

УДК 556.3:556.14(729.1)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ПОПОЛНЕНИЕ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНА ЛА ЯНА, КУБА



Д. Л. УСТЮГОВ¹,
декан, доцент, канд. геол.-минерал. наук,
Ustyugov_DL@pers.spmi.ru



Э. Л. НОА СЕГУРА¹,
аспирант



М. С. РЯКОВСКИЙ,
сторонний специалист, канд. техн. наук

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Обоснована необходимость учета влияния случайных факторов на гидрогеологические процессы [1]. Среди множества факторов, влияющих на подземный цикл гидрологического круговорота, присутствуют факторы, которые возможно определить при помощи локальных данных: интенсивности атмосферных осадков и характеристики почвы. Указанные факторы являются исходными данными при построении гидрогеологических моделей различными методами. Необходимость оценки влияния интенсивности атмосферных осадков и характеристики почвы на процесс пополнения запасов подземных вод обусловлена перспективой освоения месторождений подземных вод гидрогеологического района Ла Яна.

Гидрологический цикл играет важную роль в развитии жизнедеятельности [2, 3]. На подземные воды приходится около 99 % всего объема жидкой пресной воды Земли [4], поэтому изучение характеристик подземных водоносных горизонтов, особенно их потенциал пополнения, важно для защиты их от чрезмерного истощения [5]. Оценка водных ресурсов имеет

Исследовано влияние инфильтрации атмосферных осадков на пополнение запасов подземных вод гидрогеологического района Ла Яна, Куба. Проведен анализ параметров инфильтрации в почвенном слое на данных нескольких серий атмосферных осадков. Установлено, что атмосферные осадки характеризуются двумя периодами – сухим и влажным, вследствие чего процессы инфильтрации и пополнения запасов подземных вод носят сезонный характер.

Ключевые слова: водный баланс, инфильтрация, моделирование, атмосферные осадки, зона аэрации

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.15

исключительное значение и актуальность [6]. Актуальны вопросы, связанные с государственным управлением ресурсами подземных вод [7]. Основным ресурсом для обеспечения безопасной питьевой водой являются подземные источники [8]. Поэтому при оценке направлений развития территории важен комплексный подход [9] с учетом сохранения источников пресной воды. Немаловажно также найти возможные экономически менее затратные пути решения проблемы дефицита пресной воды [10].

Режим подземных вод связан с тем или иным поверхностным водосбором [11], а генезис инфильтрации – с поверхностными процессами [12]. Моделирование водного баланса в ненасыщенной зоне над уровнем грунтовых вод [13] позволяет установить взаимосвязь между пополнением подземных вод и балансом поверхностных вод [14–16]. В связи с этим необходимо внести коррективы в структурные модели конкретных бассейнов [17] и оценить состояние зоны аэрации [18], чтобы можно было рассчитать параметры, наиболее эффективно характеризующие свойства недр [19].

Оценка инфильтрационного питания подземных вод и его интенсивности позволяет установить взаимосвязь между пополнением запаса подземных вод и факторами, влияющими на подземный цикл гидрологического круговорота: атмосферными осадками, испарением, транспирацией, местным рельефом, свойствами поверхностного слоя почвы, глубиной залегания грунтовых вод и т. д. [13]. Инфильтрация атмосферных осадков в зоне аэрации тесно связана с гидрографической сетью района [12] и просачиванием [20]. Установлено влияние характеристик почвенного слоя на среднегодовые объемы пополнения запасов подземных вод и на долговременную динамику процесса [13].

