

зайственных культур: № 2013144559/05: заявл. 03.10.2013; опубл. 27.05.2015 / Шchedrin В.Н., Васильев С.М., Домашенко Ю.Е., Антонова Н.А. 7 с.

13. Патент № 2 764 266 Российская Федерация, МПК А01G 25/06. Система локально-внутрипочвенного орошения многолетних насаждений: № 2021116788: заявл. 08.06.2021; опубл. 14.01.2022 / Мещеряков М.П., Несмиянов И.А., Бочарников В.С., Майер А.В., Мещерякова Е.Г., Бочарникова О.В., Мартынова А.А., Хавронина В.Н., Воробьева Н.С. 9с.

14. Патент № 2773959 Российская Федерация, МПК А01G 25/02 (2006.01), А01G 29/00 (2006.01). Система капельно-инъекционного орошения: № 2021131629: заявл. 28.10.2022; опубл. 14.06.2022 / Храбров М.Ю., Губин В.К. 6 с.

REFERENCES

1. Water resources – the basis of sustainable development of Crimea: a collective monograph / Ed. by V.S. Pashtetskiy. Simferopol: IT «ARIAL», 2022. 216 p.
2. Kremenskoj V.I., Verdyshev M.V. Wastewater as a promising resource for increasing water availability in the Republic of Crimea // Environmental Management. 2016. No. 5. Pp. 72–76.
3. Zakharov R.Yu., Volkova N.E. Irrigation as a method of disposal of treated wastewater in the Republic of Crimea // Economics of Construction and Environmental Management. 2016. No. 1. Pp. 54–61.
4. Kireicheva L.V., Angold E.V. Methodological recommendations for the use of wastewater for irrigation in the Republic of Crimea / Ed. by Doctor of Technical Sciences, Professor L.V. Kireicheva. Moscow: Federal State Budgetary Institution «FNTS VNIIGiM named after A.N. Kostyakov», 2023. 58 p.
5. Kireicheva L.V., Maksimov S.A. Assessment of the possibility of using treated wastewater for irrigation in the Republic of Crimea // Ecology and industry of Russia. 2024. Vol. 28, No. 2. Pp. 54–59.
6. Yurchenko I.F. Water availability of irrigation in the Republic of Crimea // International agricultural journal. 2022. No. 6. Pp. 1334–1352.
7. Normative and methodological support of the system of state control and supervision in land reclamation / Compiled by V.N. Shchedrin,

G.G. Gulyuk, V.Ya. Bochkarev, G.L. Balakai (FSUE «RosNIIPM»). Moscow: FPUE TsNTI «Meliovodinform». 2003. 437 p.

8. Bezdina S.Ya. Ecological foundations of water use. Moscow: VNIIP, 2005. 224 с.

9. Guidelines for Irrigation with Reclaimed Water/ International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) // August 2025. 65 p.

10. Volkova N.E., Zakharov R.Y. The use of treated wastewater in the Crimea: the experience of the past, the realities of the present // Scientific Journal of the Research Institute of Land Reclamation Problems, 2017. № 3(27). Pp. 144–159.

11. Patent No. 2,755,988 Russian Federation, IPC C02F 9/00 (2006.01), C02F 9/12 (2006.01), C02F 1/463 (2006.01), C02F 1/32 (2006.01), C02F 1/48 (2006.01), B01D 61/14 (2006.01). Wastewater treatment method: No. 2021106095: application 10.03.2021: published 09/23/2021 / Saepa S.I., Digin V.N. 19 p.

12. Patent No. 2,551,504 Russian Federation, IPC C02F 9/02 (2006.01), C02F 1/28 (2006.01), B01D 36/00 (2006.01). Method of preparing drainage and discharge waters for irrigation of crops: No. 2013144559/05: application 03.10.2013: published 27.05.2015 / Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., Domashenko Yu.E., Antonova N.A. 7 p.

13. Patent No. 2,764,266 Russian Federation, IPC A01G 25/06. The system of local-intra-soil irrigation of perennial plantings: application. 06/08/2021: № 2021116788: publ. 14.01.2022 / Meshcheryakov M.P., Nesmiyanov I.A., Bocharnikov V.S., Mayer A.V., Meshcheryakova E.G., Bocharnikova O.V., Martynova A.A., Khavronina V.N., Vorobyeva N.S. (C. and application number). 9 p.

14. Patent No. 2773959 Russian Federation, IPC A01G 25/02 (2006.01), A01G 29/00 (2006.01). Drip irrigation system: No. 2021131629: application No. 10/28/2022: published 06/14/2022 / Khrabrov M.Yu., Gubin V.K. 6 s.

Колесова Наталья Георгиевна, ст. науч. сотрудник, natalia.kolesova.g@gmail.com; **Стрельбицкая Елена Брониславовна**, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник, strebitskaya.elena@mail.ru; **Шумакова Ксения Борисовна**, канд. с.-х. наук, доцент, ст. науч. сотрудник, kshum@bk.ru (ФНЦ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова», г. Москва, Россия).

