

УДК 551.326.83 :556.3 + 621.396.96(571.56)

ОЦЕНКА ЗАТОРНОЙ ОПАСНОСТИ НА УЧАСТКЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ЛЕНА ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ

М.П. Фёдоров¹, Н.И. Тананаев^{2,3}¹Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск,²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск,³Институт мерзлотоведения им. М.И. Мельникова СО РАН, Якутск,

E-mail: mpfedoroff@gmail.com, nikita.tananaev@gmail.com

В статье представлены результаты исследования уровня и ледового режима среднего течения реки Лена с 2008 г. по 2020 г. на участке от Табагинского мыса до Кангаласского мыса. Проведён обзор материалов георадиолокационных исследований ледяного покрова реки Лена с борта воздушного судна. На основе анализа гидрологических и георадиолокационных данных установлен комплекс факторов, способствующих определению заторной опасности на исследуемом участке реки: водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности, наличие ледяного покрова торосового строения и повышенной толщины.

Ключевые слова: река Лена; уровень воды; толщина льда; строение ледяного покрова реки, георадиолокация.

DOI:10.24412/2410-1192-2025-17604

Дата поступления: 20.12.2024. Принята к печати: 21.02.2025

Северные реки, протекающие с юга на север по территории России, Канады и США, в зимний период покрываются льдом. Населённые пункты, расположенные вблизи этих рек, подвержены риску возникновения опасных ледовых явлений. Наиболее опасным явлением считается ледовый затор, характеризующийся резким повышением уровня воды в реке. При достижении критического подъёма уровня происходит затопление территорий и разрушение инфраструктуры населённых пунктов. Хотя наводнения кратковременны, они наносят значительный ущерб, который оценивается в миллиарды рублей. Суммарный ущерб, нанесённый экономике Республики Саха

(Якутия) за 1998–2022 гг., составил примерно 46.8 млрд. руб. [Тананаев, 2023].

Систематические наблюдения за ледовым режимом рек России осложнены большой трудоёмкостью полевых наблюдений в сложных погодных условиях. Ограниченное количество пунктов наблюдений приводят к необходимости поиска других источников информации о толщине льда и характеристиках ледяного покрова. В существующей системе наблюдений отсутствует инструмент для оперативного сбора и выдачи информации о толщине льда в периоды, когда выход на лёд и прямые измерения невозможны, или на протяжённых участках рек.

Результаты исследований формирования ледовых заторов на реках освещены в отечественных работах [Донченко, 1987; Бузин и др., 2009; Козлов и др., 2015]. В зарубежных трудах всесторонне изучены различные аспекты процессов образования ледовых заторов на реках Канады и США [Beltaos, 1995; Beltaos, 2008; White et al., 1996; White et al., 2006]. В публикации [Агафонова и др., 2016] изложены результаты исследования разных фаз ледового режима и его опасных проявлений на реках бассейна Северной Двины. В статье [Кильмянинов, 2012] представлены результаты анализа наблюдений за расходами, уровнями воды и ледовыми явлениями в среднем течении р. Лена. В многочисленных публикациях описаны ключевые условия, способствующие образованию заторов.

Толщина и строения ледяного покрова рек являются ключевым фактором, влияющим на возникновение и уровень заторной опасности. Для определения этих характеристик широко используются не прямые методы. В публикациях [Finlay et al., 2008; Kämäri et al., 2017; Stuefer, Richards, 2021] изложены результаты применения метода георадиолокации для измерения толщины льда на реках. Разработана методика георадиолокационных исследований, обеспечивающая определение основных типов строения ледяного покрова реки Лена [Фёдоров, 2022; Fedorov, Fedorova, 2022]. Преимуществом метода является непрерывное профилирование протяжённых участков, оперативность исследований с помощью воздушного судна и получение данных георадиолокации в режиме реального времени. Результаты, получаемые георадиолока-

ционным исследованием ледяного покрова рек, могут быть использованы в качестве дополнительной информации для анализа заторной опасности на участках реки.

Целью работы является установление факторов, влияющих на возникновение заторной опасности на участке среднего течения реки Лена в районе г. Якутск, на основе анализа гидрологических и георадиолокационных данных. В целях обеспечения безопасности населения и защиты инфраструктуры от чрезвычайных ситуаций в период весеннего половодья необходимо располагать информацией о заторной опасности на участках реки.

Материалы и методы

Исследуемый район находится в среднем течении р. Лены, в широкой долине Туймаада, в которой расположен г. Якутск. Протяжённость исследуемого участка составила примерно 80 км. Средняя минимальная температура воздуха в районе г. Якутска с ноября по февраль варьирует от -38°C до -42°C . С марта по апрель средняя минимальная температура воздуха снижается с -27°C до -12°C . Ледообразование на реке Лена обычно начинается в октябре и быстро распространяется по всей длине реки. Процесс замерзания реки завершается установлением ледостава в первой декаде ноября [Климат Якутска, 1982]. Ледяной покров в период ледостава характеризуется различным строением и толщиной льда. Толщина льда на реке Лена в период ледостава интенсивно увеличивается и достигает максимальных значений в апреле.

