



DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-61-76

EDN: HCXGMM

УДК 574

Научная статья / Research article

Оценка эффективности методики краткосрочного прогноза максимального уровня половодья в верхнем и среднем течении р. Цны

С.Н. Дудник¹, М.Е. Буковский², А.В. Семенова²✉

¹ Тамбовский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», г. Тамбов, Российская Федерация

² Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация
✉ asv273@mail.ru

Аннотация. Значительное поднятие уровней воды в реках во время весеннего половодья и выход рек на пойму является основной опасностью в данный период для близлежащих территорий и проживающий там людей. Это явление может приводить к затоплению обширных территорий, значительным экономическим убыткам, наносить экологический ущерб, а также угрожать здоровью и жизни местных жителей. Подобные негативные последствия высоких половодий характерны и для рек Тамбовской области, что говорит о необходимости разработки эффективной системы прогноза и предупреждения максимальных уровней половодья. Происходящие последние десятилетия климатические изменения, которые отражаются и на водном режиме рек, диктуют необходимость модернизации существующих методик прогноза. Изложены материалы оценки эффективности существующей методики краткосрочного прогноза максимального уровня половодья на примере двух гидрологических постов («Кузьмино-Гать» и «Тамбов»), расположенных на реке Цне. Были произведены расчеты по современным данным в соответствии с тестируемой методикой и проведен сравнительный анализ с расчетами прошлых лет. На основании выполненного анализа была дана оценка точности прогнозов максимальных уровней половодья по тестируемой методике. По результатам работы было установлено, что существующая методика краткосрочного прогноза максимального уровня половодья на реке Цне в большей степени не является эффективной применительно к современным условиям формирования стока весеннего

© Дудник С.Н., Буковский М.Е., Семенова А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

половодья. При анализе на гидропосту «Кузьмино-Гать» значения максимальных уровней половодья, полученные методом реанализа согласно тестируемой методики с использованием современных данных, показали значительные отклонения от реальных наблюдаемых значений. При этом для оперативного прогноза максимальных уровней воды на гидропосту «Тамбов» использование корреляционной зависимости с наблюдаемыми уровнями воды на гидропосту «Кузьмино-Гать», как и ранее, возможно. Коэффициент корреляции при использовании современных данных составил 0,96. Авторами были выделены основные недостатки существующей методики и даны предложения по совершенствованию, в частности, определены факторы, которые необходимо проанализировать, чтобы уточнить прогноз.

Ключевые слова: весеннее половодье, гидрологический пост, Кузьмино-Гать, Тамбов, река Цна, максимальный уровень воды, краткосрочный прогноз

Благодарности и финансирование. Авторы выражают благодарность Тамбовскому центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за предоставление климатических и гидрологических данных.

Вклад авторов. Каждый автор внес вклад в разработку концепции и дизайна работы. С.Н. Дудник – подача идеи статьи и предоставление первичных данных по уровням воды и температурному режиму; А.В. Семенова – сбор, обработка и анализ данных, подготовка первичного варианта текста статьи; М.Е. Буковский – проверка полученных результатов анализа, корректировка и утверждение финального текста статьи.

История статьи: поступила в редакцию 12.10.2023; доработана после рецензирования 12.11.2023; принята к публикации 12.12.2023

Для цитирования: Дудник С.Н., Буковский М.Е., Семенова А.В. Оценка эффективности методики краткосрочного прогноза максимального уровня половодья в верхнем и среднем течении р. Цны // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 1. С. 61–76. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-1-61-76>

The efficiency assessment of short-term maximum flood level forecast methodology in the upper and middle course of the Tsna river

Sergey N. Dudnik¹, Mikhail E. Bukovskiy², Anna V. Semenova²✉

¹Tambov Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – a branch of the Federal State Budgetary Institution “Central Chernozem Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring”, Tambov, Russian Federation

²Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation

✉asv273@mail.ru

Abstract. A significant rise in water levels in the rivers during the spring flood and the release of rivers to the floodplain is the main danger in this period for nearby territories and people living there. This phenomenon can lead to flooding of large areas, significant economic losses, environmental damage, and threaten the health and life of local residents. Such negative consequences of high floods are typical for the Tambov region rivers, which indicates the need to develop an effective system for forecasting and preventing maximum flood levels. The

climatic changes that have taken place over the past few decades, which are also reflected in the rivers' water regime, show the need to modernize existing forecasting methodologies. In this paper, the authors have demonstrated the results of the effectiveness assessment of the existing methodology for short-term forecasting of the maximum flood level on the Tsna River at two gauging stations ("Kuzmino-Gat" and "Tambov"). Calculations were made using modern data in accordance with this methodology and a comparative analysis was carried out with the calculations of previous years. Based on this analysis, an assessment of the flood levels forecast methodology accuracy was given. According to the study results, it was found that the existing methodology for short-term forecasting of the maximum flood level on the Tsna River is largely ineffective nowadays with regard to modern conditions of spring flood runoff formation. In the analysis of the Kuzmino-Gat gauging station, the values of the maximum flood levels obtained by the reanalysis method according to the tested methodology using modern data showed significant deviations from the actual observed values. At the same time, for the operational forecast of maximum water levels at the Tambov gauging station, it is possible to use the correlation dependence with the observed water levels at the Kuzmino-Gat gauging station, as before. The correlation coefficient with modern data was 0.96. The authors have highlighted the main drawbacks of the existing methodology and made suggestions for improvement, in particular, what factors need to be analyzed in order to clarify the forecast.

Keywords: spring flood, gauging station, Kuzmino-Gat, Tambov, Tsna River, maximum water level, short-term forecast

Acknowledgements and Funding. The authors are grateful to the Tambov Center for Monitoring Hydrometeorology and Environmental Monitoring for providing weather and flood levels data.

Authors' contributions. Every author contributed to the study conception and design. *S.N. Dudnik* – an idea suggestion and primary data of water levels and temperature regime; *A.V. Semenova* – collection, processing and analysis of data; preparing of the first paper version; *M.E. Bukovskiy* – verification of the analysis results, correction and approval of the final text of the paper.