УДК 502/504; 626.80:626.81

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-6-25-30

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕКИ НИГЕР В ПРЕДЕЛАХ ГВИНЕЙСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

А. СИЛЛА, Т.И. МАТВЕЕВА, С.О. ВЛАДИМИРОВ, А.В. ПЕРМИНОВ

Ключевые слова: водные ресурсы, река Нигер, Гвинея, Западная Африка, осадки, речной сток.

Keywords: water resources, Niger River, Guinea, West Africa, precipitation, river runoff.

Аннотация. В исследовании анализируются перспективы использования водных ресурсов бассейна реки Нигер в Гвинейской Республике. Водные ресурсы Нигера обладают большим водно-энергетическим потенциалом, но зависят от изменений климата. Учитывая эти особенности региона (Западная Африка), авторами проанализированы метеорологические и гидрологические данные с шести метеорологических станций и гидрографических постов. Представлены данные наблюдений за 28 лет с 1990 по 2018 г. Выявлены периоды засух и наводнений, влияющие на экономику страны. Таким образом, высокая изменчивость требует строгого и адаптивного управления водными ресурсами для сохранения сельского хозяйства, экосистем и местного населения.

Abstract. The study analyzes the prospects for the use of water resources in the Niger River basin in the Republic of Guinea. Niger's water resources have large water and energy potential, but are dependent on climate change. Taking into account these characteristics of the region (West Africa), the authors analyzed meteorological and hydrological data from six meteorological stations and hydrographic posts. Observation data is presented for 28 years from 1990 to 2018. Periods of drought and flooding that affect the national economy are identified. Therefore, high variability requires rigorous and adaptive water management to preserve agriculture, ecosystems and local populations.

Введение. Перспективы использования водных ресурсов реки Нигер в Гвинейской Республике должны учитывать недавние проблемы, с которыми сталкивается река. В 2024–2025 гг. Гвинея столкнулась с критической ситуацией, характеризующейся вызывающим тревогу загрязнением реки, особенно в районе Фарана, где вода приобрела красноватый и мутный оттенок в результате незаконной или плохо контролируемой деятельности по добыче песка и золота. Это загрязнение серьезно влияет на качество воды, угрожая здоровью населения, проживающего на берегу реки, рыболовству и водоснабжению [1]. В то же время борьба с наводнениями остается серьезной проблемой, поскольку с 2024 г. наблюдаются значительные наводнения, затрагивающие население, проживающее ниже по течению, особенно в Нигере, и требующие укрепления регионального сотрудничества через Управление по бассейну реки Нигер (ABN) [2]. Эти явления подчеркивают уязвимость реки перед лицом антропогенных и климатических воздействий, а также напоминают о ее фундаментальной роли в социально-эконо-

мическом развитии Гвинеи и соседних стран. Таким образом, необходимость комплексного, устойчивого и согласованного управления водными ресурсами, сочетающего борьбу с загрязнением, адаптацию к наводнениям и повышение гидроэнергетического и сельскохозяйственного потенциала реки в контексте изменения климата и растущего давления на водные ресурсы остро стоит в бассейне реки [1, 2].

Цель исследования. Оценить перспективы использования водных ресурсов реки Нигер в пределах Гвинеи. Проанализировать проблемы и возможности, связанные с управлением водными ресурсами, с учетом экологических, социально-экономических и климатических составляющих, а также необходимого регионального сотрудничества.

Объект исследования. Водосборный бассейн реки Нигер занимает значительную территорию, являясь основным истоком реки, протекающей через несколько стран Западной Африки. Площадь активного бассейна Нигера составляет около 1,5 млн км², из которых 6 % приходится на Гвинею [3].

Водораздел реки Нигер в Гвинее составляет 661 км, площадь бассейна 71142 км². Основными притоками являются: Тинкиссо, Мило, Ниандан. Река Нигер берет начало на плато массива Фута-Джалон, ключевого региона для водоснабжения реки. Этот бассейн, характеризующийся густой гидрографической сетью, простирается по разнообразным ландшафтам, от высоких плато до пойм, играя важную роль в гидрологическом регулировании и местном биоразнообразии. Количество осадков высокое, с сильной сезонной изменчивостью, и бассейн подвергается давлению, связанному с урбанизацией, вырубкой лесов и сельским хозяйством. Среднегодовое испарение составляет 1200...1400 мм в Верхней Гвинее и порядка 1500 мм на равнине Верхней Гвинее. Устойчивое управление этим бассейном имеет решающее значение для сохранения его экологических функций и обеспечения водоснабжения населения, проживающего ниже по течению [4].

Материалы и методы. Методы сбора гидрологических данных в бассейне реки Нигер включают прямое измерение расхода и осадков через сети наблюдений. В то же время проводятся социально-экономические исследования среди местного населения для анализа водопользования, а экологические исследования оценивают качество воды и воздействие гидравлических разработок. Эти комбинированные подходы позволяют осуществлять интегрированное и устойчивое управление водными ресурсами [5]. Связанные модели необходимы для комплексного управления водоразделом реки Нигер, объединяя гидрологические, климатические и социально-экономические данные. Они позволяют сезонно прогнозировать водные ресурсы, тем самым способствуя устойчивому планированию, адаптированному к климатическим изменениям и потребностям населения [6, 7].