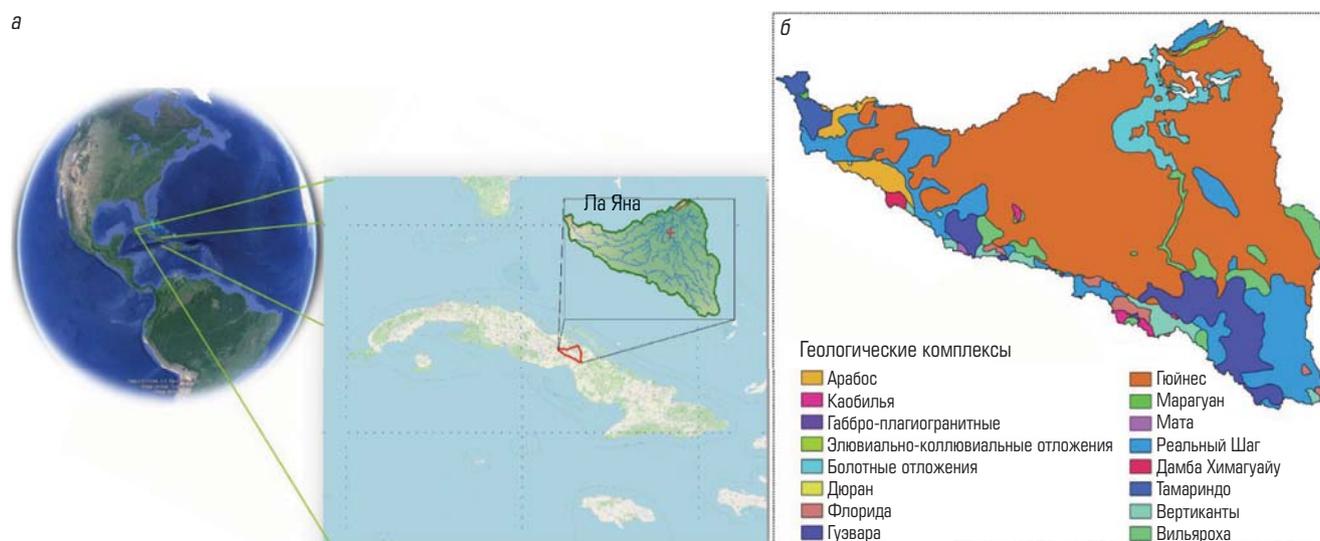


Рис. 1. Расположение района исследования (а) и геологические характеристики гидрогеологического района Ла Яна, Куба (б)

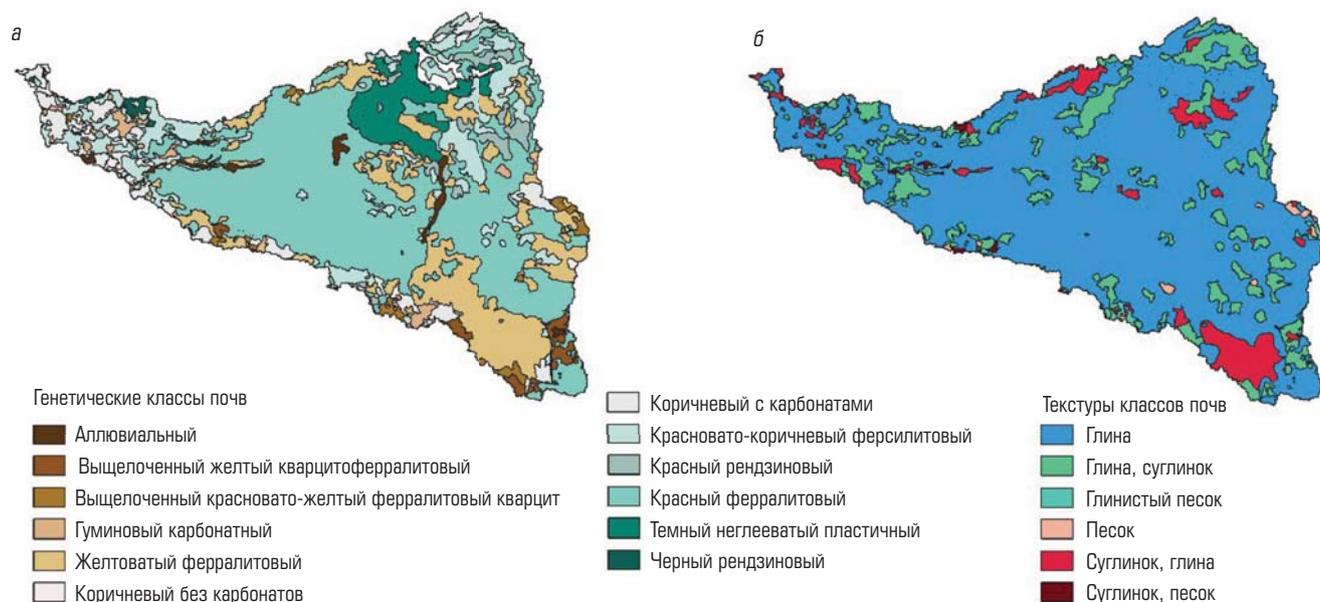


Рис. 2. Распределение почв в соответствии с их генетическим типом (а) и текстурным классом (б) в гидрогеологическом районе Ла Яна, Куба

Материалы и методы анализа

Исследование проводили в районе Ла Яна (рис. 1). Площадь территории 1629,76 км², периметр гидрогеологического района Ла Яна составляет 369,85 км, он расположен в провинции Сьего-де-Авила, Куба.

