

Генезис, сценарии и особенности прогнозирования наводнений в среднем течении р. Амга (Центральная Якутия)

Н.И. Тананаев^{1,2,*}, Н.А. Находкин³, А.О. Голованов²

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²Институт естественных наук, СВФУ им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

³Якутское региональное отделение РОССОЮЗСПАС, Якутск, Россия

*TananaevNI@mpi.ysn.ru

Аннотация. Ледовые явления внесли значимый вклад, более 0,5 м, в формирование максимального уровня воды р. Амга в створе с. Амга в 41 половодье из 76 (1938–2018). Средняя величина заторной составляющей максимального уровня воды составила 1,6 м, в годы с наводнениями – 2,4 м, максимальная – превысила 5 м. По генезису наводнения на р. Амга относятся преимущественно к стоково-заторным – 14 случаев, или стоковым – 5 случаев за период с 1938 по 2018 г. Сценарии развития стоковых и заторных наводнений различаются. Заторные наводнения случаются в среднем на четыре дня раньше и при меньших влагозапасах в снеге, чем стоковые. В годы с поздней затяжной весной наводнения случаются крайне редко. Синоптические показатели могут использоваться для предположений относительно характера будущего половодья, однако необходимо развитие более точных количественных методов прогноза вероятности наводнений и их ожидаемого уровня. Такие методы должны учитывать нестационарность основных синоптических факторов возникновения наводнений. Повторяемость наводнений за период наблюдений остается неизменной, что указывает на неэффективность противозаторных мероприятий, активно проводимых в бассейне реки в последние два десятилетия.

Ключевые слова: наводнения, Центральная Якутия, река Амга, климатический реанализ, генезис наводнений, заторные наводнения, нестационарность климата, прогноз наводнений.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Программы комплексных научных исследований Академии наук РС(Я).

Введение

Катастрофические наводнения – редко повторяющиеся события, оказывающие быстрое и массивное воздействие на общественную жизнь и экономическую активность [1]. Современные подходы к снижению ущерба и минимизации последствий наводнений предполагают переход от принятия реактивных мер и финансирования ликвидации последствий наводнений к проактивному управлению гидрологическими рисками [2]. Разработка адекватных мер реагирования на угрозу наводнений и снижения их опасности – шаги, требующие научной поддержки, информации об источниках рисков и возможных стратегиях их минимизации [3].

В Республике Саха (Якутия) основной ущерб в результате наводнений наносится сельским поселениям. После наводнений 1998 и 2001 гг. крупные города РС(Я) – Якутск, Олекминск, Ленск – были полностью или частично защище-

ны от затопления инженерными сооружениями. Сельские поселения остаются уязвимыми, что определяется рядом факторов. Во-первых, особенности традиционного хозяйствования требуют близости к воде и затопляемым угодьям. Во-вторых, муниципалитеты финансово ограничены в выборе методов защиты от наводнений и снижения гидрологических рисков. Строительство защитных дамб затратно, существующие сооружения нередко возведены хозяйственным способом, без проекта и документального оформления, не оформлены в собственность муниципальных образований. В-третьих, ведение самостоятельной земельной политики на уровне муниципалитетов также сталкивается с определенными сложностями [4].

Сельским поселениям РС(Я) необходимы локальные схемы и планы мероприятий по минимизации гидрологических рисков. Их разработка и принятие, в свою очередь, должны опираться

на гидрологические данные, включая понимание причин возникновения высоких наводнений и основанные на таком понимании прогностические модели. Наиболее актуальна разработка таких схем и планов для территории Лено-Алданского междуречья. Это наиболее заселенный и освоенный сельскохозяйственный район Якутии, регулярно страдающий от наводнений. Основной ущерб приходится на среднее течение р. Амга. В 2018 г. заявленный суммарный прямой ущерб от исторического наводнения в с. Амга и окрестностях превысил 1 млрд рубл.

В данной работе решены следующие задачи: (1) рассмотрен генезис наводнений в среднем течении этой реки; (2) выделены типичные сценарии развития половодий с наводнениями различного генезиса; (3) рассмотрены перспективные методики прогнозирования наводнений; (4) сделана оценка современных климатических изменений в бассейне реки и их влияния на возможность предсказания наводнений. Наше исследование создает научно-аналитическую базу для разработки схемы минимизации гидрологических рисков на уровне поселений и района в целом.

Работа продолжает ранее опубликованное исследование [5], поэтому в ней содержатся только самые краткие сведения о бассейне р. Амга и использованных в работе материалах и методах.

Участок исследований

Водосбор р. Амга втиснут между двух крупнейших речных бассейнов региона, рек Лена и Алдан, и по этой причине крайне вытянут в направлении с юго-запада на северо-восток. Длина бассейна по оси долины превышает 900 км при наибольшей ширине не более 150 км, форма его асимметрична, преобладают левые притоки. Верхнее течение реки пересекает полугорные области Алданского нагорья, среднее – выположенное Приленское плато, нижнее – Центральноякутскую низменность.

Село Амга располагается на границе среднего и нижнего течения реки, в левобережной части долины. Русло реки извилистое, в нем изобилуют отмели, резко сужающие живое сечение реки. Пойма реки левосторонняя, изобилует старичными озерами и прирусловыми валами, маркирующими бывшее положение русла.

Исходные данные и методы исследования

В работе использованы многолетние данные наблюдений на трех гидрологических постах (г.п.)

в бассейне р. Амга: г.п. Буяга (с. Верхняя Амга), г.п. Амга (с. Амга) и г.п. Терюль (с. Харбалах). Источники многолетних данных – открытая база данных АНУСТ.Lena [6] и АИС ГМВО [7], в которых приведены официальные данные ФГБУ “Якутское УГМС”. Автоматизированный сбор, хранение и обработка гидрометеорологической информации, подготовка графических материалов организованы в RStudio [8], графическом интерфейсе пользователя для языка R [9], на основе набора функций пакета ‘tidyverse’ [10]. Доступ к данным климатического реанализа NCEP/NCAR [11] и их агрегация выполнены с помощью базовых функций, входящих в пакет ‘RNCER’ [12]: *NCEP.gather()* и *NCEP.aggregate()*.

Авторские скрипты были написаны для пакетной обработки полей температуры воздуха, расчета значений температуры воздуха в двух узлах модели: точка T1, 62°30' с.ш., 132°30' в.д., соответствует среднему и нижнему течению реки; T2, 60° с.ш., 120° в.д., соответствует верхнему течению реки. Для двух точек рассчитывали: сумму температур ΣT_{Ti} , К, и среднюю температуру T_{Ti} , °С, по декадам в апреле и мае; разницу средних декадных температур между точками T1 и T2, $\Delta T = T_{T1} - T_{T2}$, °С; число дней с отрицательной температурой $D(-)$. Исследование тенденций в рядах переменных выполняли с помощью теста Манна–Кендалла, функция *mk.test()*, расчет критерия Вальда–Вольфовица для проверки рядов на случайность и однородность – с помощью функции *ww.test()* пакета ‘trend’ [13].

