



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 2 2025



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 2 2025



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398.

«Успехи современного естествознания» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершённых исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.

Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК РФ). К2.

Журнал ориентируется на профессиональных работников сельского хозяйства, экологов, научных сотрудников, специалистов в смежных областях знаний, занимающихся изучением наук о земле.

Основные научные направления: 1.6. Науки о Земле и окружающей среде, 2.8. Недропользование и горные науки, 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

Технический редактор

Доронкина Е.Н.

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Курзанов Анатолий Николаевич, д.м.н., профессор

Корректор

Галенкина Е.С.,

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент *Абдулвалеев Р.Р.* (Уфа); д.г.-м.н., проф., *Абилхасимов Х.Б.* (Астана); д.т.н., проф. *Айдосов А.* (Алматы); д.г.-м.н., проф., *Алексеев С.В.* (Иркутск); д.х.н., проф., *Алоев В.З.* (Нальчик); д.г.н., проф. *Андреев С.С.* (Ростов-на-Дону); д.г.н., доцент, *Андреева Е.С.* (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент *Анищенко Л.Н.* (Брянск); д.с.-х.н., проф. *Байрамбеков Ш.Б.* (Камызяк); д.т.н., проф. *Бейсембаев К.М.* (Караганда); д.т.н., проф. *Белозеров В.В.* (Ростов-на-Дону); д.б.н., доцент *Белоус О.Г.* (Сочи); д.с.-х.н., проф. *Берсон Г.З.* (Великий Новгород); д.г.-м.н., проф. *Бондарев В.И.* (Екатеринбург); д.т.н., профессор *Галкин А.Ф.* (Ухта); д.г.-м.н., проф. *Гавришин А.И.* (Новочеркасск); д.с.-х.н., *Горбачева А.Г.* (Пятигорск); д.с.-х.н., *Горянин О.И.* (Самара); д.г.-м.н., проф. *Гусев А.И.* (Бийск); д.с.-х.н., проф. *Данилин И.М.* (Красноярск); д.б.н., доцент *Долгов А.В.* (Мурманск); д.э.н., проф. *Долятовский В.А.* (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. *Дресвянников А.Ф.* (Казань); д.г.н., проф. *Егорина А.В.* (Усть-Каменогорск); д.т.н., проф. *Ерофеев В.И.* (Томск); д.с.-х.н., проф. *Залесов С.В.* (Екатеринбург); д.с.-х.н., доцент *Захарченко А.В.* (Томск); д.с.-х.н., проф. *Зволинский В.П.* (Волгоград); д.х.н., проф. *Ивашикевич А.Н.* (Москва); д.б.н., доцент *Кавецкий Н.Н.* (Мурманск); д.т.н., проф. *Калякин С.А.* (Донецк); д.с.-х.н., проф. *Караев М.К.* (Махачкала); д.г.-м.н., проф. *Кашаев А.А.* (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. *Кобрунов А.И.* (Ухта); д.г.-м.н., доцент *Копылов И.С.* (Пермь); д.г.-м.н., проф. *Костицын В.И.* (Пермь); д.с.-х.н., проф. *Костылев П.И.* (Зерноград); д.э.н., проф. *Косыкова И.В.* (Самара); д.с.-х.н., *Коцарева Н.Б.* (Белгород); д.т.н., доцент *Кузьяков О.Н.* (Тюмень); д.г.-м.н., проф. *Кучеренко И.В.* (Томск); д.б.н., проф. *Ларионов М.В.* (Саратов); д.г.-м.н., проф. *Лебедев В.И.* (Кызыл); д.ф.-м.н., проф. *Лерер А.М.* (Ростов-на-Дону); д.г.н., проф. *Луговской А.М.* (Москва); д.г.-м.н., проф. *Мельников А.И.* (Иркутск); д.т.н., проф. *Мусаев В.К.* (Москва); д.т.н., доцент *Нехорошева А.В.* (Ханты-Мансийск); д.с.-х.н., *Никитин С.Н.* (Ульяновск); д.с.-х.н., *Оказова З.П.* (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. *Партоев К.* (Душанбе); д.с.-х.н., проф. *Петелько А.И.* (Миценск); д.т.н., проф. *Петров М.Н.* (Красноярск); д.т.н., проф. *Пирумян Г.П.* (Ереван); д.с.-х.н., проф. *Проездов П.Н.* (Саратов); д.г.-м.н., проф. *Сакеев К.С.* (Бишкек); д.б.н. *Сибикеев С.Н.* (Саратов); д.с.-х.н., доцент *Сокольская О.Б.* (Саратов); д.т.н., проф. *Степанов В.В.* (Санкт-Петербург); д.т.н., проф. *Тарасенко А.А.* (Тюмень); д.т.н. *Теплухин В.К.* (Октябрьский); д.э.н., проф. *Титов В.А.* (Москва); д.с.-х.н., проф. *Титов В.Н.* (Саратов); д.с.-х.н., проф. *Тихановский А.Н.* (Салехард); д.г.-м.н., проф. *Трофименко С.В.* (Нерюнгри); д.т.н., проф. *Ульрих Е.В.* (Кемерово); д.г.н., проф. *Чодураев Т.М.* (Бишкек); д.с.-х.н., проф. *Шамшиев Б.Н.* (Ош); д.т.н., проф. *Шантарин В.Д.* (Тюмень); д.т.н., проф. *Шатов А.А.* (Уфа); д.ф.-м.н., проф. *Ширатов Д.Ш.* (Улан-Удэ); д.т.н., проф. *Шишелова Т.И.* (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. *Шузунов Л.Ж.* (Нальчик); д.г.-м.н., проф. *Юргенсон Г.А.* (Чита); д.г.н., проф. *Яковенко Н.В.* (Воронеж); д.т.н., проф. *Ямалетдинова К.Ш.* (Челябинск)

ISSN 1681-7494

Электронная версия: <http://www.natural-sciences.ru>

Правила для авторов: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,775

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,368

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

28.02.2025

Дата выхода номера

31.03.2025

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

4,75

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2025/2

Распространяется по свободной цене

Подписной индекс в электронном каталоге «Почта России»: П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. Certificate – PI No. FS 77-63398.