Основные условия, влияющие на формирование ледовых заторов: повышенная

толщина льда; неразрушенный ледяной покров на пути весеннего половодья; перелом продольного профиля водной поверхности; сочетание нескольких видов русловых препятствий, например, крутой поворот с сужением русла и наличие островов, падение уклона [Донченко, 1987; Козлов и др., 2015]. Многие условия наблюдаются ежегодно, но сами ледовые заторы формируются не всегда.

На формирование ледовых явлений на реках оказывает гидрологический режим летне-осеннего периода. Использованы характеристики, способствующие повышению заблаговременности прогноза заторной опасности, особенно к предледоставному периоду. К характеристикам водного режима относятся уровень воды, скорость течения, расход воды, уклон водной поверхности. В частности, уровень воды определяет формирование и динамику ледяного покрова рек. Анализ уровня воды выполнен по данным АИС ГМВО с 2008 г. по 2020 г. на трёх гидрологических постах Табага, Якутск и Кангалассы. По данным уровня воды летне-осеннего сезона произведён расчёт суммарных и средних значений уровня воды. По средним значениям выполнена сортировка суммарных значений уровня воды по группам водности. Нормальное распределение данных было проверено тестом Шапиро-Уилка. Наличие признака нормальности данных позволило применить тест Уэлча для оценки статистической значимости разницы средних значений.

Проанализированы архивные данные об уровне воды в предледоставный период и конце ледостава. Были определены клю-

чевые показатели: опорное значение предледоставного уровня воды и минимальное значение уровня воды в конце ледостава. Для определения влияния уровня воды на толщину льда, а также верификации установленных значений уровня воды был применён способ расчёта толщины льда. Способ основан на использовании эмпирического уравнения, которое описывает зависимость максимальной толщины льда $h_{\text{л}}$ от величины зимнего падения уровня воды $\Delta H_{\text{зн}}$ [Тананаев, 2004]:

$$h_{\text{л}} = \frac{(1 - A) \times \Delta H_{\text{зн}}}{A}, \quad (1)$$

где A – региональный параметр расположения временного пункта измерений.

Зимнее падение уровня воды $\Delta H_{\text{зн}}$ представляет собой разницу между значениями опорного предледоставного уровня воды $H_{\text{оп}}$ и минимального уровня воды в конце ледостава $H_{\text{мин}}$:

$$\Delta H_{\text{зн}} = H_{\text{оп}} - H_{\text{мин}}. \quad (2)$$

Расчёт регионального параметра A с учётом коэффициентов для гидрологических постов:

$$A = C \times \ln(\Delta H_{\text{зн}}) + D, \quad (3)$$

где коэффициенты C и D учитывают географическое расположение гидрологических постов и их влияние на региональный параметр.

При определении уклона водной поверхности использованы опорные значения предледоставного уровня воды и минимальные значения уровня воды в конце ледостава реки на гидрологических постах. Выполнено преобразование показателей уровня воды из местной системы высот в Балтийскую систему для дальнейшего анализа и построения графика изменения уклона.

Определение факторов, влияющих на заторную опасность на участке реки, выполнено по следующему алгоритму:

1. Применение относительной балльной оценки гидрологических данных по следующему условию, представленному в таблице 1.

2. Суммирование и сортирование полученных баллов по группам водности реки в зависимости от наличия и отсутствия заторной опасности на гидрологических постах;

3. Формирование матрицы взаимного распределения суммированных баллов по категориям, представленной в таблице 2 [Кобзарь, 2006].

В таблице 2 представлены следующие обозначения: a_{11} – количество баллов при заторной опасности в половодье; a_{12} – количество баллов при заторной опасности в маловодье; a_{21} – количество баллов при

отсутствии заторной опасности в половодье; a_{22} – количество баллов при отсутствии заторной опасности в маловодье; a_{01} – сумма баллов в период половодья; a_{02} – сумма баллов в период маловодья; a_{10} – сумма баллов при заторной опасности; a_{20} – сумма баллов при отсутствии заторной опасности; a_{00} – общий итог всех баллов.

4. Определение связи гидрологических данных с заторной опасностью посредством корреляционного анализа на основе коэффициентов ассоциации (Q) и контингенции (V) [Кобзарь, 2006].

Коэффициент ассоциации определяется по следующему выражению:

$$Q = \frac{a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21}}{a_{11} \times a_{22} + a_{12} \times a_{21}}. \quad (4)$$

В случае нулевого значения по баллам не применяется коэффициент ассоциации, вместо него используется коэффициент контингенции:

$$V = \frac{a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21}}{\sqrt{(a_{11} + a_{12}) \times (a_{11} + a_{21}) \times (a_{22} + a_{12}) \times (a_{22} + a_{21})}} \quad (5)$$