Качество простой бинарной классификации для прогнозирования вероятности наводнений по метеоданным оценивалось по трем метрикам:

- (1) точность (precision) $P = TP / (TP + FP)$;
- (2) полнота (recall) $R = TP / (TP + FN)$;
- (3) F -мера $= (1 + \beta^2) \cdot [(P \cdot R) / (\beta^2 \cdot P) + R]$.

Точность показывает, какова доля лет с наводнениями среди лет, для которых наводнение было предсказано, полнота – какова доля правильно предсказанных наводнений среди всех лет с наводнениями. Полнота, как метрика, в прогнозировании наводнений имеет большее значение, чем точность, поскольку цена ошибки второго рода, ложно-отрицательного прогноза, намного выше цены ошибки первого рода.

Типизация наводнений по генезису

Генезис наводнений определяется происхождением максимального уровня воды [14]. На-

воднение в контексте данной работы рассматривается как гидрологическое событие, при котором уровень воды превысил установленную отметку опасного гидрологического явления (ОГЯ). Уровень начала затопления поймы в районе г.п. Амга равен 900 см над «0» графика, отметка ОГЯ – 925 см.

Основные колебания уровня воды связаны с изменениями расхода воды, к которым может добавляться влияние ледовых явлений. Стоковые наводнения возникают в условиях открытого русла. Ледовые явления в створе или ниже створа поста приводят к возникновению *заторных* и *стоково-заторных наводнений*. Различие между ними условное: считается, что стоково-заторные наводнения приурочены к периоду максимального стока – половодью или паводку, тогда как чисто заторные – к межени [15]. На заторных участках рек генетическая роль заторов в формировании уровня воды может превышать 70 % [16].

Сценарии развития гидрологической обстановки во время наводнений, а также подходы к их прогнозированию различаются в зависимости от их генезиса. Для этого необходимо оценить вклад заторной составляющей в подъем уровня воды периода весеннего половодья за период наблюдений.

Оценка заторной составляющей максимальных уровней р. Амга

В условиях открытого русла связь между расходом и уровнем воды однозначна. Поэтому в случае стокового наводнения максимальный расход Q_{\max} и уровень воды H_{\max} наблюдаются в одну дату, и на графике связи этих величин образуют однозначную связь (рис. 1, штриховая линия), что свидетельствует об отсутствии вклада ледовых явлений в формирование максимального уровня воды. При заторных наводнениях максимальный уровень воды формируется под влиянием ледовой плотины и избыточной шероховатости подводной поверхности льда. Как следствие, на графике связи максимального расхода и уровня воды виден дополнительный подъем уровня (см. рис. 1). Максимальный уровень воды в случае заторного или стоково-заторного наводнения наблюдается, как правило, на несколько дней раньше максимального расхода.

Вклад ледовых заторов в формирование наводнений в створе р. Амга – с. Амга оценили по

данным о максимальном уровне воды H_{\max} и расходе в дату, когда он наблюдался: $Q(H_{\max})$, максимальном расходе воды Q_{\max} и уровне в дату, когда он наблюдался: $H(Q_{\max})$. При отсутствии заторов даты наступления H_{\max} и Q_{\max} совпадают, связь $Q_{\max} \sim H(Q_{\max})$ имеет степенной вид

$$H(Q_{\max}) = 3,5846 \cdot Q_{\max}^{0,6655}. \quad (1)$$

Использование уравнения (1) позволяет для заданного года рассчитать заторную составляющую максимального уровня воды. Для этого выбирается пара значений H_{\max} и $Q(H_{\max})$; затем для $Q(H_{\max})$ по уравнению (1) рассчитывается соответствующий ему уровень воды H^* , наблюдающийся при условии свободного русла. Разница между H_{\max} и H^* – вклад заторных явлений в значение H_{\max} . Если он близок к 0, то наводнение относится к стоковым, если значительно больше 0 – к заторным либо стоково-заторным.

Расчетный $H(Q_{\max})$ в створе р. Амга – с. Амга за период с 1938 по 2007 г. получили с помощью уравнения (1) по данным о Q_{\max} , наблюдаемых в нижерасположенном створе р. Амга – г.п. Терюль, поскольку для г.п. Амга данных о расходе воды за этот период в нашем распоряжении нет. Такое допущение возможно для приблизительных расчетов, поскольку на участке протяженностью около 300 км между г.п. Амга и г.п. Терюль отсутствуют крупные притоки, а впадение мелких притоков компенсируется распластыванием волны половодья. За период с пересекающимися рядами гидрологических данных (2008–2018 гг.) регрессионная модель равенства Q_{\max} на двух постах лишь незначительно хуже описывает взаимодействие между переменными, чем оптимальная модель линейной регрессии; в обоих случаях коэффициент корреляции $r > 0,95$ на уровне значимости $p < 0,01$. С другой стороны, наш подход представляет значительное упрощение, поскольку использует для исторического периода не расход воды в дату максимального уровня, а максимальный расход. Полученные результаты, следовательно, следует воспринимать как минимальную оценку генетической роли заторов.

За период с 1938 по 2018 г. ледовые явления внесли значимый вклад, более 0,5 м, в величину максимального уровня в 41 половодье из 76 (рис. 2, а). Наибольший вклад ледовых заторов, свыше 5 м, отмечен в 2011 и 2014 гг. В первом случае это произошло в крайне маловодный год,

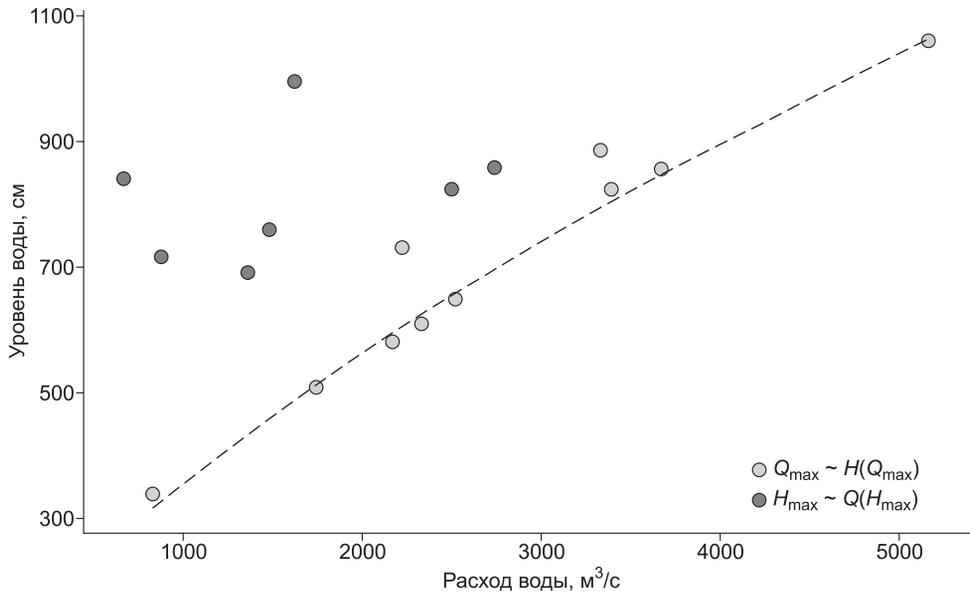


Рис. 1. Связь максимальных уровней воды H_{max} и максимальных расходов воды Q_{max} , р. Амга – с. Амга, 2008–2018 гг.

