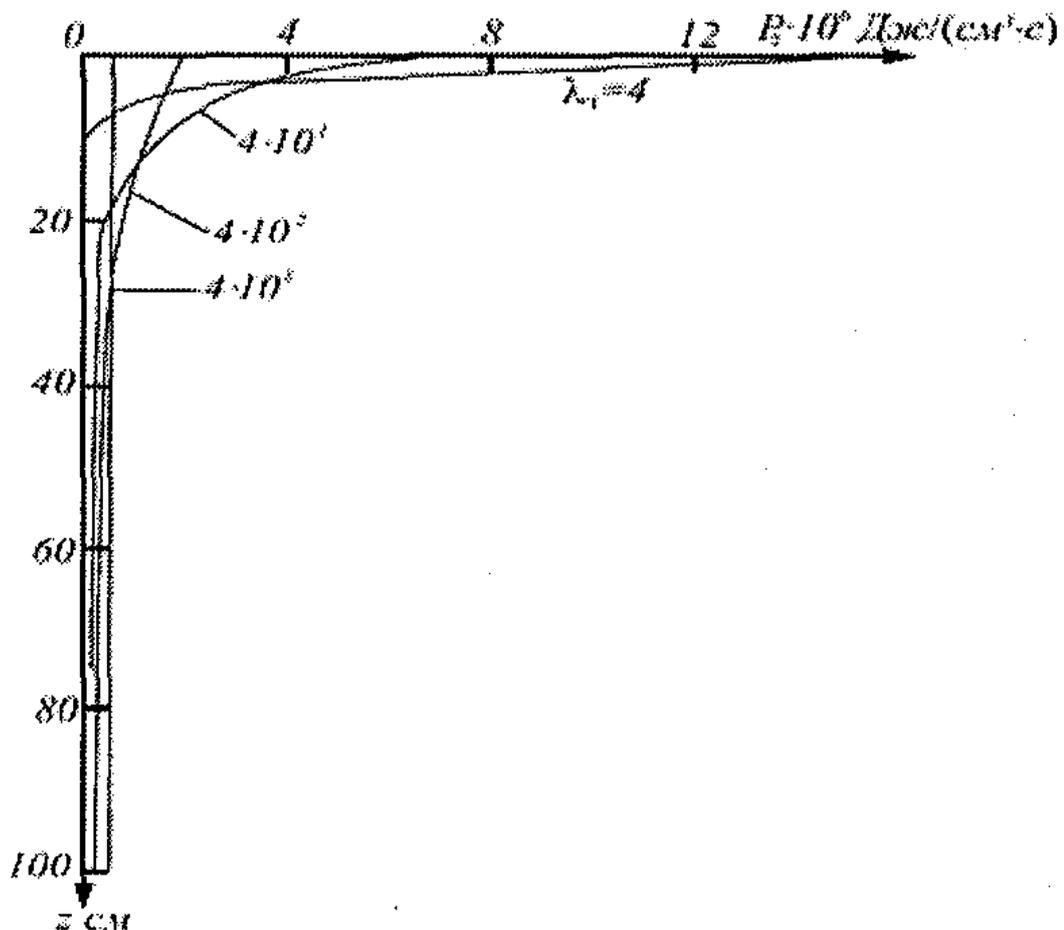


Рис. 1.1. Распределение теплоты P_z , выделяющейся при кристаллизации воды, по глубине z для различных значений коэффициента турбулентной теплопроводности λ_T .

Из данного рисунка, видно, что при относительно слабом перемешивании воды – значениях λ_T меньше единицы, $P_0 \approx S$, при кристаллизации воды основное количество тепло выделяется в поверхностном слое. То есть замерзание водного объекта происходит по статическому типу – на поверхности образуются забереги, происходит их смыкание. При интенсивном перемешивании воды $-\lambda_T$ больше единицы, $P_0 \ll S$, распределение теплоты P_z приближается к равномерному, что отвечает образованию донного и внутриводного льда по всей глубине. При этом замерзание водотока может иметь затяжной характер.

Если представить уравнение (1.4) следующим образом:

$$\alpha = \frac{P_0}{S}, \quad (1.5)$$

где α – доля теплоотдачи с водной поверхности, в результате которой образовался поверхностный лед, то для средней интенсивности образования внутреннего льда в водном потоке можно записать:

$$I_z = (1 - \alpha) \frac{S}{Lz}, \quad (1.6)$$

где L – удельное тепло ледообразования, равное $33.3 \cdot 10^4$ Дж/кг.

Если взять интервал времени, равный 1 суткам, то уравнение (1.6) принимает вид:

$$I_h = 0,2595(1 - \alpha) \frac{S}{h}, \quad (1.7)$$

По данным Р.А. Нежиховского, на реках, протекающих в пределах от 58 до 62° северной широты – а сюда входит и интересующий нас регион, потери тепла с водной поверхности в конце осени и начале зимы можно рассчитать с достаточно высокой точностью по формуле:

$$S = -24.23\bar{t}_2, \quad (1.8)$$

где S - среднесуточные потери тепла, Вт/м²;
 \bar{t}_2 - среднесуточная температура воздуха, °С.

Подставив формулу (1.8) в (1.7), получаем:

$$I_z = -6,29(1 - \alpha) \frac{\bar{t}_2}{z}. \quad (1.9)$$

Доля поверхностного теплового потока, приводящего к образованию поверхностного льда может быть рассчитана следующим образом:

$$\alpha = -0,0004 \frac{\bar{t}_2}{A}, \quad (1.10)$$

где A - коэффициент турбулентного обмена, который рассчитывается по формуле В.М. Макавеева:

$$A = \frac{gzV}{C(0.7C + 6)}, \quad (1.11)$$

где g - ускорение свободного падения, м/с²;
 V - скорость течения, м/с;
 C - коэффициент Шези.

Расчет нарастания льда

Как упоминалось ранее, основным фактором процесса нарастания льда является обмен теплом воды с окружающей средой.

В 1931 году О. Девик заложил основное направление разработки формул для вычисления увеличения толщины льда, но из-за сложности определения некоторых параметров оно не получило широкого распространения. При отсутствии снега на льду и теплопритока от дна – наиболее простой случай, скорость нарастания ледяного покрова может быть выражена уравнением:

$$\frac{dh_{\text{л}}}{dT} = \frac{1}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}} (S_{\text{л}} - S_{\text{в}}), \quad (1.12)$$

где $h_{\text{л}}$ - толщина льда;

T - время нарастания льда;

$L_{\text{л}}$ - скрытая теплота ледообразования;

$\rho_{\text{л}}$ - плотность льда;

$S_{\text{л}}$ - поток тепла от поверхности льда в атмосферу;

$S_{\text{в}}$ - приток тепла от воды к нижней поверхности льда.

Если принять, что градиент температуры в толще льда постоянный, $S_{\text{в}}=0$ (теплопотери покрываются тепловыделением при ледообразовании), температура воды у нижней поверхности льда равно нулю, а так же предположив, что увеличение толщины льда происходит скачкообразно, то применив метод конечных разностей, получим:

$$\Delta h_{\text{л}} = \frac{\lambda_{\text{л}}}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}} \left(\frac{-t_{\text{л}}}{h_{\text{л}}} \right) \Delta T, \quad (1.13)$$

где $\lambda_{\text{л}}$ - коэффициент теплопроводности льда

Подставив значения $\lambda_{\text{л}} = 0,0052 \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; $L_{\text{л}} = 80 \text{ кал}/\text{г}$; $\rho_{\text{л}} = 0,91 \text{ г}/\text{см}^3$, получим:

$$\Delta h_{\text{л}} = 6,2 \frac{\sum_{T_1}^{T_2} -t_{\text{л}}}{h_{\text{л}}}, \quad (1.14)$$

Но, так как сведения о температуре поверхности льда отсутствуют, указанное выражение не удастся использовать на практике. Для получения расчетных формул используют три метода:

-поиск эмпирических связей отдельных факторов, определяющих увеличение толщины льда за интервал времени;

-составление уравнений подходящего к нижней поверхности льда и уходящего в атмосферу потока тепла – при решении совместно данных уравнений исключается неизвестная температура льда;

-температура поверхности льда определяется через уравнение теплового баланса.

В эмпирических связях в качестве косвенного фактора, влияющего на прирост льда, чаще всего используется сумма отрицательных температур воздуха, а формулы в общем имеют вид:

$$h_{\text{л}} = \alpha \left[\sum (-t_2) \right]^n, \quad (1.15)$$

где α и n находят на основании зависимостей $h_{\text{л}}$ и $-t_2$. Но коэффициенты сильно различаются в различных физико-географических условиях.

При использовании второго метода поток тепла, уходящего в атмосферу с поверхности льда, чаще всего выражают как

$$S = \alpha(t_{\text{л}} - t_2), \quad (1.16)$$

Принимая, что теплоприток от водоема равен нулю, то есть рассматривая поток тепла через ледяной покров, существующий только за счет теплоты ледообразования, получена расчетная формула следующего вида:

$$h_{\text{л}} = \sqrt{\left(h_{\text{н}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha} + \frac{h_{\text{с}}\lambda_{\text{л}}}{\lambda_{\text{с}}}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{л}}(-\bar{t}_2)}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}T} - \left(\frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha} + \frac{h_{\text{с}}\lambda_{\text{л}}}{\lambda_{\text{с}}}\right), \quad (1.17)$$

где α - коэффициент теплообмена льда с атмосферой, определяемый в зависимости от средней за расчетное время скорости ветра ω – например, по формуле Карпентера: $\alpha = 1,25(1 + 3,1\omega)$;

$\lambda_{\text{л}}$ - коэффициент теплопроводности льда;

$\lambda_{\text{с}}$ - коэффициент теплопроводности снега;

- h_c - толщина снега на льду;
- h_l - толщина льда;
- h_n - начальная толщина льда;
- T - продолжительность расчетного интервала.

При начальной толщине льда, равной 0 и отсутствию снега на льду формула принимает следующий вид:

$$h_l = \sqrt{\left(\frac{\lambda_l}{\alpha}\right)^2 - \frac{2\lambda_l(-\bar{t}_2)}{L_l\rho_l}T} - \left(\frac{\lambda_l}{\alpha}\right). \quad (1.18)$$

2.2 Особенности замерзания рек в различных условиях

Сооружение плотин и мостов на водотоках вызывает преобразование гидравлического режима рек (в том числе и ледового) как выше, так и ниже по течению. На изменение процессов вскрытия и замерзания рек, а так же на продолжительность ледовых явлений влияют изменения морфологических и гидравлических характеристик.