Геологические характеристики района исследования были получены из пояснительной записки к литологической карте 1:250 000 [21] провинции Сьего-де-Авила (см. рис. 1). Наиболее важным является комплекс Гюйнес, занимающий 62,3 % площади бассейна, где преобладают биодетритовые, доломитовые и биогермитные известняки, доломиты

и известковые мергели, а также заболоченная территория, образованная болотными отложениями. В остальных комплексах преобладает чередование известняков и мергелей, песчано-глинистых и алевритовых глин, глинистых и алевритовых известняков, известковых иллитомонтмориллонитовых глин, алевритов, известковых песчаников, биодетритовых, песчаных, биогенных, органогенных известняков и калькаренитов [21].

Для рассматриваемой территории в соответствии с классификацией [22, 23] определены 18 генетических типов почв и текстурных классов почв (рис. 2). Красные и желтые

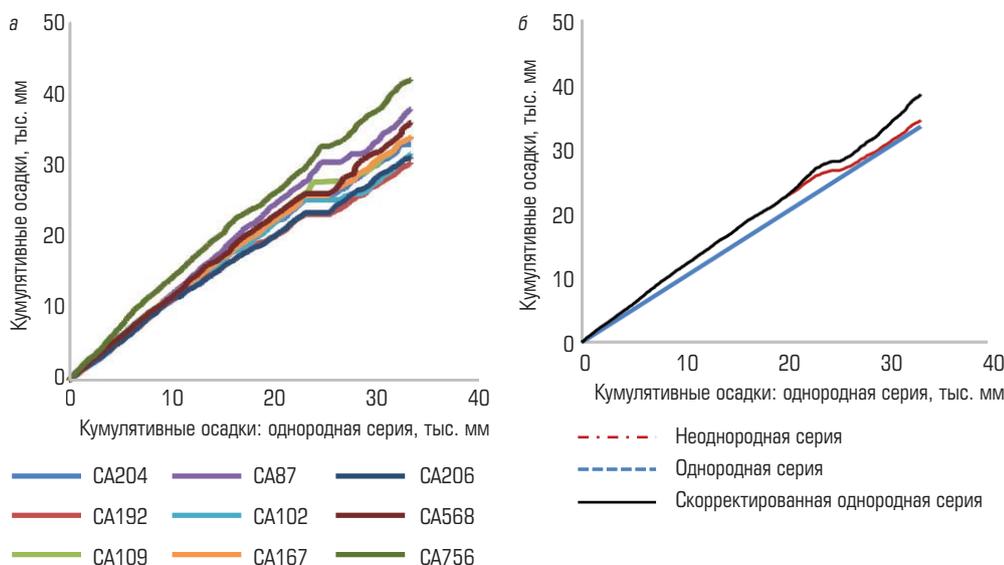


Рис. 3. Двойные кривые массы для каждой неоднородной и последовательной серии данных (а) и для кумулятивных средних показателей (б) в гидрогеологическом районе Ла Яна, Куба

ферраллиты составляют 65,97 % площади бассейна, они важны для регулирования инфильтрации.

Данные о суточном количестве осадков были взяты из сети измерительных приборов Национального института гидравлических ресурсов, которые также использовали в [24], по 16 станциям за 31 год. Для оценки согласованности и однородности серии осадков осуществляли проверку гипотезы с использованием *t*-критерия Стьюдента для дисперсий двух подвыборок. Нулевая гипотеза (H_0) и альтернативная гипотеза (H_1) сформулированы следующим образом: если рассчитанная *t*-статистика Стьюдента t_d больше ее критического значения t_c или вероятность $B_{\%}$ меньше уровня значимости α на 5 %, то принимают решение отвергнуть H_0 и принять H_1 с указанием, что сравниваемые подвыборки различаются статистически.