Fig. 1. Highest annual water stage H_{max} plotted against highest annual water discharge Q_{max} , the Amga River, at settlement Amga, 2008–2018.

но привело к подъему уровня на 0,8 м ниже отметки ОГЯ. Во втором случае водность года была больше, и ледовый затор привел к подъему уровня воды выше отметки ОГЯ до $H_{max} = 993$ см и к наводнению в с. Амга.

Средняя величина дополнительного заторного подъема уровня воды составила 1,61 м, и в подавляющем большинстве случаев, в 30 лет из 41, находилась в диапазоне от 0,5 до 2,0 м и не была связана с величиной H_{max} (рис. 2, б). В годы с наводнениями вклад заторной составляющей больше среднего – 2,4 м. Для лет с наводнениями характерна обратная зависимость заторной составляющей H_{max} от расхода воды (рис. 2, в).

Генезис наводнений в среднем течении р. Амга

Выполненные расчеты позволили установить, что из 19 наводнений, случившихся в с. Амга в период с 1938 по 2018 г., 5 относятся к стоковым, и 14 – к стоково-заторным. Стоковые наводнения редки: они наблюдались в 1962, 1983, 1998, 2007 и 2008 гг. Средний максимальный уровень стоковых наводнений – 1012 ± 20 см над «0» графика г.п. Амга, стоково-заторных наводнений – 1002 ± 43 см (табл. 1), различия в H_{max} статистически незначимы.

Каждому типу наводнений соответствует свое типичное сочетание климатических и синопти-

ческих факторов, определяющих наибольшую вероятность их возникновения. Известно, что метеорологические условия перед началом ледохода играют определяющую роль в вероятности заторообразования на территории Якутии [16, 17]. Очевидно, что в данном районе именно заторы представляют основную опасность и чаще всего приводят к наводнениям.

Возникновение заторов предсказуемо, поскольку они случаются почти каждый год. Одна из причин – в том, что в южной части водосбора уже активно происходит снеготаяние, перемещение волны половодья и сопровождающего его ледохода, тогда как в северных районах лед по-прежнему прочен и нередко сохраняется отрицательная температура воздуха [16, 18]. Нижняя кромка ледохода, особенно при быстром движении, упирается в относительно более прочный ледяной покров, что приводит к интенсивному торошению, подсову ледяных полей друг под друга, и в итоге – к образованию головы затора. В случае стоковых наводнений ведущую роль играют иные факторы – дружность половодья, влагозапас в снеге.

В среднем течении р. Амга стоково-заторные наводнения в среднем случаются раньше, чем стоковые (см. табл. 1): начало подъема уровня наблюдается раньше на два дня, максимальный уровень воды – на четыре дня, следовательно, больше и интенсивность подъема уровня воды. Влагозапас

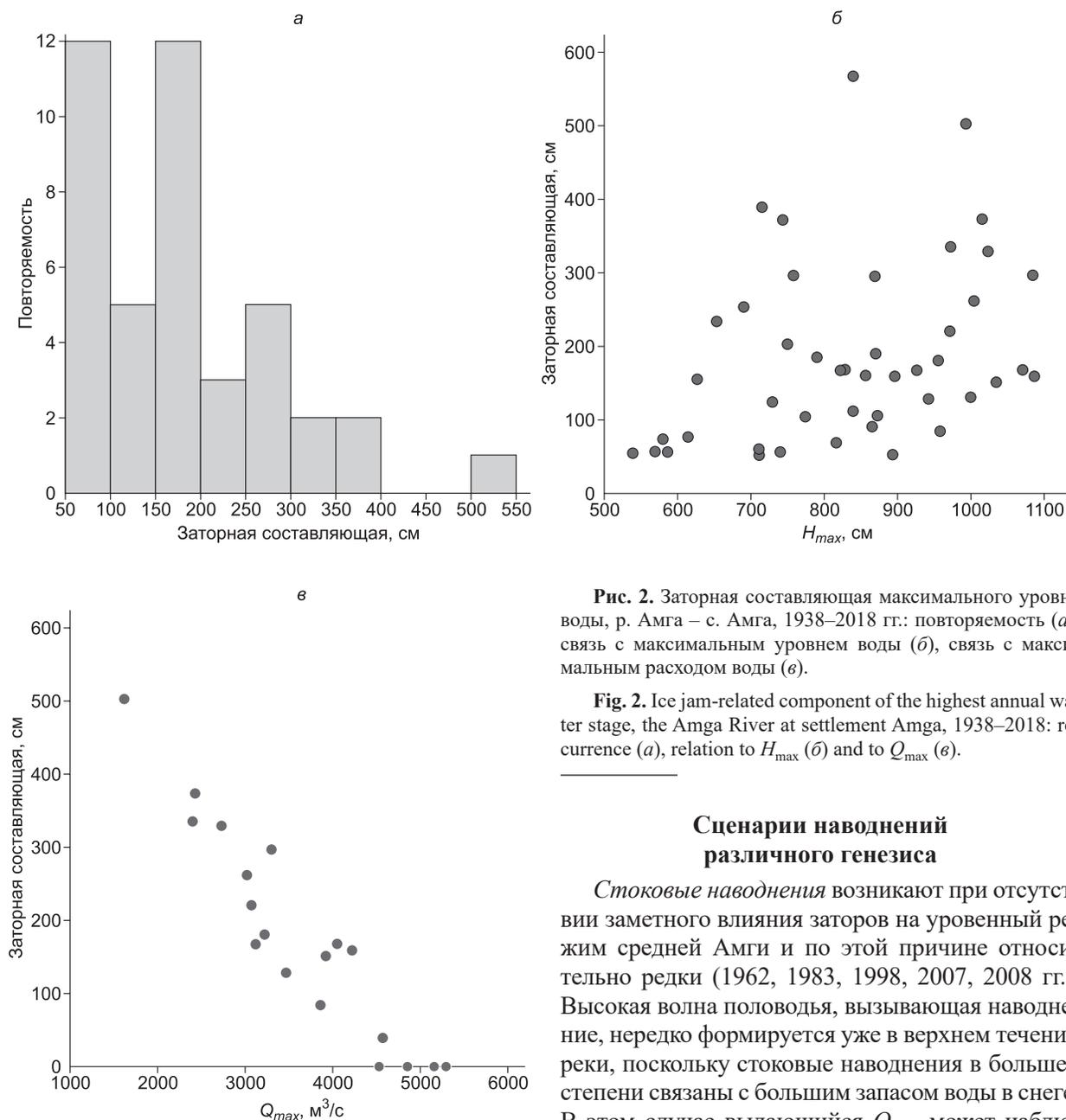


Рис. 2. Заторная составляющая максимального уровня воды, р. Амга – с. Амга, 1938–2018 гг.: повторяемость (а), связь с максимальным уровнем воды (б), связь с максимальным расходом воды (в).