Анализ проектов развития гидротехнических сооружений в бассейне реки Нигер выделяет плотину Фоми в Гвинее, многофункциональное сооружение, направленное на регулирование стока, развитие орошения (включая расширение орошаемых площадей),

производство электроэнергии (90 МВт) и улучшение навигации. Этот проект является приоритетным для региона, с ожидаемыми экономическими, социальными и экологическими выгодами, включая лучшее управление водными ресурсами и повышение продовольственной безопасности [8].

Водораздел реки Тинкиссо охватывает около 19800 км², простираясь от возвышенностей Фута-Джалон около Даболы и Дингирайе до равнин около Сигири и имеет хорошо определенные климатические и гидрологические характеристики. Среднегодовая температура составляет около 29,3 °С, с колебаниями от 28 до 32 °С [9]. Среднегодовое количество осадков колеблется от 1300 до 2000 мм, с максимумом в сезон дождей, особенно в августе-сентябре. Среднегодовой расход Тинкиссо составляет 181 м³/с [10]. Среднее потенциальное испарение составляет примерно от 1500 до 1650 мм в год, хотя фактическое испарение может быть ниже из-за ограниченной доступности воды в сухой сезон. Эти условия сильно влияют на экосистему и деятельность человека в этом районе [11].

Водосборный бассейн реки Мило в Канкане, занимает площадь около 13500 км². Для него характерен тропический климат со среднегодовой температурой от 27 до 28 °С, с колебаниями от 22 до 32 °С, с контрастными сезонами между засушливым и дождливым сезонами [11–17]. Среднегодовое количество осадков обычно колеблется от 1200 до 1800 мм, особенно в период с июня по октябрь, с пиком в августе. Годовая эвапотранспирация высока, близка или иногда превышает количество осадков из-за сильной жары и интенсивной солнечной радиации в этом районе. С гидрологической точки зрения Мило — это река с дождевым режимом, среднегодовой расход которой составляет около 251 м³/с, который за десятилетия снизился с примерно 275 км³ до 1960 г. до 160 км³ в период с 1980–2004 гг. [13, 17]. Его режим сильно сезонный, с низким стоком в сухой сезон и сильными наводнениями в сезон дождей. Река судоходна между Канканом и его устьем, а прилегающие водно-болотные угодья имеют признанное экологическое значение [16, 18].

Водосборный бассейн реки Ниандан в Баро площадью около 12770 км², характеризуется переходным тропическим климатом со среднегодовыми температурами, обычно колеблющимися от 24 до 30 °С [19]. Среднегодовое количество осадков составляет около 1940 мм, с различным распределением по зонам: самое высокое на юге (до 2200 мм) и самое низкое на севере (около 1500 мм), отмеченное сухим сезоном продолжительностью 2...4 месяца и бимодальным режимом выпадения осадков на юге и унимодальным на север. Гидрологический среднегодовой расход составляет 265 м³/с, что соответствует годовому объему стока около 8,4 млрд м³, со значительными сезонными колебаниями в диапазоне от минимального около 20,5 м³/с в сухой сезон до паводков, которые могут достигать 1100 м³/с в среднем за год, и даже 2200 м³/с во время столетних паводков. Годовая эвапотранспирация оценивается примерно в 665 мм, что является результатом дефицита стока в 1275 мм, что отражает важность

растительности и климатических условий в гидрологическом цикле этого бассейна, расположенного в зоне лесных саванн, находящихся под влиянием атлантического Муссона и харматтана [20].

Река Нигер в Фаране, характеризуется тропическим климатом со среднегодовой температурой около 33 °С, колеблющейся от 29 до 38 °С в зависимости от месяца. Среднегодовое количество осадков составляет около 1582 мм, в основном в период с июня по октябрь, с самыми влажными месяцами в июле, августе и сентябре, когда количество осадков может превышать 300 мм в месяц [21]. Сухой сезон длится с ноября по май с очень небольшим количеством осадков. Годовое испарение в этом регионе высокое, по оценкам, около 1300...1400 мм, что соответствует высокой температуре и интенсивной солнечной радиации тропической зоны [21]. С гидрологической точки зрения сток реки Нигер в Фаране сильно варьируется в зависимости от сезона. В сезон дождей стоки могут быть очень значительными, что обусловлено обильными осадками и плотностью местной гидрографической системы, в то время как в сухой сезон стоки значительно снижаются. Эта изменчивость связана с колебаниями количества осадков и высокой эвапотранспирацией в регионе [22]. Река играет жизненно важную роль в пополнении запасов грунтовых вод и регулировании паводков ниже по течению благодаря водно-болотным угодьям, присутствующим в бассейне выше по течению.

