

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ПАВОДКОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

А.С. Копейкина, Е.В. Борисова

© Копейкина А.С., Борисова Е.В., 2025

Аннотация. Рассмотрены основные климатические и гидрологические факторы, определяющие сток весеннего половодья. С учетом архивных статистических данных проведен анализ динамики годовых колебаний уровня воды одной из рек Тверской области. С помощью методов математического моделирования и вычислительного эксперимента оценены поражающие факторы при паводках. Определены модель прогноза максимального уровня воды, основные прогностические параметры процесса весеннего половодья: объем осадков за зимний и весенний климатические периоды, температура воздуха.

Ключевые слова: равнинные реки, паводок, прогнозирование, моделирование, устойчивое развитие, расчет, водный объект, река, снег, дождь, экосистема, русло, природопользование, Северное полушарие, климатические изменения.

Введение

Чрезвычайные ситуации природного характера на водных объектах – частые явления. Каждый год в том или ином регионе происходят сильные сезонные разливы рек, затапливаются значительные территории. Во время паводка может быть разрушена инфраструктура населенных пунктов, жилые и промышленные здания, железнодорожные пути, шоссейные дороги и гидротехнические сооружения. Активное снеготаяние и половодья распространены на территориях, где наблюдаются обильный снежный покров и высокая насыщенность водоносных слоев. Для заторных паводков характерно сочетание обильного осеннего увлажнения грунта и стремительного снеготаяния весной, обеспечиваемого приходом масс теплого воздуха. Водные и околоводные экосистемы исторически приспособлены к наводнениям. Но в то же время распашка лугов, приречных склонов, залежных заливных земель, бесконтрольный забор воды негативным образом отразились на облике наших рек. Уровень воды в реке – это характеристика, указывающая на высоту поверхности воды, отсчитываемую относительно некоторой постоянной плоскости сравнения [1]. Особое значение имеют оценка и прогноз для предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями, затоплениями территорий.

Среди регионов Центрального федерального округа Российской Федерации Тверская область занимает одно из первых мест по объемам разведанных и прогнозных водных ресурсов. Влажный климат, особенности рельефа и геологических условий определяют сравнительно густую гидрографическую сеть. По северо-западной части территории проходит Валдайская возвышенность, своеобразный центр зарождения крупнейших рек Русской равнины. Основной генетической составляющей речного стока являются талые воды. Водные ресурсы рек области в основном используются для производственных и хозяйствственно-питьевых нужд.

Цель исследования – изучение средней равнинной реки на основе моделирования и численной оценки прогноза паводковой обстановки в одном из районов Тверской области. Исследование механизма формирования стока в условиях происходящих климатических изменений для различных в природном отношении регионов относится к актуальным вопросам устойчивого развития территорий и рачительного водопользования.

Методы исследования:

анализ информационных источников и архивных статистических данных;

математическое моделирование и вычислительный эксперимент;

междисциплинарные методы оценки факторов, влияющих на ситуацию с паводком.

Основные результаты

В качестве предмета исследования была выбрана река Обша в Бельском районе. Такой выбор обусловлен регулярным возникновением критических ситуаций в зоне территориального бассейна, вызываемых поводковым разливами самой реки, ее притоков и стоков. Река Обша не регулируется, поэтому паводок случается практически каждый год.

На рис. 1 представлен фрагмент карты Тверской области (избранная для исследования территория обведена толстой линией).

В 2024 году подъем воды в Обше вновь фиксировался выше опасной отметки. Уровень в окрестностях города Белого на 18 см превысил исторический максимум. В зоне подтопления оказались 78 приусадебных участков, 19 улиц города; были затоплены подвалы многих жилых домов. Высокий поводок на Обше вызвал устойчивое повышение уровней воды в реке Западая Двина и ее притоков: реки Каспли у города Демидова (Смоленская область) и реки Межи у поселка Жарковского (Тверская область). В зоне подтопления оказались приусадебные участки, прибрежные улицы (более 58 объектов).