Таблица 1

Условия оценки гидрологических данных на участке реки

Table 1

Conditions of hydrological data assessment in the river section

Наименование	1 балл	2 балла
Суммарный уровень воды летней межени*	$\Sigma H_{ур.} < \Sigma H_{ср.ур.}$	$\Sigma H_{ур.} > \Sigma H_{ср.ур.}$
Опорный преддоставный уровень воды	$H_{оп.} < H_{оп.ср.}$	$H_{оп.} > H_{оп.ср.}$
Распределение уклонов в конце ледостава	$I < -0.06\%$	$I > -0.06\%$
Толщина льда	$h_{бур.} < 1.5 \text{ м}$	$h_{бур.} > 1.5 \text{ м}$
Ледовый затор (Лз)	Отсутствие	Наличие

*сумма высших значений уровня воды на гидропосту с июля по сентябрь

Величины коэффициентов ассоциации и контингенции варьируют в промежутке от -1 до 1 . Если значение коэффициента равно 0 , то связь с факторами отсутствует. При значении коэффициента ± 1 , то связь с

факторами полная. Величина коэффициента, характеризующего как показателя связи, интерпретируется аналогично величине коэффициента корреляции [Котеров и др., 2019].

Таблица 2

Матрица взаимного распределения суммированных баллов

Table 2

Matrix of mutual distribution of summarised scores

Категория	Полноводье	Маловодье	Всего
Наличие заторной опасности	a_{11}	a_{12}	a_{10}
Отсутствие заторной опасности	a_{21}	a_{22}	a_{20}
Всего	a_{01}	a_{02}	a_{00}

Результаты и обсуждение

По результатам обзора материалов георадиолокационных исследований ледяного покрова реки Лена с борта воздушного судна представлены гистограммы толщины льда на участке от Табагинского мыса до Кангаласского мыса в 2013 г. и 2018 г. (рис. 1) [Фёдоров, 2022]. В эти годы были зафиксированы случаи ледовых заторов. На представленных гистограммах участков Табага – Якутск (рис. 1а) и Якутск – Кангалассы (рис. 1б) в 2013 г. наблюдается количественное преобладание значений повышенной толщины льда в диапазоне 150–200 см. На всем протяжении участка прослеживается ледяной покров повышенной толщины льда и торосового строения.

Гистограмма участка Табага – Якутск в 2018 г. (рис. 1в) показывает, что значения толщины льда в диапазоне 100–150 см составляют 50% от общего числа точек измерений. При этом значения повышенной толщины льда в диапазоне 150–200 см составляют 40%. На данном участке преимущественно торосовый лёд. На гистограмме (рис. 1г) участка Якутск – Кангалассы в 2018 г. отмечается преобладание значений толщины льда в диапазоне 100–150 см на 60%, а значения повышенной толщины льда в диапазоне 150–200 см – 30%. В

этом участке наблюдается двукратное преобладание торосового льда над монолитным льдом. По результатам исследований в 2018 г. выявлено наличие трёх участков ледяного покрова повышенной толщины 150–250 см в районе села Табага, гидрологического поста Якутск, посёлка городского типа Жатай и села Тулагино.

По формулам (1), (2), (3) выполнены расчёты значений толщины льда с учётом регионального параметра для гидрологических постов Табага ($C=0.22$, $D=0.44$), Якутск ($C=0.28$, $D=0.42$) и Кангалассы ($C=0.2$, $D=0.46$). В таблице 3 представлены результаты для гидрологического поста Табага. Расчётные значения толщины льда были сопоставлены с данными гидрологических постов Табага, Якутск и Кангалассы, что позволило оценить погрешность расчётов. Относительная погрешность варьирует от -26% до +27% в зависимости от года. Средняя погрешность составляет не более 3%, расчётные данные близки к инструментальным. Результаты расчётов толщины льда показали хорошую согласованность с установленными значениями опорного предледоставного уровня воды и минимального уровня воды в конце ледостава. Эти данные необходимы для анализа факторов, влияющих на заторную опасность участка реки.

