

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.515.9:556.535.2
DOI 10.25587/SVFU.2022.27.3.006

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

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

² СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

³ Якутское региональное отделение РОССОЮЗСПАС, г. Якутск, Россия

ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАВОДНЕНИЙ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ Р. АМГА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ

Аннотация. Наводнения на р. Амга наблюдаются в период весеннего половодья, в первую-вторую декаду мая. Весеннее половодье – основной гидрологический сезон в среднем и нижнем течении р. Амга, к нему приурочен годовой максимум уровня и расхода воды в створе г.п. Амга. В последнее десятилетие пик половодья сместился на 6-8 дней в сторону более ранних дат, и чаще наблюдается в первую декаду мая. Русло р. Амга в районе с. Амга изобилует участками-«концентраторами» заторов, что способствует их возникновению, однако, возникают они не каждый год. Погодные условия периода половодья могут играть определяющую роль в формировании наводнений, благоприятствуя одновременно быстрому снеготаянию в верховьях реки и формированию заторов в среднем течении. Критериальный анализ указывает на более снежные зимы, более холодную третью декаду апреля и более высокое давление во второй декаде мая в центральной Якутии в годы с наводнениями. Большинство наводнений происходит в годы с суммой зимних осадков в верхнем течении р. Амга свыше 120 мм. Толщина льда в створе г.п. Амга не относится к факторам, определяющим вероятность возникновения затора. Максимальный уровень $H_{1\%}$, определенный с использованием «модели надпороговых значений», составляет 145.91 м БС (1178 см), $H_{0.1\%} = 146.88$ м БС (1277 см). На эти отметки должны ориентироваться проекты мер снижения гидрологических рисков, в том числе градостроительное зонирование, а также оценки вероятностных ущербов для возможных наводнений.

Ключевые слова: наводнения, серии наводнений, концентраторы заторов, центральная Якутия, конфигурация полей метеоэлементов, река Амга, климатический реанализ, модель надпороговых значений, критериальный анализ, минимизация гидрологических рисков.

ТАНАНАЕВ Никита Иванович – к.г.н., в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: TananaevNI@mpi.ysn.ru

TANAIEV Nikita Ivanovich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS. E-mail: TananaevNI@mpi.ysn.ru

НАХОДКИН Николай Александрович – к.б.н., рук. Якутского регионального отделения РОССОЮЗСПАСа. E-mail: nakhodkin@mail.ru

NAKHODKIN Nikolay Aleksandrovich – Candidate of Biological Sciences, Head, Yakutian Regional Office, ROSSOYUZSPAS. E-mail: nakhodkin@mail.ru

ГОЛОВАНОВ Алексей Олегович – ст. преп. Эколога-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: shedansan@mail.ru

GOLOVANOV Aleksey Olegovich – Senior Lecturer, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: shedansan@mail.ru

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

¹ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

³ ROSSOYUZSPAS, Yakutsk Regional Division, Yakutsk, Russia

NATURAL DRIVERS OF HIGH FLOODS IN THE MIDDLE REACHES OF THE AMGA RIVER, CENTRAL YAKUTIA

Abstract. Major flooding in the middle Amga River occurs in late spring, early to mid-May. Spring flood is the main hydrological season in the middle and lower reaches of the Amga River, marked with the annual maximum of the level and discharge of water at the Amga hudropost. In the last decade, spring freshet peak was observed in first 10 days of May, which was 6-8 days earlier than average. The Amga River channel in its middle reaches hosts multiple fluvial forms – potential ice jam concentrators, i.e. shallows and sharp channel bends, but ice jam floods are not observed annually. The weather conditions of the high water period can play a decisive role in the formation of floods, simultaneously favoring rapid snowmelt in the upper reaches of the river and the formation of jams in the middle reaches. A criterial analysis showed higher snow accumulation in the upstream catchment section, lower air temperature in the last 10 days of April and higher air pressure in mid-May in central Yakutia in the years with high floods in the middle Amga River reaches. Most floods were observed in the years with total winter precipitation over 120 mm in the upper part of the catchment. Ice thickness appear to have no influence on the ice jam probability of occurrence. Maximum water stage with return period of 100 years, calculated using ‘peak-over-threshold’ approach, is 145.91 m, and with return period of 1000 years – 146.88 m.

Keywords: floods, flood series, concentrators of congestion, configuration of fields of meteorological elements, central Yakutia, Amga River basin, climate reanalysis, peak-over-threshold model, criterial analysis, hydrological risk reduction.

Введение

Наводнения занимают первое место в мире среди природных бедствий по нанесенному ущербу, как в мире в целом, так и в большинстве государств, включая Российскую Федерацию [1]. По данным Минприроды РФ, среднегодовой ущерб от наводнений в стране, в сумме по семи основным водным бассейнам, превышает 120 млрд руб. (в ценах 2020 г.). Основной ущерб связан с горными районами и областями умеренных широт – Кавказ и юг России, южная Сибирь, Приамурье [2]. На бассейн р. Лена в среднем приходится около 5 млрд руб. годового ущерба (в ценах 2020 г.) [1], хотя оценка Государственного доклада опирается на устаревшие данные 2013 года.

В Республике Саха (Якутия) суммарный ущерб от наводнений за период с 1998 по 2018 г. превышает 40 млрд руб. в ценах 2020 г. [3]. Основная часть этой суммы – ущерб от наводнений на средней Лене и в центральной Якутии, случившихся в 1998 и 2001 гг., который составил, соответственно, 2,8 % и 7 % годового валового регионального продукта. Помимо этих крупнейших наводнений, с начала XXI века в Якутии произошло достаточно много крупных наводнений меньшего масштаба: в бассейне р. Витим и на р. Лена ниже устья Витима – в 2006 г., на средней Лене ниже Якутска – в 2010, 2013 и 2018 гг., в бассейне р. Алазея – в 2007-2008 гг., и после перерыва – снова в 2017-2018 гг., в центральной Якутии – также в 2007-2008 гг. и после перерыва – в 2018 г., на среднем Алдане – в 2018 г., в бассейне р. Адыча – в 2008 г., в бассейне р. Колыма – в 2012, 2013, 2014 и 2017 гг. [4].

Прямой ущерб от наводнения 2018 г., наиболее близкого по времени, оценивается в 1,5 млрд руб., основная часть которого пришлась на населенные пункты среднего течения р. Амга в центральной Якутии. В предыдущие годы от наводнений неоднократно страдали также поселения в нижнем течении Амги. Пострадавшие районы, так называемые “заречные улусы” – важные

сельскохозяйственные области, стержень продовольственной безопасности региона и его социально-экономического развития. В рамках данной публикации рассмотрены природные предпосылки возникновения наводнений в среднем и нижнем течении р. Амга, с фокусом на с. Амга, хозяйственно-административном центре региона.

Меры, направленные на минимизацию гидрологических рисков и возможного прямого ущерба, должны быть обоснованы полной и достоверной информацией о гидрологии бассейна р. Амга и основных природных факторах наводнений, что определяет актуальность нашего исследования. Обобщение этой базовой информации в целях анализа основных сценариев наводнений, разработки методов их прогноза и принципов защиты от затопления – основная задача данной статьи.