Река Нигер в Куруссе, расположена в субсуданской климатической зоне и протекает по бассейну площадью около 18600 км², характеризующемуся двумя четко выраженными сезонами: ярко выраженным сухим сезоном, длящимся 6...7 месяцев, с ноября по май, и сезоном дождей с июня по октябрь. Среднегодовое количество осадков колеблется от 1300 до 2000 мм, с тенденцией к уменьшению к северу [23]. Среднегодовая температура может достигать 38 °С, влажность воздуха в целом ниже, чем в других регионах Гвинеи [23, 24]. Прохладный сезон длится около 3,5 месяцев, с начала июля до конца октября, с дневными максимальными температурами ниже 30 °С [24]. С точки зрения гидрологии, режим течения Нигера в Куруссе сильно зависит от тропического климата и сезонных осадков. Средний расход составляет около 199 м³/с, что близко к расходу Ниандана, крупного притока. Гидрологический режим является унимодальным, с пиком паводка, совпадающим с сезоном дождей, особенно с июля по октябрь [25]. С 1970-х годов наблюдается дефицит воды, при этом значительное снижение расхода связано с дефицитом осадков и сокращением ресурсов подземных вод, что делает регион уязвимым к изменению климата [23, 26].

В Сигуири река Нигер протекает через бассейн площадью около 67700 км², среднегодовой расход составляет 948 м³/с, что соответствует годовому стоку 438 мм [21], расположенный в зоне тропического судано-гвинейского климата. Среднегодовая температура здесь высокая, с максимумами около 36 °С, колеблющимися от 30 °С в августе до 41 °С в апреле, и минимумами от 18 до 27 °С. Среднегодовое количество осадков составляет от 1000 до 1500 мм, в основном они выпадают в период

с июня по сентябрь, с пиком в августе около 394 мм. Годовое испарение высокое, оценивается в 1300...1400 мм, что отражает высокую температуру и интенсивную солнечную радиацию в регионе [21]. С точки зрения гидрологии, река Нигер в Сигуири имеет ярко выраженный сезонный режим. Расход воды низкий в сухой сезон (с января по июнь), составляя менее 7% годового расхода. Подъем уровня воды начинается в июле, с пиковым паводком между августом и октябрём, напрямую связанным с осадками. Эта изменчивость усиливается высокой эвапотранспирацией и локальной инфильтрацией, которые сокращают расход в сухой сезон и вызывают наводнения в сезон дождей [22].

Результаты и обсуждение. Данные метеорологических и гидрологических параметров использованы для изучения использования водных ресурсов реки Нигер за 28-летний период. Анализ осадков в водосборе реки Нигер, стекающих на гидрометрическую станцию, основан на записях об осадках (рис. 1, 2), расходе (рис. 3, 4, 5) и температуре. Изменение количества осадков является наиболее важным фактором как для жителей, так и для экосистем.

Анализируя график (рис. 1), видно, что пик осадков приходится на 1998, 2009 и 2018 г. для всех рассматриваемых бассейнов. Наиболее сильная засуха в регионе наблюдалась с 2001 по 2008 г., когда годовое количество осадков не превышало 900 мм. С 2009 г. (исключая 2011 г., когда наблюдалось резкое однократное падение годовых значений) прослеживается повышенное изменение количества осадков, что указывает на обилие дождей в сезон муссонов.

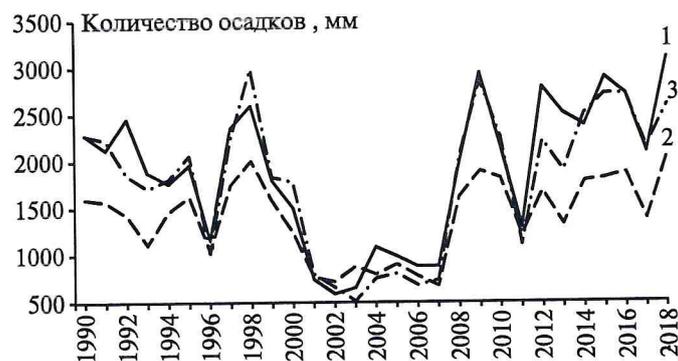


Рис. 1. Среднегодовое количество осадков в бассейне притоков реки Нигер:
1 — Тинкиссо; 2 — Мило; 3 — Ниандан

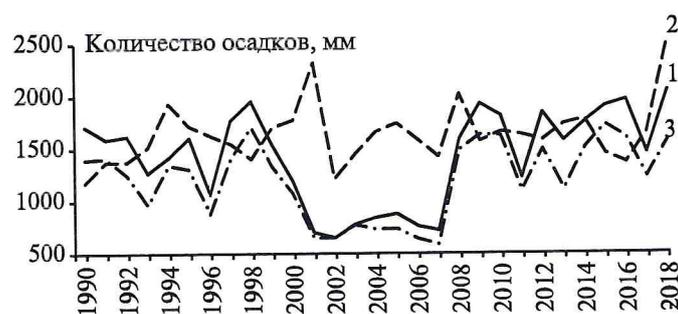


Рис. 2. Среднегодовое количество осадков на реке Нигер по станциям:
1 — Фарана; 2 — Курусса; 3 — Сигуири

Согласно кривым на рис. 2, засухи наблюдались на станции Курусса и Сигуири в период 2001–2007 гг. Здесь максимальное количество осадков не превышал 900 мм в год, а минимальное опускалось ниже 600 мм, что существенно влияло на экономическую деятельность региона. Сравнивая рис. 1 и 2, можно судить об одинаковом количестве выпавших осадков. Нигер в Фаране имеет существенные отличия: два пика в 2001 и 2018 г., когда среднегодовое количество осадков превысило 2500 мм. Засушливый период в этой части Нигера прошел практически незаметно, с отдельными значениями менее 1500 мм в год. Эта изменчивость отражает региональные климатические влияния, которые напрямую влияют на сток и водные ресурсы реки Нигер.