«Advances in current natural sciences» is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles of scientific novelty, which are the results of completed research, of a problematic or scientific-practical nature, scientific reviews.

The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (HCC RF). K2.

The journal is aimed at professional agricultural workers, environmentalists, researchers, specialists in related fields of study geosciences.

Main scientific directions: 1.6. Earth and environmental sciences, 2.8. Subsoil use and mining sciences, 4.1. Agronomy, forestry and water management.

CHIEF EDITOR

Ledvanov Mikhail Yurievich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

Technical editor

Doronkina E.N.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Kurzanov Anatoly Nikolaevich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

Corrector

Galenkina E.S.,

Dudkina N.A.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

EDITORIAL BOARD

D.Sc., Docent *Abdulvaleev R.R.* (Ufa); D.Sc., Prof. *Abilkhasimov Kh.B.* (Astana); D.Sc., Prof. *Aidosov A.* (Almaty); D.Sc., Prof. *Alekseev S.V.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Aloev V.Z.* (Nalchik); D.Sc., Prof. *Andreev S.S.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent, *Andreeva E.S.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent *Anishchenko L.N.* (Bryansk); D.Sc., Prof. *Bayrambekov Sh.B.* (Kamyzyak); D.Sc., Prof. *Beisembaev K.M.* (Karaganda); D.Sc., Prof. *Belozеров V.V.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent *Belous O.G.* (Sochi); D.Sc., Prof. *Berson G.Z.* (Velikiy Novgorod); D.Sc., Prof. *Bondarev V.I.* (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. *Galkin A.F.* (Ukhta); D.Sc., Prof. *Gavrishin A.I.* (Novocheboksarsk); D.Sc. *Gorbacheva A.G.* (Pyatigorsk); D.Sc. *Goryanin O.I.* (Samara); D.Sc., Prof. *Gusev A.I.* (Biysk); D.Sc., Prof. *Danilin I.M.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Docent *Dolgov A.V.* (Murmansk); D.Sc., Prof. *Dolyatovsky V.A.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. *Dresvyannikov A.F.* (Kazan); D.Sc., Prof. *Egorina A.V.* (Ust-Kamenogorsk); D.Sc., Prof. *Erofeev V.I.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Zalesov S.V.* (Ekaterinburg); D.Sc., Docent *Zakharchenko A.V.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Zvolinsky V.P.* (Volgograd); D.Sc., Prof. *Ivashkevich A.N.* (Moscow); D.Sc., Docent *Kavtsevich N.N.* (Murmansk); D.Sc., Prof. *Kalyakin S.A.* (Donetsk); D.Sc., Prof. *Karaev M.K.* (Makhachkala); D.Sc., Prof. *Kashaev A.A.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Kobrunov A.I.* (Ukhta); D.Sc., Docent *Kopylov I.S.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostitsyn V.I.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostylev P.I.* (Zernograd); D.Sc., Prof. *Kosyakova I.V.* (Samara); D.Sc., *Kotsareva N.V.* (Belgorod); D.Sc., Docent *Kuz'yakov O.N.* (Tyumen); D.Sc., Prof. *Kucherenko I.V.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Larionov M.V.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Lebedev V.I.* (Kyzyl); D.Sc., Prof. *Lerer A.M.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. *Lugovskoy A.M.* (Moscow); D.Sc., Prof. *Melnikov A.I.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Musaev V.K.* (Moscow); D.Sc., Docent *Nehorosheva A.V.* (Khanty-Mansiysk); D.Sc. *Nikitin S.N.* (Ulyanovsk); D.Sc. *Okazova Z.P.* (Vladikavkaz); D.Sc., Prof. *Partoev K.* (Dushanbe); D.Sc., Prof. *Petelko A.I.* (Mtsensk); D.Sc., Prof. *Petrov M.N.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. *Pirumyan G.P.* (Yerevan); D.Sc., Prof. *Proezdov P.N.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Sakiev K.S.* (Bishkek); D.Sc. *Sibikeev S.N.* (Saratov); D.Sc., Docent *Sokolskaya O.B.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Stepanov V.V.* (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. *Tarasenko A.A.* (Tyumen); D.Sc. *Teplukhin V.K.* (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. *Titov V.A.* (Moscow); D.Sc., Prof. *Titov V.N.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Tikhonovskiy A.N.* (Salekhard); D.Sc., Prof. *Trofimenko S.V.* (Neryungri); D.Sc., Prof. *Ulrich E.V.* (Kemerovo); D.Sc., Prof. *Choduraev T.M.* (Bishkek); D.Sc., Prof. *Shamshiev B.N.* (Osh); D.Sc., Prof. *Shantarin V.D.* (Tyumen); D.Sc., Prof. *Shatov A.A.* (Ufa); D.Sc., Prof. *Shirapov D.Sh.* (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. *Shishelova T.I.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Shugunov L.Zh.* (Nalchik); D.Sc., Prof. *Yurgenson G.A.* (Chita); D.Sc., Prof. *Yakovenko N.V.* (Voronezh); D.Sc., Prof. *Yamaletdinova K.Sh.* (Chelyabinsk)