Article history: received 12.10.2023; revised 12.11.2023; accepted 12.12.2023

For citation: Dudnik SN, Bukovskiy ME, Semenova AV. The efficiency assessment of short-term maximum flood level forecast methodology in the upper and middle course of the Tsna river. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(1):61–76. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-1-61-76>

Введение

Весеннее половодье является основной фазой водного режима равнинных рек Центральной России, которая характеризуется наивысшей водностью в году. На таких реках половодье провоцируется активным таянием снега и приходится на февраль-апрель. Данный период сопровождается выходом рек на пойму, что приводит к затоплению жилых объектов, объектов промышленности, инфраструктуры, а также угрожает жизни людей [1].

Подобные негативные последствия наблюдаются и для рек Тамбовской области [2; 3]. Рассматривая гидропосты «Кузьмино-Гать» и «Тамбов» на реке Цне, можно наблюдать частые случаи достижения уровней выхода воды на пойму, а иногда и опасных уровней, когда подтапливаются различные объекты.

С целью снизить причиняемый высокими половодьями ущерб люди издавна пытались предугадать время наступления и значения высоких уровней воды в реках. Первые серьезные шаги в изучении явления половодья и разработке методик прогноза в России были сделаны советскими учеными А.И. Воейковым, В.Н. Лебедевым, О.Т. Машкевичем и другими в 20–30-х гг. XX в. [4–6].

В результате были выведены эмпирические зависимости между высотой половодья и климатическими факторами, которые ее определяют. С помощью этих зависимостей и предполагалось осуществление прогнозирования уровней половодья, но тогда еще долгосрочного.

Позже среди математических методов стали активно использоваться для прогноза методы теории вероятностей и математической статистики, теория численных методов анализа и оптимизации, современная теория факторного анализа, дифференциальные уравнения [7].

Для построения прогностических моделей используются статистические модели (аппроксимации, экстраполяции и интерполяции, моделей оценки влияния случайных факторов процесса) [8].

В связи с активным развитием науки, а также высокой интеграцией и синергией различных отраслей науки друг с другом стали внедряться методы нейросетевого прогнозирования и нечеткой логики, разрабатываться физические и математические модели прогнозирования [9; 10].

Однако подобные модели в большинстве своем требуют значительного объема входных данных о различных гидрологических параметрах и являются достаточно сложно интерпретируемыми. Также для минимизирования ошибки и обеспечения эффективной работы модели необходима ее постоянная калибровка. Все это делает их малоэффективными в сфере краткосрочного прогнозирования [11].

Более того, для более эффективного использования физических моделей и моделей машинного обучения применяют ансамблевый метод, т.е. применяются несколько методов для построения модели одновременно. Такие модели отличаются более точными прогнозами [12].

Помимо этого, все более успешно применяются геоинформационные технологии в сфере моделирования формирования и таяния снежного покрова, разработки моделей прогноза погоды, причем в краткосрочной перспективе [13].

В связи с тем, что река Цна характеризуется высокими уровнями половодья, возникает необходимость разработки методики их прогнозирования. В ходе научных изысканий авторами была найдена методика краткосрочного прогноза максимальных уровней воды в половодье 1951 года, разработанная для гидрологических створов Тамбовского региона¹. Современных методик

¹ Методика краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья р. Цна у г. Тамбова и с. Кузьмино-Гать. Курск: Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1951. 8 с.

прогноза половодья, адаптированных для рек Тамбовской области, обнаружено не было.

Однако в связи с происходящими климатическими изменениями, строительством различных гидротехнических сооружений и, следовательно, трансформацией водного режима возникла необходимость в оценке применимости указанной методики в настоящее время [14–16].

С целью оценки эффективности методики краткосрочного прогноза максимального уровня весеннего половодья на реке Цне у села Кузьмино-Гать и г. Тамбова авторами были проведены расчеты и построены графические зависимости по современным данным в соответствии с методикой 1951 г.

Материалы и методы

Расчеты проводились в соответствии с «Методикой краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья на реке Цне у города Тамбова и села Кузьмино-Гать»².

Река Цна – равнинная река Европейской территории России. Она является левым притоком реки Мокши (бассейн Волги). Это наиболее протяженная река на территории Тамбовской области длиной 446 км, из которых 300 км протекает по территории региона. Площадь бассейна составляет 21,5 тыс. км² (из них 14,2 тыс. км² в Тамбовской области) [17]. На рис. 1 представлен участок реки Цны, на котором происходило тестирование методики краткосрочного прогноза уровня воды в половодье, разработанной в 1951 г. на примере этого же участка.

Тамбовским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды были предоставлены гидрологические журналы ежедневных наблюдений за уровнем воды в реке Цне на гидропостах «Кузьмино-Гать» и «Тамбов», агрометеорологические журналы с данными ежедневных наблюдений среднесуточных температур и пентадных снегосъемок по метеостанции «Тамбов». Данные охватывают промежутки с 1970 по 2020 г.

Современные данные, необходимые для прогноза максимального уровня половодья, были оцифрованы и сведены в редакторе MS Excel в единую таблицу. Затем для каждого года были определены значения следующих параметров: максимальный уровень воды в половодье, дата достижения максимального уровня, максимальный за зиму запас воды в снежном покрове, дата достижения максимального за зиму запаса воды в снеге и дата устойчивого перехода среднесуточной температуры через 0 °C в сторону повышения.

На следующем этапе в соответствии с тестируемой методикой было необходимо установить дату накопления сумм положительных среднесуточных температур, необходимых для схода снежного покрова в зависимости от запаса воды в снежном покрове в конкретный год. При этом было принято,

² Методика краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья р. Цна у г. Тамбова и с. Кузьмино-Гать. Курск: Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1951. 8 с.

что 1 °С положительной среднесуточной температуры дает убыль запасов воды в снежном покрове в 6 мм в сутки. Данный параметр отсчитывался от даты устойчивого перехода средней суточной температуры через 0 °С в сторону повышения.