Межгодовая изменчивость количества осадков напрямую влияют на доступность воды и сельскохозяйственную деятельность, подчеркивая необходимость надлежащего управления ресурсами.

Годовой расход реки Мило в Канкане в период с 1990 по 2018 г., согласно рис. 3, колеблется в пределах 100...190 м³/с, что отражает климатические колебания. Наибольший зафиксированный расход воды наблюдался в 2018 г. (189,6 м³/с), и был связан с обильными дождями. В 2011 г. наблюдался нулевой расход, аномалия, вероятно, вызванная проблемой измерения или сильной засухой. Эти изменения подчеркивают необходимость строгого управления водными ресурсами для местной деятельности.

На водосборе реки Ниандан в Баро за тот же период выявлены значительные изменения среднегодово-

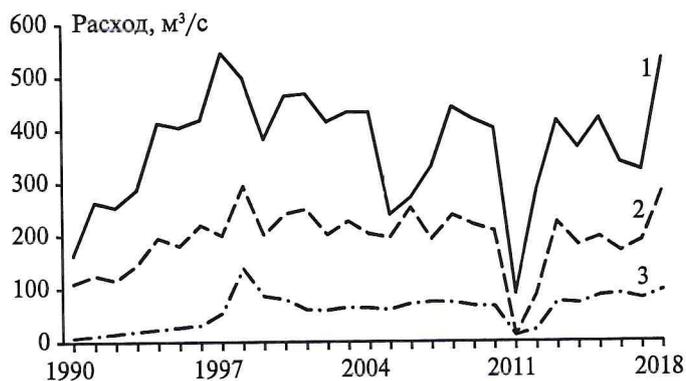


Рис. 3. Среднегодовой расход рек:
1 – Тинкиссо; 2 – Мило; 3 – Ниандан



Рис. 4. Среднегодовой расход реки Нигер по станциям:
1 – Фарана; 2 – Курусса

го расхода. Более того, расходы воды, которые обычно находятся в диапазоне от 130 до 230 м³/с, составили 346,2 м³/с в 1997 г. и 247,4 м³/с в 2018 г., что указывает на особенно сильные дождливые сезоны. Напротив, очень низкие расходы наблюдались в 2005 (43,3 м³/с) и 2006 (18,5 м³/с), что, вероятно, связано с эпизодами сильной засухи. Эта изменчивость подчеркивает влияние климатических условий на бассейн и необходимость разумного управления водными ресурсами.

Согласно рис. 3, годовой расход Тинкиссо в период с 1990 по 2018 г. имел общую тенденцию к росту, увеличившись с 7,5 (1990 г.) до 138,2 м³/с (1998 г.), что указывает на постепенное увеличение количества осадков или улучшение сбора воды. После пика в 1998 г. расход стабилизировался на уровне около 65...95 м³/с в период с 2010 по 2018 г., с заметным снижением в 2011 г. (10,7 м³/с) и 2012 г. (22,4 м³/с), что указывает на эпизоды засухи (рис. 2). Эта изменчивость отражает влияние климатических условий на бассейн, что требует соответствующего управления водными ресурсами, поскольку в бассейне реки расположена гидроэлектростанция, снабжающая электроэнергией город Дабола.

Годовой сток реки Нигер в Фаране в период 1990 и 2019 г. (рис. 4) демонстрирует незначительную изменчивость, находясь в основном в диапазоне от 60 до 100 м³/с. Однако 2019 г. ознаменовался исключительно низким расходом в 45,6 м³/с, что указывает на высокое испарение или на антропогенное воздействие. Такое резкое изменение подчеркивает чувствительность реки к климатическим условиям и деятельности человека, что имеет серьезные последствия для управления водными ресурсами и местных экосистем.

Годовой расход реки Нигер в Куруссе значительно колебался в период с 1990 по 2022 г.: от 38,2 м³/с (2003 г.) до 246,2 м³/с (2018 г.). Эта изменчивость отражает климатические колебания с годами обильных осадков (1994, 2000, 2018 г.) и периодами сильной засухи (особенно 2003 г.). Несмотря на эти изменения, расход обычно составляет от 120 до 200 м³/с, что свидетельствует об определенной гидрологической стабильности. Эти изменения подчеркивают важность правильного управления водными ресурсами.

Годовой сток реки Нигер в Сигуири между 1950 по 1999 г., представленный на рис. 5, демонстрирует сильную изменчивость, составляя в среднем около 749 м³/с. Годы низкого стока соответствуют периодам засухи, особенно заметной в 1980-х годах, тогда как в 1990-х наблюдается небольшое восстановление.



Рис. 5. Среднегодовой расход реки Нигер в районе Сигуири

Эта изменчивость влияет на управление водными ресурсами, сельское хозяйство и местные экосистемы, подчеркивая чувствительность реки Нигер к изменению регионального климата.