Для согласованности гидрометеорологических данных из серий, которые не являются последовательными и однородными, применяют метод двухмассовой кривой. С его помощью получены скорректированные наборы данных [25, 26] для моделирования при проведении аналогичных исследований [5, 27]. По результатам исследования определены типичные зависимости (1) между максимальным количеством осадков L , мм, и их продолжительностью для трех типов суточных осадков: I, II и III [28], где интенсивность осадков уменьшается с увеличением их продолжительности [26]:

$$L(d) = \begin{cases} 8,0286d^{0,5488}, & L > 400, \\ 0,1794d^{1,0033}, & 400 \geq L > 300, \\ 0,1270d^{0,9531}, & 300 \geq L > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где d – время, мин; L – количество осадков, мм/сут, сгруппированных по типам.

Механизм движения почвенных вод нуждается в дальнейшем изучении [29–31]. Насыщенная гидравлическая проводимость (коэффициент фильтрации) напрямую зависит от

текстурных классов почв. Для описания процесса безнапорного впитывания в зоне аэрации применена зависимость А. Н. Костякова в модифицированном виде (2) для определения скорости впитывания воды в почву I , мм/мин [32, 33]:

$$I(t) = \alpha t \beta, \quad (2)$$

где α , β – эмпирические параметры кумулятивной скорости инфильтрации для каждого типа и класса почв, полученные из логарифмического графика экспериментальных данных и его аппроксимации; t – время инфильтрации осадков, мин.

Оценка прогнозных ресурсов подземных вод включает в себя, в том числе, балансовую оценку – обеспеченность отбираемых объемов воды с учетом степени восполнения подземных вод, которая может быть схематизирована с помощью уравнения водного баланса [16, 34]. В настоящем исследовании для балансовой оценки выделена прикорневая зона, расположенная в зоне аэрации. Изменение влажности почвы в прикорневой зоне во времени $Zd\theta/dt$, мм/мм, на максимальную глубину, при которой можно контролировать влажность Z , м, описывается уравнением (3) водного баланса [35–37]:

$$Zd\theta/dt = L - ET - R - D, \quad (3)$$

где θ – влажность; L – слой атмосферных осадков, мм; ET – транспирация, мм; R – поверхностный сток, мм; D – дренаж ниже корневой зоны, мм.

Учитывая то, что транспирация ET минимальна при выпадении осадков, принимаем $ET = 0$. Таким образом, атмосферные осадки распределяются между поверхностным стоком R и инфильтрационной способностью I_0 . Инфильтрационная способность (максимальная скорость инфильтрации) осадков I_0 , мм, представлена в следующем виде:

$$L = Z(d\theta/dt) + D + R; \quad (4)$$

$$I_0 = Z(d\theta/dt) + D. \quad (5)$$

Преобразовав систему уравнений (1), (2), определяем инфильтрационную способность атмосферных осадков в сутки

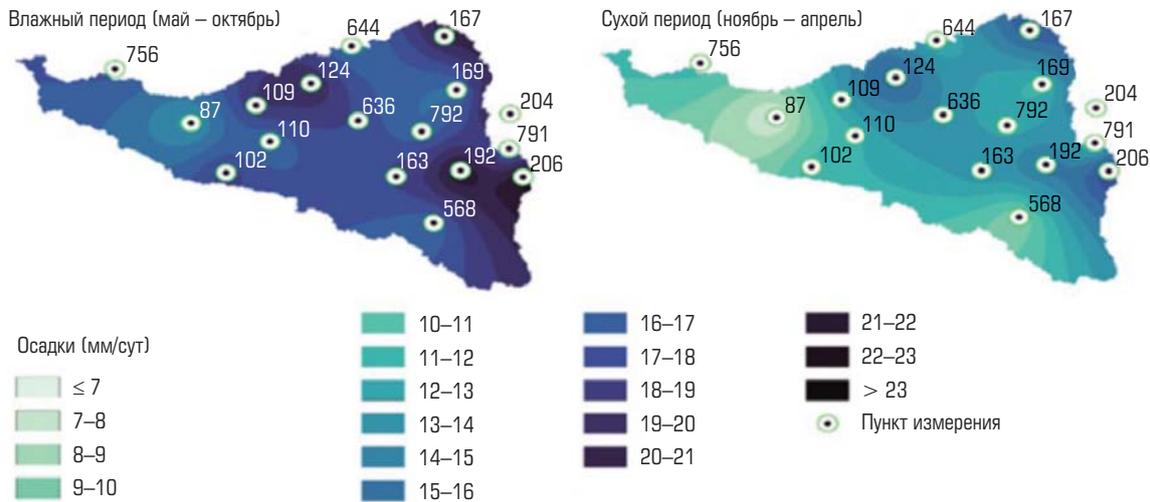


Рис. 4. Распределение среднесуточных осадков для влажного (а) и сухого (б) периодов года в гидрогеологическом районе Ла Яна, Куба