ISSN 1681-7494

Electronic version: <http://www.natural-sciences.ru>

Rules for authors: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,775

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,368

Periodicity	12 issues per year
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47
Editorial and publisher address	440026, Penza, st. Lermontov, 3
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5
E-mail	edition@rae.ru
Signed for print	28.02.2025
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	31.03.2025
Conditionally printed sheets	4,75
Order	YCE 2025/2

Distribution at a free price

Subscription index in the Russian Post electronic catalog: P7816

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬЯ

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
НА МИГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАНДШАФТАХ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Мокшина Н.Я., Пахомова О.А., Андропов Е.А., Межова Л.А., Закусилов В.П.6

Геолого-минералогические науки (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

СТАТЬИ

ВЛИЯНИЕ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА ЭСХАЛЯЦИЮ РАДОНА

Апкин Р.Н.13

АНТРОПОГЕННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УФЫ)

Хасанова Г.Ф.19

Технические науки (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ
НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ МЕДНЫХ РУД

Лушина Е.А., Александрова Т.Н.26

Физико-математические науки (1.6.22)

СТАТЬЯ

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДОХРАНИЛИЩА ПЛОТИНЫ
РВЕГУРА ПО ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Биханга Бьенвеню32

CONTENTS

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLE

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE MIGRATION
PROCESSES OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE LANDSCAPES
OF THE VORONEZH REGION

Mokshina N.Ya., Pakhomova O.A., Andropov E.A., Mezhova L.A., Zakusilov V.P.6

Geological and mineralogical sciences (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

ARTICLES

INFLUENCE OF RELIEF FORMS ON RADON EXHALATION

Apkin R.N.13

ANTHROPOGENIC LANDFORMS OF URBANIZED AREAS
(ON THE EXAMPLE OF UFA)

Khasanova G.F.19

Technical sciences (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

REVIEWS

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE LIQUID PHASE
ON THE FLOTATION PROCESS OF COPPER ORE

Lushina E.A., Aleksandrova T.N.26

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLE

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE LEVEL OF THE RWEGURA
DAM RESERVOIR BASED ON PIEZOMETRIC DATA

Bihanga Bienvenu32

СТАТЬЯ

УДК 551.583:502.05(470.324)
DOI 10.17513/use.38371

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА МИГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАНДШАФТАХ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

^{1,2}Мокшина Н.Я., ²Пахомова О.А., ²Андропов Е.А., ³Межова Л.А., ¹Закусилов В.П.

¹ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, e-mail: moksnad@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина», Елец;

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», Воронеж

В статье рассмотрена структура и динамика проявления климатических процессов в пределах Воронежской области за разные исторические эпохи и за последние два десятилетия. Начало XXI в. сопровождается климатическими катаклизмами, которые оказали влияние на геохимический состав ландшафтов в рассматриваемом регионе. В этой связи целью статьи стало выявление влияния климатических изменений на миграционные процессы химических элементов в ландшафтах Воронежской области. В результате исследования были определены закономерности изменения некоторых климатических параметров за 1961–2020 гг. и их влияние на миграционные процессы в ландшафтах, которые наиболее активно могут проявляться в системе сельскохозяйственного природопользования. Отражена взаимосвязь климатических изменений и миграционных процессов, протекающих в ландшафте, определены пространственные и временные закономерности их проявления и вероятностные особенности их моделирования. Полученные результаты могут быть применены для оценки негативного влияния современных климатических флуктуаций на региональное агро- и лесопользование. Проведенный анализ климатических параметров выявил важность определения периодов по сходным условиям миграционного режима вещества и расчета для каждого из них количественных интегральных параметров. Полученные результаты позволяют определить тенденции уровней нарушений природной среды региона и заложить их в систему мероприятий по охране и преобразованию сельскохозяйственного природопользования области.

Ключевые слова: изменение климата, миграционные процессы, химические элементы, ландшафт, ландшафтно-геохимическая система

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE MIGRATION PROCESSES OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE LANDSCAPES OF THE VORONEZH REGION

^{1,2}Mokshina N.Ya., ²Pakhomova O.A., ²Andropov E.A., ³Mezhova L.A., ¹Zakusilov V.P.

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Voronezh, e-mail: moksnad@mail.ru;

²Bunin Yelets State University, Yelets;

³Voronezh State Pedagogical University, Voronezh

The article examines the structure and dynamics of the manifestation of climatic processes within the Voronezh region over different historical epochs and over the past two centuries. The beginning of the 21st century was accompanied by climatic cataclysms, which had an impact on the geochemical composition of landscapes in the region under consideration. In this regard, the purpose of the article is to identify the impact of climate change on the migration processes of chemical elements in the landscapes of the Voronezh region. As a result of the study, the patterns of changes in some climatic parameters for the period 1961–2020 and their impact on migration processes in landscapes, which can be most actively manifested in the system of agricultural environmental management, were determined. The interrelation of climatic changes and migration processes occurring in the landscape is reflected, spatial and temporal patterns of their manifestation and probabilistic features of their modeling are determined. The results obtained can be applied to assess the negative impact of modern climatic fluctuations on regional agro- and forest management. The analysis of climatic parameters revealed the importance of determining periods based on similar conditions of the migration regime of a substance and calculating quantitative integral parameters for each of them. The results obtained make it possible to identify trends in the levels of violations of the natural environment of the region and incorporate them into the system of measures for the protection and transformation of agricultural environmental management in the region.