На формирование ледяного покрова в нижних бьефах гидроузлов оказывают влияние гидравлические условия, потери тепла, расход и температура воды, поступающей в нижний бьеф. По длине от нижнего бьефа наблюдается существенная смена характера формирования ледостава. При большой регулирующей способности водохранилища длина зоны влияния плотины ГЭС может достигать 100-300 км. Неустойчивым ледовым режимом отличается участок нижнего бьефа, находящийся в зоне перемещения кромки льда. Под влиянием регулирования стока на данном участке ледостав чередуется с шугоходом и ледоходом в зимний период. На участках с повышенными скоростями возможно образование зажоров и заторов, так как массы шуги и льда заносятся под ледяной покров, что вызывает стеснение

русла. При наличии больших уклонов и скоростей образуются целые каскады зажоров различной мощности. Формирование зажоров происходит при диапазоне температур от -2 до -10 °С. При морозе сильнее -10 градусов шуга будет просто смерзаться, и больших зажоров формироваться не будет. Так же на вероятность формирования зажоров влияет скорость течения воды – наиболее благоприятная для зажорообразования 0,5-1,6 м/с: при малых скоростях река замерзает без зажоров путем смыкания заберегов, при больших – внутриводный лед не может всплыть и сформировать течение шуги.

2. Основные климатические характеристики Северо-Западного региона

2.1 Общая характеристика рек бассейна

Расположенный в северной части Восточное-Европейской равнины, Северо-Западный федеральный округ имеет такую характерную особенность рельефа, как сочетание равнинных территорий с отдельными возвышениями. Узкие поперечные речные долины разделяют Северный, Приполярный и Полярный Урал, ограничивающие округ с востока. Для части Восточно-Европейской равнины, на которой расположена северная часть округа – Кольский полуостров и Карелия, характерны плоские междуречья и моренно-холмистым рельефом, что объясняется интенсивной деятельностью ледника в прошлом. На Кольском полуострове расположен крупный горный массив – Хибины. Реки округа принадлежат бассейнам Балтийского моря Атлантического океана и Белого и Баренцева морям Северного ледовитого океана.

Густота ручной сети региона $0,7 \text{ км/км}^2$, заболоченность от $1,14\%$ в Санкт-Петербурге до $39,94\%$ в Мурманской области, озерность от $0,43\%$ в Республике Коми до $19,96\%$ в Республике Карелии. Среднемноголетний речной сток $607,4 \text{ км}^3/\text{год}$, наименее обеспечена ресурсами Псковская область ($12 \text{ км}^3/\text{год}$), наиболее – Архангельская ($387,2 \text{ км}^3/\text{год}$).

На территории Северо-Западного федерального округа расположены бассейны девяти крупнейших рек России – Северной Двины, Печоры, Невы, Мезени, Онеги, Нарвы, Немана, а так же бассейны рек, впадающих в Ладожское озеро. Часть рек имеет судоходное значение.

Сток рек Северо-Западного региона зарегулирован многочисленными водохранилищами, в подпоре многих водохранилищ расположены крупные озера.

2.1.1 Рельеф и геология исследуемого участка

Являясь правым притоком реки Луги, р относится к бассейну Балтийского моря, расположенному в пределах $67^{\circ}40'$ - $55^{\circ} 36'$ с.ш и $27^{\circ}20'$ - $37^{\circ}57'$ в.д и занимает площадь 396 тыс. км².

Бассейн р. Луги расположен на Ордовикском плато, ранее называвшимся "Силурийским". Плато протягивается в широтном направлении от р. Сяси на востоке до западной границы Ленинградской области и далее на территорию Эстонии и представляет собой плоскую возвышенную равнину, сложенную устойчивыми карбонатными породами ордовикской системы. Плато разделяется на два обособленных участка: западный, наиболее приподнятый и обширный, называемый Ижорской возвышенностью (абсолютные высоты до 168 м, по другим источникам - до 176 м) и восточный – Волховское плато (между реками Мгой и Волховом) с отметками поверхности до 80 м абсолютной высоты.

2.1.2 Почвенный покров

Расположение территории в зоне холодного и влажного климата и преобладания лесной, преимущественно хвойной растительности, объясняет подзолообразование и заболачивание – основные процессы почвообразования.

На глубину промерзания оказывает влияние рельеф местности, а также интенсивность нарастания отрицательных температур воздуха, наличие снежного и растительного покровов, увлажненность почвы и ее механический состав.

Оттаивание почвы происходит сверху и до схода снежного покрова происходит медленно, а затем ускоряется под влиянием солнечных лучей. На болотах почва может быть промерзшей и летом.

2.1.3 Растительность

Главным образом состав местных лесов представлен мелколиственными породами: березой, сосной, ольхой, так же есть таежные полосы растительности – еловые и сосновые леса, сфагновые торфяно-осоковые и кустарниковые болота совершенно не облесённые или с редкостной сосной.

2.1.4 Климат

Средняя годовая температура воздуха на территории Северо-Запада колеблется от 2°С в Северо- Восточной части до 4,5 °С в Южной. Самым теплым месяцем в году является июль, самыми холодными – январь и февраль.

В среднем годовой объем осадков на большей части районов составляет 550-750 мм. Распределение в большой степени зависит от орографической особенности местности и подстилающей поверхности.

На испарение затрачивается 50-70% атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосбора, поэтому оно является одним из основных расходных элементов водного баланса.

Тесно связанный с особенностями распределения барических центров, ветровой режим так же зависит и от общей циркуляции атмосферы. Преобладают ветры южного, юго-западного и западного направления.

Для оценки климатических условий исследуемой территории использовались показания метеостанции «Белогорка», расположенной в 15,5 км на северо-восток от интересующего участка. На данной метеостанции наблюдения ведутся с 1 февраля 2005 года. Минимальная наблюдаемая температура -34°C , максимальная $33,5^{\circ}\text{C}$, температурная амплитуда $67,5^{\circ}\text{C}$.

2.1.5 Описание реки Оредеж и участка наблюдений

Начало реки Оредеж – в Кикеренских болотах. Река сильно меандрирует, но общее направление северо-восточное. Длина реки 201 км, общая площадь водосбора 3400 км². Площадь водосбора в районе наблюдений составляет 192 км². Река Оредеж впадает в реку Лугу на 194 км от устья последней.

Отметка истока-112,6 м БС, устья-31,6 м., в результате общее падение реки составляет 81 м.

Прилегающая местность-слабовсхолмлённая на пологом юго-восточном склоне Ижорской возвышенности, занята смешанным лесом и сельскохозяйственными угодьями.

Долина реки неясно выражена, ширина меняется от 10 м у д. Даймище до 1,5 км у с. Рыбицы. Преобладающая ширина 150-200 м. В районе проведения работ долину реки можно отнести к V-образной

На всем протяжении русла наблюдается зарастание водной растительностью. Дно песчаное с отдельными валунами, подвержено незначительной деформации - перемещение песчаных гряд. Имеются небольшие острова. Пойменная терраса местами заболочена. Коренные берега в основном пологие, но местами крутые обрывистые. Ширина реки варьируется от 15 до 30 м. Средняя глубина 1,0-1,5 м. Скорости течения на плесах 0,2-0,3 м/с, на перекатах до 1 м/с.

В середине XX века на реке был создан каскад гидроэлектростанций, но все станции были упразднены в 1973 году.

Река имеет смешанное питание. В верхнем течении существенна роль карстовых вод. Половодье приходится на апрель-май и за его время проходит 55-60% годового стока.

Суточные колебания уровня воды незначительны, однако во время обильных дождей наблюдается затопление поймы из-за резкого повышения уровня. Уровни воды при весеннем половодье превышают меженные на 1-2 м в верхнем и среднем течении.

В зимнюю межень, начинающуюся как правило в первой декаде декабря, сток осуществляется за счет подземного питания. Вызванное оттепелями таяние снега, приводящее к паводкам, нарушает порядок питания в зимнюю межень. Минимальные расходы воды в зимнюю межень, как правило, являются наименьшими в году.



Рисунок 2.1 Ортофотоплан участка реки Оредеж 11 февраля 2015 г.

Годовое испарение с водной поверхности 522 мм, с суши - – 435 мм.

Высота снега в поле от 19 до 71 см, средняя за зиму – около 45 см. В лесу – 14-63 см, средняя- 36 см. Годовые осадки могут достигать 708 мм.

На прямолинейном участке р. Оредеж были оборудованы водомерный пост и гидроствор. Левый берег крутой, густо поросший кустарником и лесом. Правый берег – плоская пойма шириной до 200 м, поросшая луговой растительностью и кустарником. Коренной берег обрывистый. Ширина реки на участке наблюдений 20-25 м, средняя глубина 1,0-1,2 м.

2.2 Закономерности замерзания рек региона

Ранее р. Оредеж замерзала практически ежегодно, за исключением теплых зим. Ледообразование начиналось преимущественно с третьей декады октября по третью декаду ноября. В конце зимы толщина льда на

реке достигает 20-25 см, максимальная 50 см. Из-за малой интенсивности весеннего ледохода образование заторов не характерно. Зажоры образуются, как правило, в период установления ледостава. Подъемы уровней, вызываемых зажорами, не превышают максимальных уровней весеннего половодья.

В настоящее время река замерзает так же практически ежегодно, Однако ледяной покров держится крайне непродолжительное время.

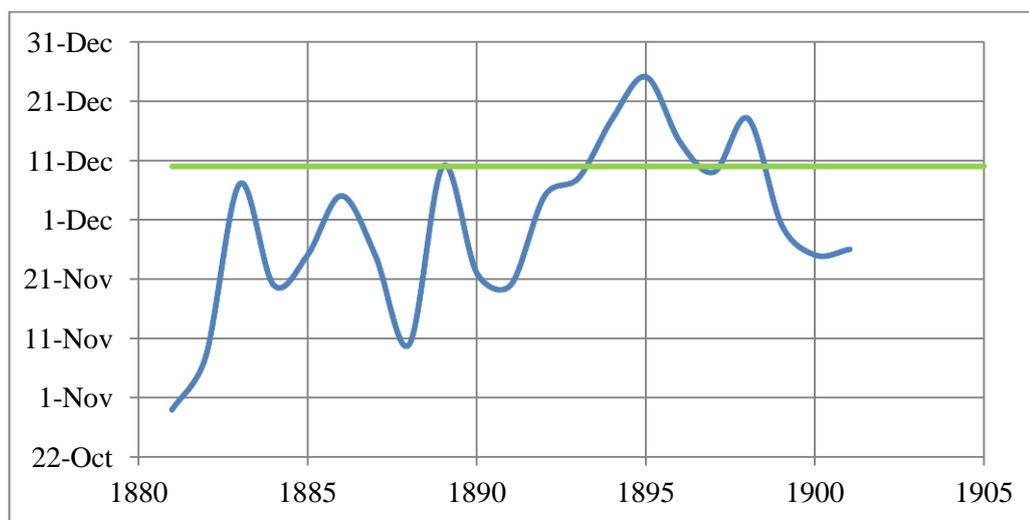


Рисунок 2.2 Даты наступления осеннего ледостава на р. Оредеж. 1881-1901 гг и среднемноголетняя дата