для рассматриваемого гидрогеологического района $I_0(L, \alpha, \beta)$, мм/сут, в виде функции:

$$I_0(L, \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha \left(\left(\frac{L}{8,0286} \right)^{0,5488} \right)^\beta, & L > 400; \\ \alpha \left(\left(\frac{L}{0,1794} \right)^{1,0033} \right)^\beta, & 400 \geq L > 300; \\ \alpha \left(\left(\frac{L}{0,1270} \right)^{0,9531} \right)^\beta, & 300 \geq L > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Обсуждение результатов

В результате обработки данных определено, что 8 из 16 серий обладают однородностью и согласованностью, остальные наборы данных не соответствуют параметрам t -критерия Стьюдента (рис. 3, а). Отобранные наборы данных скорректированы с помощью метода двухмассовой кривой. Серии были разделены на две равные подвыборки (31/12/1989–1/7/2005; 2/7/2005–31/12/2020) и соотнесены со средними значениями однородных серий, как показано на рис. 3, б. Расчетные статистики t_d скорректированных серий оказались ниже их критических значений t_c , а вероятности – выше значения доверительного интервала для 5 %. Таким образом, альтернативную гипотезу отвергают, а нулевую принимают, что свидетельствует о том, что статистически все они последовательны и однородны.

Накопленное годовое количество осадков составляет 1287,78 мм/год, среднее количество дождливых дней

в году – 64,5 дня, а среднесуточное количество осадков в году – 19,97 мм/сут. На рис. 4 показана разница в количестве осадков между периодами года: ноябрь – апрель со средним значением 12,08 мм/сут со стандартным отклонением $\pm 16,12$ мм/сут; май – октябрь со средним значением 17,65 мм/сут со стандартным отклонением $\pm 21,13$ мм/сут, которые соответствуют сухому и влажному периодам.

Средние значения осадков для рассматриваемой территории соответствуют предположению $300 \geq L > 0$, что позволяет применить функцию (7):

$$I_0(L, \alpha, \beta) = \begin{cases} 2,5368 \left(\left(\frac{L}{0,127} \right)^{0,9531} \right)^{0,5735}, & I_0 < L; \\ L, & I_0 > L. \end{cases} \quad (7)$$

Для определения параметров $\alpha = 2,5368$ и $\beta = 0,5735$ использован метод корректировки уравнения (2) А. Н. Костякова.

Принимая во внимание интервал стандартного отклонения средних значений атмосферных осадков, можно применить уравнение (7) в этом интервале. Таким образом, получим, что годовое осадконакопление представляет собой вклад среднесуточной инфильтрации в баланс бассейна. В таблице приведены значения, рассчитанные в [38] для модуля годового поверхностного стока бассейна Ла Яна, а также в [39], где был определен объем потенциальных ресурсов подземных вод, прогнозируемый в год для исследуемой территории, на основе которого рассчитывается модуль годового подземного стока.

Результаты исследований показывают, что инфильтрация атмосферных осадков является основным источником пополнения запасов подземных вод, вследствие чего процессы

Модуль годового стока воды в гидрогеологическом районе Ла Яна, Куба

| Показатели | Доля от годового количества осадков, % | Модуль среднегодового расхода, л/с/км ² | Средний годовой расход, мм/км ² | Годовой объем, ×10 ⁶ , м ³ | Водосборный бассейн, км ² |
|---|--|--|--|--|--------------------------------------|
| Среднегодовое количество осадков в бассейне | 100 | 40,84 | 1287,78 | 2097,5 | 1629,76 |
| Поверхностный сток [38] | 4,5 | 1,83 | 57,6 | 86,6 | 1503 |
| Подземный сток [39] | 20,1 | 8,21 | 259,08 | 506 | 1953 |
| Инфильтрация осадков: | 43,7 | 17,85 | 562,8 | 917,3 | 1629,76 |
| I_0 (сухого периода) | 12,6 | 5,14 | 161,9 | 263,9 | 1629,76 |
| I_0 (влажного периода) | 31,1 | 12,71 | 400,9 | 653,4 | 1629,76 |