Участок исследований

Бассейн р. Амга, площадью 69 300 км², расположен в южной и центральной Якутии, в верхней части – в междуречье рр. Алдан и Олекма, в средней и нижней части – в пределах Лено-Алданского междуречья (Рис. 1). Верховья реки дренируют северо-западные отроги Алданского нагорья с высотами от 1200 до 1300 м н.у.м. Ниже по течению река врезается в Алданское плато, выровненную поверхность выветривания с высотами в пределах от 350 до 600 м., а ниже с. Амга – выходит в пределы Центральнаякутской низменности, впадая затем в р. Алдан.

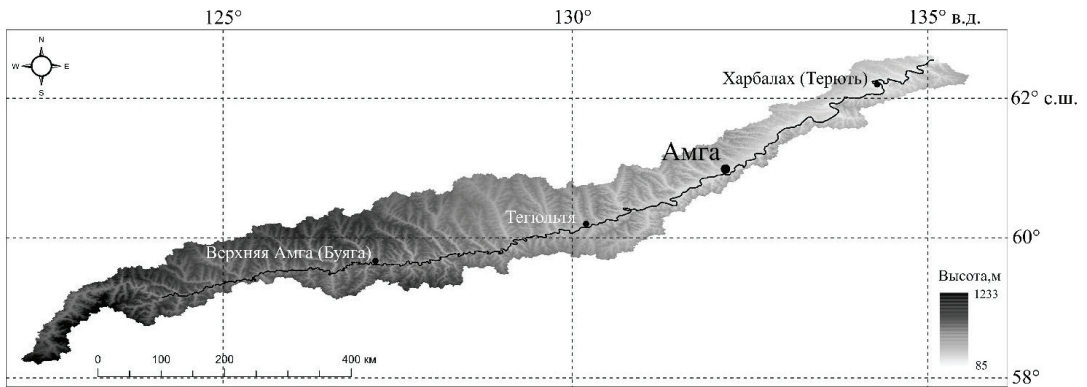


Рис. 1. Схема бассейна р. Амга

В среднем течении реки, на расстоянии 436 км от устья, в левобережной части долины расположено село Амга, в наибольшей степени пострадавшее от наводнения 2018 года. Село Амга – районный центр Амгинского улуса (района) РС (Я), основано в 1652 г. и с тех пор остается важным центром освоения региона. Население села составляет 6590 чел., района – 16745 чел. (2019). В настоящее время Амга и села Амгинского района, расположенные по берегам р. Амга (села Оннес, Болугур, Чакыр 2-й, Бетюнцы, Абага, Мяндиги), в основном ориентированы на сельское хозяйство и животноводство. Район начинает играть роль локального туристического центра благодаря наличию автомобильной трассы, связывающей с. Амга с Якутском.

Климат региона – резко-континентальный, с холодной зимой и коротким жарким летом. Средняя температура января, по данным м/с Амга, составляет –40.8°C, июля +17.8°C, зимой температура опускается ниже –60°C, летом нередко поднимается выше +30°C. Годовая сумма осадков по м/с Тегюльга, в 90 км к юго-западу от с. Амга (рис. 1), составляет 270 мм, из которых 168 мм, или 62 %, выпадают в виде дождей, 102 мм, или 38 % – в виде снега или смешанных осадков. В верхней части бассейна, на западной окраине Алданского нагорья, среднегодовая сумма осадков возрастает до 394 мм, из которых дождевых – 247 мм, твердых и смешанных – 147 мм (по данным м/с Дикимдя в бассейне р. Олёкма).

Водный режим р. Амга – восточно-сибирский, с выраженным весенне-летним половодьем, нередко – с наложенными дождевыми паводками на спаде, одним или несколькими

дождевыми паводками летне-осеннего периода, и продолжительной зимней меженью без прекращения стока (Рис. 2). Основные гидрологические характеристики типичны для региона, южная часть которого подвержена ограниченному влиянию муссонной циркуляции, а северная – попеременному влиянию Сибирского антициклона и проникающих с востока охотоморских циклонов (Табл. 1). В среднем и нижнем течении реки, вследствие общей засушливости климата, происходит снижение модуля и слоя стока – относительных характеристик, до 1.69 л/с·км² и 53 мм, соответственно, на участке между г.п. Буяга и Терють (расположение гидропостов показано на рис. 1).

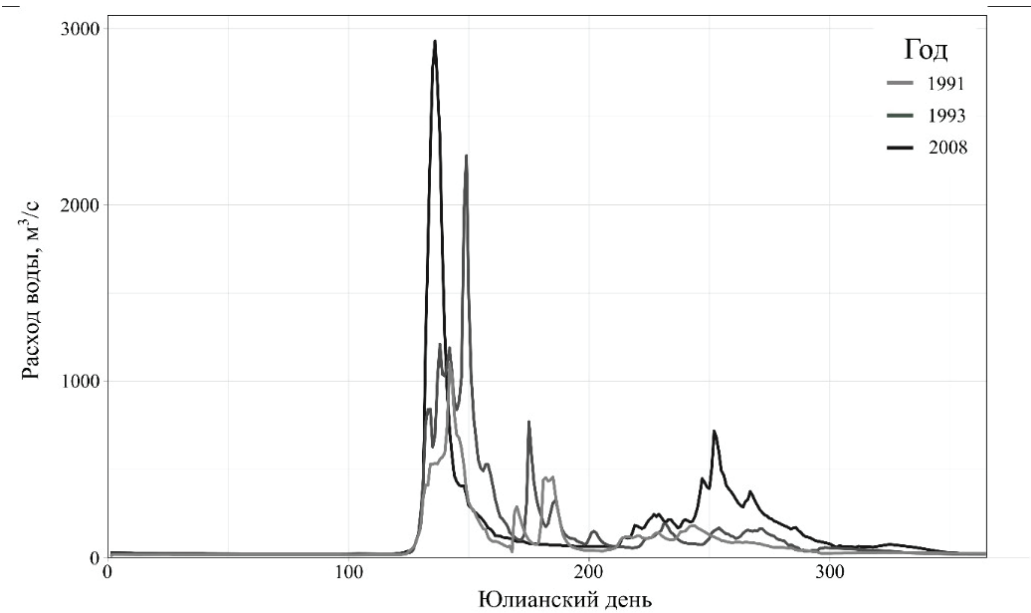


Рис. 2. Гидрографы р. Амга – г.п. Буяга, $F = 23\,900\text{ км}^2$, в годы различной водности: маловодный (1991 г.), средний по водности (1993 г.), многоводный (2008 г.)

Таблица 1 – Гидрологические посты в бассейне р. Амга

Пост	F	Тип поста	Начало наблюдений	Q	M	Y
Gauge	F	Gauge type	Observations start year	Q	M	Y
Буяга	23 900	стоковый	1932	131	5.48	173
Амга	56 800	стоковый*	1933	–	–	–
Терють	65 400	стоковый	1937	220	3.36	106

* Данные о расходах воды по г.п. Амга доступны только с 2008 г.

F – площадь водосбора, км²; Q – норма стока (1940–2017), м³/с; M – модуль годового стока, л/с·км²; Y – слой стока, мм.

* Water discharge data at Amga gauging station are available from 2008

F – basin area, км²; Q – mean annual daily flow, 1940–2017; M – water runoff yield, L/s.km², Y – annual runoff, mm.