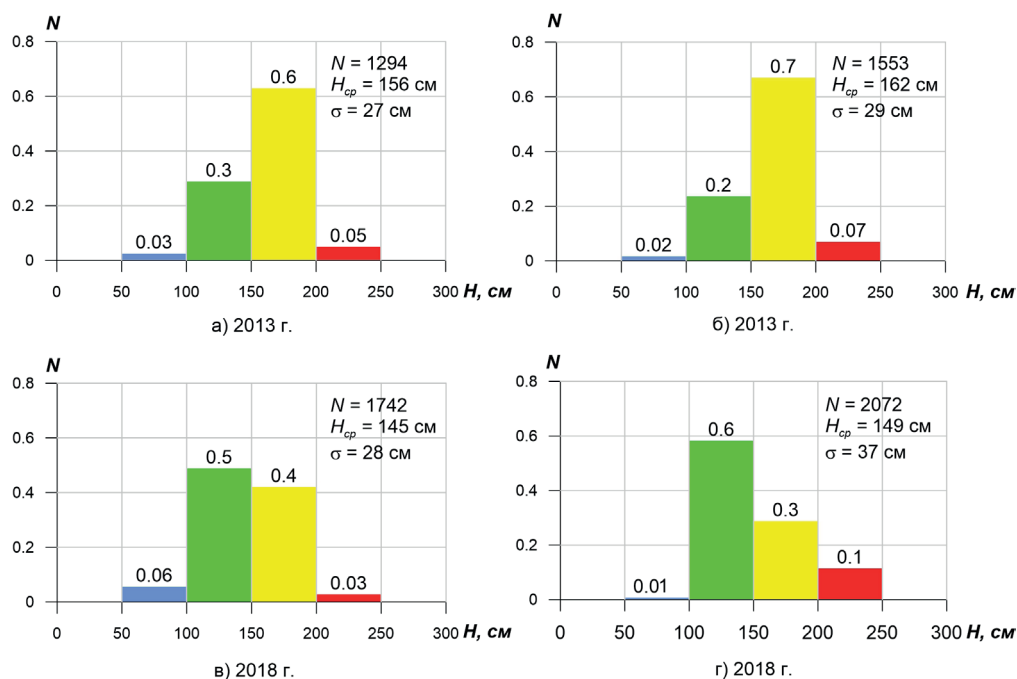


Рис. 1. Гистограммы распределения толщины ледяного покрова р. Лена на участке Табага – Якутск (а, в) и Якутск – Кангалассы (б, г)

Fig. 1. Histograms of the Lena River ice cover thickness distribution at the section Tabaga – Yakutsk (a, c) and Yakutsk – Kangelassy (b, d)

Результат анализа данных уклонов второе положение уклона. Третье положение уклона представляют данные за 2010 г., водной поверхности до ледовых явлений представлено на рис. 2а. Данные за 2008 г., 2013 г., 2016 г., 2019 г. Четвёртое положение уклона представляют данные за 2015 г. Снижение уровня воды до конца ледостава составило 2009 г. и 2012 г. отражены в первом положении уклона. Данные 2011 г., 2014 г., 2017 г., 2018 г. и 2020 г. демонстрируют в среднем 2 м.

Таблица 3

Расчётные значения толщины льда с учётом гидрологических данных за 2008–2020 гг. в районе гидрологического поста Табага

Table 3

Estimated values of ice thickness taking into account hydrological data for 2008–2020 in the area of the Tabaga hydrological post

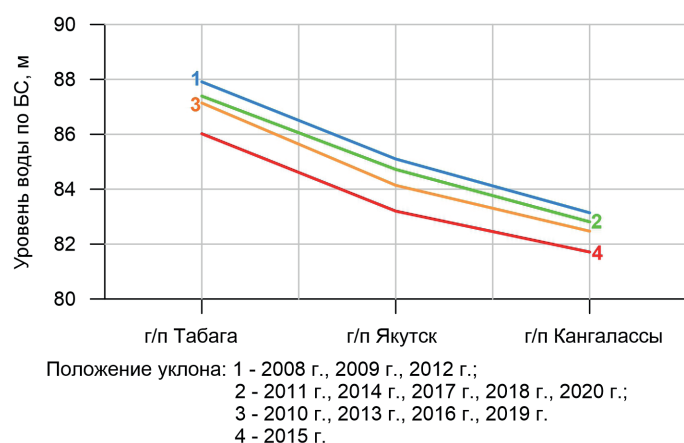
Год	$H_{\text{он.}}, \text{ м}$	$H_{\text{мин.}}, \text{ м}$	$\Delta H_{\text{зн.}}, \text{ м}$	A	$h_{\text{л.расч.}}, \text{ м}$	$h_{\text{бур.}}, \text{ м}$	$\Delta h, \text{ м}$	$\delta, \%$
2008/2009	2.61	0.90	1.71	0.56	1.35	1.68	0.33	19
2009/2010	2.78	0.82	1.96	0.59	1.37	1.56	0.19	12
2010/2011	2.09	0.63	1.46	0.52	1.33	1.18	-0.15	-13
2011/2012	2.84	0.57	2.27	0.62	1.39	1.23	-0.16	-13
2012/2013	2.49	0.75	1.74	0.56	1.36	1.45	0.09	6
2013/2014	1.78	0.50	1.28	0.49	1.31	1.36	0.05	4
2014/2015	1.99	0.36	1.63	0.55	1.35	1.18	-0.17	-14
2015/2016	1.10	0.31	1.38	0.51	1.32	1.20	-0.12	-10
2016/2017	1.44	0.44	1.64	0.55	1.35	1.33	-0.02	-1
2017/2018	2.19	0.75	1.44	0.52	1.33	1.45	0.12	8
2018/2019	2.17	0.63	1.54	0.53	1.34	1.48	0.14	10
2019/2020	1.24	0.43	1.63	0.55	1.35	1.07	-0.28	-26

На рис. 2б представлен уклон водной поверхности в конце ледостава. Данные первого положения за 2009–2010 гг. показывают линейный спад. Данные второго положения (2012 г., 2013 г.), третьего положения (2011 г., 2018 г.) и четвёртого положения (2014–2016 гг., 2017 г., 2019–2020 гг.) демонстрируют последовательность падения. Падение реки на участке Табага – Якутск составило 3.2 м, а на участке Якутск – Кангалассы – 1.3 м. Большинство зафиксированных ледовых заторов наблюдалось в положениях 2, 3 и 4.