Keywords: climate change, migration processes, chemical elements, landscape, landscape-geochemical system

Введение

В настоящее время в связи с глобальными климатическими изменениями особое внимание отводится оценке их проявления

на региональных уровнях. Зональные ландшафты являются открытыми геосистемами, формирующимися в результате массоэнергетических процессов с окружающей сре-

дой. Поэтому изменение климатических параметров отражается на структуре и динамике миграционных процессов в ландшафтах и их компонентах. Качественная и количественная характеристики региональных климатических ресурсов взаимосвязаны со сложными погодообразующими процессами в атмосфере и антропогенной трансформацией ландшафтов. Ландшафтно-климатический подход основан на комплексном анализе всей совокупности климатических и миграционных процессов, протекающих в ландшафтах. Выделяют ландшафтно-геохимические системы, которые характеризуются рядом однотипных физико-географических характеристик и имеют специфический набор факторов и закономерностей. Региональные ландшафты в условиях климатических катаклизмов могут менять скорость и направленность геохимических процессов. Анализ влияния изменения климатических условий на ландшафты позволит прогнозировать и моделировать структурные и динамические процессы в них.

Цель исследования – выявление влияния климатических изменений на миграционные процессы химических элементов в ландшафтах Воронежской области за 1961–2020 гг.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели использовались аналитический, статистический, геохимический методы. Проанализированы многолетние сведения Воронежского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, специализированные массивы месячных сумм осадков и среднемесячных температур на территории России по данным мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИГМИ МЦД) [1–3]. Анализируемый период: 1961–2020 гг. Для определения динамики барического поля (чередования циклональных и антициклональных типов) были рассмотрены синоптические карты и карты барической топографии с 1947 по 2023 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что на миграционные процессы химических элементов в региональном ландшафте оказывают влияние климатические факторы [4, 5]. Воронежская область расположена в лесостепной зоне, в умерен-

ном климатическом поясе, с умеренной степенью континентальности климата, для нее природой созданы условия, оптимальным образом сочетающие солнечную освещенность и, соответственно, нагрев подстилающей поверхности с ее увлажненностью, что способствует накоплению растительной биомассы, активности химических реакций, происходящих в элементах ландшафта, и в общем является основой развития ландшафта [5].

Установлено, что средний поток солнечной энергии на земную поверхность достигает 3300 ккал/м², а ее полезная мощность составляет 1792 ккал/м². Термический режим территории характеризуется температурой воздуха и почвы. Среднегодовая температура воздуха Воронежской области составляет 5,5 °С, усредненные ее значения для самого холодного месяца, января, составляют –7,5 °С, для самого теплого, июля, составляют +20,1 °С, средние параметры из абсолютных минимумов определены около –30 °С, а максимумов +35 °С. От температурного режима в общем зависит скорость химических реакций. Увеличение температуры воздуха на 10° приводит к возрастанию скорости миграционных процессов в ландшафте в 2 раза [6]. Начиная с XXI в. увеличивается количество жарких дней, температура возросла на 2,2°, уменьшилось почти в два раза количество морозных типов погоды. Толщина снежного покрова изменилась с 25–30 до 10–20 см, а также продолжительность залегания снежного покрова с 140 до 110 дней, и устойчивый снежный покров начал устанавливаться с середины декабря [7]. Динамика температурного режима в годовом ходе, полученная по данным [3] за 1961–2020 гг., представлена на рис. 1.

Из-за своего географического положения территория Воронежской области находится под воздействием воздушных масс Атлантики, Арктического бассейна, а также масс, сформировавшихся над территорией Центральной Азии. В конце лета – начале осени, нередко во второй половине зимы и весной преобладает западный тип атмосферной циркуляции, сопровождающийся обычно активной циклонической деятельностью, значительными осадками, положительными аномалиями температуры воздуха зимой и отрицательными летом [2, 3]. Циркуляционные условия атмосферы способствуют переносу или накоплению вещества в зональных типах ландшафтов.