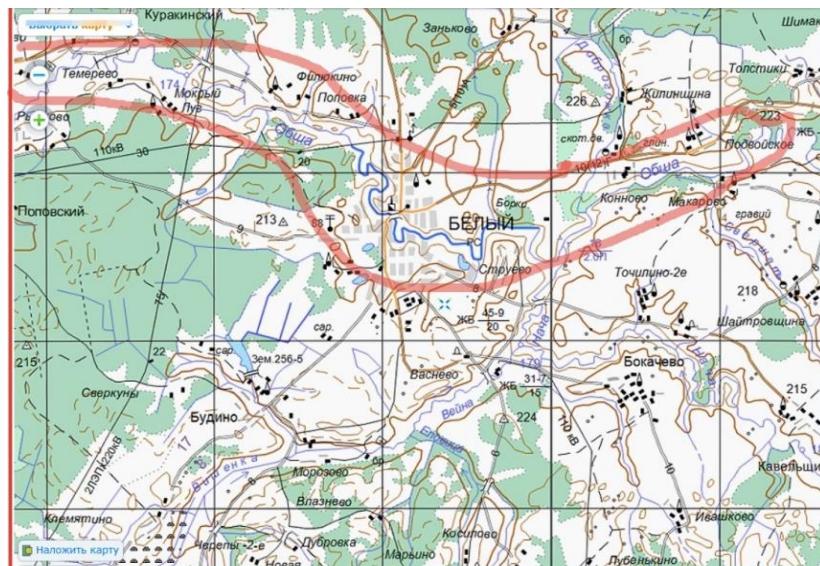


Рис. 1. Карта окрестностей города Белого с указанием расположения изучаемого водного объекта

Обла – река на северо-западе европейской части России, протекающая в Смоленской и Тверской областях и впадающая в реку Межу. Длина – 153 км, площадь бассейна – 2 080 км², средний расход воды в 47 км от устья – 11,5 м³/с. Русло реки извилистое, ширина составляет 10–20 м. Берега густо залесены, после города Белого сильно заболочены. Река принадлежит к бассейну Западной Двины и Балтийского моря, крупнейший населенный пункт – город Белый. Самые большие притоки – Белая, Нача (левый); Льба (правый). Обла берет начало в Смоленской области, в болотах на склоне Бельской возвышенности, в отроге Смоленской возвышенности возле деревни Бочарово. Исток реки находится в нескольких километрах от истока Днепра, вытекающего из того же комплекса болот. На рис. 2 представлен график годовых колебаний уровня воды с максимальными и минимальными отметками [2].

Анализ общедоступных архивных данных позволил установить граничные значения для изучаемого водного объекта. Минимальный уровень равен 79 см (2008 год), максимальный – 551 см (2009 год); среднестатистический уровень составляет 193 см. Абсолютный минимум (57 см) наблюдался 15 сентября 2019 года; абсолютный максимум, равный 881 см, отмечен 20 апреля 2013 г. Критический уровень выхода воды на пойму составляет 780 см. При достижении отметки «Высокое половодье» начнется затопление поймы и пониженных участков рельефа, а также расположенных на них построек, сельскохозяйственных угодий, объектов инфраструктуры.