Далее определялось наибольшее среднее значение среднесуточных температур воздуха за три последовательных дня, начиная с даты устойчивого весеннего перехода до даты накопления теоретически необходимых для полного схода снежного покрова сумм положительных среднесуточных температур. Полученные значения были округлены с шагом в 0,5 °С. Однако несколько лет, а именно девять, были исключены из расчета: восемь из них (1981–1982, 1995, 1997–1998, 2001, 2013, 2019) – из-за того, что устойчивый переход среднесуточной температуры через 0 °С в сторону повышения в эти годы произошел позже, чем наступил пик половодья; 1974 г. исключен из-за отсутствия исходных гидрологических данных.

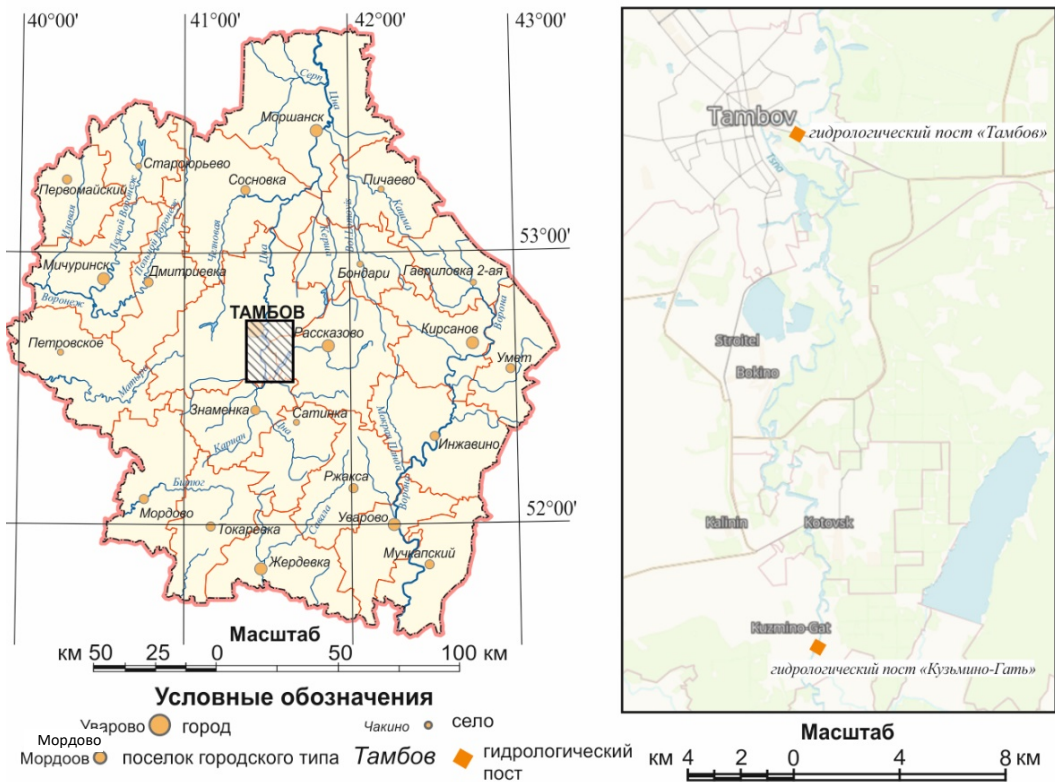


Рис. 1. Район проведения исследований

Источник: составлено авторами /

Figure 1. Study area

Source: compiled by the authors.

Затем весь массив данных был разделен в соответствии со значениями полученных ранее наибольших средних значений температур на 7 групп: 2 °С и ниже; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 °С и выше.

Для каждой группы была построена линейная зависимость между максимальными за зиму запасами воды в снежном покрове и максимальным уровнем половодья. Следует уточнить, что при наличии в конкретном году двух пиков половодья с более высоким вторым пиком для построения линейных графических зависимостей использовался именно первый более низкий пик, что связано с особенностью тестируемой методики, которая не рассчитана на прогноз высоты второго и последующих пиков. В случае с гидропостом «Кузьмино-Гать» это – 1973, 1979, 1988, 1989, 1991 гг. Превышение второго пика половодья над первым составило в разные годы от 1 до 36 см. Линейные зависимости были получены путем аппроксимации по методу наименьших квадратов реальных кривых зависимостей максимального уровня половодья от максимальных за зиму запасов воды в снежном покрове.

Получившиеся графики были использованы для получения теоретических прогнозных значений максимальных уровней половодья на гидропосту «Кузьмино-Гать» по данным за период с 1970 по 2020 г. согласно тестируемой методике.

Для сопоставления максимальных прогнозных уровней воды, полученных с помощью тестируемой методики, с реальными максимальными уровнями воды, достигнутыми во время половодья, использовались значения реальных наблюдаемых максимальных уровней половодья вне зависимости от того, были ли они достигнуты в первый или во второй пик в случае двухвершинного половодья.

Прогноз максимального уровня воды по гидропосту «Тамбов», согласно тестируемой методике, производится на основании графика линейной зависимости максимального уровня воды на гидропосту «Тамбов» от максимального уровня воды на гидропосту «Кузьмино-Гать». На рис. 2 и 7 представлены воспроизведенные в электронном виде графики линейных зависимостей, приведенные в тестируемой методике³.

Результаты и обсуждение

Исходя из приведенного в тестируемой методике графика зависимости максимального уровня половодья у села Кузьмино-Гать от наибольших за зиму запасов воды в снеге (рис. 2) можно наблюдать довольно четкую связь: при наличии больших запасов воды в снеге и значительном повышении среднесуточной температуры воздуха наблюдается высокое половодье, и наоборот. В ходе линейной аппроксимации зависимости максимального уровня половодья от максимальных запасов воды в снеге с учетом значений средних суточных температур воздуха по данным за период с 1970 по 2020 г. (рис. 3)

³ Методика краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья р. Цна у г. Тамбова и с. Кузьмино-Гать. Курск: Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1951. 8 с.