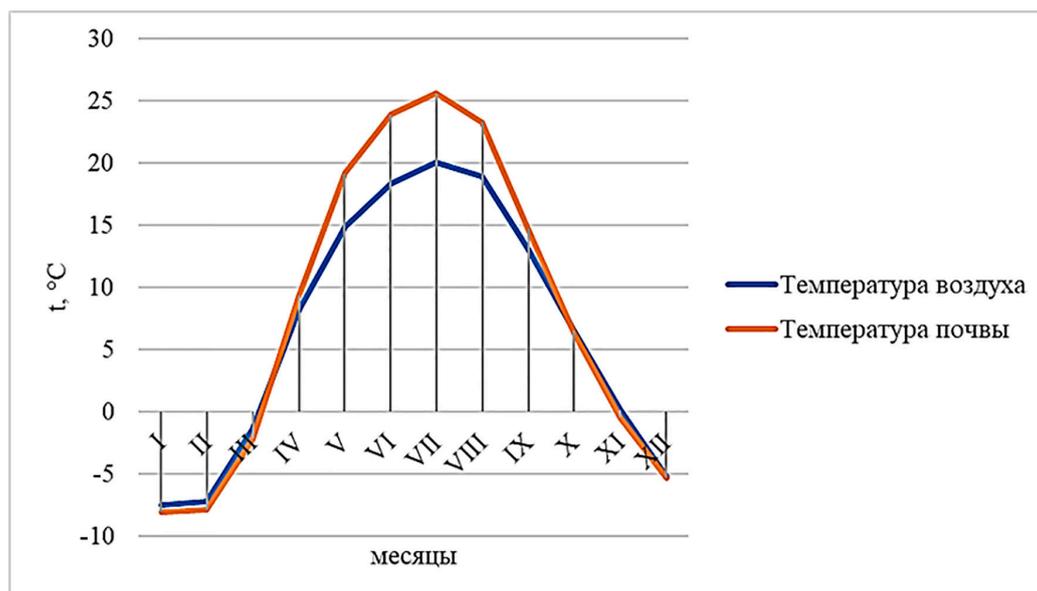


Рис. 1. Среднемесячный ход температур воздуха и почв (1961–2020 гг.) [3]

Для Воронежской области характерна, особенно в холодный период года, частая смена антициклональных и циклональных типов погоды [6, 8]. В результате анализа аэросиноптического материала за 1947–2023 гг. на территории области было установлено 9 циклональных и 7 антициклональных типов погоды. В основу данной классификации положено местоположение центров формирования данных барических образований, траектории их перемещения и их части (периферии), оказывающие влияние на территорию. Значительное количество циклональных типов погоды отмечено в осенне-зимний период, с наибольшей их повторяемостью в ноябре и декабре [9]. С данным типом связана облачная погода с высотой нижней границы облаков 300–500 м, а часто и ниже, около 100–200 м. Преобладание облачности нижнего яруса обуславливает выпадение осадков. Их выпадение способствует очищению атмосферы от примесей, содержащихся в ней. В конечном итоге происходит перемещение примесей, содержащихся в атмосфере, и накопление в компонентах ландшафта.

Антициклональный тип погоды чаще отмечается в теплое полугодие. Данному типу свойственны малооблачное (безоблачное) состояние неба, высокие температуры летом и низкие зимой. Установление сухой жаркой погоды, влияющей на увеличение скорости химических реакций в ландшафте. В осенне-зимний период, особенно

в утренние часы, нередко образование низкой (200–300 м) подынверсионной облачности и туманов; осадков при этом практически не выпадает.

В начале XXI в. количество аномальных явлений погодных условий возрастает. Среднее количество осадков до 1960-х гг. колебалось в пределах 389–548 мм в год. По последним данным (период осреднения 1961–2020 гг.) [2], среднегодовое количество осадков по Воронежской области составляет 579 мм в год. Максимальное их количество выпадает в июне-июле, минимальное – в холодное полугодие, с минимумом в марте (табл. 1). Максимум поступления химических веществ на ландшафт области приходится также на период максимального выпадения осадков, при этом существенную роль оказывает характер атмосферных осадков, скорость и продолжительность их выпадения [9]. Интенсивность ливней может достигать 1,16 до 2,76 мм/мин – это приводит к значительному поступлению минеральных и органических веществ на почвенный покров [6].

Пространственный перенос атмосферных аэрозолей осуществляется ветром. Годовая роза основных направлений ветра с обозначением их повторяемостей на территории Воронежской области, построенная за 1961–2020 гг. по данным [1], показана на рис. 2. Распределение средних скоростей ветра по месяцам и за год приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение среднего количества осадков и средних скоростей ветра в течение года

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Количество осадков (мм)	43	36	34	41	45	67	64	53	53	46	47	49	579
Скорость ветра, м/с	3,3	3,4	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,2	2,4	2,9	3,1	3,4	2,8

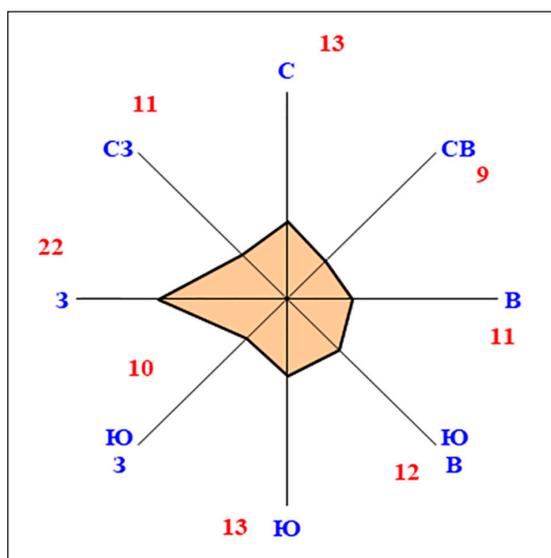


Рис. 2. Годовая роза ветров (1961–2020 гг.) [1]

Наибольшую повторяемость в году имеют ветры западного направления (21,5%). Меньше всего наблюдаются ветры северо-восточного направления (9,0%). Среднегодовая скорость ветра составляет 2,8 м/с, при этом в зимнее и весеннее время скорость несколько больше (3,3–3,4 м/с), в летнее – меньше (2,2 м/с) [1]. Продолжительность ветра с большими скоростями в теплый период года обычно меньше, чем в холодный, однако при ливнях и грозах наблюдается резкое шквалистое, но кратковременное усиление ветра. Ветровой перенос усиливает саморегулирующие свойства атмосферы. Количество дней со штилем и скоростью ветра до 1–2 м/с достигает 32%, и характерны они для летнего периода.