Русло реки в верхнем течении р. Амга врезанное, меандрирующее, с единичными разветвлениями; ниже с. Амга – адаптированное и широкопойменное, относительно прямолинейное с отдельными излучинами, опирающимися на коренные берега, либо меандрирующее, со сложными сопряженными излучинами. Село Амга расположено в левобережной части долины реки,

на первой надпойменной террасе (основная часть села) или пойменных валах, возвышающихся над поверхностью высокой поймы (относящиеся к сельскому поселению микрорайоны).

Русло реки в районе села Амга слабоизвилистое, тяготеет к правой части долины, периодически перемещаясь к ее осевой части. Пойма преимущественно левосторонняя, на ее поверхности сохраняются следы палеомеандрирования – прирусловые валы, старичные озера. В пойму Амги на территории села вложена долина р. Крестях, затапливаемая при подъеме уровней; по пойме проходит автодорога, соединяющая райцентр с другими населенными пунктами района.

Исходные данные и методы исследования

Гидрологические наблюдения в бассейне р. Амга проводятся с 1930-х гг. на трех постах в селах Верхняя Амга (г.п. Буяга), Амга (г.п. Амга) и Харбалах (г.п. Терюль) (Табл. 1). Сведения о ежедневных, среднегодовых, максимальных и минимальных уровнях и расходах воды, и датах их наступления за период с 1937 по 2007 г. принадлежат ФГБУ “Якутское УГМС”, либо получены из базы данных АНУСТ.Lena [5]. Сведения о ежедневных уровнях и расходах воды за период с 2008 по 2017 г. получены из АИС ГМВО [6]. Уровень начала затопления поймы в районе г.п. Амга равен 900 см над “0” графика, отметка опасного гидрологического явления (ОГЯ) – 925 см.

Автоматизированный сбор, хранение и обработка информации, подготовка графических материалов организованы в RStudio [7], графическом интерфейсе пользователя для языка R [8], на основе набора функций пакета ‘tidyverse’ [9]. Метеорологические характеристики весенних месяцев (среднесуточная температура воздуха, атмосферное давление) рассчитаны по данным климатического реанализа NCEP/NCAR Reanalysis [10]. Доступ к данным NCEP/NCAR и их агрегация выполнены с помощью базовых функций, входящих в пакет ‘RNCEP’ [11]: *NCEP.gather()* и *NCEP.aggregate()*. Расчет критерия серий (Вальда-Вольфовица) для проверки рядов на случайность и однородность – с помощью функции *ww.test()* пакета ‘trend’ [12]. Расчет двухвыборочного *t*-критерия Стьюдента выполняли с помощью функции *t.test()*, критерия Колмогорова-Смирнова – функции *ks.test()*, критерия Ансари-Брэдли (тест на равенство дисперсий) – функции *ansari.test()* базового пакета ‘stats’.

Авторские скрипты на основе перечисленных пакетов использовались в RStudio для автоматического скачивания и обработки полей реанализа NCEP/NCAR [10], определения значений температуры воздуха в двух узлах модели: точка T1, 62°30' с.ш., 132°30' в.д., соответствует среднему и нижнему течению р. Амга; T2, 60° с.ш., 120° в.д., соответствует верхнему течению реки. Предполагалось, что на вероятность возникновения заторов решающее влияние оказывает синоптическая обстановка периода снеготаяния: раннее потепление в верховьях бассейна (точка T2) в третьей декаде апреля, либо возврат холодов в среднем течении реки, в районе с. Амга (точка T1).

Основные результаты и их обсуждение

Водный режим р. Амга в период половодья. Весеннее половодье – основной гидрологический сезон в среднем и нижнем течении р. Амга, к нему приурочен годовой максимум уровня и расхода воды в створе г.п. Амга. В последние десятилетия годовые максимумы начали отмечаться в период летних паводков: в 2003 г. – в июле, в 2006 и 2016 гг. – в августе; до 2000 г. таких случаев не наблюдалось. Во всех трех случаях уровень был значительно, от 1.5 до 3.0 м, ниже отметки ОГЯ.

Смена сезонов в южной и центральной Якутии начинается во второй половине апреля, однако в отдельные годы устойчивый весенний переход через 0°C затягивается до второй половины мая вследствие продолжительных холодов или их резкого возврата. Несинхронное чередование оттепелей и похолоданий в верхней и средней частях водосбора определяет особенности гидрологической обстановки в период снеготаяния, вероятность возникновения опасных гидрологических явлений.

Пик весеннего половодья на средней Амге приходится на май; лишь однажды, в 1943 г., он наблюдался в последние числа апреля. В 1956 и 1987 гг., вследствие растянутого половодья

и выпадения дождей, максимальный уровень воды наблюдался в первых числах июня. Интенсивный рост расхода воды в начале среднего течения Амги (г.п. Буяга) начинается в первой декаде мая (среднее за период с 1948 по 2017 гг. – 7 мая). Полторы недели спустя, в среднем около 16 мая, уровень воды в створе г.п. Амга достигает наивысших значений. В половине случаев, 49 %, наивысший уровень половодья наблюдается во второй декаде мая, в 28 % случаев во второй декаде, и в 23 % случаев – в первой декаде. В последнее десятилетие пик половодья сместился в сторону более ранних дат: на первую декаду мая приходится 60 % годовых максимумов, максимальный уровень наблюдается в среднем 8 мая, максимальный расход – 12 мая. Разница в датах наступления максимумов расхода и уровня воды связана с заторными явлениями, которые регулярно наблюдаются в среднем и нижнем течении р. Амга.

Наводнения – гидрологические события, во время которых происходит подъем уровня воды выше отметки ОГЯ – наблюдаются в среднем раз в пять лет (Рис. 3); всего за период наблюдений случилось 19 наводнений. В 1957, 1980, 2008 и 2018 гг. максимальный уровень воды превышал критическую отметку более чем на 1 м, достигнув 1070 см, 1084 см, 1057 и 1104 см, соответственно.

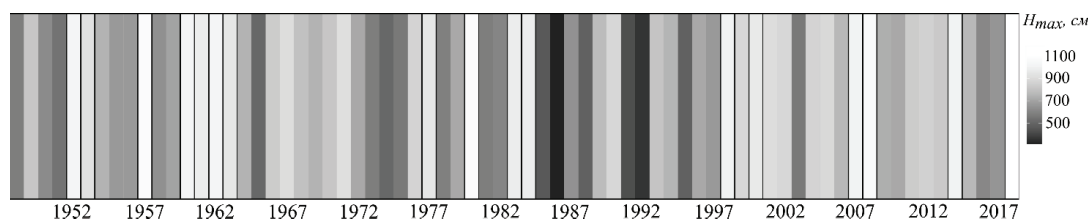


Рис. 3. Максимальный уровень воды р. Амга – с. Амга в 1948-2018 гг.

В народном нарративе катастрофическим считалось наводнение 1980 г., а также 1961 г., не самое высокое, но оставшееся в памяти (Алена Нестерова, магистрант СВФУ, проводившая опрос родственников и других жителей с. Амга, личное сообщение). Возможно, череда наводнений с 1957 по 1963 г. суммировалась в народной памяти в один год с не самым выдающимся максимальным уровнем. Теперь в этот ряд добавилось наводнение 2018 г. Другие события не оставили следа в памяти местных жителей, поскольку случились давно, либо недостаточно впечатлили их по причине отсутствия большого ущерба.