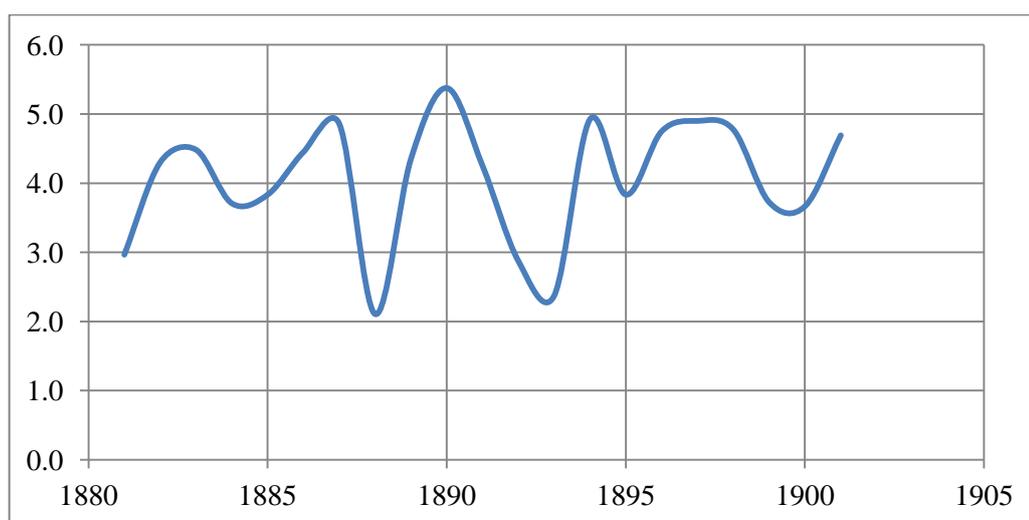


Рисунок 2.3 Среднегодовая температура воздуха в г. Санкт-Петербурге 1881-1901 гг

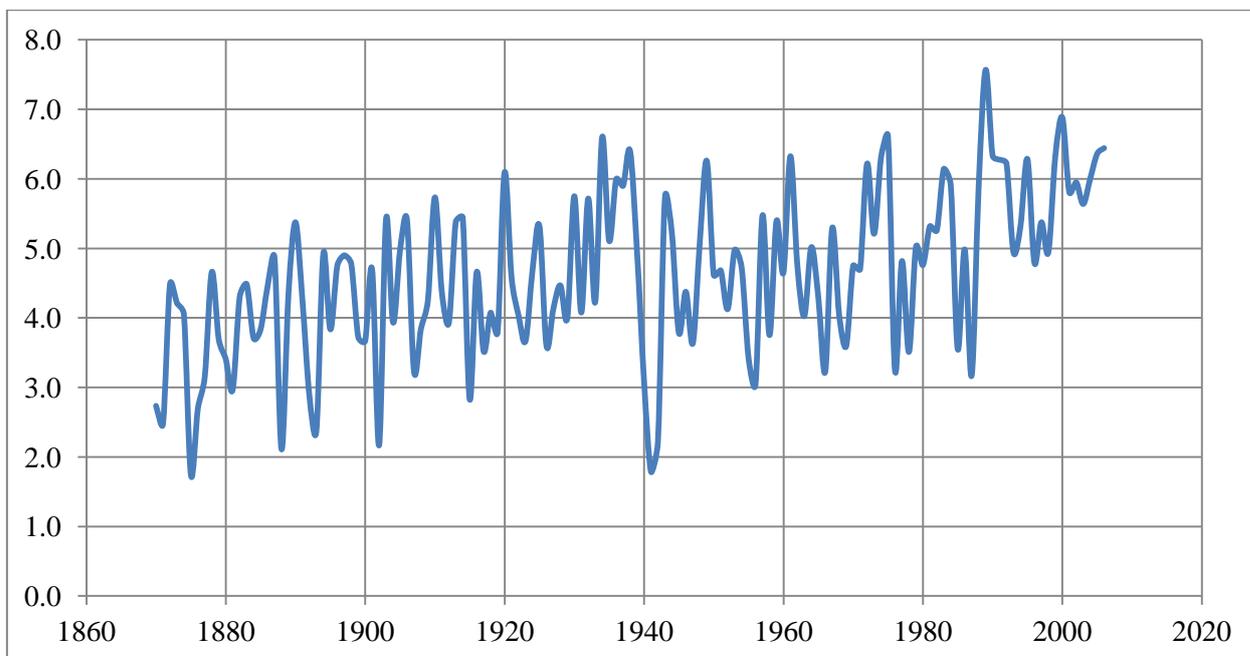


Рисунок 2.4 Среднегодовая температура воздуха в г. Санкт-Петербурге
1870-2006 гг

Длина реки Невы 74 метра. Вытекает она из Ладожского озера – Шлиссельбургской губы, и впадает в Невскую губу Финского залива. Река делится на множество протоков и рукавов.

Систематически измерения расхода воды в реке Неве проводятся с 1900 г. Среднегодовой расход воды 2500 м³/с. Максимальный расход воды бывает в июне – в этом месяце уровень воды в Ладоге достигает наивысшего положения. В годы с маловодной весной и дождливым летом максимальные расходы смещаются на август-сентябрь. Минимальные расходы наблюдаются в начале зимы – когда появляется торосистый ледовый покров, замерзает Шлиссельбургская губа, а живое сечение реки на отмели перед истоком резко сокращается из-за скопления шуги.

Замерзание реки начинается с образования салового льда, после чего следует осенний ледоход, состоящий из разнообразного ледяного материала – сало и шуга, Ладожские льдины, всплывший донный лед.

Осенний ледоход завершается ледоставом в воронке Большой Невы, после чего постепенно замерзают и вышерасположенные участки.

В целом замерзание Невы происходит снизу вверх по течению. При густом ледоходе с Ладоги в местах со сравнительно слабым течением верхней половины реки образуются перемычки из-за скапливания льда, из-за чего замерзание нижерасположенного участка может затянуться на две-три недели, так как прекращается поступление озерного льда.

Такой процесс замерзания, с сокращением сечения реки из-за увлечения течением льдин под образовавшийся ледяной покров и образованием торосов из-за скопления льдин на поверхности льда приводит к образованию зажоров. Причем происходит это при слабых морозах, так как если мороз силен, льдины прочные, они не ломаются и легко смерзаются, и лишь небольшую часть утягивает под ледяной покров. Так же образованию зажоров способствует шуга. Тело зажора может быть длиной от 2 до 16 км, а толщину от 1 до 8 м.

Вскрытие реки Невы происходит сверху вниз по течению, что приводит к образованиюзаторов.

3. Исследование ледовых явлений в верховьях р. Оредеж

3.1 Материалы наблюдений

Как было указано выше, ранее на реке Оредеж был выстроен каскад ГЭС. Позднее станции были упразднены, но плотины остались. Наблюдаемый участок находится между двумя плотинами, река находится в подпоре, но регулирование стока в зимнее время практически не проводится.

В 2014 году на базе практики РГГМУ был установлен автоматический гидропост – комплекс АГК, состоящий из гидростатического уровнемера, поплавкового уровнемера, барботажного уровнемера и осадкомера. Установка одновременно трех различных уровнемеров позволяет делать более точные измерения, а так же рассмотреть плюсы и минусы каждого. Был настроен удаленный доступ, что позволяет постоянно получать свежие данные с гидрологического поста.

3.2 Особенности ледовых явлений участка реки у базы практики РГГМУ

Процесс становления ледостава различается на Неве и на Оредеж. На реке Оредеж характерно появление заберегов которые постепенно срастаются или практически полностью равномерно на интересующем участке, либо формируются перемычки, от которых потом происходит «расползание» ледяного покрова. На Неве, как было описано выше, формируются торосы, зажоры из-за озерного льда, вытесненного с Ладоги.

Среднемноголетний расход в реке Нева в 625 раз больше среднегодового расхода реки Оредеж. Больше и скорости течения. Однако ледяной покров на Неве формируется намного быстрее – на приведенных ниже фотографиях видно, что ледостав установился за 4 дня – с 30 ноября по 3 декабря. На реке Оредеж же, ни за 4 дня, ни за десять – с 30 ноября по 9 декабря, становление ледяного покрова так и не произошло.



Рисунок 3.1 Ледовая обстановка на р. Неве 30.11.2018 г



Рисунок 3.2 Ледовая обстановка на р. Оредеж 30.11.2018 г



Рисунок 3.3 Ледовая обстановка на р. Нева 01.12.2018 г



Рисунок 3.4 Ледовая обстановка на р. Оредеж 01.12.2018 г



Рисунок 3.5 Ледовая обстановка на р. Нева 03.12.2018 г



Рисунок 3.6 Ледовая обстановка на р. Оредеж 03.12.2018 г



Рисунок 3.7 Ледовая обстановка на р. Оредеж 05.12.2018 г.