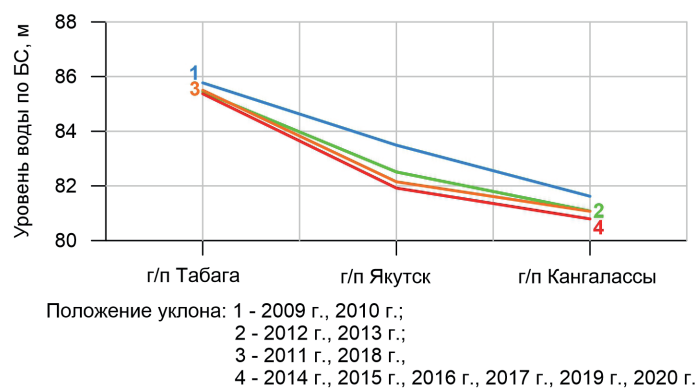
В таблице 4 представлены результаты анализа данных гидрологического поста Табага, которые распределены по группам водности реки. Распределение рядов данных

в обеих группах соответствуют нормальному (тест Шапиро-Уилка, $p > 0.05$). Разница средних в двух группах водности статистически значима (тест Уэлча, $p < 0.03$).

На рис. 3 представлены графики, отражающие водность реки за период 2008–2020 гг. на трёх гидрологических постах. На графиках прослеживаются линии тренда – маловодья и полноводья. Показано влияние установленных опорных значений предледоставного уровня воды на толщину льда в зависимости от водности реки. При полноводье наблюдаются высокие значения толщины льда в зависимости от опорных значений предледоставного уровня воды. В условиях маловодья отмечаются низкие значения толщины льда.



а)



б)

Рис. 2. Распределение уклонов водной поверхности до ледовых явлений (а) и в конце ледостава (б) на исследуемом участке реки Лена

Fig. 2. Distribution of water surface gradients before ice events (a) and at the end of ice formation in the studied section of the Lena River

Таблица 4

Водность реки Лена по данным гидрологического поста Табага

Table 4

Water content of the Lena River according to the data of the Tabaga hydrological post

Водность реки	Год	$\Sigma H_{yp}, \text{ см}$	$H_{on}, \text{ см}$	$h_{бур}, \text{ м}$	$I, \text{ ‰}$
Маловодье (М)	2010/2011	1662	209	1.18	-0.059
	2011/2012	1471	284	1.23	-0.082
	2014/2015	1443	199	1.18	-0.084
	2015/2016	1204	110	1.20	-0.081
	2019/2020	1140	124	1.07	-0.085
Средние значения		1384	185	1.17	-0.078
Полноводье (П)	2008/2009	1956	261	1.68	-0.069
	2009/2010	1837	278	1.56	-0.056
	2012/2013	2128	249	1.45	-0.071
	2013/2014	1988	178	1.36	-0.078
	2016/2017	1997	144	1.33	-0.084
	2017/2018	1909	219	1.45	-0.085
	2018/2019	1792	217	1.48	-0.083
Средние значения		1944	221	1.47	-0.075