Гидрологический ряд максимальных уровней воды на средней Амге проявляет черты нестационарности: годы с наводнениями и без них группируются в серии (рис. 3). Одновыборочный критерий серий Вальда-Вольфовица z равен 1.826, $p = 0.05$, что подтверждает гипотезу «серийности».

Две основные серии лет с наводнениями: (1) конец 1950-х гг. и начало 1960-х гг.; (2) конец 1970-х гг. и начало 1980-х гг. Самая продолжительная серия – четыре наводнения подряд с 1960 по 1963 г., или семь – за период с 1952 по 1962 г. Продолжительные периоды без наводнений наблюдались с 1964 по 1976 гг. и с 1985 по 1997 гг. Средняя продолжительность серий лет без наводнений – 5 лет, медианная – 4 года, максимальная – 13 лет. В итоге, для любого года без наводнения вероятность того, что следующие три года также будут без наводнений, составляет 37 %. Соответственно, для каждого года вероятность возникновения наводнения в следующие пять лет равна – 68 %, в следующие десять лет – 83 %. Для каждого года с наводнением вероятность, что в следующем году также случится наводнение, равна 32 %. Начиная с середины 1990-х гг., наводнения не формируют продолжительных серий, распределены во времени относительно равномерно.

Природные факторы возникновения наводнений на средней Амге. Согласно формальному определению, наводнение наблюдается, когда уровень воды превышает установленную отметку ОГЯ. Максимальный уровень воды периода весеннего половодья, согласно принци-

пу аддитивности [13], можно представить в виде суммы стоковой и заторной составляющих. Генетическая значимость заторного повышения уровня воды достигает 54 % на р. Малая Северная Двина, и 76 % на р. Нижняя Тунгуска [14].

Вклад генетических составляющих в суммарный уровень воды связан с природными факторами, которые различны для каждой составляющей. Так, вклад стоковой составляющей определяется влагозапасом в снеге на день начала снеготаяния и синоптическими факторами – дружностью весны, скоростью снеготаяния в верхнем течении реки, выпадением ранних весенних дождей. Заторные наводнения – многофакторные явления, к которому приводят «...значительная увлажненность водосбора реки осенью, большая толщина ледяного покрова, интенсивное снеготаяние весной, избыточные осадки в период формирования половодья и, наконец, резкий контраст температур воздуха в месте заторообразования и верхней части речного бассейна» [15, С.74-75]. Необходимое условие – значительная скорость воды в период вскрытия, превышающая 0,6 м/с [16]. Только при этом условии отмечаются подсоны льда под кромку ледяного покрова. Важно также наличие русловой формы-«концентратора» затора. Эту роль нередко выполняют крутые излучины, где наблюдается физическая блокировка движения льда, а наибольшая глубина потока в вершине способствует формированию в этой позиции ледовой плотины значительной мощности [17–18].

Геоморфологический фактор: строение русла средней Амги. В среднем течении р. Амга русло извилистое (рис. 4), «концентраторы» заторов в нем имеют как морфоскульптурную природу – резкие изгибы адаптированного или врезанного русла, так и морфоструктурную – перекартные участки, перекрывающие большую часть русла аллювиальные массивы.

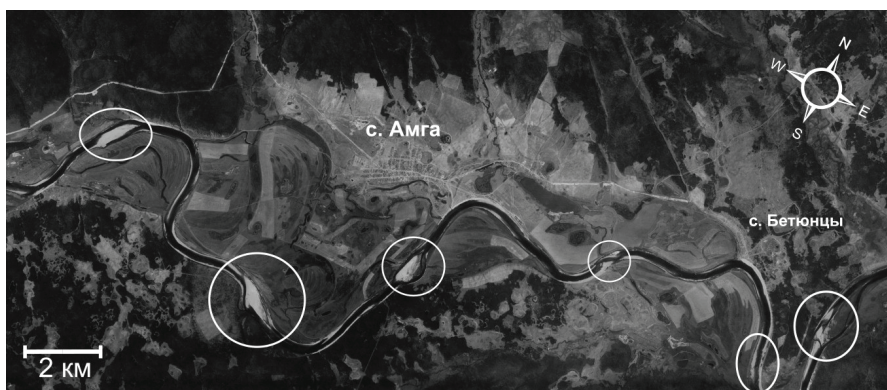


Рис. 4. Русло р. Амга в районе с. Амга с участками потенциального заторообразования (выделены белым контуром). Космический снимок Corona KH-3, 08.08.1969; направление течения реки слева направо

Положение в русле участков потенциального заторообразования почти не изменилось по сравнению с 1960-ыми гг. (см. рис. 4). Наводнение 2018 г. связано с затором, сформировавшимся в местности Урай на двух нижних по течению участках в районе с. Бетюнцы. Проводившиеся на этих участках превентивные мероприятия ожидаемо не дали никакого эффекта. По сообщениям местных жителей, затор возник в период с 7 по 8 мая, что привело к подъему уровня воды и началу затопления территории села. Были проведены взрывные работы, однако также безрезультатно. Верхняя кромка ледохода в это время располагалась в с. Амга, нижняя – в 90 км ниже по течению, а весь участок между ними был заполнен уплотненным битым льдом. Вероятно, на участке существовало сразу несколько заторов, что в итоге привело к затоплению всех населенных пунктов в зоне их воздействия.

Метеорологический фактор: погодные условия в период половодья. Высокая скорость подъема уровня воды и перемещения нижней кромки ледохода, дружность весеннего половодья, определяются погодными условиями: быстрым наступлением весны, устойчивой

положительной температурой воздуха в области максимальных снеготпасов, как правило, в верховьях рек. С другой стороны, возврат холодов в период ледохода способствует повторному смерзанию, т.н. «режеляции» ледяных полей. Совместное влияние этих факторов в итоге создаст высокую вероятность возникновения затора.

Конфигурация полей метеоэлементов и их динамика в период половодья могут служить косвенными индикаторами вероятности развития наводнений, как вследствие высокого стока половодья, так и в результате заторов. Поиск таких индикаторов основан на сравнительном анализе метеоусловий в годы с катастрофическими наводнениями и выделении сходных черт при всём возможном разнообразии (Рис. 5). Качественный обзор метеоусловий сделан для лет со значительными наводнениями в среднем течении р. Амга – 1957, 1980, 2008 и 2018 гг.