По данным ветрового переноса можно рассчитать энергетическую результирующую ветра [10]. Энергетическая результирующая ветра характеризует энергию, которую можно получить от воздушной массы, движущейся над территорией, с одного квадратного километра. Этот показатель позволяет определить энергообмен воздушной среды с окружающей территорией. Для региональных ландшафтов основными источниками

загрязнения атмосферы являются урбанизированные территории, энергетическая результирующая ветра позволит определить массу выноса ингредиентов по воздуху от промышленных источников загрязнения.

Для определения качественной и количественной характеристики миграционного потока необходимы сведения о химическом составе снеговых и дождевых вод. Для Воронежской области средняя минерализация атмосферных осадков невысокая и составляет 31,2 мг/л. Наибольшие колебания в снеговых и дождевых водах наблюдаются в содержании ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} . На территорию региона может поступить более 13,00 т/км² солей [5, 6], что доказывает роль климатических факторов на формирование геохимического фона региональных ландшафтов. На территории области климатические показатели в пространственном отношении изменяются незначительно. Так, разница в температуре при движении с запада на восток и с севера на юг не превышает 2–3°, а величины выпадающих осадков колеблются в пределах 20–50 мм [2, 3]. Отмечено нарастание частоты аномальных климатических условий, которые негативно влияют на сельскохозяйственное природопользование. По годам в зависимости от их климатических особенностей наблюдаются колебания урожайности сельскохозяйственных культур, которая тесно взаимосвязана и с почвенными ресурсами региона. Неоднородное почвенное пространство во взаимосвязи с климатическими процессами меняет свойства миграционных потоков в ландшафте. В зональных ландшафтах исторически формируются массоэнергетические процессы, и их функциональный режим зависит от особенностей взаимосвязи всех компонентов природы.

Динамика многолетних климатических показателей существенно изменяет характер миграционных процессов вещества в ландшафте. Известны четыре эпохи изменения климата [11] (рис. 3) и три циркуляционные эпохи по преобладающему переносу воздушных масс, которые в конечном счете приводят к изменению условий миграционного режима вещества в ландшафте (табл. 2) [12, 13].

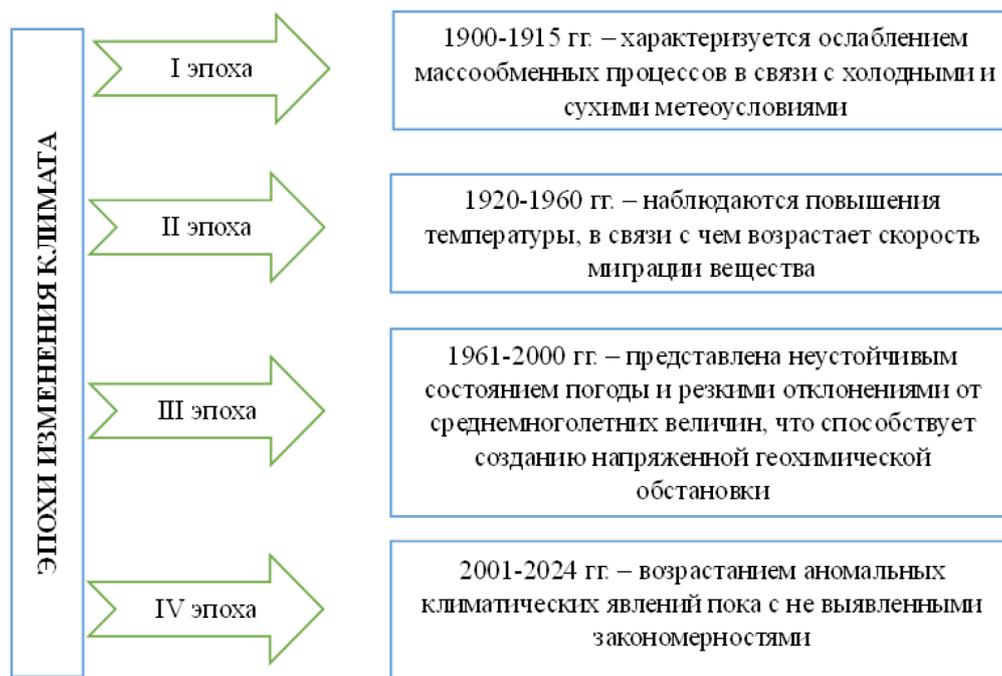


Рис. 3. Эпохи изменения климата на территории России (1900–2024) [11]

Таблица 2

Многолетние циклы преобладающего циркуляционного режима (1899–2014 гг.) [12]

Эпохи	I	II	III
Годы	1899–1915	1916–1956	1957–2014
Особенности циркуляционных процессов	Преобладание блокирующих процессов	Преобладание зональной циркуляции	Преобладание выходов циклонов из низких широт в высокие

Эпоху после 2014 г. до настоящего времени можно характеризовать как эпоху с преобладанием высокочастотных колебаний циркуляционных процессов, с преобладанием межширотного обмена.