Fig. 2. Ice jam-related component of the highest annual water stage, the Amga River at settlement Amga, 1938–2018: recurrence (a), relation to H_{max} (б) and to Q_{max} (в).

Сценарии наводнений различного генезиса

Стокосые наводнения возникают при отсутствии заметного влияния затворов на уровеньный режим средней Амги и по этой причине относительно редки (1962, 1983, 1998, 2007, 2008 гг.). Высокая волна половодья, вызывающая наводнение, нередко формируется уже в верхнем течении реки, поскольку стокосые наводнения в большей степени связаны с большим запасом воды в снеге. В этом случае выдающийся Q_{max} может наблюдаться уже в створе г.п. Буяга, как в наводнение 1962 г. (рис. 3). Характерно, что стокосые наводнения хронологически совпадают с крупными наводнениями на других реках региона. Так, 1983 г. был самым многоводным за период исторических наблюдений на большинстве рек бассейна р. Лена, в 1998 г. крупное наводнение наблюдалось на средней Лене, в 2007 и 2008 гг. наводнения затронули бассейны малых рек центральной Якутии, а также Северо-Востока России, в первую очередь р. Алазея. Стокосые наводнения развиваются по схожему сценарию: для них характерно раннее начало снеготаяния, большая его продолжитель-

в снеге ожидаемо больше в годы со стокосыми наводнениями, майские осадки – в годы с заторными наводнениями. Основной фактор риска наводнения в районе с. Амга – величина заторной составляющей максимального уровня, для которой фактически не существует методов прогноза. Стокосое наводнение, в свою очередь, предсказать относительно просто: предпосылки для его возникновения складываются уже в верхнем течении, где сосредоточены значительные влагозапасы в снеге. В целом, для каждого типа наводнений характерен свой сценарий развития.

Характеристики наводнений различного генезиса на гидрологических постах в бассейне р. Амга

Table 1

Spring flood features on gauging stations in the Amga River basin

Тип наводнений/ Flood type	Дата H_{\max} / H_{\max} date	Дата начала подъема уровня/ Stage increase start day	Влагозапас в снеге, мм/ Snow water equivalent, mm	Осадки за май, мм/ May precipitation, mm
Стоковые /Discharge flood	18/V	9/V	133	29
Заторные /Discharge-jamming flood	14/V	7/V	121	38

ность и небольшое количество дней с отрицательной температурой воздуха в верховьях.

Для средней Амги опасность стоковых наводнений в том, что предотвратить их наступление не представляется возможным: расход воды, превышающий $4200 \text{ м}^3/\text{с}$, гарантирует подъем уровня воды на г.п. Амга выше отметки ОГЯ (см. рис. 1). С другой стороны, поскольку пик стокового наводнения формируется в верхнем течении реки, его возможно предсказать с заблаговременностью от 2 до 3 дней, во время его прохождения в створе вышерасположенного г.п. Буяга, и своевременно принять меры к эвакуации жителей и защите домохозяйств. Этим стоковые наводнения отличаются от заторных, прогноз которых сопряжен со значительными сложностями.

Стоково-заторные наводнения формируются при различных сочетаниях внешних условий и развиваются по различным сценариям, однако чаще всего – во время быстрого и дружного половодья, при сравнительно небольшом расходе

воды. В большинстве случаев для них типично очень раннее начало половодья, в последнюю декаду апреля или первые числа мая, что более чем на неделю раньше нормы. К примеру, в 2014 г. в верховьях Амги положительная температура воздуха установилась уже в первой декаде апреля, и весь месяц держалась на $1,5 \dots 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем в центральной Якутии. В результате дружной весны половодье началось рано, по г.п. Буяга – уже 26 апреля, что на 11 дней раньше среднего срока. В результате 4 мая 2014 г. ниже г.п. Амга наблюдался затор, приведший к подъему уровня на 503 см до отметки 993 см.

Заторные наводнения в позднее, затянувшееся половодье, случаются редко. Подъем воды, вызванный заторами, может превышать 3 м, однако позднее и растянутое половодье с возвратами холодов не могут обеспечить водность, достаточную для подъема уровня выше отметки ОГЯ. Наводнение в такие годы также связано с резким потеплением, пусть и отложенным.

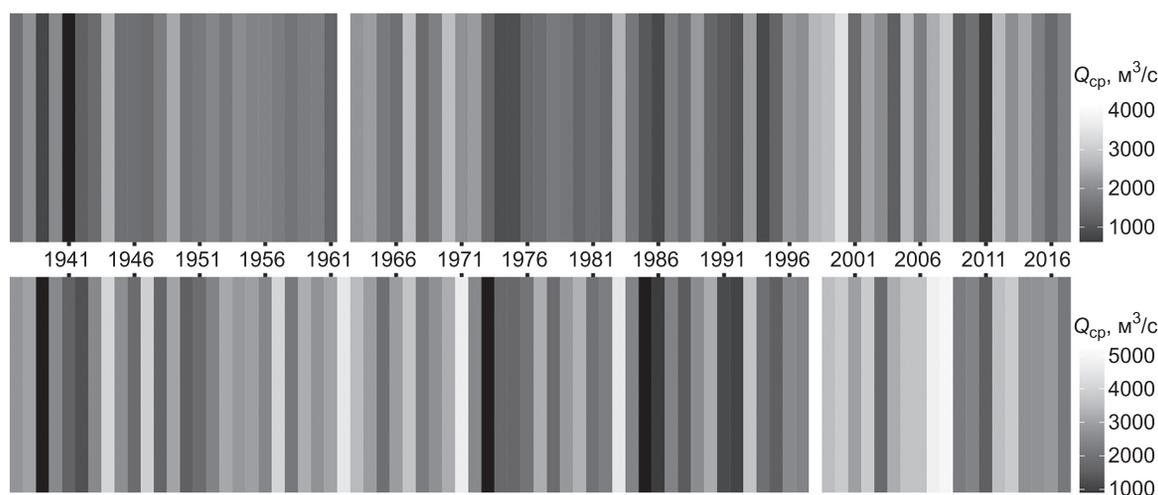


Рис. 3. Максимальные расходы воды р. Амга в створах г.п. Буяга (вверху) и г.п. Терьют (внизу), 1937–2017 гг.

Fig. 3. Highest annual water discharge, the Amga River at Buyaga (above) and Teryut (below) gauging stations, 1937–2017.

В 1960 г. отрицательные температуры в бассейне Амги устойчиво держались до середины мая, что случается крайне редко, и затем резко перешли через 0 °С. Половодье на г.п. Буяга началось 14 мая 1960 г., максимальный уровень в с. Амга наблюдался 24 мая, заторный подъем уровня составил 3,3 м при $H_{\max} = 1023$ см.