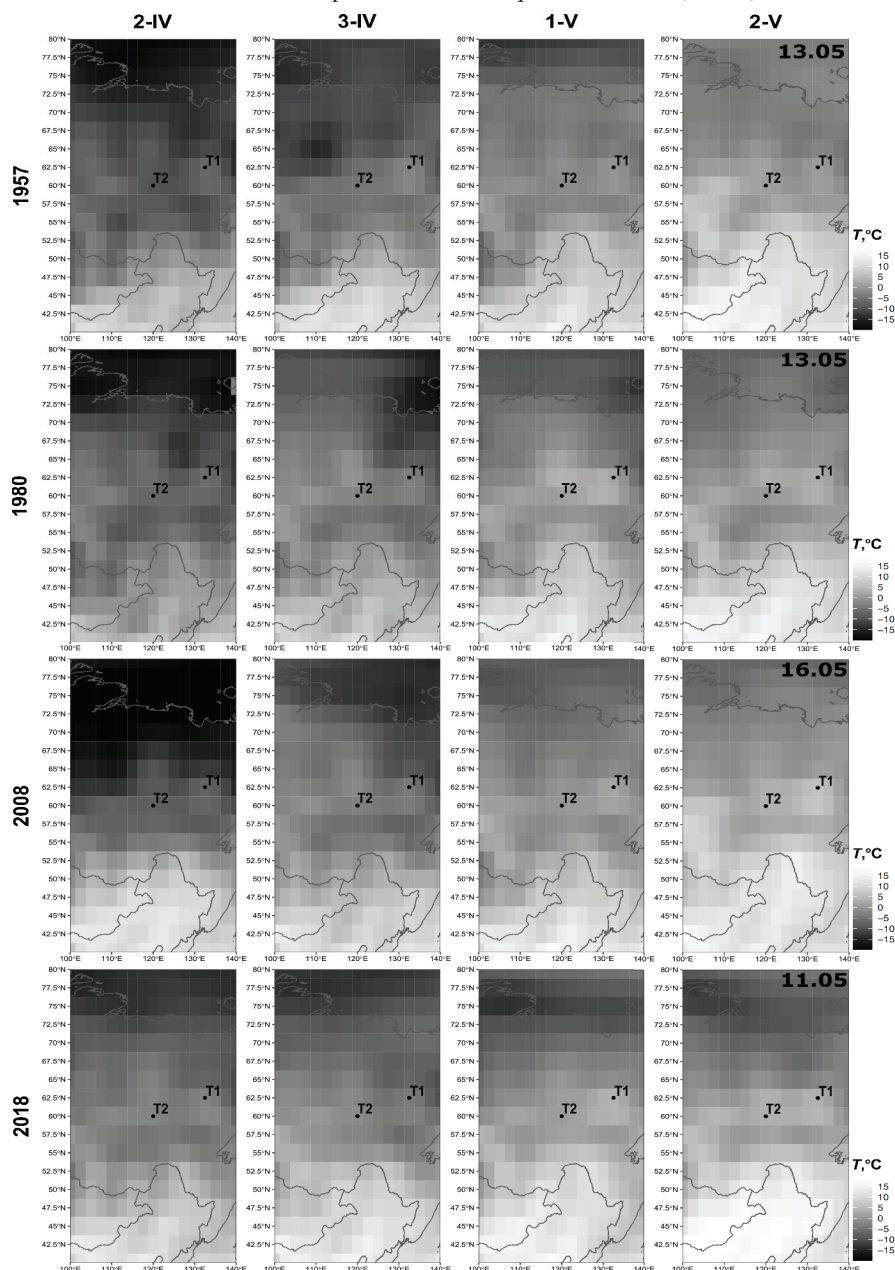


Рис. 5. Изменение среднедекадной температуры воздуха на Дальнем Востоке и Северо-Востоке РФ в весенний период в годы с катастрофическими половодьями на р. Амга

Во второй и третьей декаде апреля 1957 г. на территории Якутии держались умеренно низкие температуры воздуха, сменившиеся в начале мая проникновением теплых воздушных масс с территории Приморья и Китая на юг Якутии, включая верховья Амги. В то же время в среднем течении реки температура воздуха в первой и, особенно, во второй декаде мая оставалась существенно ниже обычно наблюдающихся значений (Табл. 2). Весенний переход температуры воздуха через 0°C случился только во второй декаде мая, которая в южной Якутии была теплее, чем в центральной. В начале мая на средней Амге начался подъем уровня воды, однако основная волна половодья в среднем течении сформировалась в результате выпадения дождей в начале мая. В верхнем течении уровень и расход воды были в пределах нормы, в с. Амга 13 мая наблюдался максимальный уровень воды, 1070 см над “0” графика поста.

Таблица 2 – Основные гидрометеорологические характеристики лет с высокими наводнениями (превышение максимального уровня воды над критическим на 1 м и более)

	Даты	T _{T1} , °C	T _{T2} , °C	ΔT, °C		Даты	T _{T1} , °C	T _{T2} , °C	ΔT, °C
1957*	11-20.04	-6.22	-9.41	3.19	2008	11-20.04	-7.28	-7.66	0.38
1070	21-30.04	-2.01	-4.60	2.59	1057	21-30.04	-4.33	-3.04	-1.29
129	1-10.05	-0.27	-1.62	1.35	141	1-10.05	2.20	0.19	2.01
50.9	11-20.05	1.09	1.28	-0.19	18.5	11-20.05	5.91	3.35	2.56
1980	11-20.04	-5.75	-6.48	0.73	2018	11-20.04	-2.68	-2.56	-0.12
1084	21-30.04	-2.93	-2.35	-0.58	1104	21-30.04	-3.69	-1.55	-2.14
н/д	1-10.05	2.40	1.37	1.03	н/д	1-10.05	3.79	1.06	2.73
13.6	11-20.05	3.04	0.61	2.43	н/д	11-20.05	3.42	3.33	0.09

* Ниже года друг под другом приведены: максимальный уровень воды, см над “0” графика поста; сумма зимних осадков (октябрь-апрель), мм; сумма дождевых осадков за май, мм.

В 1980 г. весна в южной и центральной Якутии также была прохладной, хотя и менее затяжной, чем в 1957 г. Область пониженной температуры в центральной Якутии сменилась в начале мая волной тепла, за которой последовало похолодание, особенно заметное в верховьях реки. Максимальный уровень воды в с. Амга, 1084 см, держался на протяжении двух дней, 13 и 14 мая, что говорит о крайне устойчивом заторе ниже поста.

В 2008 г. территория центральной Якутии была под действием холодных воздушных масс на протяжении всего начала весны, вплоть до второй декады мая, когда воздух резко прогрелся по всему Приамурью и югу Якутии. В результате быстрого снеготаяния расход воды на средней Амге начал увеличиваться лишь в конце первой декады мая, после чего быстро достиг пика; максимальный расход половодья лишь немного уступил историческому максимуму 1998 г., 5040 и 5290 м³/с, соответственно.

В 2018 г., напротив, середина апреля была намного теплее средних значений, в первую очередь в верховьях Амги, тогда как в среднем течении, напротив, в целом было холоднее обычного. Оттепели и раннее снеготаяние привели к тому, что уже 8 мая уровень воды превысил установленную критическую отметку; кроме того, в нескольких километрах ниже поселения возник ледовый затор. Взрывные работы не улучшили ситуации, голова затора сместилась на 90 км ниже по течению, тогда как его верхняя часть находилась в черте с. Амга. Уровень продолжал нарастать, достигнув 11 мая, на пять дней раньше нормы, отметки 1104 см над “0” графика, максимальной за период наблюдений.

Приведенный субъективный анализ не позволяет выделить какие-либо особенности, объединяющие годы с наводнениями, и тем более – отличающие их от ряда лет, в которые наводнений не случалось. Единственная общая черта, которую можно отметить – более быстрое повышение температуры воздуха в верхнем течении Амги при весеннем переходе через 0°C,

о чем свидетельствует отрицательная разница между среднедекадной температурой воздуха в верхнем и среднем течении реки (см. табл. 2).