такой четкой зависимости получено не было, что ставит под сомнение эффективность данной методики в современных условиях формирования стока половодья.

На рис. 4 линейные зависимости, полученные на рис. 3, продлены по оси *X* до одних и тех же пределов так же, как это сделано в тестируемой методике (рис. 2) для возможности получения прогнозных значений максимального уровня половодья с учетом наибольших средних за три последовательных дня снеготаяния значений среднесуточных температур воздуха при любых значениях запасов воды в снежном покрове в интервале от 35 до 175 мм.

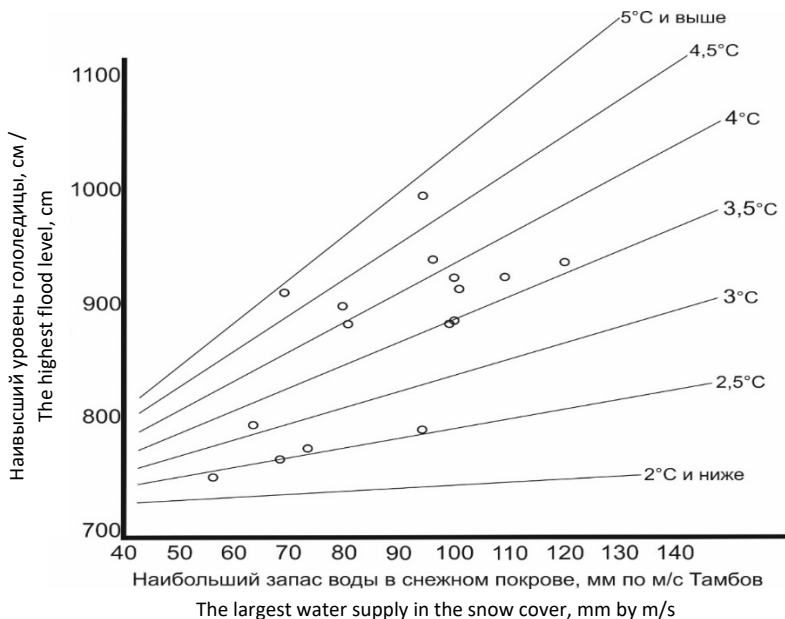


Рис. 2. Линейные зависимости максимального уровня половодья от максимальных за зиму запасов воды в снежном покрове с учетом наибольших средних за три последовательных дня снеготаяния значений среднесуточных температур воздуха по данным за 1942–1951 гг.

Источник: Методика краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья р. Цна у г. Тамбова и с. Кузьмино-Гать. Курск: Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1951. 8 с.

Источник: составлено авторами /

Figure 2. Linear dependences of the maximum flood level on the maximum winter water reserves in the snow cover, taking into account the largest average values of average daily air temperatures for three consecutive days of snowmelt according to data for 1942–1951

Source: Methodology for short-term forecasting of the highest level of spring floods on the Tsna river near the Tambov city and Kuzmino-Gat village. Kursk Central Black Earth Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 1951. 8 p. (In Russ.).

Source: compiled by the authors.

Далее графическим методом были получены значения максимальных уровней воды в половодье за 1970–2020 гг. путем определения значений с использованием рис. 2 и 4. Затем рассчитана разница между значениями, полученными с помощью номограмм, и фактически наблюдаемыми значениями. Результаты представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

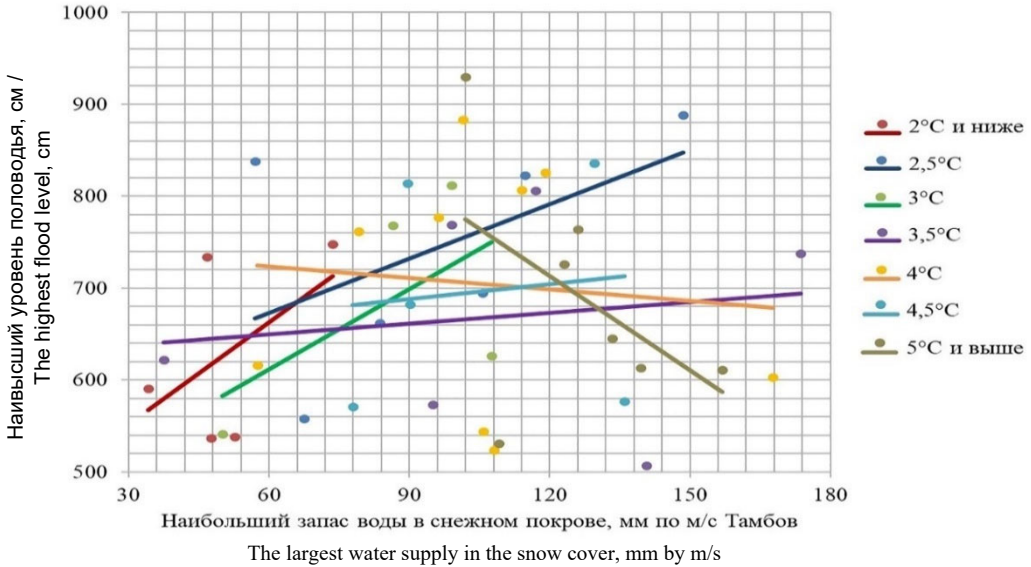


Рис. 3. Линейная аппроксимация зависимости максимального уровня воды в половодье от наибольших запасов воды в снежном покрове с учетом наибольших средних за три последовательных дня снеготаяния значений среднесуточных температур воздуха по современным данным, 1970–2020 гг.

Источник: составлено авторами /

Figure 3. Linear approximation of the maximum water level dependence in the flood on the largest water reserves in the snow cover, taking into account the largest average values of average daily air temperatures for three consecutive days of snowmelt according to modern data, 1970–2020

Source: compiled by the authors.