В ряде случаев стоково-заторные наводнения происходят в годы с ранней, но недостаточно дружной весной, когда резкие оттепели начинаются по всему бассейну реки уже во второй декаде апреля, но всякий раз прерываются резкими возвратами холодов (2000, 2018). В отдельные годы, прежде всего в середине XX в., значимую роль играли дождевые осадки в верхнем течении реки. Так, в наводнение 1963 г. при затяжной прохладной весне слой майских осадков составил 74 мм, в два раза больше среднего, что привело к резкому подъему уровня воды до 942 см в створе г.п. Амга.

Такие наводнения сложнее всего прогнозировать в силу отсутствия единого ведущего фактора. При низком расходе воды наибольшая вероятность стоково-заторного наводнения приурочена, как видно, к крайне ранней весне в верхнем течении Амги, когда продвижение волны ледохода встречает сопротивление прочного ледяного покрова, недостаточно ослабленного оттепелями, и максимально вероятно возникновение мощных заторов именно на пике половодья или за один-два дня до него. При достаточно большом расходе воды величина заторного подъема уровня, необходимого для начала наводнения, меньше.

Использование метеоданных для приблизительного прогноза вероятности наводнений

Как показано выше и в нашей предыдущей работе [5], существование температурного «диаполя», с теплым полюсом в верховьях р. Амга и холодным – в ее среднем течении, может считаться одной из основных предпосылок возникновения заторов в районе г.п. Амга. Косвенно, отрицательная разница среднедекадной температуры воздуха между средним и верхним течениями реки в конце апреля–начале мая $\Delta T < 0$ может служить индикатором повышенной вероятности наводнений на средней Амге. Этот фактор нельзя считать единственным определяющим, необходим учет других факторов, набор которых зависит от генезиса наводнения.

Анализ имеющихся гидрометеорологических данных (табл. 2) показал, что за период с 1948 по 2018 г., для которого есть данные реанализа NCEP/NCAR и опубликованные данные Росгидромета по осадкам на м/с Дикимдя в верховьях реки, всего произошло 17 наводнений, при этом в пяти случаях условие $\Delta T < 0$ не выполнялось (ошибка второго рода, $p = 0,29$). Кроме того, условие $\Delta T < 0$ выполнялось при отсутствии наводнений в 10 годах из оставшихся 55 (ошибка первого рода, $p = 0,18$). Точность (precision) такой простой модели равна 0,55, полнота (recall) равна 0,71, что неплохо для модели, основанной на единственном косвенном показателе. F -меру оценим дважды, сбалансированно, при $\beta = 1$, и субъективно, при $\beta = 10$, в предположении, что полнота в 10 раз важнее точности, т. е. правильное определение наводнения намного «дороже», чем цена ошибки первого рода. Величина F -меры меняется от 0,62 при $\beta = 1$ до 0,71 при $\beta = 10$, что указывает на удовлетворительное качество модели.

Ошибки первого рода более часты в последние два десятилетия – 5 случаев из 10 в период с 2002 по 2018 г. Ошибки второго рода в 4 случаях из 5, напротив, относятся к периоду до 1990 г. В отношении ошибок первого рода следует также сказать, что в 4 случаях из 10 (1967, 2002, 2004 и 2011 гг.), тем не менее, максимальный уровень воды поднимался до относительно высоких отметок – между 825 и 925 см над «0» графика поста, т. е. существовала объективная вероятность наводнения.

Точность такого однофакторного синоптического прогноза относительна, но в первом приближении это направление выглядит перспективным для прогноза вероятности опасного наводнения в среднем и нижнем течении р. Амга, с учетом типа наводнения. Так, для *стоковых наводнений* необходимы влагозапас в снеге на конец апреля свыше 130 мм, раннее начало снеготаяния в верховьях, устойчивые холода в конце апреля/начале мая. Кроме того, в динамическом прогнозировании максимальный расход воды по г.п. Буяга свыше 4000 м³/с гарантирует наводнение в с. Амга в ближайшие 5–7 дней, а расход в диапазоне от 3000 до 4000 м³/с резко увеличивает вероятность стоково-заторного наводнения.

Стоково-заторные наводнения возможно прогнозировать по совокупности признаков, среди которых влагозапас в снеге (свыше 120 мм), раннее начало половодья и небольшое количество

Разница среднедекадной температуры воздуха в точках Т1 (Центральная Якутия) и Т2 (Южная Якутия), ΔT , °С, в 1948–2018 гг. Приведены данные для лет с наводнениями ($H_{\max} > 925$ см) и лет без наводнений, в которые для конца апреля-начала мая выполнялось условие $\Delta T < 0$

Table 2

Average 10-day air temperature in points T1 (Central Yakutia) and T2 (South Yakutia), ΔT , °C, 1948–2018. Data are given for years with floods ($H_{\max} > 925$ cm), and all years on record with $\Delta T < 0$ in late April and/or early May

Год/ Year	H_{\max} , см*/ H_{\max} , cm*	Декады/ 10-day intervals			Дата/ Date	Год/ Year	H_{\max} , см/ H_{\max} , cm*	Декады/ 10-day intervals			Дата/ Date
		3-IV	1-V	2-V				3-IV	1-V	2-V	
<i>Годы с наводнениями, $H_{\max} > 925$ см</i>											
1952	1015	1,24	-0,08	3,19	7/V	1983	969	1,92	1,68	3,56	21/V
1953	926	-0,54	4,2	0,32	17/V	1984	972	5,01	2,06	2,14	6/V
1957	1070	2,59	1,35	-0,19	13/V	1998	1007	-0,34	-1,02	1,07	17/V
1960	1023	-0,42	3,56	0,20	23/V	2000	958	1,87	1,02	0,90	16/V
1961	971	0,35	-0,79	0,68	17/V	2007	1010	-3,62	0,03	1,12	11/V
1962**	<i>1071</i>	<i>0,43</i>	<i>2,75</i>	<i>2,73</i>	<i>21/V</i>	2008	1057	-1,29	2,01	2,56	16/V
1963	942	2,01	1,83	1,65	23/V	2014	993	-1,77	-2,29	-4,47	4/V
1977	955	1,36	-0,25	1,91	13/V	2018	1104	-2,14	2,73	0,09	11/V
1980	1084	-0,58	1,02	2,43	13/V						
<i>Годы без наводнений, $H_{\max} < 925$ см</i>											
1964	743	-1,44	2,55	0,26	25/V	2002	873	0,31	-2,07	-1,46	15/V
1967	893	-2,40	-0,30	-0,13	4/V	2004	865	-0,84	-0,73	0,39	16/V
1978	586	-2,54	-2,23	2,83	25/V	2009	729	-0,79	1,24	1,25	12/V
1981	579	-1,54	0,17	0,63	22/V	2011	839	-1,10	-2,49	1,50	10/V
1997	667	-1,33	0,65	-0,65	19/V	2015	758	-1,72	-0,79	0,62	5/V

* H_{\max} – максимальный годовой уровень воды, см над «0» графика поста; дата – дата наблюдения максимального уровня.

* H_{\max} – maximum annual water level, sm above «0»; date - date of observation of the maximum level.