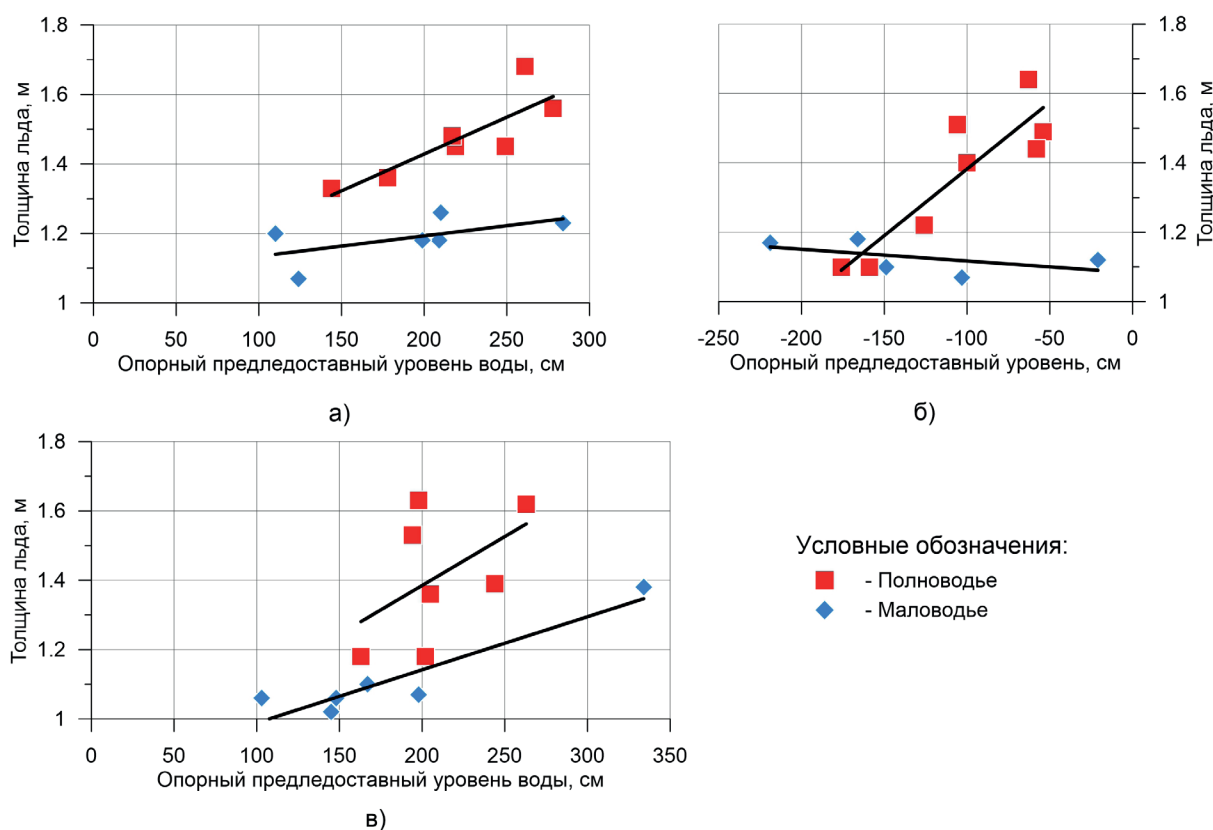


Рис. 3. Толщина льда в зависимости от опорного предледоставного уровня воды реки Лена по данным гидрологических постов Табага (а), Якутск (б) и Кангалассы (в)
 Fig. 3. Ice thickness depending on the reference pre-summer water level of the Lena River according to the data of hydrological posts Tabaga (a), Yakutsk (b) and Kangalassy (c)

В соответствии с данными таблицы 4 был применён алгоритм для определения факторов, влияющих на заторную опасность на гидрологических постах. Результаты относительной оценки гидрологических данных поста Табага за рассмотренные года, а также суммы баллов приведены в таблице 5. Для Табаги имеем следующие значения: $a_{11} = 25$; $a_{12} = 29$; $a_{21} = 6$; $a_{22} = 20$, которые отражены в сформированной матрице (таблица 6). В таблицах 7 и 8 представлены матрицы взаимного распределения суммированных баллов по категориям для гидрологических постов Якутск и Кангалассы.

По данным таблиц 6, 7, 8 с использованием формул (4) и (5) были получены расчётные значения коэффициента ассоциации 0.5 и -0.6 для гидрологических постов Табага, Якутск соответственно. Для гидрологического поста Кангалассы коэффициент контингенции составил 0.6. Согласно источнику [Котеров и др., 2019] по-

лученные значения указывают на наличие средней связи гидрологических данных с заторной опасностью. Установленная связь позволила выявить сочетание таких факторов, как водность предшествующего периода, опорный предледоставный уровень воды и распределение уклонов водной поверхности, влияющих на возникновение заторной опасности на участке реки. По данным георадиолокации можно выявить местоположение участков ледяного покрова повышенной толщины и торосового строения. На основе полученных гидрологических и георадиолокационных данных можно установить вероятность возникновения заторной опасности и вероятное пространственное положение головы затора на участке реки. Скорее всего, оно соответствует не участку с наибольшей толщиной льда и перегибу продольного профиля реки, а отстоит от него на некоторое расстояние (следующий затороопасный участок: сужение русла с увеличением глубины потока, резкий изгиб меженного русла).

Таблица 5

Результаты оценки данных гидрологического поста Табага

Table 5

Results of evaluation of the Tabaga hydrological station data

Период	$\Sigma H_{ур.}$	$H_{оп.}$	$h_{бур.}$	I	Лз	Полноводье (отсутств. Лз)	Маловодье (отсутств. Лз)	Полноводье (нал. Лз)	Маловодье (нал. Лз)
2008/2009	2	2	2	2	1	9	0	0	0
2009/2010	2	2	2	2	2	0	0	10	0
2010/2011	1	2	1	1	1	0	6	0	0
2011/2012	1	2	1	1	1	0	6	0	0
2012/2013	2	2	1	1	1	7	0	0	0
2013/2014	2	1	1	1	2	0	0	7	0
2014/2015	1	1	1	1	2	0	0	0	6
2015/2016	1	1	1	1	1	0	5	0	0
2016/2017	2	1	1	1	1	6	0	0	0
2017/2018	2	2	1	1	2	0	0	8	0
2018/2019	2	2	1	1	1	7	0	0	0
2019/2020	1	2	1	1	1	0	3	0	0
Сумма						29	20	25	6

Таблица 6

Заторная опасность в зависимости от водности реки Лена
в районе гидрологического поста Табага

Table 6

Congestion hazard depending on water content of the Lena River
in the area of the Tabaga hydrological post

Категория	Полноводье	Маловодье	Всего
Наличие заторной опасности	25	6	31
Отсутствие заторной опасности	29	20	49
Всего	54	26	80

Таблица 7

Заторная опасность в зависимости от водности реки Лена
в районе гидрологического поста Якутск

Table 7

Congestion hazard depending on water content of the Lena River
in the area of Yakutsk hydrological post

Категория	Полноводье	Маловодье	Всего
Наличие заторной опасности	9	13	22
Отсутствие заторной опасности	43	16	59
Всего	52	29	81