носят сезонный характер. По укрупненной предварительной оценке, рассматриваемый гидрогеологический район способен пополнять подземные воды с модулем 17,85 л/с/км²/год. Данная величина может изменяться в зависимости от времени года. Величина инфильтрации составляет 43,7 % от среднегодового расхода. Учитывая, что, по оценкам [40], зона аэрации имеет пористость 20 %, можно подсчитать изменение объемов запасов почвенной влаги или пополнение, которое составит $325,8 \cdot 10^6$ м³ (или 15,5 % от годового объема выпадающих осадков).

Заключение

Типы почв ферраллит красный, ферраллит желтый, развитые из известковых пород, имеют глинистый профиль, в них содержится 2–5 % органического вещества. Их инфильтрационная способность (159,95–250,56 мм/сут) близка к средней для других почв – 175,47 мм/сут, но по своей площади распространения они получают 66,59 % инфильтрации и играют ключевую роль при просачивании атмосферных осадков. Суточные осадки были определены как основной источник пополнения водоносного горизонта.

Необходимы дальнейшие исследования перспективных районов с целью определения режимов и условий инфильтрации, в том числе толщины почвенного покрова, мощности верхнего водоносного горизонта и его связи с горизонтами, расположенными ниже, а также оценки влияния транспирации, поверхностного стока и разгрузки в поверхностные водоемы. Необходимо исследовать роль эвапотранспирации в накоплении влаги в почве, образующейся в результате инфильтрации, а также объем хранения в ненасыщенной зоне и ее значение в регулировании стока подземных вод.

Актуальность дальнейших исследований обусловлена влиянием последствий изменения климата и снижением доступности воды [41–43]. Изменение слоя атмосферных осадков позволяет определять увеличение или уменьшение запасов подземных вод, а также прогнозировать величину запасов.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 97–102
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.15

Influence of rainfall infiltration on groundwater recharge in hydrogeological region La Yana, Cuba

Information about authors

D. L. Ustyugov¹, Dean, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Ustyugov_DL@pers.spmi.ru

E. L. Noa Segura¹, Post-Graduate Student

M. S. Ryakhovsky, Outside Specialist, Candidate of Engineering Sciences

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Assessment of groundwater recharge owing to intense rainfall allows correlating these processes. The influence of rainfall infiltration on replenishment of groundwater resources in hydrogeological region La Yana, Cuba is studied.

Parameters of infiltration in soil layer are analyzed using data of a few series of rainfall. The hydrometeorological data on the rainfall series, which were nonsequential and nonuniform, were harmonized using the double mass curve analysis. The double mass curve analysis

provided corrected data bases for investigative modeling. The studies determined typical relationships between the maximum amount and duration for three types of daily rainfall. It is found that rainfall is characterized by two periods: dry and wet, and the processes of infiltration and replenishment of groundwater resources have a seasonal nature.

Assessment of possible groundwater reserves includes, among other things, the in-place reserves appraisal—amount of taken water with regard to water replenishment, which is schematized using the water balance equation. In this research, the balance valuation is carried out in the root layer in the vadoze zone.

Essentiality of the further research in this area is governed by climate change and by reduced availability of water resources.

Keywords: water balance, infiltration, modeling, rainfall, vadoze zone.

References

1. Ilyushin Yu. V., Asadulagi M.-A. M. Development of a distributed control system for the hydrodynamic processes of aquifers, taking into account stochastic disturbing factors. *Water*. 2023. Vol. 15, Iss. 4. ID 770.
2. Etale A., Nhlane D., Richards H. Graphene oxide nanosheets for treatment of mine-drainage contaminated water: The effect of phosphate functionalisation on U(VI) removal. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. pp. 647–651.
3. Mzinyane N. N. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage using poly