** Курсивом выделены ошибки второго рода (ложные отрицательные результаты).

** Errors of the second type (false negative results) are italicized.

дней с отрицательной температурой в верховьях реки. В случае позднего половодья спровоцировать наводнение способно резкое повышение температуры. Кроме того, в динамическом прогнозировании любое падение температуры воздуха ниже 0 °С во время прохождения ледохода в среднем течении реки повышает вероятность заторообразования. В годы с поздней и затяжной весной наводнения не случаются.

С точки зрения заблаговременности прогноза, использование синоптических показателей позволяет делать первые предположения о вероятности наводнения уже в третьей декаде апреля на основании декадных прогнозов погоды в южных

и центральных районах Якутии. Однако для того чтобы рассмотренный подход стал полноценной прогнозной методикой, необходима дальнейшая работа. Интересно, что в годы, когда существовали предпосылки возникновения наводнений на средней Амге, происходили мощные заторные наводнения на средней Лене – 2010 и 2013 гг., как примеры. Возможно, построенная на изложенных выше подходах расчетная методика может применяться, после адаптации, и для средней Лены.

Основная сложность, с которой может столкнуться такая прогнозная модель, как и другие модели, нестационарность климата. Наводнения

в 1960-х и 1980-х гг. происходили по определенным причинам и в результате определенных сочетаний погодных условий (температуры воздуха, количества дней с положительной температурой). С начала XXI в. климат Якутии изменился, и наводнения последних лет возникают в результате других сочетаний погодных условий, которые раньше не наблюдались.

**Стационарность
синоптических факторов наводнений**

Прогнозирование наводнений упирается в проблему нестационарности климата и рядов гидрометеорологических характеристик, используемых в прогнозах, поскольку соотношение значимых факторов может меняться со временем. В бассейне р. Амга климатические изменения отмечаются с середины 1990-х гг. Начиная с этого времени, наблюдается резкое уменьшение количества дней с отрицательной температурой в конце апреля–начале мая, рост средней температуры воздуха в начале весны.

Большинство метеорологических рядов не проходит проверку на стационарность и случайность по критерию Вальда–Вулфовица *WW* (табл. 3). Кроме того, наблюдаются более раннее начало весны и более высокая температура воздуха, уменьшается число дней с отрицательной температурой в конце апреля–начале мая. Для оценки значимости этих трендов использован стандартный критерий Манна–Уитни *U** (см. табл. 3).

Максимальный годовой уровень воды за период наблюдений остается стабильным ($p = 0,56$), неизменна и повторяемость наводнений, несмотря на активно проводимые в последние десяти-

летия противозаторные меры ($p = 0,50$), что говорит о неэффективности, в долгосрочной перспективе, таких мер. Дата наступления максимального уровня воды сместилась на более ранние сроки и наблюдается в 1999–2019 гг. на шесть дней раньше, 11 мая, чем в период с 1938 по 1998 г.

Наблюдаемые изменения, с точки зрения условий возникновения наводнений, в чем-то компенсируют друг друга. Так, с одной стороны, слой зимних осадков в верхнем течении реки уменьшается, с другой – увеличивается температура воздуха, причем в верхнем течении реки – больше, чем в среднем. Этим объясняется увеличение числа «ошибок первого рода» в табл. 2: большая разница температур между верхним и нижним течением, раннее таяние снега с меньшей вероятностью приводят к наводнениям, поскольку слой стока половодья в среднем становится меньше и уже недостаточен для возникновения стоково-заторных наводнений. С другой стороны, в таких условиях катастрофическое наводнение может произойти в любой год со снегозапасами больше среднемноголетних либо в многоводный год с холодной весной в центральной Якутии.

**Прогнозирование наводнений
в среднем течении р. Амга**

Выше мы показали, что даже простая однофакторная прогнозная модель, основанная на рутинно прогнозируемых показателях (температура воздуха), может достигать некоторого успеха в бинарном прогнозе возможности наводнения. Полученные нами полнота модели и *F*-мера больше 0,7 в задаче с такой постановкой оцениваются

Таблица 3
Уровень значимости тенденций современных климатических изменений в бассейне р. Амга

Table 3

Statistical significance of climatic trends in the Amga River basin

T1			T2			Бассейн/ Amga R. basin		
<i>WW</i>	<i>U*</i>		<i>WW</i>	<i>U*</i>		<i>WW</i>	<i>U*</i>	
T_{3-IV}	$p < 0,05$	$p < 0,01$	T_{3-IV}	$p < 0,05$	$p < 0,001$	ΔT_{3-IV}	$p < 0,1$	$p < 0,05$
T_{1-V}	$p < 0,001$	$p < 0,001$	T_{1-V}	$p < 0,001$	$p < 0,001$	ΔT_{1-V}	–	$p < 0,05$
T_{2-V}	–	$p < 0,001$	T_{2-V}	–	$p < 0,001$	ΔT_{2-V}	–	$p < 0,05$
$D(-)_{3-IV}$	–	$p < 0,01$	$D(-)_{3-IV}$	$p < 0,05$	$p < 0,001$	P_{IV-X}	$p < 0,1$	$p < 0,1$
$D(-)_{1-V}$	$p < 0,05$	$p < 0,01$	$D(-)_{1-V}$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	P_V	–	–
$D(-)_{2-V}$	–	$p < 0,05$	$D(-)_{2-V}$	–	$p < 0,001$	H_{max}	$p < 0,05$	–

как удовлетворительные, особенно в прогнозировании заторных наводнений. В перспективе, однако, следует исследовать возможность применения и других моделей прогноза наводнений. Важный вопрос: какой именно параметр планируется прогнозировать? От ответа на этот вопрос зависит выбор оптимальной прогностической модели.

Бинарный прогноз наводнения может быть построен на любой модели бинарного выбора, например классической множественной логит-или пробит-регрессии или более сложных моделях нечеткой логистической регрессии [19]. Системы нечеткой логики, вероятно, оптимально использовать для вероятностного прогноза распределения максимального уровня воды по высотным диапазонам. В данном случае решается задача о том, с какой вероятностью максимальный уровень воды попадет в тот или иной диапазон отметок. Искусственные нейронные сети (ИНС) ранее использовали для прогноза заторной составляющей максимального уровня воды и максимальных заторных уровней воды для рек в бассейне р. Северная Двина [20]. В состав предикторов входили осенние условия (осенние уровни воды, характеристики осеннего шугохода), данные о толщине льда, весенние условия (даты вскрытия и расходы воды перед вскрытием). Качество модели авторы оценивают как удовлетворительное, однако они отмечают также требовательность моделей ИНС к объему исходных данных. Опыт прогноза вскрытия р. Атабаска в створе Форт Макмюррэй показывает, однако, что простые системы с нечеткой логикой способны давать качественные бинарные прогнозы, а смешанные прогнозные модели с нечеткой логикой и ИНС – также и количественные прогнозы максимального уровня воды [21].