Таблица 8

Заторная опасность в зависимости от водности реки Лена
в районе гидрологического поста Кангалассы

Table 8

Congestion hazard depending on water content of the Lena River
in the area of Kangalassy hydrological post

Категория	Полноводье	Маловодье	Всего
Наличие заторной опасности	38	0	38
Отсутствие заторной опасности	23	32	55
Всего	61	32	93

Заклучение

По результатам анализа гидрологических и георадиолокационных данных установлено, что весной 2009, 2010, 2013, 2018 годах на постах Табага, Якутск и Кангалассы наблюдались случаи ледовых заторов при сочетании определённых факторов: высокая водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности (-0.05%), наличие ледяного покрова торосового строения и повышенной

толщины льда (150–250 см). По установленным факторам и данным о толщине и типе строения ледяного покрова реки можно установить вероятность возникновения заторной опасности и его пространственное положение на участке реки.

Информация о заторной опасности на участках реки позволит составить схему прохождения весеннего половодья, а также уточнить мероприятия по обеспечению безопасности населения и защите критической инфраструктуры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проектам № 122011800086-1, № 122012400106-7 и по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М. К. Аммосова на 2024 и 2025 гг.

Список литературы

Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 2. С. 82–90.

Бузин В.А., Зиновьев А.Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы): монография. Барнаул: ООО Пять плюс, 2009. 168 с.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.

Климат Якутска / Ред. Ц.А. Швер, С.А. Изюменко. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.

Кильмянинов В.В. Влияние метеорологических условий перед началом ледохода на масштаб заторных наводнений на р. Лене // Метеорология и гидрология. 2012. № 4. С. 86–89.

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. М.: РГАУМСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С., Калинина М.В., Бирюков А.П., Ласточкина Е.М., Молодцова Д.В., Вайнсон А.А. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 6. С. 12–24.

Тананаев Н.И. Сезонное и многолетнее промерзание русел рек криолитозоны и его влияние на русловые деформации // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Геогр. факультет МГУ, 2004. С. 195–201.

Тананаев Н.И. В Якутии суммарный ущерб от наводнений оценили в 46.8 млрд. рублей // ТАСС. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/obshchestvo/17209059> (дата обращения: 21.02.2025).

Фёдоров М.П. Методика георадиолокационных исследований ледяного покрова р. Лена на участке Табагинский мыс-Кангаласский мыс // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 5. С. 18–32.

Beltaos S. River ice jams. Water Resources Publication, 1995. 372 p.

Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. V. 51. Is.1. P. 2–19.

Finlay P.I., Parry N.S., Proskin S.A., Mickle R.J. An overview of ice profiling using ground penetrating radar (GPR) // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 2008. P. 461–470.

Fedorov M.P., Fedorova L.L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022. Vol. 19 [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564> (дата обращения: 21.02.2025).

Kämäri M., Alho P., Colpaert A., Lotsari E. Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. 137. P. 17–29.

Stuefer S., Richards E. River ice measurements for transportation safety in rural communities // *ROSAP*. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/58696> (дата обращения: 21.02.2025).

White K.D., Roger L.K. Ice jam flooding and mitigation, Lower Platte River Basin, Nebraska. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1996. 88 p.

White K.D., Tuthill A.M., Furman L. Studies of ice jam flooding in the United States // *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*. 2006. Vol.78. P. 255–268.

References

Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Faktory obrazovaniya ledovykh zatorov na rekakh basseina Severnoi Dviny v sovremennykh usloviyakh [Factors of ice jam formation on the rivers of the Northern Dvina basin in modern conditions] // *Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University]. Seriya 5. Geografiya*. 2016. No 2. P. 82–90 (in Russian).

Buzin V.A., Zinov'ev A.T. Ledovye protsessy i yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh. Metody matematicheskogo modelirovaniya i opyt ikh realizatsii dlya prakticheskikh tselei (obzor sovremennogo sostoyaniya problemy) [Ice processes and phenomena on rivers and reservoirs. Methods of mathematical modeling and experience of their implementation for practical purposes (review of the current state of the problem)] : monografiya. Barnaul: OOO Pyat plyus, 2009. 168 p. (in Russian).

Donchenko R.V. Ledovyi rezhim rek SSSR [Ice regime of the rivers of the USSR]. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 248 p. (in Russian).

Klimat Yakutsk [Climate of Yakutsk] / Eds. C.A. Shver, S.A. Izyumenko. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 246 p. (in Russian).

Kilmyaninov V.V. Vliyanie meteorologicheskikh uslovii pered nachalom ledokhoda na masshtab zatornykh navodnenii na r. Lene [Influence of meteorological conditions before the onset of ice drift on the scale of jam floods on the Lena River] // *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2012. No 4. P. 86–89. (in Russian).

Kozlov D.V., Buzin V.A., Frolova N.L., Agafonova S.A., Baburin V.L., Banshchikova L.S., Goroshkova N.I., Zavadskii A.S., Krylenko I.N., Savel'ev K.L., Kozlov K.D., Buzina L.F. Opasnye ledovye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii: monografiya [Dangerous

ice phenomena on Russian rivers and reservoirs]. M.: RGAUMSKHA imeni K.A. Timiryazeva, 2015. 348 p. (in Russian).