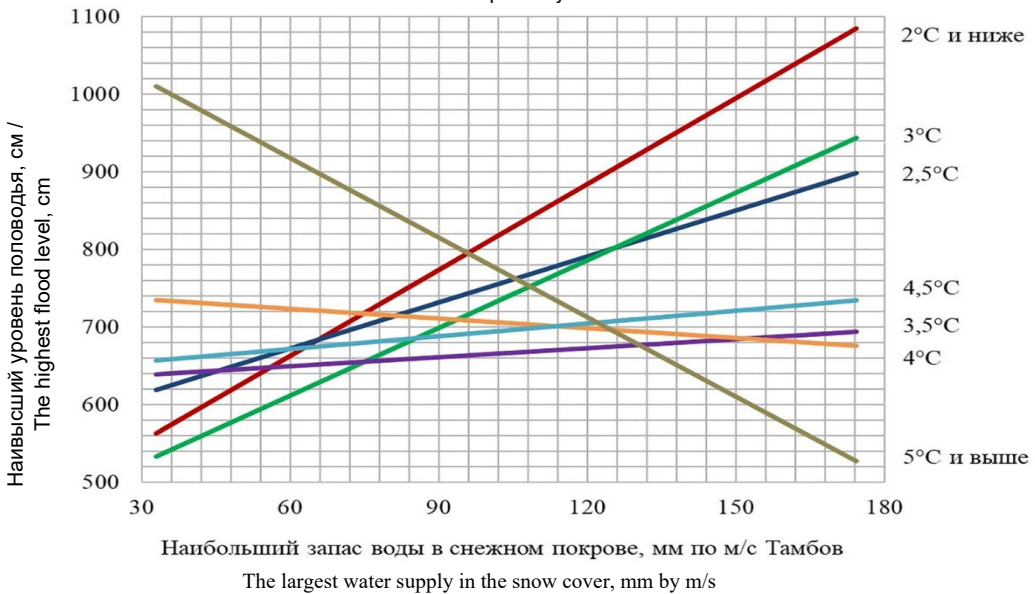


Рис. 4. Линейные зависимости максимального уровня половодья от максимальных за зиму запасов воды в снежном покрове с учетом наибольших средних за три последовательных дня снеготаяния значений среднесуточных температур воздуха по современным данным, 1970–2020 гг.

Источник: составлено авторами /

Figure 4. Linear dependences of the maximum flood level on the maximum winter water reserves in the snow cover, taking into account the highest average daily air temperatures for three consecutive days of snowmelt according to modern data, 1970–2020

Source: compiled by the authors.

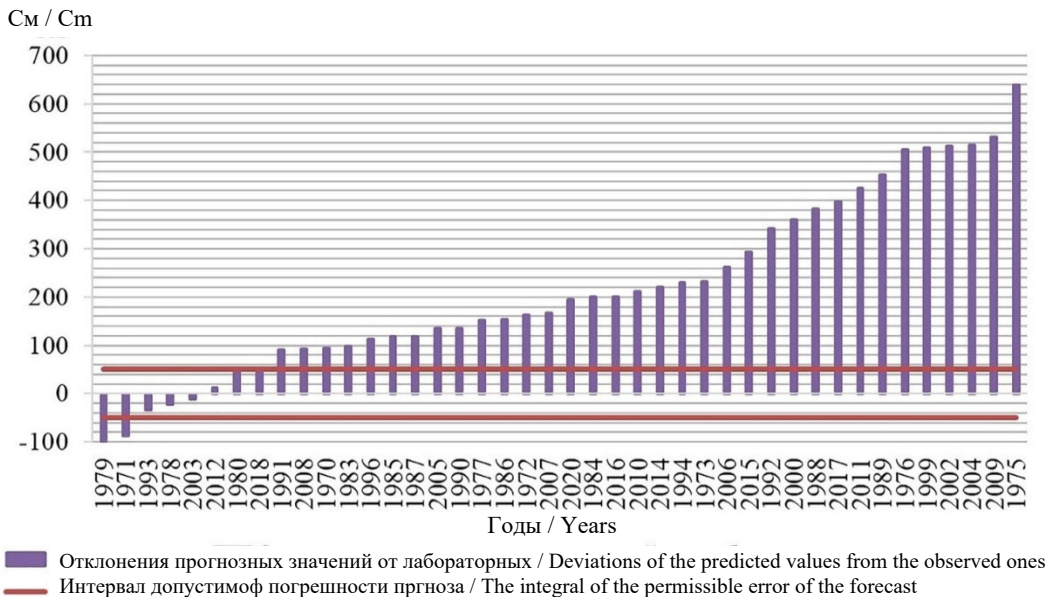


Рис. 5. Отклонение прогнозных значений максимального уровня половодья от фактически наблюдаемых значений на гидропосту «Кузьмино-Гать» на примере современных данных, полученных графическим методом с использованием рис. 2

Источник: составлено авторами /

Figure 5. Deviation of the forecast values of the maximum flood level from the actually observed values at the Kuzmino-Gat gauging station, obtained by a graphical method using the Figure 2, using modern data

Source: compiled by the authors.