Рассмотрение изменения основных химических параметров в многолетнем цикле позволяет классифицировать их по направленности воздействия на миграционные процессы вещества, потому что изменения климата находят отражение в водно-тепловом и биогенном режиме ландшафтов. Причем следует различать прямое и косвенное влияние климата на геохимическую миграцию вещества. Интенсивность миграционных процессов тесно взаимосвязана не только с пространственной, но и с временной дифференциацией климата. Характер миграции вещества изменяется в зависимости от многолетних и сезонных флуктуаций климатических параметров.

Проведен историко-географический анализ более чем векового цикла природных условий, связанных с солнечной активностью, которая отражается на сочетании теплых и влажных эпох [14]. В табл. 3 приведены сочетания лет (периоды) по сходным метеоусловиям с 1836 по 1956 г. с характерными для них режимами температуры и осадков, а также особенностями миграционных процессов химических веществ.

По данным Всемирной метеорологической организации, начиная с 1960 г. наблюдается повышение температуры, а 2015–2020 гг. были самыми теплыми. При этом можно выделить волны похолодания –1970–1990 и 2000–2005 гг. Отмечена тенденция увеличения количества осадков на 5–10 мм в год, снижается мощность снежного покрова, продолжительность его залегания, усиливается циклональный режим атмосферы.

Таблица 3

Историко-географический анализ природных условий (1836–1956 гг.) [14]

Годы	Температурный режим	Режим осадков	Особенности миграционных процессов химических веществ
1836–1852	не показательно, близко к норме	выпадение большего количества осадков	промывной режим и активизация миграционных процессов
1853–1877	не показательно, близко к норме	среднеувлажненный период весной и летом	оптимизация миграционных процессов
1878–1886	не показательно, близко к норме	обильные осадками зимой и летом	возрастание выноса вещества
1887–1898	не показательно, близко к норме	недостаток осадков весной и летом	замедление вертикального массообмена, увеличение скорости химических реакций
1899–1914	не показательно, близко к норме	недостаточное увлажнение в сочетании с обильными осадками	взаимодействие процессов миграции и аккумуляция вещества
1915–1928	не показательно, близко к норме	преобладают обильные летние осадки в сочетании с короткими засухами	возрастание миграционных процессов в летний период в сочетании с застойными явлениями и резким всплеском скоростей химических реакций
1929–1935	отдельные суровые зимы (температуры значительно ниже нормы)	преобладает влажное лето и отдельные суровые зимы	создаются оптимальные условия для миграционных процессов летом и нарушение миграционного цикла зимой
1936–1939	жаркое лето (температуры значительно ниже нормы)	засушливое лето (дефицит осадков)	увеличение скорости миграции вещества
1940–1945	холодные годы (температуры ниже нормы)	влажные годы (количество осадков выше нормы)	процессы вертикального выноса вещества с резким уменьшением скоростей химических реакций
1946–1956	достаточно частые оттепели в зимний период	годы с достаточным количеством осадков в зимний период и летними засухами	изменение миграции вещества по сезонам года и увеличение скорости химических реакций в летний период

На основании проведенного анализа, по мнению авторов, данные примеры иллюстрируют диапазон колебаний миграционных процессов во многолетнем цикле, показывают их разнонаправленность. Это позволяет вычленять сезонную и временную динамику миграции. Многолетние изменения солнечной активности находят отражение в сочетании климатических показателей и являются энергетическими факторами миграционных процессов. Колебания осадков теплого и холодного периода происходят не синхронно. В периоды ослабления западного переноса черты континентальности климата увеличиваются, при этом температуры июля возрастают, а температуры января снижаются.

Заключение

Таким образом, начиная с 1960 г. наблюдается повышение температуры и отмечается общая тенденция к увеличению увлажнения, при этом 1960-е и 1980-е гг. характе-

ризовались относительной засушливостью, 1970-е и 1990-е гг. – увеличением увлажненности. В начале XXI в. отмечено повышение температуры на 1,2–1,4 °С по сравнению с XX в. Следующее десятилетие, до 2035 г., также будет характеризоваться тенденцией к увеличению количества осадков и возрастанием среднегодовой температуры.

Показатели климата региона прослеживаются во всех составляющих зональной ландшафтной геосистемы. Качественный анализ климатических показателей выявил возможность определения периодов по сходным условиям миграционного режима вещества и расчета для каждого из них количественных интегральных параметров. Это позволит более достоверно обосновать геоэкологические условия почвенного покрова, ландшафтов отдельных регионов, с учетом известной цикличности атмосферных процессов, связанных с периодичностью солнечной активности, а также с изменением антропогенных условий, об-

условленных общим ростом народонаселения земного шара и активной индустриализацией человеческого общества.

Полученные результаты позволяют определить тенденции уровней нарушений природной среды региона и заложить их в системе мероприятий по охране и преобразованию сельскохозяйственного природопользования области. Климатические условия лесостепной и степной зон на рубеже XXI в. характеризуются частой сменой погодных условий и высокой вероятностью наступления засушливых периодов, которые необходимо учитывать для оптимизации сельскохозяйственной деятельности. Сопоставление статистических данных урожая сельскохозяйственных культур и климатических параметров с миграционными процессами в почве даст возможность выявить протекающие в них негативные процессы. Материалы исследования можно использовать при оценке функционального режима региональных агро- и лесных геосистем и положить в основу усовершенствования его мониторинга. В зависимости от конкретных задач используются различные логические цепочки периодичности ритмов температур, осадков, циркуляционных процессов. Пульсационно-ритмические механизмы природных процессов определяют скачкообразные изменения направленности и темпов природных процессов и импульсы дальнейшего развития.