Климатический анализ факторов возникновения наводнений. Основные наблюдаемые характеристики, с помощью которых можно характеризовать условия возникновения наводнений, включают объем воды, доступный для формирования волны половодья, синоптические условия периода прохождения ледохода, и ледовые условия. Объем волны половодья ограничен суммой осадков за октябрь-апрель P_{X-IV} , мм, составляющей влагозапас в снеге, и слоем осадков в мае, P_V , мм. Форму волны половодья определяют синоптические факторы (конфигурация поля температуры в апреле и мае, возвраты холодов, дружность весны). Ледовые условия характеризует толщина льда в исследуемом створе.

Гидрометеорологические параметры различаются незначительно в годы с наводнениями и без них, что подтверждается критериальным анализом с использованием t -критерия Стьюдента, критерия Колмогорова-Смирнова KS и критерия Вилкоксона W . Для большинства параметров уровень значимости различий p не меньше 0.3, но необходимо выделить более снежные зимы, более холодную третью декаду апреля и более высокое давление во второй декаде мая в центральной Якутии в годы с наводнениями (табл. 3).

Таблица 3 – Критерии однородности метеорологических характеристик для рядов лет с наводнениями и без них, где хотя бы один из критериев имеет $p \leq 0.1$

Характеристика	Точка	Наводнения	Среднее	t -критерий	KS	AB
Variable	Point	Floods	Mean	Student's t	KS	AB
Сумма зимних осадков P_{IV-X} , мм	м/с Дикимдя	Да	125±20	$p = 0.08$	$p = 0.01$	$p = 0.21$
		Нет	114±20			
Средняя температура воздуха в 3 декаде апреля T_{3-IV} , °C	T1	Да	-3.21	$p = 0.15$	$p = 0.02$	$p = 0.06$
		Нет	-2.35			
Количество дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха в 3 декаде апреля	T1	Да	8.3	$p = 0.10$	$p = 0.56$	$p = 0.97$
		Нет	7.2			
Разница среднего атмосферного давления между точками T1 и T2 во 2 декаду мая, гПа		Да	26.1	$p = 0.07$	$p = 0.23$	$p = 1.00$
		Нет	24.9			

Средний слой зимних осадков в верховьях р. Амга составляет 117±20 мм, максимальный – превышает 150 мм, минимальный – ниже 80 мм. В годы с P_{X-IV} больше 140 мм ($n = 10$), наводнение случилось лишь трижды; в то же время, в годы с наводнениями P_{X-IV} в среднем на 10 мм больше, чем в годы без наводнений (см. табл. 3).

Большинство наводнений происходит в годы с $P_{X-IV} > 120$ мм (Рис. 6). В случае меньших влагозапасов наводнения случаются лишь в годы с низкими температурами третьей декады апреля, но даже при этом подъем уровня воды чаще всего остается умеренным. Исключение составляет наводнение 1977 г., когда при $P_{X-IV} = 80$ мм и $P_V = 22$ мм снеготаяние началось лишь в первой декаде мая; быстрое потепление в верховьях сопровождалось похолоданием в среднем и нижнем течении, и вследствие заторов к 13 мая уровень достиг отметки $H_{max} = 955$ см.

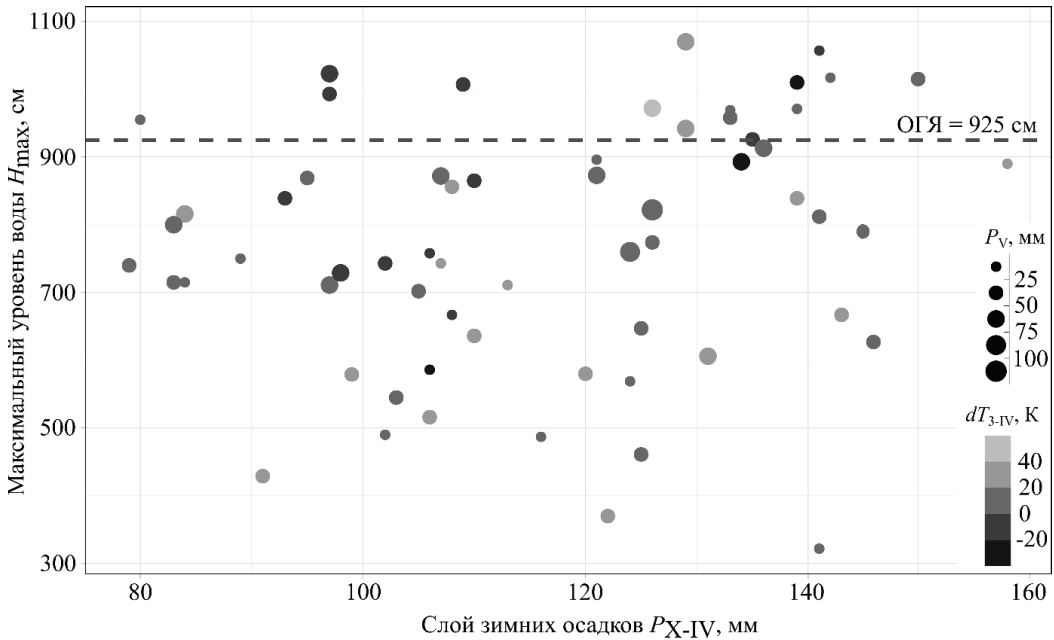


Рис. 6. Связь максимальных уровней воды в створе г.п. Амга $H_{\max}$, см над “0” графика поста, с метеорологическими переменными: суммой осадков за октябрь-апрель P_{X-IV} , мм, суммой осадков за май P_V , мм, и разницей суммы среднесуточных температур за третью декаду апреля между точками T2 и T1, ΔT_{3-IV} , К

Метеорологические условия, сопутствующие наводнениям в “многоснежные” годы, при $P_{X-IV} > 120$ мм, намного разнообразней. Очевидно, что при преобладании стоково-заторных и заторных наводнений прямой связи между влагозапасами в снеге и максимальными уровнями воды не существует. Точки на графике связи P_{X-IV} с максимальными уровнями воды в створе с. Амга, приведенном на рис. 6, визуальнo объединяются в две группы, разделенные интервалом 110-120 мм, в который попадают только два года ($n = 71$). Деление на “многоснежные” и “малоснежные” годы вполне может соответствовать разным погодным паттернам, с доминированием в регионе Сибирского антициклона либо охотоморских циклонов, но эта гипотеза требует отдельной проверки.

Осадки периода ледохода P_V в среднем в верхнем и среднем течении реки – второй по важности источник речного стока в половодье. При небольшом количестве весенних осадков ($P_V < 50$ мм) и теплой весне в среднем течении реки максимальный уровень воды редко превышает 700 см (см. рис. 6). С другой стороны, значительный слой дождей также необязательно приводит к неблагоприятным последствиям.

В 2013 г., при $P_{X-IV} = 126$ мм и $P_V = 106$ мм, устойчивый весенний переход через 0°C в бассейне реки случился в третьей декаде апреля. В первой декаде мая среднесуточная температура уже не опускалась ниже 4°C , подъем половодья по г.п. Буга начался 1 мая, и уже 6 мая в с. Амга наблюдался максимальный уровень воды $H_{\max} = 822$ см. При этом начало весны было теплым также и в среднем течении реки, что позволило избежать значительных заторов. Обратим внимание, что в том же 2013 г. на средней Лене наблюдались мощные заторы льда, приведшие к затоплению нескольких населенных пунктов Намского улуса (района). Возможно, что в некоторые годы вероятность наводнений на Амге и средней Лене определяется одними и теми же факторами.