Рисунок 3.8 Ледовая обстановка на р. Оредеж 07.12.2018 г



Рисунок 3.9 Ледовая обстановка на р. Оредеж 09.12.2018 г



Рисунок 3.10 Ледовая обстановка на р. Оредеж 11.12.2018 г

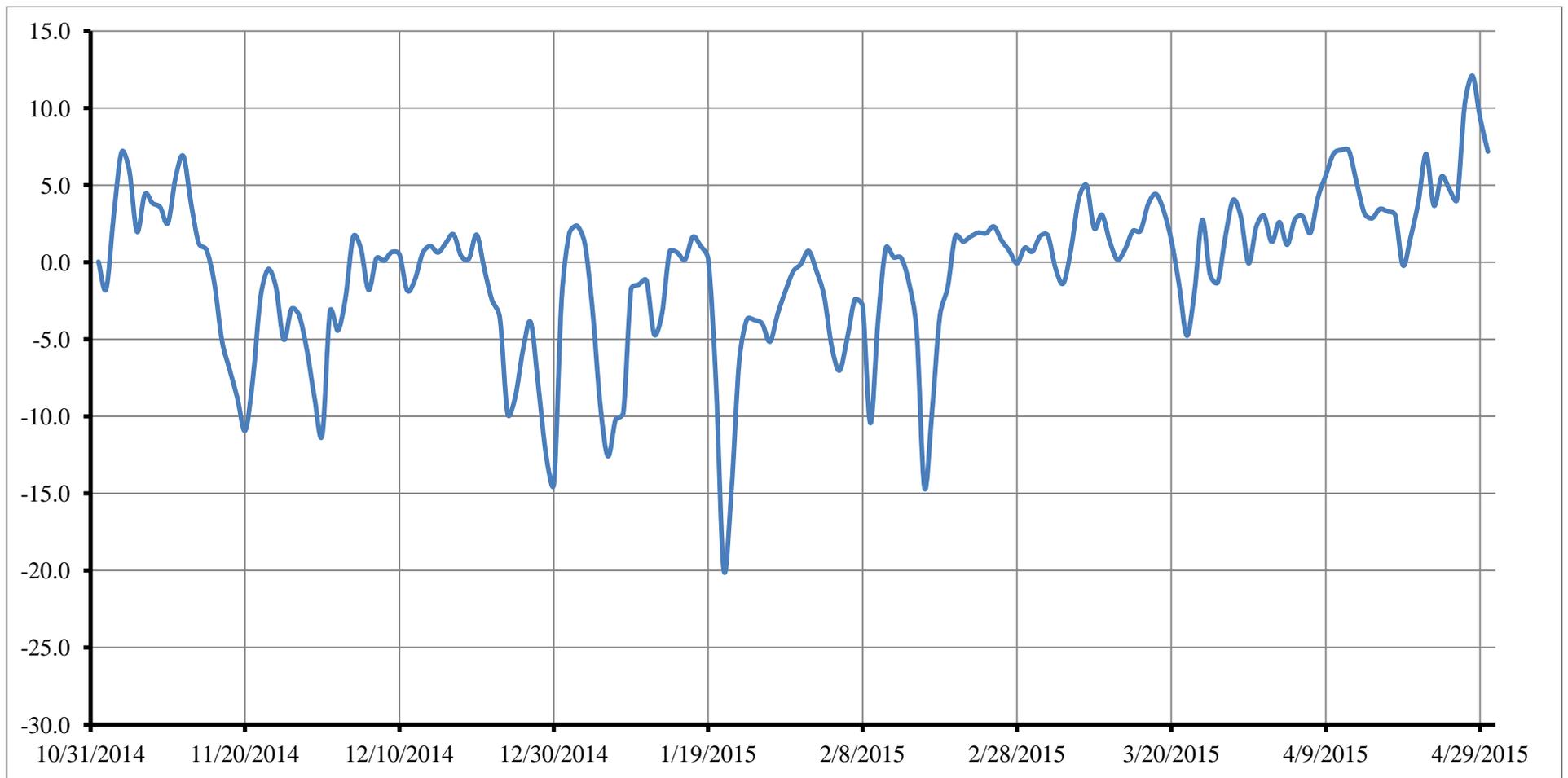


Рисунок 3.11 График хода среднесуточной температуры воздуха 2014-2015 гг

2014-2015 гг.

Образование ледового покрова происходило путем формирования заберегов и их частичного смыкания – формирования перемычки и движения кромки льда вверх по течению, но окончательного становления не произошло.

01.12 наблюдается образование первичного правобережного заберега по всей длине исследуемого участка реки, шириной порядка $1/3$ русла, но уже к 05.12 он стаивает.

Повторное образование заберегов наблюдается 23.12 у правого берега, а 25.12 произошло частичное смыкание. 29 декабря наблюдается полынья в верхней по течению части исследуемого участка, с первого января начинается активное стаивание ледовых образований с образованием остаточного заберега у правого берега. В ночь на 06.01 повторно происходит частичное смыкание заберегов – образование перемычки, после чего наблюдается постепенное продвижение кромки льда вверх по течению, пока 08.01 не остается небольшая полынья. С 09 января начинается стаивание льда. После чего в течение нескольких дней можно наблюдать движение кромки льда то вверх, то вниз по течению вплоть до почти полного очищения зеркала воды от ледовых образований 20.01 и формирования очередной перемычки 21.01, и повторения данной ситуации еще несколько раз. Окончательного становления ледостава так и не произошло.

Во время становления ледового покрова не наблюдается повышение уровня воды, что говорит об отсутствии шуги.

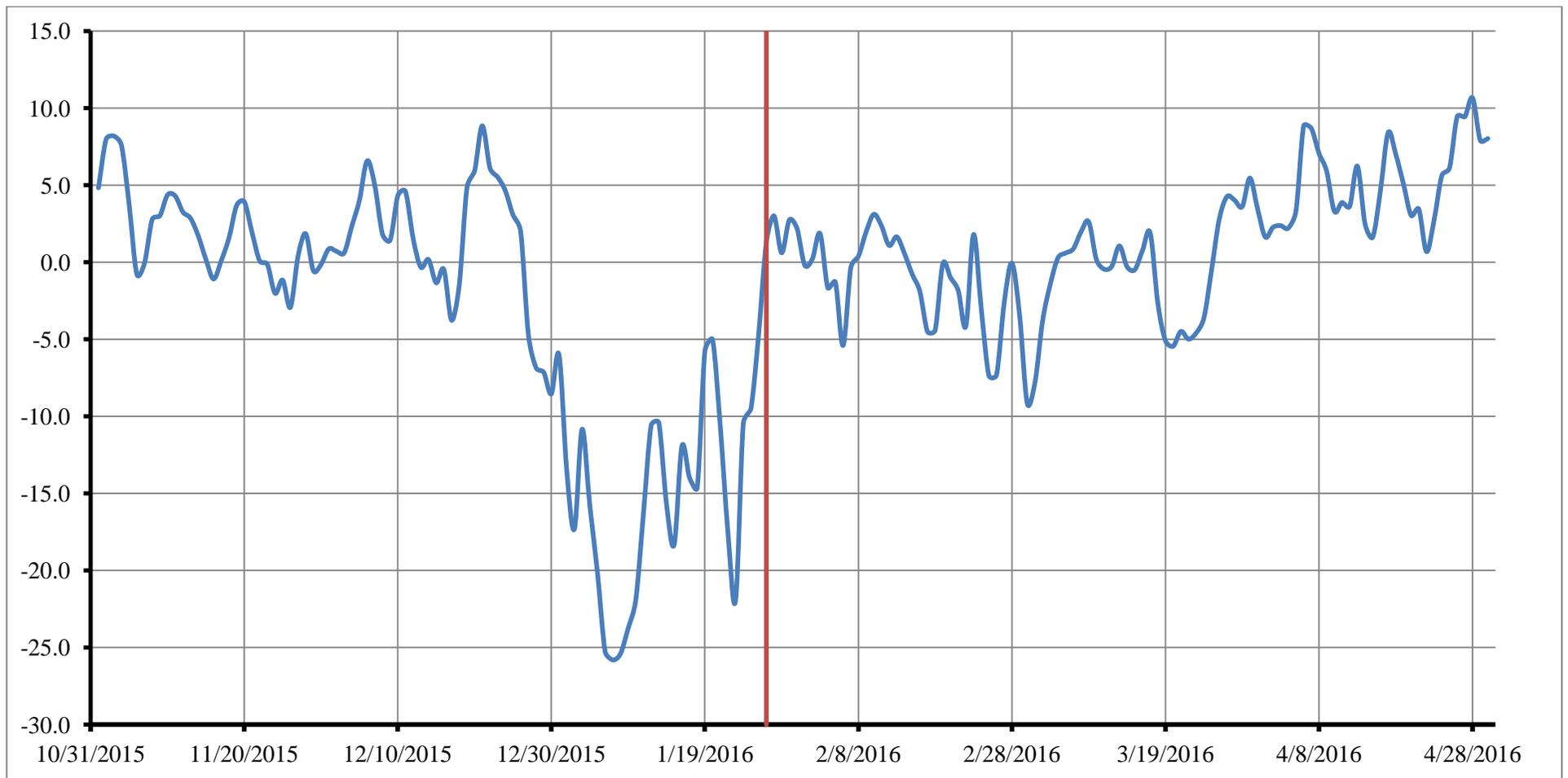


Рисунок 3.12 График хода среднесуточной температуры воздуха 2015-2016 гг. Красной линией отмечена дата окончания ледостава.

2015-2016 гг.

Образование ледового покрова происходило путем формирования заберегов и их смыкания

28 декабря наблюдается формирование первичных ледовых образований на растительности в нижней по течению части исследуемого участка реки. На следующий день заметен активный рост правобережного заберега. К первой января забереги занимают практически всю ширину русла, протока расположена у левого берега. К 6 января устанавливается ледостав – в этот день и на следующий наблюдается минимум температур в данную зиму, $-25,2^{\circ}$ и $-25,8^{\circ}$ соответственно. Ледостав держится до 26.01, а 27 января начинается образование полыньи и к 19 февраля русло практически полностью очищено от ледовых образований.

Во время становления ледового покрова не наблюдается повышение уровня воды, что говорит об отсутствии шуги.

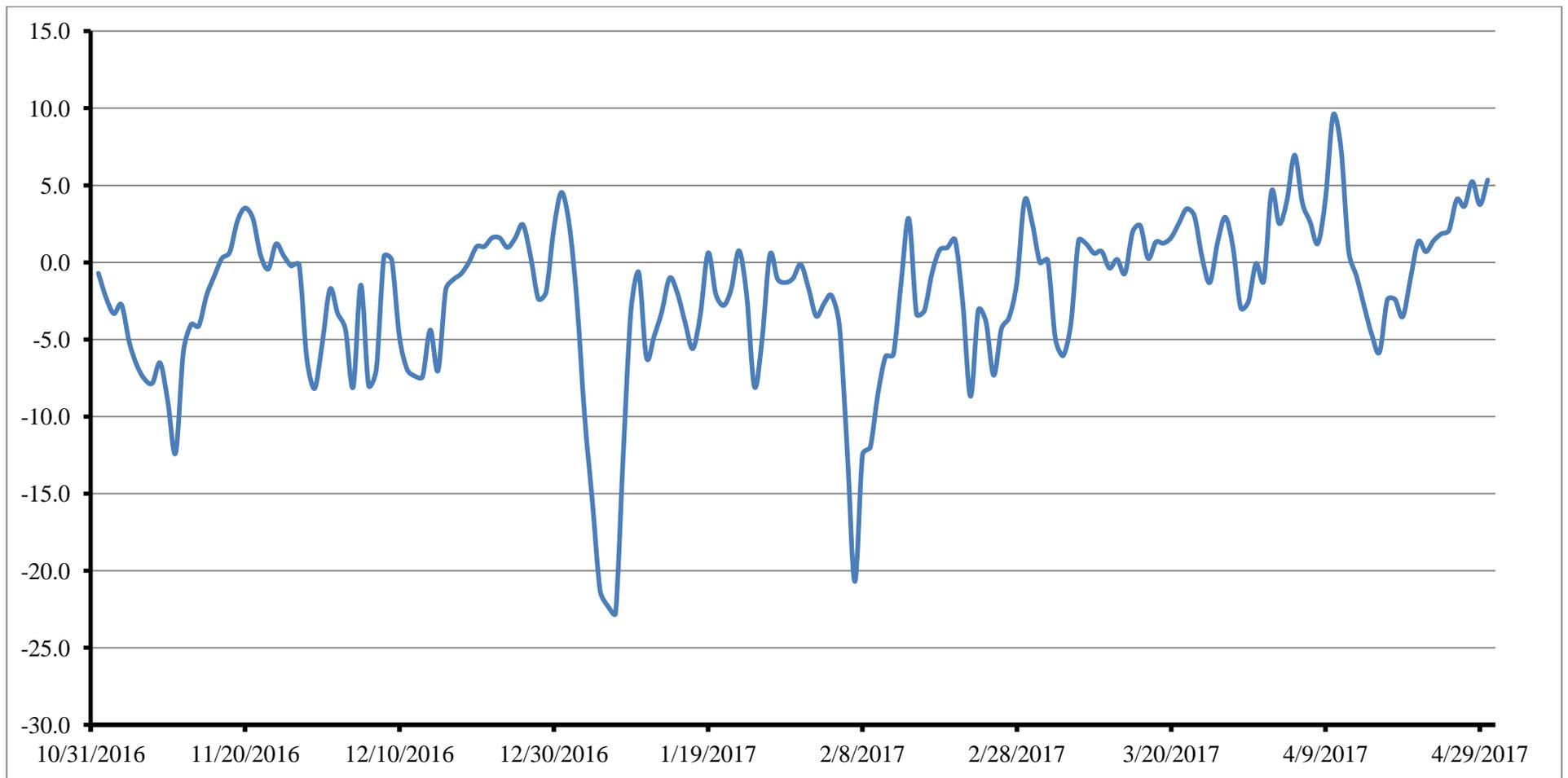


Рисунок 3.13 График хода среднесуточной температуры воздуха 2016-2017 гг

2016-2017 гг.