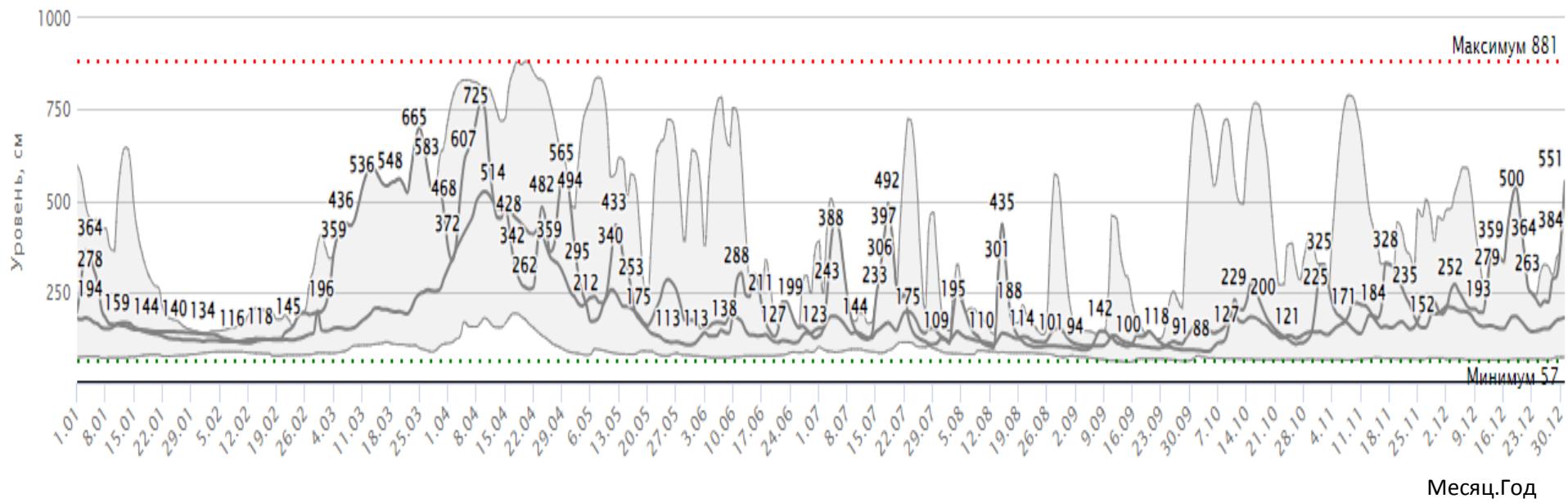


Рис. 2. Диаграмма уровней воды на реке Обше на гидропосту города Белого

Недостаточное финансирование, износ оборудования и потеря гидрологических постов, отток населения из малых городов и, как следствие, оперирование данными, полученными из вторичных источников, приводят к снижению достоверности результатов мониторинговых наблюдений и (или) их отсутствию. Увеличение количества и доли оттепельных паводков в общем стоке во многом вызывает перераспределение стока внутри года, возрастание водности межени, рост коэффициента естественной зарегулированности. Обратная сторона данного процесса – деградация весеннего половодья как основной фазы водного режима и связанные с этим маловодья. Все это определяет значимость оценок состояния и моделирование прогноза паводочного стока не только в разрезе наводнений, но и с точки зрения трансформации водного режима в целом [3]. С целью обоснования пригодной для прогнозирования модели уровней реки с учетом проявления современных климатических изменений в водном режиме проведем оценку опасных гидрологических явлений для современного и будущего водопользования на локальном уровне.

Оценка обстановки при наводнениях (паводках)

Проведем модельный расчет показателей, определяющих поражающее действие паводка [3].

Исходные данные

Примем расход воды до наступления наводнения $Q_0 = 420 \text{ м}^3/\text{с}$. Русло сечения реки до паводка $S_0, \text{ м}^2$, определяли по формуле

$$S_0 = 0,5(a_0 + b_0)h_0, \quad (1)$$

где a_0 – ширина дна реки; b_0 – ширина реки до паводка; h_0 – глубина реки до паводка.

Получили, что

$$S_0 = 0,5(100 + 180)2,5 = 1\ 725 \text{ м}^2.$$

Расход воды после выпадения осадков (таяния снега) и наступления половодья (паводка) $Q_{\max}, \text{ м}^3/\text{с}$, находили из соотношения

$$Q_{\max} = Q_0 + JF / 3,6, \quad (2)$$

где J – интенсивность осадков (таяния снега), $\text{мм}/\text{ч}$; F – площадь выпадения осадков (таяния снега), км^2 .

Таким образом, расчетное значение максимального расхода, определяемого из формулы (2):

$$Q_{\max} = 5\ 175 + 34,6 + 3\ 870 / 3,6 = 612 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Высота подъема воды в реке при прохождении паводка h , м, составляет 9 м. Среднестатистическая скорость потока воды во время паводка V_{\max} равна 3,3 м/с.

Находили площадь поперечного сечения потока S_{\max} при прохождении паводка. В формулу (1) вместо h_0 подставили h , а вместо $b_0 - b$ (высота разлива). Получили

$$S_{\max} = 0,5(100 + 240)11 = 1870 \text{ м}^2.$$

Поражающее действие паводка зависит от глубины затопления h_3 , м:

$$h_3 = h - h_0 - h_m,$$

где h_m – высота места.