- (hydroxamic acid) ligand. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2022. Vol. 42. pp. 318–336.
4. Aguas subterráneas. Hacer visible el recurso invisible. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022. Paris : UNESCO, 2022. 266 p.
 5. Alifujiang Y., Abuduwaili J., Groll M., Issanova G., Maihemuti B. Changes in intra-annual runoff and its response to climate variability and anthropogenic activity in the Lake Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan. *CATENA*. 2021. Vol. 198. ID 104974.
 6. Georgievsky M. V., Mamaeva M. A. Water Resources of the Russian Part of the Baltic Sea Basin and Their Possible Changes Under Global Warming. *Water Resources Quality and Management in Baltic Sea Countries*. Series Springer Water. Cham : Springer, 2020. pp. 159–208.
 7. Golovina E. I., Grebneva A. V. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 788–800.
 8. Ilyushin Yu. V., Nosova V. A. Methodology to increase the efficiency of the mineral water extraction process. *Water*. 2024. Vol. 16, Iss. 10. ID 1329.
 9. Semenova T., Martínez Santoyo J. Y. economic strategy for developing the oil industry in Mexico by incorporating environmental factors. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, Iss. 1. ID 36.
 10. Narendra B. H., Siregar C. A., Dharmawan I. W. S., Sukmana A., Pratiwi et al. A review on sustainability of watershed management in Indonesia. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Iss. 19. ID 11125.
 11. Golovina E. I., Grebneva A. V. Features of groundwater resources management in the transboundary territories (on the example of the Kaliningrad region). *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2022. No. 4. pp. 85–94.
 12. Khaustov V. V., Ustiugov D. L. Formation of drainage waters of Tyrnauz deposit in ecological aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87, No. 4. ID 042006.
 13. Pozdniakov S. P., Vasilevsky P. Yu., Grinevskiy S. O., Lekhov V. A., Sizov N. E. et al. Variability in spatial–temporal recharge under the observed and projected climate: A site-specific simulation in the black soil region of Russia. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 590. ID 125247.
 14. Atoui M., Agoubi B. Groundwater flow modeling and recharge estimation of heterogeneous aquifer: Applied to Matmata aquifer, southeastern, Tunisia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2024. Vol. 133. ID 103513.
 15. Guevara-Ochoa C., Sierra A. M., Vives L., Barrios M. Impact of rainfed agriculture on spatio-temporal patterns of water balance and the interaction between groundwater and surface water in sub-humid plains. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 912. ID 169247.
 16. Xu P., Weng B., Gong X., Xia K., Yan D. et al. Estimation of shallow groundwater recharge in central Qinghai-Tibet Plateau by combining unsaturated zone simulation and improved water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*. 2024. Vol. 630. ID 130689.
 17. Gusev E.A. Results and prospects of geological mapping of the Arctic shelf of Russia. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 290–298.
 18. Lebedeva Ya., Kotiukov P., Lange I. Study of the geo-ecological state of groundwater of metropolitan areas under the conditions of intensive contamination thereof. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, Iss. 2. pp. 157–165.
 19. Nikishin V. V., Blinov P. A., Fedorov V. V., Nikishina E. K., Tokarev I. V. Analysis of the problems of high-quality drinking water extraction from underground water intakes on Vysotsky Island in the Vyborg district of the Leningrad region. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 264. pp. 937–948.
 20. Paswan A. K., Tiwari V. M., Agarwal A., Asoka A., Rangarajan R. et al. Long-term spatiotemporal variation in groundwater recharge in the highly irrigated semi-arid region of India: The intertwined relationship between climate variability and anthropogenic activities. *Groundwater for Sustainable Development*. 2024. Vol. 25. ID 101148.
 21. Iturralde-Vinent M., Tchoune D., Cabrera R. Geología del territorio Ciego de Ávila-Camagüey-Las Tunas. Resultados de las investigaciones y levantamiento geológico a escala 1:250000. Memoria explicativa del mapa geológico. Cuba : Academia de Ciencias de Cuba y Bulgaria, 1981.
 22. Pospheh G. B., Savón Y., Delgado R., Castellanos R., Peña A. Inventory of landslides triggered by hurricane Matthews in Guantánamo, Cuba. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 16, No. 1. pp. 55–63.