Заключение

Масштаб наводнений определяется природными причинами, а также социально-экономическими последствиями, которые они влекут, в первую очередь – материальным ущербом. С другой стороны, у наводнений есть определенные социально-экономические причины: низкий уровень управления территориями, как следствие – несвоевременные и недостаточные управленческие решения, особенности хозяйствования на затопленных территориях. В этом же контексте можно говорить и о природных последствиях наводнений, например, снижении биоразнообразия и потере качества экосистемных услуг.

Работа по минимизации гидрологических рисков и ущербов от наводнений включает в себя пять основных этапов: прогноз, предупреждение, подготовка, реагирование и ликвидация последствий. Превентивные мероприятия, направленные на предупреждение наводнений, как показывают статистические данные [16, 20], не оказывают никакого влияния на частоту заторных наводнений. Косвенно подтверждают эти выводы и данные наблюдений в Республике Саха (Якутия), где только взрывные работы на этапе реагирования оказывают крайне ограниченный положительный эффект, и то локально. Противозаторные мероприятия не смогли предотвратить ни одно крупное наводнение на р. Лена и притоках за последние два десятилетия, однако способствовали образованию крупных затор и наводнениям в Ленске в 2001 г. и в Амге в 2018 г. Как следствие, впустую тратится финансирование, которое могло бы в ином случае пойти на реализацию инфраструктурных проектов, связанных с безопасным освоением речных долин – расчистку русел малых рек, дноуглубление на средних и крупных реках, берегоукрепительные работы, а также разработку методов прогнозирования наводнений.

Современная практика работы по снижению ущербов от наводнений должна быть пересмотрена, акцент должен переместиться с технических мер, которые не эффективны, на развитие инструментов страхования рисков [22], на разработку программ психологической поддержки пострадавших от наводнений [23].

Среднее и нижнее течение р. Амга – важный сельскохозяйственный регион, постоянное население которого сосредоточено в долине реки. Наводнения наносят этому региону значительный ущерб, поэтому их прогноз – необходимое звено в стратегической работе по снижению гидрологических рисков. Полученные в данной работе результаты предполагают, что такая прогнозная методика может быть разработана, опираясь на данные о слое зимних осадков, сроках весеннего перехода через 0 °С в верхнем и среднем течении реки, а также вероятном типе ожидаемого наводнения.

При разработке прогнозных подходов необходимо учитывать влияние изменений климата на соотношение значимых прогнозных факторов. Больше внимание следует уделять оценкам влагозапаса в снеге в верхнем течении Амги, а также организации структурных и неструктурных мер

защиты от наводнений и предупреждения негативных последствий: расчистку русла реки на потенциально заторных участках, улучшение коммуникации с населением, страхование риска затопления как на уровне домовладений, так и на уровне отдельных муниципалитетов, улучшение коммуникации с местным населением. Необходимо разработать прогнозную методику, которая, видимо, будет общей для средней и нижней Амги и средней Лены, учитывающей типизацию наводнений, изменение во времени основных факторов и возможности динамического прогнозирования – с меньшей заблаговременностью, но опирающегося на информацию в реальном времени.

Статья подготовлена в рамках программы Комплексных научных исследований Академии наук РС(Я).

Литература

1. *de Ville de Goyet C., Zapata Marti R., Osorio C.* Natural disaster mitigation and relief. // Disease control priorities in developing countries. 2nd Ed. / The World Bank. London, UK. 1401 p.
2. *Wright J.M.* The nation's responses to flood disasters: A historical account / Association of State Floodplain Managers, 2000. 102 p.
3. *Сендайская* рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. UNISDR, Женева, Швейцария, 2015. 38 с.
4. *Козлова С.В.* Современная государственная земельная политика // Федерализм. 2017. № 3(87). С. 33–48.
5. *Tananaev N., Efremova V., Gavrilyeva T., Parfenova O.* Assessment of the community vulnerability to spring floods: the case of the Amga River, Central Yakutia, Siberia // Hydrology Research. Vol. 52, №1. P. 125–141. DOI: 10.2166/nh.2020.124
6. *AHYST.Lena.* Arctic hydrology and statistics data or the Lena River basin. Compilative dataset on mean annual and extreme flows in the Lena River basin (compiled by Makarieva O., Tananaev N., Lebedeva L.), figshare, version 1.2 (12 August 2019). DOI: 10.6084/m9.figshare.3206962.
7. *Автоматизированная* информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Адрес доступа: <https://gmvo.skniivh.ru>.
8. *RStudio Team.* RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. URL: <http://www.rstudio.com/>.
9. *R Core Team.* R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: <https://www.R-project.org/>
10. *Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Grolemond G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H.* Welcome to the tidyverse // Journal of Open Source Software. 2019. Vol. 4(43). P. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.
11. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471.
12. *Kemp M.U., van Loon E.E., Shamoun-Baranes J., Bouten W.* RNCEP: global weather and climate data at your fingertips // Methods in Ecology and Evolution. 2012. No. 3. P. 65–70., R package version 1.0.9.
13. *Pohlert T.* trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>.
14. *Самохин М.А.* Особенности изменения уровня воды в реках в различных регионах России: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 26 с.
15. *Магрицкий Д.В., Иванов А.А.* Наводнения в дельте р. Кубани // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 4. С. 387–406.
16. *Бузин В.А.* Затопы и зажоры на реках России. СПб.: ГГИ, 2016. 240 с.
17. *Кильмянинов В.В.* Влияние метеорологических условий перед началом ледохода на масштаб заторных наводнений на Лене // Метеорология и гидрология. 2012. № 4. С. 86–89.
18. *Lindenschmidt K.-E., Huokuna M., Burrell B.C., Beltaos S.* Lessons learned from past ice-jam floods concerning the challenges of flood mapping // International Journal of River Basin Management. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 457–468.
19. *Chukhrova N., Johannssen A.* Fuzzy regression analysis: Systematic review and bibliography // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 84. P. 105708. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105708.
20. *Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л.* Факторы образования ледовых затопов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2016. № 2. С. 82–90.
21. *Mahabir C., Hicks F., Fayek A.R.* Neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system // Cold Regions Science and Technology. 2006. Vol. 46, Is. 2. P. 100–112. DOI: j.coldregions.2006.08.009.
22. *Ermolieva T., Filatova T., Ermoliev Y., Obersteiner M., de Bruijn, K.M., Jeuken A.* Flood catastrophe model for designing optimal flood insurance program: Estimating location-specific premiums in the Netherlands //

Risk Analysis. 2017. Vol. 37, Is. 1. P. 82–89. DOI: 10.1111/risa.12589.

23. Stanke C., Murray V., Amlôt R., Nurse J., Williams R. The effects of flooding on mental health: Out-

comes and recommendations from a review of the literature // PLOS Currents Disasters. 2012. Edition 1. DOI: 10.1371/4f9f1fa9c3cae.