В нашем случае

$$h_3 = 9 - 5,6 - 1,1 = 2,3 \text{ м.}$$

Максимальная скорость потока затопления V_3 , м/с:

$$V_3 = V_{\max} f,$$

где V_{\max} – максимальная скорость потока воды при прохождении паводка; f – параметр удаленности объекта от русла реки;

$$V_3 = 3,3 \cdot 0,64 = 2,1 \text{ м/с.}$$

Полученные расчетные значения обусловливают, при каких отметках и скоростях потоков происходит подтопление.

Прогноз максимальных уровней воды

Максимальные уровни воды формируются под влиянием притока воды в русловую сеть, с одной стороны, и факторов, определяющих образование ледообразование в русле, – с другой. Все используемые характеристики – это комплексные показатели, характеризующие взаимодействие атмосферы, бассейна и русла. Выделить индивидуальную степень их влияния в общем физическом процессе не всегда представляется возможным. Объем и интенсивность притока воды в русловую сеть зависят от запасов снега, имеющихся до начала снеготаяния, определяются весенними осадками, а также факторами, сказывающимися на интенсивности снеготаяния.

В нашем исследовании мы применяли методы математического и численного моделирования при вариациях исходных данных, отражающих характер развития весенних процессов, в том числе случаи экстремальных паводков.

Математическая модель прогноза максимального уровня воды H_a в реке, составленная на основе разработок В.М. Морейдо [5], выглядит следующим образом:

$$H_a = (S_a + 1,623X) + (\Delta H_1 \cdot 0,644) - (\Delta H_2 \cdot 0,395) - \Delta t_1 - 3,393t_4 + 404,136,$$

где S_a – показатель развития весенних процессов снеготаяния и выпадения осадков; X – сумма осадков за январь, февраль, март; ΔH_1 – минимальный зимний уровень; ΔH_2 – уровень воды в середине апреля; Δt_1 – среднемесячная температура воздуха в марте; t_4 – среднемесячная температура воздуха в апреле.

Модель содержит составляющие, отражающие запасы воды в снежном покрове на разных гидрологических постах и в различные моменты времени. Например, S_a является показателем развития весенних процессов снеготаяния и выпадения осадков. Кроме того, в модель включены слагаемые, характеризующие изменения уровней воды и отражающие тенденции уровневых колебаний за соответствующие периоды. Эти слагаемые выступают интегральными показателями развития процесса вскрытия реки весной. В ходе анализа диаграммы (см. рис. 2) и архивных данных был сделан вывод, что апрель – это месяц, в котором наиболее высока вероятность паводка.

Основными факторами для выполнения численного прогноза максимального уровня у реки Обши выбраны снегонакопление в бассейне; минимальные зимние уровни воды; уровни воды при появлении ледовых образований; уровни воды на 10 апреля в пунктах наблюдений; температура воздуха в апреле. Все они характеризуют динамику развития весенних процессов. Исходные данные, полученные из архивных источников и касающиеся выбранных факторов, за 2012–2017 годы представлены ниже:

S_a	ΔH_1	ΔH_2	Δt_1	t_4	X
194	113	524	3,7	5,1	126
198	110	453	3,1	4,5	90
174,1	115	562	3,3	4,7	95
171,8	90	450	3	4	105
157	100	482	3,2	4,1	112
164,5	105	493	3,4	3,9	118

Выбор указанного периода для модельных расчетов обусловлен наличием систематизированных сведений, как исходных (по выделенным факторам), так и фактически достигнутых уровнями во время паводка на реке Обше [6]. Расчеты выполнены с помощью таблиц Excel из интегрированного пакета Microsoft Office.

В таблице представлен фрагмент прогнозных расчетов по выбранной модели.

**Результаты численного моделирования уровня паводка H_a
на реке Обше Тверской области (фрагмент)**

Год	Фактические отметки	H_a , см	Ошибка
2012	651	647	4
2013	644	622	22
2014	625	565	60
2015	630	610	20
2016	617	600	17
2017	625	616	9

Полученные модельные результаты прогноза в пяти случаях не вышли за пределы допустимой ошибки согласно стандарту, утвержденному Постановлением Государственного комитета СССР от 23 ноября 1981 года № 5067. Этот стандарт устанавливает допускаемые погрешности измерения линейных размеров до 500 мм при приемочном контроле и правила определения приемочных границ с учетом этих погрешностей.