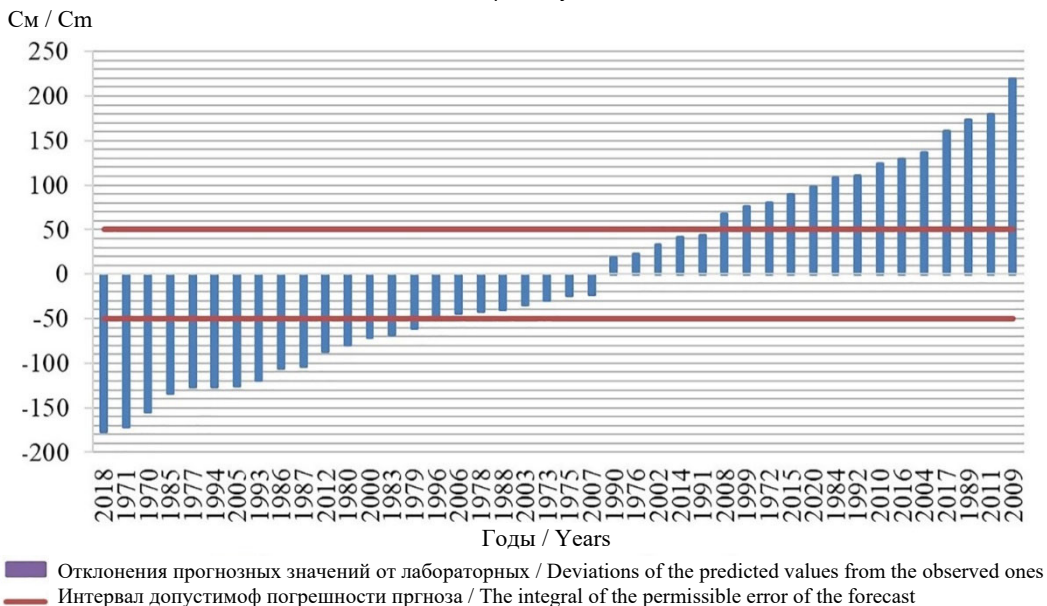
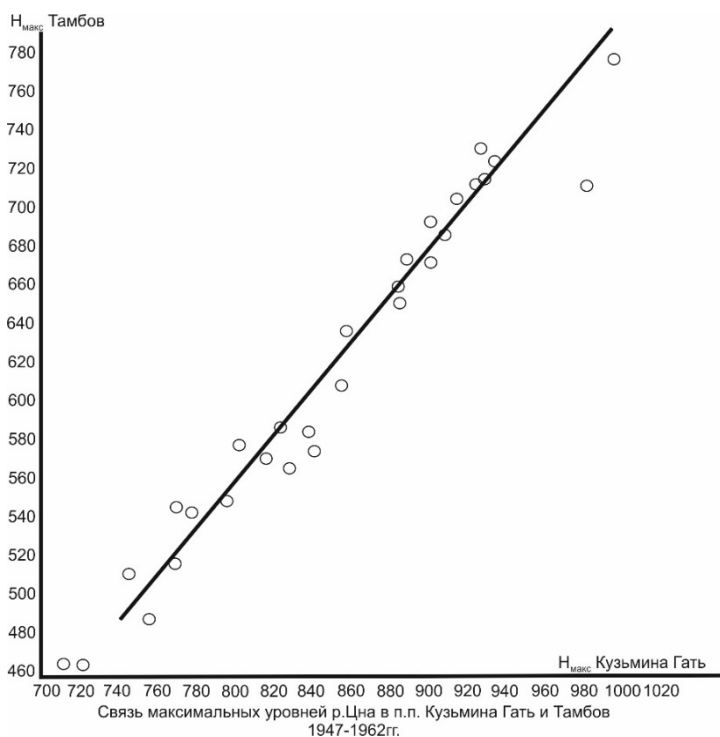


Рис. 6. Отклонение прогнозных значений максимального уровня половодья от фактически наблюдаемых значений на гидропосту «Кузьмино-Гать» на примере современных данных, полученных графическим методом с использованием рис. 4

Источник: составлено авторами /

Figure 6. Deviation of the predicted values of the maximum flood level from the actually observed values at the Kuzmino-Gat gauging station, obtained by a graphical method using the Figure 4, on the modern data

Source: compiled by the authors.



The relationship of the maximum levels of R. Cna in the village of Kuzmina Gat and Tambov 1947–1962

Рис. 7. Связь между максимальными уровнями половодья на гидропостах «Кузьмино-Гать» и «Тамбов» по данным за 1947–1962 гг. Источник: Методика краткосрочного прогнозирования наивысшего уровня весеннего половодья р. Цна у г. Тамбова и с. Кузьмино-Гать. Курск: Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1951. 8 с. /

Figure 7. Relationship between maximum flood levels at the Kuzmino-Gat and Tambov gauging stations according to data for 1947–1962

Source: Methodology for short-term forecasting of the highest level of spring floods on the Tsna river near the Tambov city and Kuzmino-Gat village. Kursk Central Black Earth Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 1951. 8 p. (In Russ.).

Допустимая погрешность прогноза максимального уровня половодья, принятая в территориальном подразделении Росгидромета, составляет 50 см. Как видно из рис. 5 и 6, ошибки прогноза значений максимального уровня воды в половодье по гидропосту «Кузьмино-Гать», полученные при помощи тестируемой методики на современных данных, превышают допустимую ошибку в 50 см в 86 и 69 % случаев соответственно.

Следующим шагом стал сравнительный анализ графиков зависимости максимального уровня воды в половодье по гидропосту «Тамбов» от максимального уровня воды в половодье по гидропосту «Кузьмино-Гать», приведенного в более позднем приложении к тестируемой методике (рис. 7) и полученного по современным данным (рис. 8).

График зависимости максимальных уровней половодья в Тамбове от максимальных уровней половодья в Кузьмино-Гати, построенный по современным данным по-прежнему позволяет прогнозировать максимальные уровни половодья на гидропосту «Тамбов» при достижении максимального

уровня на гидропосту «Кузьмино-Гать». Коэффициент корреляции при построении линейного графика составил 0,96. Так как статистическая связь очень сильна, то определение прогнозных значений максимального уровня воды в половодье на гидропосту «Тамбов» при помощи графика на рис. 8 является обоснованным.