Образование ледового покрова происходило путем формирования заберегов и их смыкания, но окончательного становления не произошло.

Образование первичных заберегов у правого берега наблюдается 29 ноября, у левого – 07 декабря. Так же 07.12 наблюдается повышение уровня воды, что может быть связано с шугоходом.

На следующий день уровень воды снижается, наблюдается частичное стаивание заберегов. После небольших колебаний по ширине к третьей декаде декабря русло реки полностью освобождается от ледовых образований.

Температура воздуха понижалась с -2.6° 02 января до -21.3 05 января, что сопровождалось повторным образованием первичных заберегов 04.01 у правого берега и 05.01 – у левого. Заметен подъем воды, вызванный шугоходом, активный рост заберегов. С 05 по 07 января наблюдается минимум температур воздуха за данную зимнюю межень – до минус 22.8° 07.01. Смыкания заберегов не произошло, по всей длине наблюдаемого участка видна протока, а в верхней по течению части – полынья, которые уже 09.01 начали увеличиваться в размерах, а 10.01 появились промоины вдоль берегов. 13 января промоины вдоль берегов покрылись льдом. Далее снова началось постепенное стаивание ледовых образований до практически полной очистки русла к февралю.

С 06 февраля до конца месяца картина повторилась – образование заберегов сперва у правого, затем и у левого берега, их рост с суммарной шириной примерно $4/5$ ширина русла, затем постепенное стаивание.

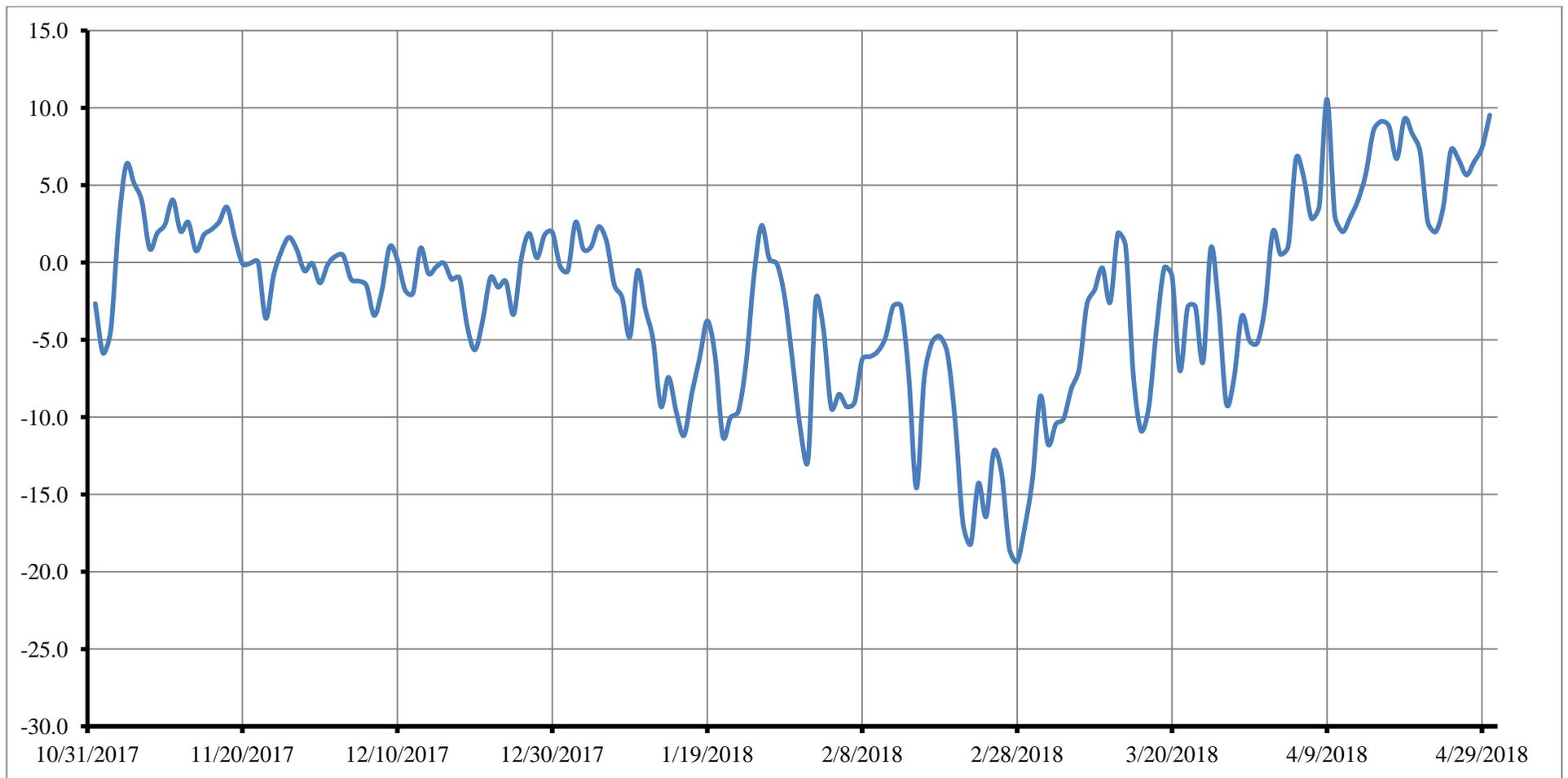


Рисунок 3.14 График хода среднесуточной температуры воздуха 2017-2018 гг

2017-2018 гг.

Образование ледового покрова происходило путем формирования заберегов и их смыкания, но окончательного становления не произошло.

Первичные забереги у правого берега наблюдались 09.01, у левого – небольшими участками с 20.01.

В течение длительного времени происходили колебания ширины заберегов. С 11.01 по 25.01 наблюдался двухнедельный период отрицательных температур с минимумом в $-11,2^{\circ}$, к концу которого суммарная ширина заберегов составила менее половины русла реки. В следующий морозный период с 29.01 по 10.03 наблюдался медленный рост заберегов с периодическим подтаиванием, при том, что температуры не превышали минус 2° . Активный рост заберегов начался 21.02, после падения температуры с минус $5,9^{\circ}$ 19.02 до минус $16,9^{\circ}$ 21.02.

К 28 февраля, в день с минимальной температурой за год $-19,4^{\circ}$, произошло частичное смыкание. В верхней по течению части исследуемого участка наблюдалась узкая полынья длиной несколько метров, которая так и не покрылась льдом. С 09.03, при температуре воздуха минус $2,7^{\circ}$ началось активное стаивание ледовых образований – верхняя граница полыньи уже находится за пределами видимого участка, ширина выросла с примерно до метра. На следующий день ото льда освободилась вся центральная часть реки, после чего остаточные забереги постепенно стаивали.

07.02 и 22-25.02 наблюдается повышение уровня воды, что может быть вызвано шугоходом.

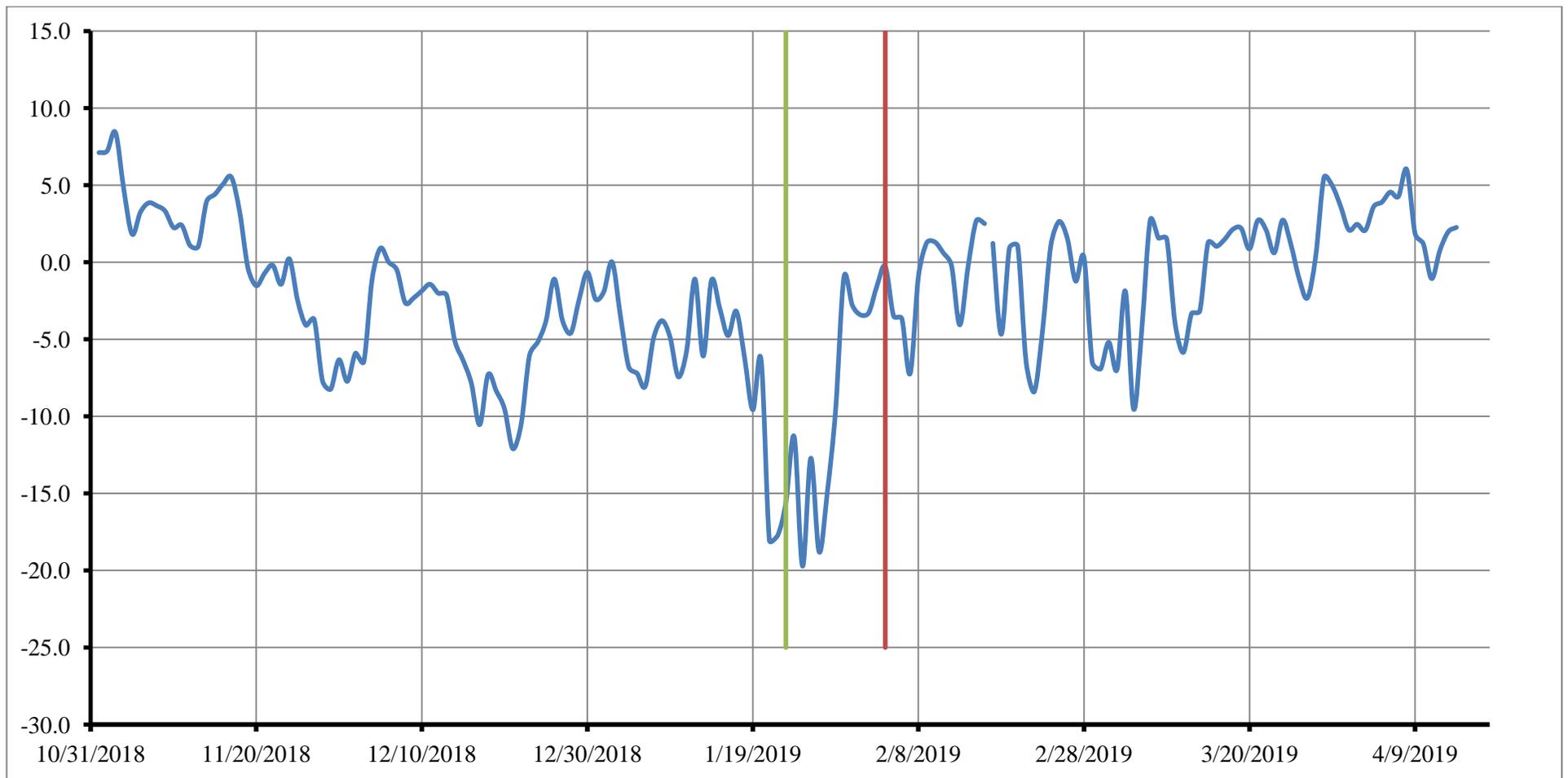


Рисунок 3.15 График хода среднесуточной температуры воздуха 2018-2019 гг. Зеленой линией отмечено начало ледостава, красной – его окончание.