Выходящая за допустимые пределы погрешность вычислений, полученная для прогноза за 2014 год, может быть связана с тем, что указанный год стал в Северном полушарии Земли вторым по теплоте за всю историю регулярных метеорологических наблюдений на планете. Аномалия среднегодовой температуры воздуха составила +0,75. Самые крупные аномалии на полушарии образовались в российском секторе Арктики (+3...+4°). Крупных отрицательных аномалий не было отмечено. Во все остальные месяцы года (за исключением февраля) средняя температура воздуха в полушарии достигала экстремальных значений (особенно в июне, августе, декабре) или близких к таковым. Экстремально холодных месяцев в крупных регионах Северного полушария в 2014 году не было, поэтому в эти регионах в указанном году выпало атмосферных осадков заметно больше нормы [7].

Ситуацию с паводком весной 2024 года, по данным ФГБУ «Тверской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», на реке Обше у города Белого Тверской области признали критической. Исходные данные и расчет прогнозного уровня паводка на апрель месяц 2024 года приведены ниже:

S_a	ΔH_1	ΔH_2	Δt_1	t_4	X	Фактическое значение	H_a , см	Ошибка
350	120	587	3,9	5,5	160	840	837	-3

Полученная точность расчетов соответствует допустимой погрешности и практически отвечает фактическому значению достигнутой отметки (о чем свидетельствуют данные центра мониторинга в период с 21 по 24 апреля). Результат численного моделирования подтверждает пригодность математической модели для прогнозирования уровней поводковых вод на равнинных реках.

Использованная в исследовании математическая модель прогноза максимального уровня воды в реке применяет преимущества физического подхода (на этапе «конструирования» обобщенных показателей, факторов, оказывающих различное воздействие) [8] и объективного статистического анализа (на этапе получения исходных данных).

Результаты проведенного анализа и моделирования позволили сделать выводы:

1. Состояние аллювиальных почв, формирующихся на речных слоистых наносах в наиболее пониженных (прирусовых) частях долин, существенно влияет на уровень воды в реке и ее поведение во время половодий.

2. Обобщение характеристик водного объекта является основанием для численных прогнозных расчетов и выбора вариантов допустимого антропологического воздействия.

Река Обша собирает воду с площади 2 080 км², протекает по местности, покрытой холмами. Берега возвышенные, обрывистые. Русло реки извилистое, течение быстрое. Ширина реки – от 10 до 20 м. Дно суглинистое, супесчаное, реже каменистое. Ледостав происходит в начале декабря, освобождается речка от ледяного покрова в апреле [6]. Долина реки луговая, плоская; после города Белый берега заболочены, в среднем течении у воды растут кусты ивняка и ольховые рощицы, лес находится вдали от уреза воды. Далее вплотную к воде подходят преимущественно лиственные и смешанные леса. Таким образом, варианты противопаводковых мероприятий на реке Обше ограничены из-за морфогенетического типа рельефа и поднятия неотектонических структур.

3. На величины талого стока влияет широкий спектр взаимообусловленных гидрометеорологических, физических и физико-географических факторов.

Основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются:

максимальные снегозапасы,
осадки в период половодья.

Факторы подстилающей поверхности выступают промежуточным регулятором. В качестве главных прогностических параметров прогноза весеннего половодья предлагается использовать объем осадков за зимний и весенний климатические периоды, а также температуру воздуха зимнего и весеннего периодов.

4. Для получения прогнозных оценок по паводковой ситуации рекомендовано использовать выбранную модель, показывающую допустимые погрешности в ходе вычислительного эксперимента.

5. В качестве рекомендаций по защите от паводков на средних нерегулируемых равнинных реках предлагается (для реки Обши в границах городской территории, а именно города Белого Тверской области) и далее по руслу выполнить работы по расчистке и дноуглублению; расчистить пойменные территории от нежелательной древесно-кустарниковой растительности комбинированными методами; рекультивировать территории, укрепить и обустроить береговую линию.

Отдельно отметим, что при выполнении численных расчетов согласно выбранной модели целесообразно вариативно выбирать исходные статистические данные (как первичные, так и вторичные). Вторичные данные обходятся дешевле и более доступны по сравнению со сведениями из первичных источников, поэтому собирать данные из последних рекомендуется в том случае, если в ходе поиска обнаружится, что во вторичных источниках отсутствует необходимая информация.