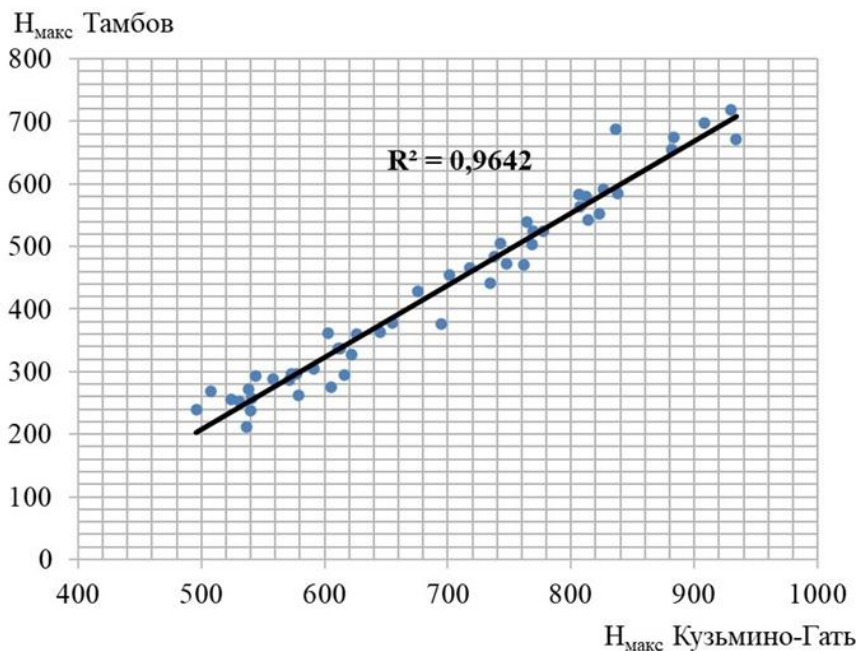


Рис. 8. Связь между максимальными уровнями половодья на гидропостах «Кузьмино-Гать» и «Тамбов» по современным данным (1970–2020 гг.)

Источник: составлено авторами /

Figure 8. Relationship between maximum flood levels at the Kuzmino-Gat and Tambov gauging stations according to modern data (1970–2020)

Source: compiled by the authors.

Заключение

Обобщая все вышеизложенное, можно утверждать, что методика краткосрочного прогноза максимального уровня весеннего половодья на реке Цне у села Кузьмино-Гать, созданная в 1951 г., в настоящее время является неэффективной.

Во-первых, использование такого параметра, как наибольшая средняя температура воздуха за 3 последовательных дня периода снеготаяния, в качестве основного критерия для построения методики является не совсем корректным. Этот параметр считается от даты устойчивого перехода среднесуточной температуры через 0 °С в сторону повышения, однако есть случаи, когда этот переход происходит после начала, а иногда и после наступления пика половодья. В этих случаях главную роль играют уже максимальные суточные температуры.

Во-вторых, использование значений максимального за зиму запаса воды в снеге в качестве главного влияющего фактора не учитывает наличие оттепелей в феврале-марте и, следовательно, некорректно отражает количество воды, которое образуется непосредственно во время весеннего снеготаяния. В данном случае правильнее использовать значения запаса воды в снежном покрове на дату начала активного снеготаяния, которое иногда может совпадать с датой накопления максимальных запасов воды в снеге, а может и не совпадать.

В-третьих, подход, приведенный в методике не в полной мере, учитывает другие климатические факторы, например, осадки, глубину промерзания почвы, осеннее увлажнение почвогрунтов, запас влаги в метровом слое почвы перед началом снеготаяния.

В целом рис. 5 и 6 наглядно показывают, что в большинстве случаев прогноз максимального уровня половодья на гидропосту «Кузьмино-Гать», выполненный с помощью тестируемой методики с использованием современных данных, выходит далеко за рамки допустимых погрешностей.

Следует отметить, что пользоваться линейной зависимостью максимальных уровней половодья между гидропостами «Кузьмино-Гать» и «Тамбов» для оперативного прогноза максимальных уровней половодья в Тамбове по-прежнему целесообразно.

Таким образом, по итогам проведенных исследований необходимо сделать вывод о неэффективности использования для прогнозов максимальных уровней половодья у с. Кузьмино-Гать протестированной методики и необходимости разработки новой методики прогноза максимальных уровней воды в половодье.

Список литературы

- [1] *Davies J.B.* Economic analysis of the costs of flooding // *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*. 2016. Vol. 41. P. 204–219. <http://dx.doi.org/10.1080/07011784.2015.1055804>
- [2] *Дмитриева В.А.* Аномалии весеннего половодья в Донском бассейне и их водохозяйственные и гидроэкологические последствия // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2018. Т. 42. № 2. С. 181–190. <http://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-181-190>
- [3] *Bukovskiy M.E., Semenova A.V.* Analysis of the effects of climatic factors on flood peak formation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 386. P. 012034. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012034>
- [4] *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов: учебник для гидрометеорол. ин-тов и геогр. фак. ун-тов. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 422 с.
- [5] *Воейков А.И.* К вопросу о половодье 1908 года и предсказание уровня рек // *Метеорологический вестник*. 1908. № 7. 17 с.
- [6] *Лебедев В.Н.* Методы предсказания высоты весеннего половодья рек // *Известия РГИ*. 1924. № 11.
- [7] *Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А.* Системный анализ в управлении: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

- [8] Анашечкин А.Д., Трофимец Е.Н. К вопросу построения краткосрочных моделей прогнозирования уровней воды на участках рек // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2019. № 1. С. 36–43.
- [9] Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Российская академия наук, 2018. 300 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
- [10] Mosavi A., Ozturk P., Chau K. Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review // Water. 2018. Vol. 10. P. 1536. <http://dx.doi.org/10.3390/w10111536>
- [11] Jain S.K. Mani P., Jain S.K., Prakash P., Singh V.P., Tullos D., Kumar S., Agarwal S.P., Dimri A.P. A Brief review of flood forecasting techniques and their applications // International Journal of River Basin Management. 2018. Vol. 16. P. 329–344. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2017.1411920>
- [12] Wu W., Emerton R., Duan Q., Wood A.W., Wetterhall F., Robertson D.E. Ensemble flood forecasting: Current status and future opportunities // WIREs Water. 2020. Vol. 7. P. e1432. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1432>
- [13] Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. 148 с.
- [14] Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- [15] Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26. <http://dx.doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26>
- [16] Чернова М.А., Буковский М.Е., Дудник С.Н. Оценка изменения летнего стока рек Волжского бассейна на территории Тамбовской области за 65 лет // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 года. Екатеринбург: [б.и.], 2021. С. 117–123. <https://doi.org/10.26170/KFG-2021-16>
- [17] Дудник Н.И. Реки Тамбовской области Каталог. Тамбов: ТГПИ, 1991. 47 с.