2018-2019 гг.

Образование ледового покрова происходило путем формирования заберегов и их смыкания.

Первичные забереги у правого берега наблюдались 24.11, у левого – небольшими участками с 02.12.

В течение почти месяца ширина заберегов у правого берега изменялась в относительно небольших пределах, у левого – то оттаивая полностью, то формируясь вновь. 23.12 забереги занимали примерно 3/4-4/5 русла реки, однако смыкания так и не произошло – температура воздуха стала подниматься и к 31.12 большая часть русла освободилась.

Резкое падение температуры воздуха во второй половине января 2019 года (20.01 температура составляла $-6,4^{\circ}$, 21.01 уже $-18,1^{\circ}$) привело к быстрому формированию заберегов и их интенсивному росту, а 22.01 произошло полное смыкание в пределах всего наблюдаемого участка. Ледостав продержался до 04.02 – в эту дату наблюдаются первые, совсем еще небольшие проталины – температура воздуха в этот день составила $-0,3^{\circ}$. В течение следующих четырех дней большая часть русла была освобождена от ледовых образований.

Во время становления ледового покрова не наблюдается повышение уровня воды, что говорит об отсутствии шуги.

В приложении А представлены фотографии наблюдаемого участка р. Оредеж.

4. Обзор методов прогноза замерзания рек.

Прогнозы замерзания рек широко используются во многих отраслях народного хозяйства. Особенно важное значение они имеют для речного транспорта и лесосплава.

По долгосрочным прогнозам навигация планируется, а по краткосрочным – она практически завершается.

Долгосрочные прогнозы

Сроки замерзания и вскрытия рек сильно вариативны по территории и во времени. Так, на реках Восточной Сибири и Дальнего востока многолетняя амплитуда сроков замерзания и вскрытия достигает 20-30 дней, а в юго-западных районах – 70-75 дней. Для эффективного использования водных ресурсов в различных отраслях народного хозяйства необходима своевременный прогноз сроков начала ледовых явлений.

В связи с тем, что атмосферные процессы и погодные условия, оказывающие воздействие на процессы замерзания и вскрытия рек, охватывают значительные территории, на площадях до 30 тыс. км² ледовые явления на реках наступают с почти одинаковыми отклонениями от климатической нормы.

Основная задача долгосрочных ледовых прогнозов состоит в выявлении закономерностей развития атмосферных процессов, которые с определенной заблаговременностью характеризуют особенности теплообмена между подстилающей поверхностью (вода, снег-лед) и атмосферой. После чего, используя качественные или количественные показатели (индексы), необходимо составить прогностические зависимости – отклонения даты наступления ледового явления от нормы в зависимости от

индекса, характеризующего развитие атмосферных процессов в предшествующий период.

Первоначально при разработке долгосрочных прогнозов ледовых явлений использовалась типизация атмосферных процессов Г.Я. Вангенгейма. Данная типизация учитывала нюансы синоптических процессов над атлантико-европейским сектором северного полушария. Было выделено три основных типа атмосферной циркуляции – западный, восточный и меридиональный.

Западные процессы имеют несколько разновидностей, которые отличаются друг от друга в основном широтой, на которой наблюдаются зональные – с запада на восток – смещения барических образований. При западных процессах в толще тропосферы наблюдаются волны малой амплитуды, отрицательная аномалия температуры и давления в полярных, а положительная в умеренных и субтропических широтах.

Особенности восточных процессов характеризуются смещением с востока на запад сибирского антициклона и наличием восточного ведущего потока в тропосфере.

При меридиональных процессах в толще тропосферы наблюдаются стационарные волны большой амплитуды – есть две локализации основных гребней и ложбин. При первой высотный гребень расположен над Европейской частью страны, а высотные ложбины – над Западной Европой и Западной Сибирью. При данных процессах характерны более мощные барические образования. Для второй локализации положение полей давления противоположное – высотные гребни над Западной Европой и Западной Сибирью, и высотная ложбина – над ЕТР. При данных процессах наблюдаются более значительные нарушения западной циркуляции.

В гребнях наблюдается положительная аномалия температуры и давления, в ложбинах – отрицательная. Аномалии осадков наоборот положительны в ложбинах и отрицательны в гребнях.

По данным Г.Я. Вангенгейма, так как макросиноптические процессы в достаточной степени инерционны, имеется определенная связь между преобладающими типами атмосферной циркуляции смежных месяцев. Благодаря этому есть возможность судить о возможных метеорологических условиях последующего периода по характеристикам воздушных масс периода предшествующего, и, опираясь на эти данные, прогнозировать сроки наступления ледовых явлений.

Первые долгосрочные прогнозы замерзания рек Европейской территории СССР были составлены Г.Р. Брегманом и Г.Я. Вангенгеймом. Однако типизация Вангенгейма позволяла лишь качественно судить об атмосферных процессах.

Х.П. Погосян и Е.И. Савченкова предложили для количественной оценки циркуляции атмосферы индекс, который впоследствии был назван индексом меридиональности. Он представляет собой разность средних высот изобарической поверхности 500 мбар двух сферических прямоугольников, сторонами которых являются меридианы и параллели. Первый прямоугольник расположен обычно западнее рассматриваемого бассейна, второй – включает данный бассейн.

Дальнейшее разработка долгосрочных прогнозов ледовых явлений связана с установленным положением об однородности атмосферных процессов, преобладающих в течение синоптического сезона (по Б.П. Мультиановскому и С.П. Пагава). Для синоптического сезона характерно преобладание процессов, сходных по локализации основных барических образований и направлению движения циклонов и антициклонов.

Незадолго до начала войны Г.Р. Брегманом на учете температуры вод Атлантики и типов циркуляции атмосферы за некоторый период, предшествующий составлению прогноза, был разработан долгосрочный фоновый прогноз замерзания рек с заблаговременностью до 50-70 дней и погрешностью до 6-10 дней в соответствии с многолетней амплитудой явления.

Обеспеченность этих методов удовлетворительная, но в отдельные годы, особенно в годы с экстремальными сроками появления льда, они не дают положительных результатов.

Исследования по общей циркуляции атмосферы показали, что при прогнозе ледовых явлений необходимо учитывать атмосферные процессы над большими районами северного полушария, поскольку основным недостатком ранее применяемых методов, как было установлено, являлось использование характеристик (индексов) развития атмосферных процессов над ограниченной территорией – долгосрочные прогнозы ледовых явлений по отдельным бассейнам оказались неэффективными.

Такой учет стал возможным при использовании статистических методов представления метеорологических полей с помощью разложения их по естественным ортогональным функциям.

Основное назначение метода заключается в «сжатии» метеорологической информации и переходе от использования массовых наблюдений за многомерными полями к значительно меньшему числу укрупненных признаков. Выявленные признаки затем участвуют в регрессионном анализе. Итогом является уравнение множественной регрессии.

Так же попытки использовать еще один метод математической статистики – дискриминантный анализ. Ближе примыкая к методу

разложения на естественные ортогональные функции, он в тоже время решает несколько иную задачу.

Предсказатели, полученные с использованием метода естественных ортогональных функций, достаточно характеризуют массив исходных данных, но среди них не всегда удастся найти значимые с прогностической точки зрения. Обработка же архива данных дискриминантным анализом позволяет получить предикторы с учетом наших данных о предиктанте, а это значит, что они должны нести больше прогностической информации.

В целом можно указать следующее – основной недостаток эмпирических методов это их значительная индивидуальность, что касается не только выявления особенностей режима самого водного объекта, но и подходов к решению прогностических задач. Использование таких методов влечет необходимость субъективного подхода к отысканию природных связей. При этом не исключается использование предположений прогноза погоды (долгосрочные прогнозы), что зачастую приводит к значительным ошибкам. Во многих случаях связями такого рода, построенными обычно по данным короткого ряда наблюдений, приходится пользоваться с большой осторожностью, так как они бывают весьма неустойчивыми.

Почти в каждом методе прогнозов, основанном на использовании эмпирических связей, в зависимости от индивидуального подхода исследователя обычно закладываются, кроме фактического материала, и различного рода субъективные соображения, опирающиеся в значительной степени на знания изучаемого объекта, имеющиеся навыки в работе и в известной мере – на научную интуицию. Таким образом, во многих случаях автор метода вынужден сам и составлять прогноз.

Использование в разумных пределах способов и приемов математической вариационной статистики, как показывает практика, дает хорошие результаты. Физическая сущность таких вероятностных

статистических приемов исследований заключается в экстраполяции динамико-статистических закономерностей в развитии природных явлений.

Существует два направления поисков, предполагающих использование рядов самих предшествующих наблюдений по установлению сроков в многолетнем аспекте: 1) установление периодичности в изменениях фиксированных дат наступления ледовых фаз за весь предшествующий ряд наблюдений. 2) использование линейного экстраполирования ряда значений фиксированных дат, рассматривая их последовательную многолетнюю совокупность как вероятностный процесс.

Краткосрочные прогнозы

До 1942 года, за редкими исключениями, краткосрочные прогнозы замерзания и вскрытия рек не выпускались, так как прогноз погоды на период соответствующей длительности, без которого краткосрочный прогноз замерзания или вскрытия реки не может быть вполне эффективным, считался недостаточно точным.

В более или менее современном виде краткосрочные прогнозы ледовых явлений впервые начали составляться в годы Великой Отечественной войны.

Краткосрочные прогнозы основаны на расчете дат наступления ледовых явлений, причем их заблаговременность достигается путем введения в расчет метеорологических элементов, ожидаемых по прогнозу погоды на 3-5 дней.