Kobzar A.I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p. (in Russian).

Koterov A.N., Ushenkova L.N., Zubenkova Je.S., Kalinina M.V., Birjukov A.P., Lastochkina E.M., Molodcova D.V., Vajnsen A.A. Sila svjazi. Soobshhenie 2. Gradacii velichiny korrelyacii [The power of communication. Message 2. Gradations of the correlation value] // Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost [Medical radiology and radiation safety]. 2019. Vol. 64, no 6. P. 12–24. (in Russian).

Tananaev N.I. Sezonnoe i mnogoletnee promerzanie rusel rek kriolitozony i ego vliyanie na ruslovyje deformatsii [Seasonal and perennial freezing of cryolithozone river channels and its influence on channel deformations] // Ehrozionnye, ruslovyje protsessy i problemy gidroekologii [Erosion, channel processes and hydroecological problems]. M.: Geogr. fakultet MGU, 2004. P. 195–201. (in Russian).

Tananaev N.I. V Yakutii summarnyi ushcherb ot navodnenii otsenili v 46.8 mlrd. Rublei [In Yakutia, the total damage from floods was estimated at 46.8 billion rubles] // TASS. 2023. URL: <https://tass.ru/obschestvo/17209059> (accessed: 21.02.2025). (in Russian).

Fedorov M.P. Metodika georadiolokatsionnykh issledovanii ledyanogo pokrova r. Lena na uchastke Tabaginskii mys-Kangalasskii mys [Methodology of georadiolocation studies of the Lena River ice cover in the Tabaginsky cape-Kangalassky cape section] // Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water economy of Russia: problems, technologies, management]. 2022. No 5. P. 18–32. (in Russian).

Beltaos S. River ice jams. Water Resources Publication, 1995. 372 p.

Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // Cold Regions Science and Technology. 2008. Vol. 51. Is.1. P. 2–19.

Finlay P.I., Parry N.S., Proskin S.A., Mickle R.J. An overview of ice profiling using ground penetrating radar (GPR) // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2008. P. 461–470.

Fedorov M.P., Fedorova L.L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564> (accessed: 21.02.2025).

Kämäri M., Alho P., Colpaert A., Lotsari E. Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river // Cold Regions Science and Technology. 2017. 137. P. 17–29.

Stuefer S., Richards E. River ice measurements for transportation safety in rural communities // ROSAP. 2021. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/58696> (accessed: 21.02.2025).

White K.D., Roger L.K. Ice jam flooding and mitigation, Lower Platte River Basin, Nebraska. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1996. 88 p.

White K.D., Tuthill A.M., Furman L. Studies of ice jam flooding in the United States // Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security. 2006. Vol.78. P. 255–268.

ASSESSMENT OF ICE HAZARD IN THE MIDDLE LENA RIVER USING HYDROLOGICAL AND GPR DATA

M.P. Fedorov¹, N.I. Tananaev^{2,3}

¹Mining Institute of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk,

²North-Eastern Federal University, Yakutsk,

³Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk,

E-mail: mpfedoroff@gmail.com, nikita.tananaev@gmail.com

The article presents the results of a study of the water stage and ice regime of the middle Lena River from 2008 to 2020 in the area from Tabaginsky Cape to Kangalassky Cape. A review of the materials of GPR studies of the Lena River ice cover from an aircraft has been conducted. Based on the analysis of hydrological and GPR data, a set of factors contributing to the determination of congestion hazards in the studied section of the river has been established: the water content of the previous period, the distribution of slopes of the water surface, the presence of areas of hummock ice cover and increased thickness.

Ключевые слова: Lena River; water level; ice thickness; structure of the river's ice cover; ground-penetrating radar (GPR).

Received December 20, 2024. Accepted: February 21, 2025

Сведения об авторах

Фёдоров Максим Петрович – научный сотрудник лаборатории георадиолокации Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 43. ORCID: 0000-0001-6722-2861. E-mail: mpfedoroff@gmail.com.

Тананаев Никита Иванович – кандидат географических наук; заведующий лабораторией по изучению климата и экосистем северных регионов, доцент Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Россия, 677013, г. Якутск, ул. Кулаковского, 46. Ведущий научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36. ORCID: 0000-0003-2997-0169. E-mail: nikita.tananaev@gmail.com.

Information about the authors

Fedorov Maksim Petrovich – Research scientist of the GPR laboratory Mining Institute of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences. 43, Lenin Av., 677980 Yakutsk, Russia. ORCID: 0000-0001-6722-2861. E-mail: mpfedoroff@gmail.com

Tananaev Nikita Ivanovich – PhD of Geographical Sciences; Head of the Laboratory for the Study of Climate and Ecosystems of the northern regions, Associate Professor, North-Eastern Federal University. 46, Kulakovsky St., 677013 Yakutsk, Russia. Leading Research Scientist at the Laboratory of Permafrost Groundwater and Geochemistry Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Science. 36, Merzlotnaya St., 677010 Yakutsk, Russia. ORCID: 0000-0003-2997-0169. E-mail: nikita.tananaev@gmail.com.