Вопреки ожиданиям, толщина льда перед ледоставом не оказывает значимого влияния на значение максимального уровня воды (Рис. 7). В створе с. Амга она в среднем составляет 112 ± 23 см, и не различается статистически значимо в годы с наводнениями и без них ($p = 0.44$).

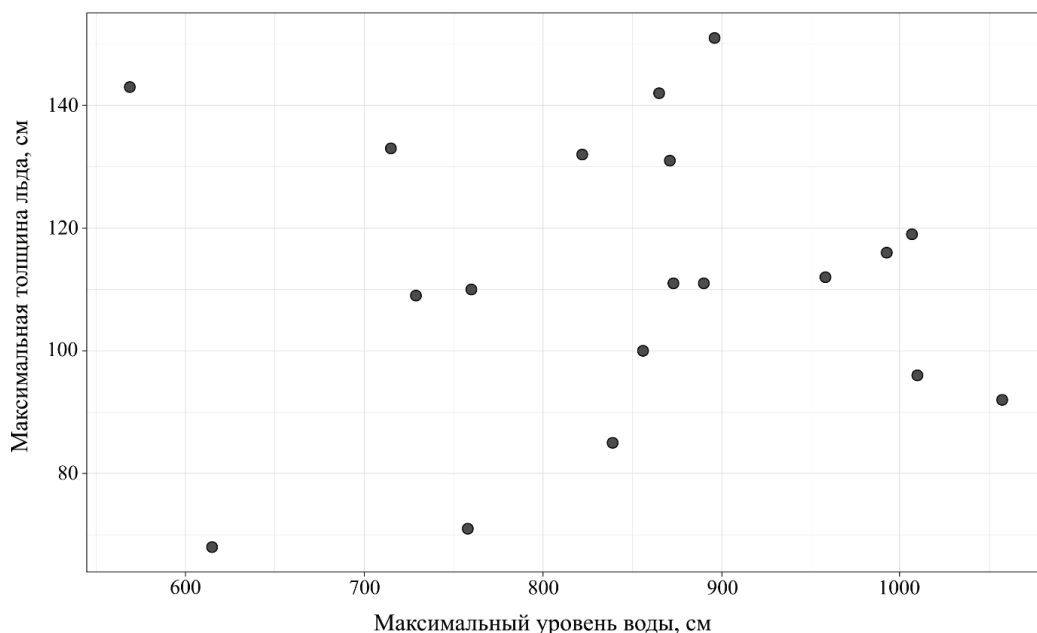


Рис. 7 Связь максимального уровня воды $H_{\max}$ и толщины льда перед ледоходом $H_{\text{л}}$, р. Амга – с. Амга, 1998-2016 гг.

Прогноз наводнений сложен из-за разнообразия ведущих факторов. Кроме того, конкретно прогноз максимального уровня периода половодья, в силу значительной неопределенности, не имеет большого практического значения. Более целесообразно в каждый год, исходя из складывающейся гидрологической и метеорологической обстановки, прогнозировать вероятность наводнения в зависимости от его типа. В этом случае значимые прогнозные признаки будут зависеть от наиболее вероятного типа наводнения.

Обеспеченность максимальных уровней воды. Высокие наводнения последних десятилетий на средней Амге периодически относятся к разряду катастрофических в сообщениях Правительства Республики Саха (Якутия) и средств массовой информации, а также в коллективном восприятии общества. К катастрофическим относят наводнения очень редкой повторяемости, раз в 100-200 лет и больше, то есть с обеспеченностью 1 % и меньше. Длина ряда наблюдений – 85 лет, следовательно, эмпирическая обеспеченность наибольших из наблюдавшихся уровней воды больше 1 %.

С этой точки зрения, существует зазор между восприятием ранее случившихся наводнений как катастрофических, и реальной гидрологической катастрофой, которая на средней Амге, по существу, еще не наблюдалась. Этот зазор – разница отметок между наблюдавшимся максимумом и уровнем обеспеченностью 1 % – определяет территорию поселения, которая исторически не затоплялась, и не считается опасной и нежелательной для застройки, но потенциально может быть затоплена во время действительно катастрофического наводнения. В этом случае ущерб от наводнения может значительно возрасти из-за априорной уверенности жителей в безопасности их места проживания, и их неготовности к катастрофическому событию.

Наводнение теоретической повторяемостью 1 раз в 100 лет превысит уровень 2018 г. почти на 0.7 м, достигнув отметки $H_{1\%} = 145.82$ м БС (1172 см над «0» графика в.п. Амга), катастрофическое наводнение повторяемостью 1 раз в 1000 лет достигнет $H_{0.1\%} = 146.69$ м БС, или 1258 см [3]. Однако, как показано в работе [3], неопределенность этих оценок велика из-за формы эмпирического распределения максимальных уровней в области малой обеспеченности.

Снизить неопределенность оценки $H_{1\%}$ и $H_{0.1\%}$ попробуем с помощью модели “peak-over-threshold”, или “модели надпороговых значений”, основанной на теореме Балкемы-де Хаана и Пикэндса [19]. В такой модели анализируется вариационный ряд, составленный из значений случайной величины, в данном случае – максимальных уровней воды, превышающих заранее заданный порог, “надпороговых”. Ищется такое распределение из семейства экстремальных, наиболее точно описывающее вариационный ряд, эмпирические квантили которого в области редкой повторяемости сходятся к квантилям функции распределения вероятности годовых максимумов [20].

Рассмотрим вариационный ряд, составленный из максимумов уровня воды, превышающих отметку ОГЯ, и определим наиболее точно описывающее его распределение. В нашем случае это распределение Гумбеля с параметрами $\mu = 979$ и $\beta = 43$; его применение дает оценки $H_{1\%} = 145.91$ м БС (1178 см), $H_{0.1\%} = 146.88$ м БС (1277 см). Вопрос, при каком сочетании природных факторов могут быть достигнуты такие уровни воды, остается открытым.

Заключение

Наводнения в среднем и нижнем течении р. Амга происходят регулярно и наносят многомиллионный ущерб поселениям этого региона. Необходимые меры повышения гидрологической безопасности должны опираться на детальное изучение водного режима реки и условия формирования максимальных уровней воды. В результате наших исследований показано:

1. По историческим данным, максимальный уровень воды наблюдается во второй декаде мая, однако в последнее десятилетие, с 2009 по 2018, более чем в половине лет он наблюдался в первой декаде мая.

2. Эмпирическая вероятность превышения отметки ОГЯ составляет 22 %, то есть наводнения на средней Амге происходят в среднем раз в пять лет. При этом годы с наводнениями и без них группируются в серии, что подтверждается критерием серий Вальда-Вольфовица ($p = 0.05$). Наиболее продолжительная серия лет с наводнениями – четыре года кряду. Для каждого года с наводнением вероятность, что в следующем году также случится наводнение, равна 32 %.