Модельные прогнозы и анализ накопленной информации предоставляют возможность практического использования выбранных моделей и различных факторов специалистами в сфере природопользования, экологической безопасности и охраны окружающей среды при разработке и принятии управлеченческих решений, касающихся устойчивого развития на региональном уровне.

Полученные модельные результаты не вышли за пределы допустимой ошибки. Решение междисциплинарной задачи дает основание для теоретических выводов и формулировки практических рекомендаций по защите от паводков на средних нерегулируемых равнинных реках. Учебно-практическое значение проделанной работы состоит в расширении спектра применения математических инструментов; получении новых знаний, приобретаемых при освоении учебных курсов «Гидрология рек», «Гидрологические прогнозы»; установлении антропогенного воздействия на водные объекты в свете устойчивого развития территорий.

По результатам анализа научных источников, согласно прогнозу и оценке обстановки при наводнениях (паводках) были предложены природоохранные мероприятия, реализация которых поможет предотвратить паводки на реке Обше. Приведенные модели, выявленные факторы и результаты численных экспериментов могут быть включены в учебные курсы «Гидрология рек», «Гидрологические прогнозы».

Библиографический список

1. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Издание третье, перераб. и доп. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 156 с. URL: <https://djvu.online/file/xxJR7kmFTTej3> (дата обращения: 13.03.2024).
2. Гидропосты на р. Обша. Онлайн-мониторинг. URL: <https://allrivers.info/river/obsha> (дата обращения: 14.03.2024).
3. Миллер А.О. Прогнозирование и оценка паводковой обстановки на примере г. Юрги. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/28116/1/TPU200856.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).
4. О модели прогнозирования подъема уровня паводковых вод, вызванных весенним половодьем, на основе анализа больших данных / А.В. Рыбаков, Е.В. Иванова, А.Н. Тедуриева, Т.В. Усачева // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 48–57.
5. Морейдо В.М. Разработка методов ансамблевого прогноза характеристик сезонного речного стока (на примере притока воды в Чебоксарское водохранилище) дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. М., 2015. 185 с. URL: <https://www.iwp.ru/upload/iblock/1b3/1b38fe46cb5b1c4b80392bb14b7cbb33.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).
6. Основные гидрологические характеристики (с 1963 по 1970 год). Том 10. Верхневолжский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 536 с. URL: <https://n.eruditor.one/file/2382684/> (дата обращения: 14.03.2024).
7. Основные погодно-климатические особенности, наблюдавшиеся на Северном полушарии Земли в 2014 году. URL: <https://meteoinfo.ru/climate/%20climat-tabl3/-2014-/10455--2014-> (дата обращения: 14.03.2024).
8. Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Гидрологические прогнозы. Конспект лекций. СПб.: РГГМУ, 2021. 92 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_ecb616ec524c4c23be78e6d4aa1bf955.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

ASSESSMENT AND FORECAST OF FLOOD SITUATIONS IN UNREGULATED WATER BODIES

A.S. Kopeikina, E.V. Borisova

Abstract. *The main climatic and hydrological factors determining the runoff of the spring flood are considered. Taking into account archival statistical data, the dynamics of annual fluctuations in the water level of one of the rivers of the Tver region was analyzed. The damaging factors during floods were assessed using mathematical modeling and computational experiment methods. The model of forecasting the maximum water level, the main prognostic parameters of the spring flood process are determined: the amount of precipitation during the winter and spring climatic periods, and air temperature.*

Keywords: lowland rivers, flood, forecasting, modeling, sustainable development, calculation, water body, river, snow, rain, ecosystem, riverbed, nature management, Northern hemisphere, climate change.

Об авторах:

КОПЕЙКИНА Анна Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: anna.kopejkina@mail.ru

БОРИСОВА Елена Владимировна – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: elenborisov@mail.ru

About the authors:

KOPEIKINA Anna Sergeevna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: anna.kopejkina@mail.ru

BORISOVA Elena Vladimirovna – Doctor of Pedagogical Sciences, certified professor, professor of the Department of Higher Mathematics, Tver State Technical University, Tver. E-mail: elenborisov@mail.ru