Выводы. Водные ресурсы реки Нигер в Гвинее обладают огромным потенциалом, но подвержены значительной изменчивости климата, характеризующейся значительными колебаниями годового количества осадков и порой экстремальными скоростями потока. Эта изменчивость, наблюдаемая в водоразделах рек Тинкиссо, Ниандан, Мило и Нигера, напрямую влияет на доступность воды для сельского хозяйства, промышленности, экосистемы и местного населения. Засухи и пиковые паводки подчеркивают уязвимость гидрологической системы к изменению климата и деятельности человека. Столкнувшись с этими проблемами, Гвинея стремится к комплексному и устойчивому управлению водными ресурсами, при поддержке национальных и региональных инициатив.

Конкретным примером является проект Всемирного банка по улучшению доступа к питьевой воде и укреплению гидравлического управления. Кроме того, Управление бассейна Нигера (NBA) играет ключевую роль в трансграничной координации для климатически оптимизированного управления и эффективного сотрудничества между государствами. Внедрение надежных правовых, институциональных и технических рамок, таких как Национальный план комплексного управления водными ресурсами (PANGIRE), имеет важное значение для обеспечения сбалансированного и справедливого использования водных ресурсов. Эти усилия должны включать участие местных заинтересованных сторон, предотвращение рисков наводнений и засух, а также защиту экосистем для обеспечения устойчивости и устойчивого развития бассейна реки Нигер в Гвинее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Facely Kalman Keita, 22 Mars 2024, Le fleuve Niger en danger. URL: <https://guineenews.org/2024/03/21/faranah-le-fleuve-niger-en-danger>
2. Autorite du bassin du niger. URL: <http://www.abn.ne/index.php/fr/>
3. Управление бассейна реки Нигер. Обсерватория. Гидрологическая оценка бассейна реки Нигер на 2023–2024 годы. С. 11.
4. Восель С. Река Нигер и ее водосборный бассейн: управление, регулирование и стратегии адаптации к изменению климата // Зарубежные блокноты. 2015. Т. 68, № 270. С. 243–270. URL: <https://doi.org/10.4000/com.7458>.
5. Гидрологическая оценка бассейна реки Нигер на 2019/2020 год, 6 июля 2020 г. URL: <http://www.abn.ne/index.php?limitstart=35&lang=fr>
6. Национальный план действий по комплексному управлению водными ресурсами, Пангире Нигер/Республика Нигер, Министерство гидравлики и санитарии, утвержден Указом № 2017/356/PRN/МНА от 9 мая 2017 г. С. 158.
7. Диарра Л. и др. Глава 3. Знания о реке, ее эволюции и индикаторы. Будущее реки Нигер. С. 193–309. URL: <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.5215>.
8. Определение гидравлического управления плотинной Фомы (Гвинея) с учетом ее воздействия на окружающую среду ниже по течению / С. Ле Клерк, Н. Гале-Лаланд, А.-К. Энумба, А.-Б. Янсан // 32-я конференция гидравлики Французского гидротехнического общества. Окружающая среда и гидроэлектроэнергия, Лион, 6 и 7 октября 2010 г. С. 129–135.
9. Национальное управление метеорологии (Национальное метеорологическое агентство). URL: <https://www.developmentaid.org/donors/view/507630/agence-nationale-de-la-meteorologie>

10. Национальный отчет о состоянии генетических ресурсов растений для продовольствия и сельского хозяйства, Республика Гвинея // Министерство сельского хозяйства, Институт агрономических исследований Гвинеи (IRAG). 2008. 38 с.

11. Конде С. Структура и функционирование прибрежных лесов реки Мило (приток верхнего течения Нигера) в Гвинее. Функциональная экология: докторская диссертация. Университет Тулузы, 12 апреля 2018 г. С. 141.

12. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers / V. Ilinich, A. Perminov, A. Belolybceva, A. Naumova // Springer Water. 2020. P. 717–725. DOI 10.1007/978-981-15-5436-0_55. EDN KDLPNN.

13. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Influence of landscape and climate changes on the maximum discharge of small catchment areas // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 56, No. 5. P. 635–638. DOI 10.1007/s10749-023-01565-1. EDN VZPMWL.

14. Ильинич В.В., Перминов А.В., Наумова А.А. Влияние ландшафтных и климатических изменений на максимальный сток малых водосборов // Гидротехническое строительство. 2022. № 7. С. 15–19. EDN AZIXGJ.

15. Ильинич В.В., Перминов А.В., Наумова А.А. Оценка влияния климатических характеристик и ландшафтных изменений на максимальный сток малых водосборов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 9. С. 1228–1235. DOI 10.22227/1997-0935.2021.9.1228-1235. EDN UDKCUS.

16. Исследовательский дендрохронологический и дендрозотопный анализ прибрежных лесов вдоль реки Мило (Гвинея) / С. Конде, Т. Отто, И. Мусса, Л. Лэмбс и Д. Коренблит // Физико-Гео. 2020. Т. 15. С. 211–231. DOI: 10.4000/physio-geo.11681.