Для образования ледяной перемычки, означающей начало ледостава, необходимо наличие двух условий: 1) накопление достаточного количества ледяного материала, а следовательно, отдача определенного количества тепла водой; 2) чтобы остановившиеся льдины смерзлись, процесс смерзания должен происходить с достаточной интенсивностью, то есть температура

воздуха после выполнения первого условия должна быть достаточно низкой (не выше так называемой критической)

И необходимая теплоотдача, и критическая температура воздуха зависят от морфометрических характеристик русла и гидравлических условий на данном участке реки в рассматриваемый период ледообразования.

Основы метода расчета начала ледостава были разработаны В.Д. Комаровым и Л.Г. Шуляковским в 1943 г. В качестве относительной характеристики теплоотдачи принята сумма среднесуточных температур воздуха от появления льда до ледостава. Морфометрические и гидравлические условия характеризуются уровнем воды. Для расчетов используются локальные графики связи, которые строятся на основе многолетних наблюдений.

Обобщенный метод расчета начала ледообразования на реках и водохранилищах предложен Шуляковским в 1957 г. Метод позволяет рассчитывать начало ледостава при отсутствии данных многолетних наблюдений – необходимая сумма отрицательных температур воздуха и критическая температура воздуха определяются по формулам, содержащим такие характеристики, как средняя скорость течения в рассматриваемом сечении и ширина реки в том же сечении.

В 1966 г им же было предложено определять величину критической температуры воздуха не только по морфометрическим и гидравлическим характеристикам, но и в зависимости от накопившейся суммы отрицательных температур. Чем больше накопилось ледового материала, тем при более высокой температуре может произойти смерзание льда.

Для наиболее точного предсказания времени наступления того или иного ледового явления необходимо знать исходные условия и условия погоды вперед на соответствующий расчетный период.

Образование поверхностного льда в водоемах начинается в момент снижения температуры поверхности воды до 0°C.

Изменение температуры воды, ее понижение или повышение, является результатом целого ряда теплообменных процессов. Льдообразование тоже связано с определенной теплоотдачей. Наиболее детально методика расчетов теплообмена в период льдообразования разработана О. Дэвиком.

Теплообмен в связи с русловым стоком может быть подсчитан путем учета количества тепла в исходных створах, расположенных выше створа, для которого составляется прогноз, в расстояниях пробега за расчетный период.

Расчет охлаждения воды и начала льдообразования в реках только по теплообмену через водную поверхность может дать совершенно неудовлетворительные результаты – точность и детальность прогноза погоды недостаточны для расчета. Поэтому остывание воды и время начала льдообразования приходится определять в зависимости от некоторых основных факторов теплообмена, величины которых либо известны, либо даются в прогнозе погоды с достаточной точностью. Обычно используется зависимость времени начала льдообразования от накопления суммы отрицательных температур воздуха и температуры воды предшествующего периода.

Существует несколько источников прогнозной и модельной гидрометеорологической информации, которые могут использоваться при формировании прогнозов ледовых явлений. В первую очередь это оперативные пространственные данные в виде полей температуры, давления, осадков, ветра и так далее, а так же их прогнозные оценки с различной заблаговременностью.

5. Разработка прогноза

Так как на р. Оредеж находится база учебной практики РГГМУ, существует реальная потребность прогноза образования.

Для прогноза использовалась формула прироста толщины льда:

$$h_{\text{л}} = \sqrt{\left(h_{\text{н}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{л}}(-\bar{t}_2)}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}T} - \left(\frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)$$

где α - коэффициент теплообмена льда с атмосферой, определяемый в зависимости от средней за расчетное время скорости ветра ω – например, по формуле Карпентера: $\alpha = 1,25(1 + 3,1\omega)$;

$\lambda_{\text{л}}$ - коэффициент теплопроводности льда;

$h_{\text{л}}$ - толщина льда;

$h_{\text{н}}$ - начальная толщина льда;

T - продолжительность расчетного интервала.

$L_{\text{л}}$ - скрытая теплота ледообразования;

$\rho_{\text{л}}$ - плотность льда;

\bar{t}_2 - среднесуточная температура воздуха.

Данные по температуре воздуха и скорости ветра использовались по метеостанции «Белогорка», расположенной в 15,5 км на северо-восток от интересующего участка. Данные за еобходимые периоды были загружены из архива данных на сайте gr5.ru.

Расчет производился по наблюдениям 2018-2019 гг, так как в этот зимний период наблюдалось установление ледостава. Полученные данные указаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Расчет нарастания толщины льда за 2018-2019 год.

Дата	03.01	04.01.	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01	17.01	18.01	19.01	20.01	21.01	22.01	23.01
\bar{t}_2	-3,5	-6,8	-7,2	-8,1	-4,9	-3,8	-4,9	-7,4	-5,8	-1,1	-6,1	-1,2	-3,0	-4,8	-3,2	-6,2	-9,6	-6,4	-18,1	-17,7	-15,6
ω	500	213	200	175	525	263	213	138	538	413	275	238	214	363	438	500	288	388	113	163	200
α	1939	825	776	679	2036	1018	825	534	2084	1600	1067	922	832	1406	1697	1939	1115	1503	437	631	776
$h_{л}$	7	11	15	18	19	21	22	24	25	26	27	27	28	29	30	31	33	34	37	40	42

Плотность льда $\rho_{\text{л}} = 0,91 \text{ г/см}^3$, скрытая теплота ледообразования $L_{\text{л}} = 80 \text{ кал/г}$; Теплопроводность льда $\lambda_{\text{л}} = 0,0052 \text{ кал/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{°C)}$ За расчетный интервал взяты 1 сутки – 86400 с.

За первую дату взято 03.01.2019 – начала периода отрицательных температур. В качестве окончания интересующего периода выбрано 23.01 – дата установления ледостава.

Как видно из таблицы 5.1, уже в первый день прирост льда составляет 7 см, а к 23 января толщина льда уже 38 см, что не соответствует истине.

В связи с этим в формулу был добавлен коэффициент для приведения в соответствие расчетных и фактических данных.

В первом случае расчетная формула приняла вид:

$$h_{\text{л}} = \sqrt{\left(h_{\text{н}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{л}}(-\bar{t}_2)k_1}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}T - \left(\frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)},$$

во втором:

$$h_{\text{л}} = k_2 \sqrt{\left(h_{\text{н}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{л}}(-\bar{t}_2)}{L_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}T - \left(\frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)},$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, подобранные по наблюдаемым данным.

Коэффициент k_1 был принят равным 0,00018, $k_2 = 0,055$.

Значения толщины льда, рассчитанные с использованием данных коэффициентов приведены в таблицах 5.2 и 5.3 соответственно.

Таблица 5.2 Расчет нарастания толщины льда за 2018-2019 год с использованием коэффициента k_1 .

Дата	03.01	04.01.	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01	17.01	18.01	19.01	20.01	21.01	22.01	23.01
\bar{t}_2	-3,5	-6,8	-7,2	-8,1	-4,9	-3,8	-4,9	-7,4	-5,8	-1,1	-6,1	-1,2	-3,0	-4,8	-3,2	-6,2	-9,6	-6,4	-18,1	-17,7	-15,6
ω	500	213	200	175	525	263	213	138	538	413	275	238	214	363	438	500	288	388	113	163	200
α	1939	825	776	679	2036	1018	825	534	2084	1600	1067	922	832	1406	1697	1939	1115	1503	437	631	776
$h_{л}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 5.3 Расчет нарастания толщины льда за 2018-2019 год с использованием коэффициента k_2

Дата	03.01	04.01.	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01	17.01	18.01	19.01	20.01	21.01	22.01	23.01
\bar{t}_2	-3,5	-6,8	-7,2	-8,1	-4,9	-3,8	-4,9	-7,4	-5,8	-1,1	-6,1	-1,2	-3,0	-4,8	-3,2	-6,2	-9,6	-6,4	-18,1	-17,7	-15,6
ω	500	213	200	175	525	263	213	138	538	413	275	238	214	363	438	500	288	388	113	163	200
α	1939	825	776	679	2036	1018	825	534	2084	1600	1067	922	832	1406	1697	1939	1115	1503	437	631	776
$h_{л}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

После подбора коэффициента, расчет был выполнен по данным 2015-2016 гг.

За первую дату взято 27.12.2015 – начала периода отрицательных температур. Дата начала ледостава точно не установлена, но известно что она расположена в пределах 04.01 – 12.01.2019

Результаты расчетов представлены в таблицах 5.4 и 5.5.

Как видно из данных таблиц, при расчете с использованием коэффициентов k_1 и k_2 , приращение льда на 1 см – что можно считать началом ледостава, наблюдается 09 января 2016 года, что попадает в интересующий диапазон.

Однако таким образом можно рассчитать только предположительную дату начала ледостава, так как при продлении прогноза на более поздние даты толщина льда остается без изменений.

..

Таблица 5.4 Расчет нарастания толщины льда за 2015-2016 год с использованием коэффициента k_1 .

Дата	27.12	28.12	29.12	30.12	31.12	01.01	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01
\bar{t}_2	-4,7	-5,8	-6,2	-6,8	-6,6	-7,8	-9,1	-9,4	-10,1	-11,1	-12,4	-13,5	-14,4	-15,1	-15,5	-15,6	-15,3	-15,0	-15,0	-15,2	-15,0
ω	363	263	229	203	185	183	173	183	178	173	157	147	140	137	128	129	139	142	139	143	137
α	1406	1018	889	788	718	712	672	710	690	670	609	570	545	531	499	501	540	553	542	556	532
$h_{л}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 5.5 Расчет нарастания толщины льда за 2015-2016 год с использованием коэффициента k_2

Дата	27.12	28.12	29.12	30.12	31.12	01.01	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01
\bar{t}_2	-4,7	-5,8	-6,2	-6,8	-6,6	-7,8	-9,1	-9,4	-10,1	-11,1	-12,4	-13,5	-14,4	-15,1	-15,5	-15,6	-15,3	-15,0	-15,0	-15,2	-15,0
ω	363	263	229	203	185	183	173	183	178	173	157	147	140	137	128	129	139	142	139	143	137
α	1406	1018	889	788	718	712	672	710	690	670	609	570	545	531	499	501	540	553	542	556	532
$h_{л}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Следующим шагом было решение отталкиваться от суммы температур с начала расчетного периода. Для этого формула была приведена к следующему виду:

$$h_{\text{л}} = \sqrt{\left(h_{\text{н}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{л}}(\sum \bar{t}_2 + a)}{nL_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}T - \left(\frac{\lambda_{\text{л}}}{\alpha}\right)},$$

где a - параметр, подобранный по наблюдаемым данным;

n - порядковый номер дня с начала прогноза.