 23. Pospheh G. B., Savón Yu., Moseykin V. V. Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process. A case study of Guantanamo Province. *MiAB*. 2024. No. 1. pp. 125–145.
 24. Manrique O. B., Ruiz R. D., Ballat Y. G., Freyre J. V. Caracterización de precipitaciones diarias en el municipio de Ciego de Ávila, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2017. Vol. 38, No. 2. pp. 44–58.
 25. Beyene T. D., Zimale F. A., Tekleab S., Nedaw D. Assessment of input rainfall uncertainty for groundwater recharge estimation, Tikur-Wuha Watershed, Rift valley Lakes basin, Ethiopia. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Iss. 2. ID e24311.
 26. González Y. M., Gutiérrez E. P., Cuellar D. P. Hietogramas adimensionales para ciclones tropicales que afectan al archipiélago cubano. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2020. Vol. 41, No. 2. pp. 48–63.
 27. Reis A. A. D., Weerts A., Ramos M.-H., Wetterhall F., Fernandes W. D. S. Hydrological data and modeling to combine and validate precipitation datasets relevant to hydrological applications. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2022. Vol. 44. ID 101200.
 28. Gutiérrez E. O. P., Martínez M. E. L., González R. V., Rouco D. B., Sosa M. H. Las Grandes Precipitaciones y las Precipitaciones Intensas en Cuba: Causas y Características. Cuba, 2011. 37 p.
 29. Alhama I., Jiménez-Valera J. A., del Mar Pérez Cambra M. Hydraulic and physical property characterizations of materials for the design of sustainable urban drainage systems. *Urban Climate*. 2024. Vol. 53. ID 101779.
 30. Li M., Xie Y., Dong Y., Wang L., Zhang Z. Review: Recent progress on groundwater recharge research in arid and semiarid areas of China. *Hydrogeology Journal*. 2024. Vol. 32, Iss. 1. pp. 9–30.
 31. Redin C. G., Valente M. L., Andriollo D. D., Inda Junior A. V., Frank de Araújo E. Soil–landscape–vegetation relationships in grassland–forest boundaries, and possible applications in ecological restoration. *Journal of South American Earth Sciences*. 2023. Vol. 132. ID 104684.
 32. Kostiakov A. N. Dynamics of water percolation rate in soil and the dynamic approach to the analysis toward melioration. *Soviet Soil Science*. 1932. No. 5. pp. 17–21.
 33. Rosales-Naranjo L., Pérez-Rodríguez M., Herrera-Puebla J., González-Rodríguez J. A., Cid-Lazo G. Efecto del manejo del suelo sobre la infiltración en un suelo Ferralítico Rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*. 2020. Vol. 10, No. 4. pp. 20–30.
 34. Rossi M., Donnini M., Beddini G. Nationwide groundwater recharge evaluation for a sustainable water withdrawal over Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2022. Vol. 43. ID 101172.
 35. Amindin A., Siamian N., Dereimi Z. N., Clague J. J., Blaschke T. et al. Long term analysis of international wetlands in Iran: Monitoring surface water area and water balance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 126. ID 103637.
 36. Scott R. L., Biederman J. A. Critical zone water balance over 13 years in a Semiarid Savanna. *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55, Iss. 1. pp. 574–588.
 37. Zhang X., Dong Q., Zhang Q., Yu Y. A unified framework of water balance models for monthly, annual, and mean annual timescales. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 589. ID 125186.
 38. Vidal Olivera V. M., González-Abreu Fernández R., Peña Y. J., González L. A. V., Carrillo M. C. Funciones y usos de los recursos hídricos en el Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2015. Vol. 36, No. 2. pp. 84–93.
 39. Molerio-León L. F., Sardiñas Gómez A. M. Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (II): dominio de los acuíferos cársicos, regionalización y recursos potenciales de agua subterránea. *Gota a Gota*. 2023. No. 29. pp. 33–46.
 40. Vidal Olivera V. M., González-Abreu Fernández R. Aguas superficiales y subterráneas en el Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2013. Vol. 34, No. 3. pp. 57–69.
 41. Atawneh D. A., Cartwright N., Bertone E. Climate change and its impact on the projected values of groundwater recharge: A review. *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 601. ID 126602.
 42. Gutiérrez E. O. P. Aproximación a los recursos hídricos potenciales en Cuba al 2030. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2022. Vol. 43, No. 1. pp. 48–62.
 43. Scanlon B. R., Fakhreddine S., Rateb A., de Graaf I., Famiglietti J. et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4, No. 2. pp. 87–101.