17. Сулла А., Матвеева Т.И. Анализ эколога-водохозяйственной ситуации на водоразделе реки Мило в Гвинейской Республике // Проблемы развития современного общества: сборник научных статей 10-й Всероссийской национальной научно-практической конференции, Курск, 23–24 января 2025 г. Курск: Университетская книга, 2025. С. 271–276. DOI 10.47581/2025.ML-20/Sulla-Amadu-01. EDN WZOEKS.

18. Мамаду Альфа Соу. Гидрология и геохимия речного переноса растворенных и взвешенных веществ в бассейне реки Мило (Гвинейская Республика) // Науки о Земле. Национальный политический институт Тулузы (INPT): докторская диссертация. 2018. 219 с.

19. Национальный план действий Гвинеи по адаптации к изменению климата // Министерство сельского хозяйства, животноводства, окружающей среды, водных ресурсов и лесов, Конакри, июль 2007. 118 с.

20. Monographie du regime hydrologique du Niandan a Baro. Paris, 1955. P. 105.

21. Бассейн реки Нигер: на пути к видению устойчивого развития / А. Ингер, У. Дион, М. Ярославич-Холдер, Ж.-К. Оливри // Направления развития, Всемирный банк. 2006. 172 с.

22. Leo Zwarts, Pieter van Beukering, Bakary Kone, Eddy Wymenga, Le Niger, une artère vitale: gestion efficace de l'eau dans le bassin du Haut Niger / Lelystad, NL: RIZA; Sévaré, ML: Wetlands International; Amsterdam: IVM; Veenvouden, NL: A&W ecological research, 2005. P. 305.

23. Гидрологический баланс реки Нигер в Гвинее с 1950 по 2000 г. / С. Сангаре, Г. Маэ, Дж. Э. Патурел, Ю. Бангура // Южная наука и технологии. 2002. № 9. С. 4–16.

24. Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour Kouroussa / Weather Spark, 01.01.1980 au 31.12.2016 URL: <https://fr.weatherspark.com/y/31952/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Kouroussa-Guin%C3%A9-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>

25. Аллювиальная равнина Верхнего Нигера и пруд Баро (Гвинея) / Л. Ферри, М. Миттон, А. Ренар-Туми, Д. Мартин, М.А. Барри и Н. Мутер // Территория в движении. 2015. № 25–26. DOI: 10.4000/tem.2786.

26. Восприятие изменений климата на гидрологический баланс и естественные возможности использования солнечной энергии в районе Куруссы / М. Курума, Д. Кейта, М. Курума, У.Д. Каба // Международный журнал инноваций и прикладных исследований. 2024. Т. 42. № 2. С. 295–306.

REFERENCES

1. Facely Kalman Keita, 22 Mars 2024, Le fleuve Niger en danger. URL: <https://guineenews.org/2024/03/21/faranah-le-fleuve-niger-en-danger>
2. Autorite du bassin du niger. URL: <http://www.abn.ne/index.php/fr/>
3. Autorite du bassin du Niger, Observatoire, Bilan hydrologique 2023–2024 du Bassin du Niger. P. 11.

4. Vaucelle S. The Niger River and Its Drainage Basin: Management, Governance and Climate Change Adaptation Strategies. Cahiers d'Outre-Mer, vol. 68, no. 270, Apr. 2015, pp. 243–270. Crossref, <https://doi.org/10.4000/com.7458>.

5. Bilan hydrologique du Bassin du Niger de l'année 2019/2020, 06 juillet 2020 <http://www.abn.ne/index.php?limitstart=35&lang=fr>

6. Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau, Pangire Niger/ République du Niger, Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement, Adopté par Décret n 2017/356/PRN/MHA du 09 mai 2017, P. 158.

7. Diarra L., et al. Chapitre 3. Connaissance Du Fleuve, Évolution et Indicateurs. Avenir Du Fleuve Niger, pp. 193–309. Crossref, <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.5215>.

8. Le Clerc Sandrine, Galet-Lalande Noel, Enoumba Henri-Claude, Yansane A.-B. La définition de la gestion hydraulique du barrage de FOMI (Guinée) en regard de ses impacts environnementaux aval. In: 32èmes Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France Environnement et Hydroélectricité Lyon – 6 et 7 octobre 2010. Pp. 129–135.

9. Direction Nationale de la Météorologie (Agence Nationale de la Météorologie) URL: <https://www.developmentaid.org/donors/view/507630/agence-nationale-de-la-meteorologie>

10. Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture, république de guinée/ Ministère de l'Agriculture Institut de Recherche Agronomique de Guinée (IRAG) P. 38.

11. Condé, Soumaïla., Structure et fonctionnement des ripisylves de la rivière Milo (affluent du haut Niger) en Guinée. Écologie fonctionnelle. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 12 Avril 2018, P. 141.

12. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers / V. Ilinich, A. Perminov, A. Belolybcey, A. Naumova // Springer Water. 2020. P. 717–725. DOI 10.1007/978-981-15-5436-0_55. EDN KDLPNN.

13. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Influence of landscape and climate changes on the maximum discharge of small catchment areas // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 56, No. 5. P. 635–638. DOI 10.1007/s10749-023-01565-1. EDN VZPMWL.

14. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Vliyaniye landshaftnykh i klimaticheskikh izmeneniy na maksimal'nyy stok mal'nykh vodosborov // Hidrotekhnicheskoye stroitel'stvo. 2022. № 7. S. 15–19.

15. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Otsenka vliyaniya klimaticheskikh kharakteristik i landshaftnykh izmeneniy na maksimal'nyy stok mal'nykh vodosborov // Vestnik MGSU. 2021. T. 16, № 9. S. 1228–1235

16. S. Condé, T. Otto, I. Moussa, L. Lambs, and D. Corenblit, «Exploratory dendrochronological and dendroisotopic analyzes of riparian forests along the Milo river (Guinea),» Physio-Géo, no. Volume 15, pp. 211–231, Mar. 2020. DOI: 10.4000/physio-geo.11681.

17. Sylla A., Matveeva T.I. Analysis of the ecological and water management situation in the Milo River watershed in the Republic of Guinea // Problems of development of modern society: collection of

scientific articles of the 10th All-Russian national scientific and practical conference, Kursk, January 23–24, 2025. Kursk: Universitetskaya kniga, 2025. P. 271–276. DOI 10.47581/2025.ML-20/Sulla-Amadu-01

18. Mamadou Alpha Sow. Hydrologie et géochimie des transports fluviaux dissous et particulaires dans le bassin versant du Milo (République de Guinée). Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT, 2018. Français

19. Plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques de la guinea // Ministère de l'agriculture, de l'élevage, de l'environnement, des eaux et forêts, Conakry juillet 2007. P. 118.

20. Monographie du regime hydrologique du Niandan a Baro. Paris, 1955. P. 105.

21. Andersen Inger, Ousmane Dione, Martha Jarosewich-Holder, Jean-Claude Olivry, Le Bassin du fleuve Niger: vers une vision de développement durable / Directions in development, Banque Mondiale, 2006. P. 172.

22. Leo Zwarts, Pieter van Beukering, Bakary Kone, Eddy Wymenga, Le Niger, une artère vitale: gestion efficace de l'eau dans le bassin du Haut Niger / Lelystad, NL: RIZA; Sévaré, ML: Wetlands International; Amsterdam: IVM; Veenwouden, NL: A&W ecological research, 2005. P. 305.

23. Sangare S., Mahe G., Patuere J.E., Bangoura Y. Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000 // Sud sciences&technologies. № 9. Décembre 2002. Pp. 4–16.

24. Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour Kouroussa / Weather Spark, 01.01.1980 au 31.12.2016 URL: <https://fr.weatherspark.com/y/31952/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Kouroussa-Guin%C3%A9e-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>

25. L. Ferry, M. Mietton, A. Renard-Toumi, D. Martin, M. A. Barry, and N. Muther, «Plaine alluviale du Niger supérieur et mare de Baro (Guinée),» Territoire en mouvement, no. 25–26, Mar. 2015, doi: 10.4000/tem.2786.

26. Moriba Kourouma, Daouda Keita, Mory Kourouma, and Ousmane Djènè Kaba, Perception of climate changes on the hydrological balance and natural opportunities for exploiting solar energy in the Kouroussa area // International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. 42, no. 2, pp. 295–306, April 2024.

Силла Амаду, аспирант, amadousyllasylla165@gmail.com; **Матвеева Татьяна Ивановна**, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, ti-matveeva@mail.ru; **Владимиров Станислав Олегович**, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры сельскохозяйственных мелиораций, vladimirov_so@rgau-msha.ru; **Перминов Алексей Васильевич**, канд. техн. наук, доцент, и.о. зав. кафедрой гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, alexperminov@gmail.com (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия).

УДК 628.355.2:628.357.2

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-6-30-33

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ОЧИСТКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

О.А. СТРИЖНИКОВ

Ключевые слова: математическая модель, микроводоросли, биологическая очистка, дренажные воды.

Keywords: mathematical model, microalgae, biological treatment, drainage water.

Аннотация. В статье рассматриваются основные принципы и подходы к созданию математических динамических моделей процесса биологической очистки дренажного стока с мелиорируемых земель с использованием микроводорослей. Анализируются ключевые факторы, влияющие на эффективность очистки, такие как состав сточных вод, условия роста и развития микроводорослей. Представлены методы формализации процессов, включая описание кинетики роста микроводорослей, динамику потребления загрязняющих веществ и изменения параметров среды. Особое внимание уделяется разработке уравнений, описывающих динамику системы и интеграции экспериментальных данных для повышения точности моделирования. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации технологий

очистки дренажных вод и разработки устойчивых экологических решений, направленных на снижение антропогенного воздействия на окружающую среду.

Abstract. The article discusses the basic principles and approaches to creating mathematical dynamic models of the biological treatment process of drainage runoff from reclaimed lands using microalgae. It analyzes the key factors affecting the efficiency of treatment, such as the composition of wastewater, the growth and development conditions of microalgae. The article presents methods for formalizing the processes, including the description of the kinetics of microalgae growth, the dynamics of pollutant consumption, and changes in environmental parameters. Special attention is given to the development of equations that describe the dynamics of the system and the integration of experimental data to improve the accuracy of modeling. The results of this work can be used to optimize drainage water treatment technologies and develop sustainable environmental solutions aimed at reducing anthropogenic impact on the environment.