References

- [1] Davies JB. Economic analysis of the costs of flooding. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*. 2015 Jul 9;41(1–2):204–19. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/07011784.2015.1055804>
- [2] Dmitrieva VA. Of Spring Flood in Don River Basin and Their Water Management and Hydroecological Consequences. *Belgorod State University Scientific bulletin Natural Sciences*. 2018 Jun 30;37(2):181–90. Available from: <http://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-181-190> (In Russ.).
- [3] Bukovskiy ME, Semenova AV. Analysis of the effects of climatic factors on flood peak formation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019 Nov 1;386(1):012034. Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012034>
- [4] Apollonov BA, Kalinin, GP, Komarov VD. *Course of hydrological forecasts: Textbook for hydrometeorological institutes and geographical departments of universities*. Moscow: Gidrometeoizdat Publ.; 1974. 422 p. (In Russ.).

- [5] Voeikov AI. On the question of the flood of 1908 and the prediction of the level of rivers. *Meteorological Bulletin*. 1908;7:17 p. (In Russ.).
- [6] Lebedev VN. Methods for predicting the height of the spring flood of rivers. *News of the Russian Hydrological Institute*. 1924. 11 p. (In Russ.).
- [7] Anfilatov VS, Emelyanov AA, Kukushkin AA. *System analysis in management: textbook*. Moscow: Finance and statistics Publ.; 2002. 368 p. (In Russ.).
- [8] Anashechkin AD, Trophimets EN. The question of building a short-term predictive models of water levels on stretches of the rivers. *Scientific and analytical journal "Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2019;1:36–43. (In Russ.).
- [9] Motovilov YG, Gelfan AN. *Models of runoff formation in problems of hydrology of river basins*. Moscow: Russian Academy of Sciences Publ.; 2018. 300 p. Available from: <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001> (In Russ.).
- [10] Mosavi A, Ozturk P, Chau K. Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review. *Water*. 2018 Oct 27;10(11):1536. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/w10111536>
- [11] Jain SK, Mani P, Jain SK, Prakash P, Singh VP, Tullos D, et al. A Brief review of flood forecasting techniques and their applications. *International Journal of River Basin Management*. 2018 Jan 22;16(3):329–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2017.1411920>
- [12] Wu W, Emerton R, Duan Q, Wood AW, Wetterhall F, Robertson DE. Ensemble flood forecasting: Current status and future opportunities. *WIREs Water*. 2020 Mar 29;7(3). Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1432>
- [13] Pyankov SV, Shikhov AN. *Geoinformation support for modeling hydrological processes and phenomena*. Perm: Perm State National Research University Publ.; 2017. 148 p. (In Russ.).
- [14] Gelfan A, Frolova N, Magritsky D, Kireeva M, Grigoriev V, Motovilov Yu, Gusev E. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021;7(1):36–79. Available from: <http://dx.doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79> (In Russ.).
- [15] Frolova NL, Kireeva MB, Kharlamov MA, Samsonov TE, Entin AL, Lurie IK. Mapping the current state and transformation of the water regime of rivers in the European territory of Russia. *Geodesy and Cartography*. 2020 Aug 20;961(7):14–26. Available from: <http://dx.doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26> (In Russ.).
- [16] Chernova MA, Bukovskiy ME, Dudnik VV. Assessment of changes in the summer flow of rivers in the volga basin in the tambov region over 65 years. *Climate Change and Seasonal Landscape Dynamics. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2021. Available from: <http://dx.doi.org/10.26170/kfg-2021-16> (In Russ.).
- [17] Dudnik NI. *Catalog "Rivers of the Tambov region"*. Tambov: Tambov State Pedagogical Institute Publ.; 1991. 47 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Дудник Сергей Николаевич, начальник Тамбовского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», Российская Федерация, 392008, г. Тамбов, ул. Советская, д. 182. ORCID: 0000-0003-2661-0854, eLIBRARY SPIN-код: 583-066. E-mail: tgmc@mail.ru

Буковский Михаил Евгеньевич, кандидат географических наук, доцент, заведующий лабораторией мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий НИИ экологии и биотехнологий, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Российская Федерация, 392036, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33. ORCID: 0000-0002-2773-3816, eLIBRARY SPIN-код: 7774-1375. E-mail: mikezzz@mail.ru

Семенова Анна Владимировна, аспирант 2-го года научной специальности 1.6.21. Геоэкология кафедры экологии и природопользования, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий НИИ экологии и биотехнологий, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Российская Федерация, 392036, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33. ORCID: 0000-0002-9306-9861, eLIBRARY SPIN-код: 5544-5277. E-mail: asv273@mail.ru

Bio notes:

Sergey N. Dudnik, Head of Tambov Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – a Branch of the Federal State Budgetary Institution “Central Chernozem Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring”, 182 Sovetskaya St, Tambov, 392008, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2661-0854, eLIBRARY SPIN-code: 583-066. E-mail: tgmc@mail.ru

Mikhail E. Bukovskiy, PhD in Geography, Assistant Professor, Head of Laboratory for Monitoring the Agroclimatic and Water-Resource Potentials of the Territories, Research Institute of Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsional'naya St, Tambov, 392036, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2773-3816, eLIBRARY SPIN-code: 7774-1375. E-mail: mikezzz@mail.ru

Anna V. Semenova, 2nd year postgraduate student of scientific specialty 1.6.21. Geoecology, Department of Ecology and Environmental Management, Junior Researcher of Laboratory for Monitoring the Agroclimatic and Water-Resource Potentials of the Territories, Research Institute of Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsional'naya St, Tambov, 392036, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-9306-9861, eLIBRARY SPIN-code: 5544-5277. E-mail: asv273@mail.ru