3. Наблюдались также две серии лет без наводнений продолжительностью 13 лет, с 1964 по 1976 гг., и с 1985 по 1997 гг. Средняя продолжительность серий лет без наводнений – 5 лет, медианная – 4 года. Для каждого года вероятность возникновения наводнения в следующие десять лет равна 83 %, в следующие пять лет – 68 %.

4. Строение русла р. Амга в районе с. Амга благоприятствует возникновению ледовых заторов, однако наиболее разрушительные наводнения случаются, как в 2018 г., когда на нижеразмещенном участке реки формируются сразу несколько заторов.

5. Погодные условия периода половодья могут играть определяющую роль в формировании наводнений, благоприятствуя одновременно быстрому снеготаянию в верховьях реки и формированию заторов в среднем течении. Объективный критерий оценки влияния погодных условий для каждого конкретного года – разница среднедекадной температуры воздуха между двумя точками в верхнем и среднем течении реки – может быть использован для прогноза наводнений.

6. Максимальный уровень $H_{1\%}$, определенный с использованием «модели надпороговых значений», составляет 145.91 м БС (1178 см), $H_{0.1\%} = 146.88$ м БС (1277 см). На эти отметки должны ориентироваться проекты мер снижения гидрологических рисков, в том числе градостроительное зонирование, а также оценки вероятностных ущербов для возможных наводнений.

Статья подготовлена в рамках программы Комплексных научных исследований Академии наук РС (Я) на 2020-2021 гг.

Литература

1. Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 г.”. – М.: НИИ-Природа, 2019. – 290 с.
2. Добровольский С.Г. Характеристика наводнений на территории России по природным и социально-экономическим параметрам / С.Г. Добровольский, М.Н. Истомина // Водные ресурсы. – 2009. – том 36, № 5. – С. 515–531.
3. Tananaev N., Efremova V.A., Gavrilieva T., Parfenova O. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia // Hydrology Research. – 2021. – Vol. 52, No. 1. -P. 125-141.
4. Парфенова О.Т. Экономическая оценка и возмещение ущерба от наводнений на северных реках Республики Саха (Якутия): дисс. к.э.н. – Парфенова Ольга Терентьевна. – Якутск: СВФУ, 2017. – 168 с.
5. ANHYST.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.
6. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru>. – (дата обращения: 14.12.2021).
7. RStudio Team. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rstudio.com/>. – (дата обращения: 14.12.2021).
8. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.R-project.org/>– (дата обращения: 14.12.2021).
9. 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), 1686. doi: 10.21105/joss.01686.
10. 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, № 3. – P. 437–471.
11. 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. – № 3. – P. 65-70.
12. Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. – 2020.
13. Самохин М.А. Генетические особенности формирования уровня режима рек в различных регионах России: дисс. к.г.н. – Самохин Михаил Алексеевич. – М.: МГУ, 2006. – 113 с.
14. Алексеевский Н.И. Пространственно-временная изменчивость уровней воды в руслах рек / Н.И. Алексеевский, М.А. Самохин // Ученые записки РГГМУ. – 2007. – № 5. – С. 21–28.
15. Бузин В.А. Затопы и заборы на реках России. – Санкт-Петербург: ГГИ, 2016. – 240 с.
16. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России / под ред. Д.В. Козлова. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. -348 с.
17. Kontar Y., Eichelberger J., Gavrilieva T., Filippova V., Savvinova A., Tananaev N., Trainor S. Springtime flood risk reduction in rural Arctic: a comparative study of interior Alaska, United States and Central Yakutia, Russia // Geosciences. – 2018. – Vol. 8, 90. doi: 10.3390/geosciences8030090.
18. Zaitsev A., Belikov V., Tananaev, N. Spring ice processes on rivers of North-Eastern Russia, Seventh International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice (ICETECH06), 16–19 July, Banff, Canada, p. 6.
19. Быков А.А. Статистические методы прогнозирования риска чрезвычайных ситуаций. – М.: Анкил, 2014. – 155 с.
20. Langbein W.B. Annual floods and the partial-duration flood series // Eos, Transactions AGU. – 1949. – Vol. 30(6). – P. 879–881. doi: 10.1029/TR030i006p00879.

References

1. Gosudarstvennyj doklad "O sostojanii i ispol'zovanii vodnyh resursov Rossijskoj Federacii v 2018 g.". – M.: NIA-Priroda, 2019. – 290 s.
2. Dobrovol'skij S.G. Charakteristika navodnenij na territorii Rossii po prirodnym i social'no-jekonomicheskim parametram / S.G. Dobrovol'skij, M.N. Istomina // *Vodnye resursy*. – 2009. – tom 36, № 5. – S. 515–531.
3. Tananaev N., Efremova V.A., Gavriljeva T., Parfenova O. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia // *Hydrology Research*. – 2021. – Vol. 52, No. 1. – P. 125–141.
4. Parfenova O.T. Jekonomicheskaja ocenka i vozmeshhenie ushherba ot navodnenij na severnyh rekah Respubliki Saha (Jakutija): diss. k.je.n. – Parfenova Ol'ga Terent'evna. – Jakutsk: SVFU, 2017. – 168 s.
5. 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.
6. Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob#ektov (AIS GMVO) [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://gmvo.skniivh.ru>. – (data obrashhenija: 14.12.2021).
7. RStudio Team. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.rstudio.com/>. – (data obrashhenija: 14.12.2021).
8. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.R-project.org/> – (data obrashhenija: 14.12.2021).
9. 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), 1686. doi: 10.21105/joss.01686.
10. 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, № 3. – R. 437–471.
11. 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. – № 3. – P. 65–70.
12. Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. – 2020.
13. Samohin M.A. Geneticheskie osobennosti formirovanija urovnogo rezhima rek v razlichnyh regionah Rossii: diss. k.g.n. – Samohin Mihail Alekseevich. – M.: MGU, 2006. – 113 s.
14. Alekseevskij N.I. Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' urovnej vody v ruslah rek / N.I. Alekseevskij, M.A. Samohin // *Uchenye zapiski RGGMU*. – 2007. – № 5. – S. 21–28.
15. Buzin V.A. Zatory i zazhory na rekah Rossii. – Sankt-Peterburg: GGI, 2016. – 240 s.
16. Opasnye ledovye javlenija na rekah i vodohranilishhah Rossii / pod red. D.V. Kozlova. – M.: Izd-vo RGAU-MSHA im. K.A. Timirjazeva, 2015. – 348 s.
17. Kontar Y., Eichelberger J., Gavriljeva T., Filippova V., Savvinova A., Tananaev N., Trainor S. Springtime flood risk reduction in rural Arctic: a comparative study of interior Alaska, United States and Central Yakutia, Russia // *Geosciences*. – 2018. – Vol. 8, 90. doi: 10.3390/geosciences8030090.
18. Zaitsev A., Belikov V., Tananaev, N. Spring ice processes on rivers of North-Eastern Russia, Seventh International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice (ICETECH06), 16–19 July, Banff, Canada, p. 6.
19. Bykov A.A. Statisticheskie metody prognozirovaniya riska chrezvychajnyh situacij. – M.: Ankil, 2014. – 155 s.
20. Langbein W.B. Annual floods and the partial-duration flood series // *Eos, Transactions AGU*. – 1949. – Vol. 30(6). – P. 879–881. doi: 10.1029/TR030i006p00879.