По данным 2018-2019 гг, параметр a был подобран равным 141°C. При тако величине параметра в дни с отрицательной температурой воздуха, предшествующие началу ледостава расчет невозможен, так как под корнем получается отрицательное значение, а начиная с первого дня установившегося ледяного покрова формула дает прирост ледяного покрова.

Результаты расчета представлены в таблице 5.6. Обозначение «н/о» соответствует расчетам с отрицательным значением под корнем.

Из данной таблицы видно, что параметр a подобран таким бразом, что бы расчетная дата начала ледостава соответствовало дате фактической.

Далее расчет по данной формуле был проверен по даным 2015-2016 гг, результаты представлены в таблице 5.7.

Как можно увидеть по результатам расчета, прирост льда начинается 07 января 2016 года, что соответствует наблюденному интервалу.

Сам расчет прироста толщины льда нет возможности проверить ввиду отсутствия данных о фактической толщине льда, однако полученные цифры соответствуют среднестатистическим значениям мощности ледяного покрова в интересующем створе.

Таблица 5.6 Расчет нарастания толщины льда за 2018-2019 год с использованием параметра a .

Дата	03.01	04.01.	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01
\bar{t}_2	-3,5	-10,3	-17,5	-25,5	-30,5	-34,3	-39,1	-46,6	-52,3	-53,4	-59,5	-60,7	-63,6	-68,4
ω	500	356	304	272	323	313	298	278	307	318	314	307	301	305
α	1939	1382	1180	1055	1251	1212	1157	1079	1191	1232	1217	1192	1168	1185
$h_{л}$	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Окончание таблицы 5.6

Дата	17.01	18.01	19.01	20.01	21.01	22.01	23.01	24.02	25.01	26.01	27.01	28.01	29.01
\bar{t}_2	-71,6	-77,7	-87,3	-93,7	-111,7	-129,4	-145,0	-156,3	-176,1	-188,8	-207,6	-222,4	-232,0
ω	314	326	324	327	316	308	303	301	292	287	276	270	266
α	1219	1264	1256	1269	1225	1195	1175	1168	1134	1113	1072	1046	1030
$h_{л}$	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	2	3	5	7	9	11	13

Таблица 5.7 Расчет нарастания толщины льда за 2015-2016 год с использованием параметра a .

Дата	27.12	28.12	29.12	30.12	31.12	01.01	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01
\bar{t}_2	-4,7	-11,5	-18,7	-27,2	-33,2	-46,7	-64,0	-74,9	-90,6	-111	-136	-162	-187	-211	-233	-249	-260	-270	-286	-304	-316
ω	363	263	229	203	185	183	173	183	178	173	157	147	140	137	128	129	139	142	139	143	137
α	1406	1018	889	788	718	712	672	710	690	670	609	570	545	531	499	501	540	553	542	556	532
$h_{\text{л}}$	н/о	5	8	11	14	17	19	21	24	26	28										

Так же расчет по указанной формуле был проверен по данным 2016-2017 гг – в этот зимний период так и не произошло становления ледяного покрова. За начало периода была выбрана дата 02.01.2017 года – первый день с отрицательной температурой самого длительного по времени периода, в котором так же наблюдались самые низкие температуры в году. За окончание принято 18.01.2017 – последний день морозного периода.

Результаты расчетов представлены в таблице 5.8. По данным расчетов в указанный период прирост льда так же не наблюдался, ледостав не установился, что соответствует фактическим данным.

На основании полученных результатов можно считать указанную формулу рабочей и использовать ее для прогноза наступления ледовых явлений, основываясь на прогнозе погоды с соответствующей заблаговременностью. Так же, при наличии в будущем данных о толщине льда на наблюдаемом участке, возможно уточнение параметра a для получения более точных расчетных данных по приросту толщины ледяного покрова.

Таблица 5.8 Расчет нарастания толщины льда за 2016-2017 год с использованием параметра a .

Дата	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01	11.01	12.01	13.01	14.01	15.01	16.01	17.01	18.01
\bar{t}_2	-2,6	-12,6	-28,1	-49,4	-71,7	-94,4	-106,9	-110,0	-110,7	-116,8	-121,6	-124,8	-125,8	-127,8	-131,7	-137,3	-140,6
ω	200	125	196	253	218	227	243	272	290	311	319	319	311	303	288	282	293
α	776	486	760	982	844	881	942	1055	1126	1207	1239	1236	1205	1174	1115	1094	1138
$h_{\text{л}}$	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о						

Заключение

В ходе работы были выполнены все поставленные цели, а именно:

- рассмотрены физика процесса, особенности, методы прогнозирования ледовых явлений, характеристики объекта и региона;
- проанализированы фактические данные формирования ледостава в соответствии с архивом погоды метеостанции;
- на основании формулы расчета прироста льда был разработан способ прогнозирования даты установления ледяного покрова и расчета нарастания толщины льда, прогноз проверен по фактическим данным о сроках наступления ледостава.

Список используемой литературы

1. Антонов В.С., Топорков Л.Г. Физико-статистический метод долгосрочного прогноза сроков наступления ледовых фаз для низовьев сибирских рек//Труды ААНИИ, т.290. –Л.:Гидрометеиздат, 1970. –с. 158-175
2. Балашова И.В. Состояние и практическое использование методов краткосрочных прогнозов замерзания рек и водохранилищ. –Обнинск, изд. Гидрометцентр СССР, 1968. –с.19-29
3. Бузин В.А. Зажоры и заторы на реках России.Монография. – СПб.:изд.ООО «Эс Пэ Ха», 2015. –242 с
4. Бузин В.А., Горошкова Н.И. Прогноз внутриводного ледообразования в реках и нижних бьефах ГЭС.//Ученые записки №27. – СПб.:изд.РГГМУ, 2013. –с.29-35
5. Бузин В.А., Шилов Д.В., Дьяченко Н.Ю., Солощук П.В. Прогнозирование опасных ледовых явленийна реке Нева.//Ученые записки №14. –СПбю:изд.РГГМУ, 2010. –с.25-33
6. Винников С.Д. Викторова Н.В. Физика водсуши. Изд. 2-е, испр и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. –430 с.
7. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах. Учебное пособие. –Л., Изд.ЛПИ, 1986. –50 с (ЛГМИ)
8. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные ледовые прогнозы. Учебное пособие. –Л., Изд.ЛПИ, 1982. –100 с (ЛГМИ)
9. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. –Л.:Гидрометеиздат, 1987. –248 с.
10. Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Бабурин В.Л., Банщикова Л.С., Горошкова Н.И., Завадский А.С., Крыленко И.Н., Савельев К.Л., Козлов К.Д., Бузина Л.Ф. Опасные ледовые

явления на реках и водохранилищах России: Монография/Под общей ред. проф., д.т.н. Д.В. Козлова. –М.:Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 2015. –348с.

11. Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа. – Л.:Гидрометеиздат, 1981. –112 с.

12. Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши.–Л.:Гидрометеиздат, 1979. –312с.

13. Основные гидрологические характеристики Т.2- часть 1-2, Бассейн Балтийского моря-1980г.

14. Савченкова Е.И. Исследование особенностей метеорологических полей над северным полушарием, обуславливающих появление льда на реках СССР//Труды ордена Ленина гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР, вып.40. Расчеты и прогнозы ледовых явлений на реках и водохранилищах.–Л.:Гидрометеиздат, 1969. –с.47-66

15. Шаночкин С.В. Долгосрочный прогноз начала ледообразования на реках севера ЕТС.//Труды государственного ордена трудового красного знамени гидрологического института, вып. 270. Исследования. Расчеты и прогнозы ледовых явлений на реках. –Л.:Гидрометеиздат, 1980. –с.92-99

16. Шуляковский Л.Г. К методике краткосрочных прогнозов замерзания и вскрытия рек. //Труды центрального института прогнозов. Вып.5–Л.:Гидрометеиздат, 1947. –с.3-42

17. Priroda. Природа России. Национальный портал. Северо-западный ФО[Электронный ресурс] – Режим доступа priroda.ru/regions/recreation/index.php?SECTION_ID=&FO_ID=605

18. Traveler-mir. Traveler мир в котором мы живем. Река Оредеж. [Электронный ресурс] – Режим доступа traveler-mir.com/cruise/reka-oredezh

19. Water-rf. Научно-популярная энциклопедия Вода России. Северо-Западный федеральный округ [Электронный ресурс] – Режим доступа [water-
rf.ru/Регионы_России/2203/Северо-Западный_федеральный_округ](http://water-rf.ru/Регионы_России/2203/Северо-Западный_федеральный_округ)

20. Water-rf. Научно-популярная энциклопедия Вода России. Оредеж [Электронный ресурс] – Режим доступа [water-
rf.ru/Водные_объекты/3464/Оредеж](http://water-
rf.ru/Водные_объекты/3464/Оредеж)

21. Wikipedia. Википедия. Свободная энциклопедия. Северо-Западный федеральный округ. [Электронный ресурс] – Режим доступа ru.wikipedia.org/wiki/Северо-Западный_федеральный_округ

Приложение А



Рисунок А.1 Ледовая обстановка на р. Оредеж 24.12.2014 г, температура воздуха $-9,8^{\circ}\text{C}$



Рисунок А.2 Ледовая обстановка на р. Оредеж 06.01.2015 г, температура воздуха $-12,6^{\circ}\text{C}$



Рисунок А.3 Ледовая обстановка на р. Оредеж 21.01.2015 г, температура воздуха -19.9°C



Рисунок А.4 Ледовая обстановка на р. Оредеж 02.01.2016 г, температура воздуха -17.3°C



Рисунок А.5 Ледовая обстановка на р. Оредеж 20.01.2016 г, температура воздуха -5.0°C



Рисунок А.6 Ледовая обстановка на р. Оредеж 27.01.2016 г, температура воздуха 1.3°C



Рисунок А.7 Ледовая обстановка на р. Оредеж 07.01.2017 г, температура воздуха -22.8°C



Рисунок А.8 Ледовая обстановка на р. Оредеж 14.01.2017 г, температура воздуха -1.0°C



Рисунок А.9 Ледовая обстановка на р. Оредеж 07.02.2017 г, температура воздуха -20.7°C



Рисунок А.10 Ледовая обстановка на р. Оредеж 22.02.2018 г, температура воздуха -18.2°C



Рисунок А.11 Ледовая обстановка на р. Оредеж 28.02.2018 г, температура воздуха -19.4°C



Рисунок А.12 Ледовая обстановка на р. Оредеж 11.03.2018 г, температура воздуха -0.4°C



Рисунок А.13 Ледовая обстановка на р. Оредеж 20.12.2018 г, температура воздуха -9.5°C



Рисунок А.14 Ледовая обстановка на р. Оредеж 23.01.2019 г, температура воздуха -15.6°C



Рисунок А.15 Ледовая обстановка на р. Оредеж 06.02.2019 г, температура воздуха -3.7°C