Поступила в редакцию 02.05.2021

Принята к публикации 01.06.2021

Об авторах

ТАНАНАЕВ Никита Иванович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677004, Якутск, ул. Кулаковского, 46, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, TananaevNI@mpi.ysn.ru;

НАХОДКИН Николай Александрович, кандидат биологических наук, руководитель, Якутское региональное отделение РОССОЮЗСПАС, 677901, Якутск, мкрн Марха, ул. Экспериментальная, 4А, Россия, nakhodkin@mail.ru;

ГОЛОВАНОВ Алексей Олегович, старший преподаватель, Институт естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, 677013, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия, shedansan@mail.ru.

Информация для цитирования

Тананаев Н.И., Находкин Н.А., Голованов А.О. Генезис, сценарии и особенности прогнозирования наводнений в среднем течении р. Амга (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 86–99. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-86-99>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-86-99

Genesis, scenarios and features of flood prediction in the middle reach of the Amga River (Central Yakutia)

N.I. Tananaev^{1,2,*}, N.A. Nakhodkin³, A.O. Golovanov²

¹Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

²Institute of natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

³Yakut Regional Branch of ROSSOYUZSPAS, Yakutsk, Russia

*TananaevNI@mpi.ysn.ru

Abstract. Ice-related phenomena made a significant contribution, more than 0.5 m, into the formation of the maximal water level on the Amga River in the cross section near Amga settlement during 41 high water episodes out of 76 (1938–2018). The average value of the ice jamming input into the maximal water level was 1.6 m, during the years with floods – 2.4 m, and the maximal value exceeded 5 m. With respect to the genesis, floods on the Amga River belong mainly to discharge-jamming type – fourteen cases, or to discharge type – five cases during the years 1938 to 2018. The scenarios of the development of discharge and ice-jamming floods differ from each other. Ice-jamming floods occur four days earlier on average and involve lower moisture content in the snow than that in the case of discharge floods. During the years with late expanded springs, floods occur very rarely. Synoptical parameters may be used to make assumptions concerning the type of forthcoming floods, but it is necessary to develop more accurate quantitative

methods to predict the probability of the floods and their expected levels. These methods should take into account the non-stationary nature of the main synoptical factors leading to waterfloods. The rate of flood repetition during the time of observation remains unchanged, which points to inefficiency of the measures against jamming that were carried out in the river basin during the two recent decades.

Keywords: spring floods, Central Yakutia, Amga River, climatic reanalysis, flood genesis, ice-jamming floods, climate unsteadiness, flood prediction.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the Program of Integrated Research of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia).*

References

1. *de Ville de Goyet C., Zapata Marti R., Osorio C.* Natural disaster mitigation and relief. // Disease control priorities in developing countries. 2nd Ed. / The World Bank. London, UK. 1401 p.
2. *Wright J.M.* The nation's responses to flood disasters: A historical account / Association of State Floodplain Managers, 2000. 102 p.
3. *Sendai* Reduction Framework disaster risk 2015–2030 UNISDR, Geneva, Switzerland. 2015.38 p.
4. *Kozlova S.V.* Sovremennaya gosudarstvennaya zemel'naya politika // *Federalizm*. 2017. No. 3(87). P. 33–48.
5. *Tananaev N., Efremova V., Gavriilyeva T., Parfenova O.* Assessment of the community vulnerability to spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia // *Hydrology Research*. Vol. 52, №1. P. 125–141. DOI: 10.2166/nh.2020.124
6. *AHYST.Lena.* Arctic hydrology and statistics data or the Lena River basin. Compilative dataset on mean annual and extreme flows in the Lena River basin (compiled by Makarieva O., Tananaev N., Lebedeva L.), figshare, version 1.2 (12 August 2019). DOI: 10.6084/m9.figshare.3206962.
7. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh objektov (AIS GMVO)* : <https://gmvo.skniivh.ru>.
8. *RStudio Team.* RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. URL: <http://www.rstudio.com/>.
9. *R Core Team.* R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: <https://www.R-project.org/>
10. *Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Golemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H.* Welcome to the tidyverse // *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4(43). P. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.
11. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471.
12. *Kemp M.U., van Loon E.E., Shamoun-Baranes J., Bouten W.* RNCEP: global weather and climate data at your fingertips // *Methods in Ecology and Evolution*. 2012. No. 3. P. 65–70., R package version 1.0.9.
13. *Pohlert T.* trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>.
14. *Samokhin M.A.* Osobennosti izmeneniya urovney vody v rekakh v razlichnykh regionakh Rossii: Avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk. Moscow: MSU, 2006. 26 p.
15. *Magritskiy D.V., Ivanov A.A.* Navodneniya v del'te r. Kubani // *Vodnye resursy*. 2011. Vol. 38, No. 4. P. 387–406.
16. *Buzin V.A.* Zatory i zashory na rekakh Rossii. SPb: GGI. 2016. 240 p.
17. *Kil'myaninov V.V.* Vliyaniye meteorologicheskikh usloviy pered nachalom ledokhoda na masshtab zatornykh navodneniy na Lene // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2012. No. 4. P. 86–89.
18. *Lindenschmidt K.-E., Huokuna M., Burrell B.C., Beltaos S.* Lessons learned from past ice-jam floods concerning the challenges of flood mapping // *International Journal of River Basin Management*. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 457–468.
19. *Chukhrova N., Johannssen A.* Fuzzy regression analysis: Systematic review and bibliography // *Applied Soft Computing*. 2019. Vol. 84. P. 105708. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105708.
20. *Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L.* Faktory obrazovaniya ledovykh zatorov na rekakh basseyna Severnoy Dviny v sovremennykh usloviyakh // *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2016. No. 2. P. 82–90.
21. *Mahabir C., Hicks F., Fayek A.R.* Neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system // *Cold Regions Science and Technology*. 2006. Vol. 46, Is. 2. P. 100–112. DOI: j.coldregions.2006.08.009.
22. *Ermolieva T., Filatova T., Ermoliev Y., Obersteiner M., de Bruijn, K.M., Jeuken A.* Flood catastrophe model for designing optimal flood insurance program: Estimating location-specific premiums in the Netherlands // *Risk Analysis*. 2017. Vol. 37, Is. 1. P. 82–89. DOI: 10.1111/risa.12589.
23. *Stanke C., Murray V., Amlôt R., Nurse J., Williams R.* The effects of flooding on mental health: Outcomes and recommendations from a review of the literature // *PLOS Currents Disasters*. 2012. Edition 1. DOI: 10.1371/4f9f1fa9c3cae.

About the authors

TANANAEV, Nikita Ivanovich, Cand. Sci. (Geography), leading researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia; leading researcher, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk, 677004, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, TananaevNI@mpi.ysn.ru;

NAKHODKIN, Nikolay Aleksandrovich, Cand. Sci. (Biology), head, Yakutian regional office, ROSSOYUZSPAS, 4A Eksperimentalnaya st., Markha District, Yakutsk 67790, Russia, nakhodkin@mail.ru;

GOLOVANOV, Aleksey Olegovich, senior lecturer, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk 677013, Russia, shedansan@mail.ru.

Citation

Tananaev N.I., Nakhodkin N.A., Golovanov A.O. Genesis, scenarios and features of flood prediction in the middle reach of the Amga River (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 86–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-86-99>