Список литературы

1. Специализированные массивы // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 06.08.2024).
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. 2014. [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.ru/data/total-precipitation/> (дата обращения: 06.08.2024).
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России // Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/temperature/> (дата обращения: 06.08.2024).
4. Кочуров Б.И., Капитальчук И.П., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П., Гоцев Д.В. Анализ фоновых метеорологических полей в целях геоэкологического изучения территории // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7, № 2. С. 279–290. URL: <https://sn-geography.cfuv.ru/> (дата обращения: 06.08.2024).
5. Чернятина Г.Н., Межова Л.А., Луговской А.М. Оценка миграционных и депонирующих процессов природных сред южных районов воронежской области // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22272> (дата обращения: 20.01.2025).
6. Кожанов А.А. Геоэкологическая оценка влияния топливно-энергетической системы Воронежской области на окружающую среду: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Калуга, 2006. 23 с.
7. Дмитриева В.А., Сушков А.И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 2. С. 56–63. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/11302/1> 1408 (дата обращения: 20.01.2025). DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63.
8. Гарькуша Д.Н., Великохатская В.В., Красюк А.С. Многолетние изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в городе Воронеж // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 9 (147). URL: <https://research-journal.org/archive/9-147-2024-september/10.60797/IRJ.2024.147.91> (дата обращения: 12.11.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.147.91.
9. Луговской А.М. Мониторинг природной среды методом индикации сосны обыкновенной в условиях техногенеза Русской равнины: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Волгоград, 2004. 37 с.
10. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 6. С. 20–28. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/591> (дата обращения: 20.01.2025).
11. Кононова Н.К., Хмелевская Л.В. Многолетние колебания дат начала и продолжительности циркуляционных сезонов внетропических широт Северного полушария // Известия РАН. Сер. География. 2011. № 3. С. 43–62. URL: <https://atmospheric-circulation.ru/wpcontent/uploads/2011/12/Kononova.pdf> (дата обращения: 20.01.2025).
12. Кононова Н.К. Флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в XX–XXI вв. // Сложные системы. 2016. № 1 (18). С. 22–37. URL: <https://thecomplexsystems.ru/archive> (дата обращения: 20.01.2025).
13. Задорожная Т.Н., Закусилов В.П., Акимов Л.М. Особенности влияния внешних факторов на формирование циркуляционного режима Северного полушария // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9. С. 40–48. URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=264> (дата обращения: 23.01.2025).
14. Скрыбин М.П. Дубовые леса и вековые циклы в природных условиях // Восстановление и повышение производительности дубрав лесостепи: научные записки Воронежского Лесотехнического ин-та. Воронеж, 1960. Т. 20. С. 211–217.

СТАТЬИ

УДК 550.81

DOI 10.17513/use.38372

ВЛИЯНИЕ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА ЭСХАЛЯЦИЮ РАДОНА

Апкин Р.Н.

*ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
Казань, e-mail: renat.apkin@gmail.com*

Геоморфологическое строение на любом участке поверхности Земли теснейшим образом связано с геологической структурой территории и оказывает решающее влияние на эсхалацию радона. В статье рассматриваются особенности эсхалации радона на экспериментально выбранной территории естественного развития экзогенных процессов как важного показателя, служащего для контроля дегазации в платформенных областях. Целью работы явилось установление влияния геоморфологического строения выбранной территории на эсхалацию радона. Для проверки этого утверждения первоначально были проведены полевые исследования на участке около Казани, на котором, помимо овражной эрозии, повторялись бы суффозионно-карстовые понижения. В период полевых работ (сентябрь-октябрь 2024 г.) с помощью радиометра RTM-1866 Geo Station проведены замеры объемной активности радона на контрольных точках в приповерхностном почвенном воздухе, также учитывались почвенный состав и особенности растительного покрова данной территории. Результаты полевых исследований в процессе камеральной обработки были представлены на картографическом материале и в соответствующих таблицах. Они доказывают, что концентрация подпочвенного радона в суффозионно-карстовых просадках принимает более высокие значения, чем в формах эрозийного процесса и на плакоре. Данные, полученные в ходе исследований, служат информацией для крупномасштабного картирования и установления природных закономерностей выхода радона из геологической среды, а также выявления зон повышенного радонового риска для населения.

Ключевые слова: радон, эсхалация, суффозионно-карстовые процессы, контроль, безопасность

INFLUENCE OF RELIEF FORMS ON RADON EXHALATION

Apkin R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: renat.apkin@gmail.com

The geomorphological configuration of any part of the Earth's surface is closely related to the geological structure of the territory and has a decisive influence on radon exhalation. The article considers the features of radon exhalation in an experimentally selected area of natural development of exogenous processes – as an important indicator serving to control degassing in platform areas. The aim of the work was to establish the influence of the geomorphological structure of the selected territory on radon exhalation. To test this statement, field studies were initially carried out in an area near Kazan, where, in addition to ravine erosion, suffusion-karst depressions would be repeated. During the field work (September-October 2024), using the RTM-1866 Geo Station radiometer, measurements of radon volume activity were taken at control points in the near-surface soil air; the soil composition and features of the vegetation cover of this territory were also taken into account. The results of field studies during processing were presented on cartographic material and in the corresponding tables, which prove that the concentration of subsoil radon in suffusion-karst subsidences takes on higher values than in the forms of the erosion process and on the plakor. The data obtained during the studies serve as information for large-scale mapping and establishing natural patterns of radon release from the geological environment, as well as identifying areas of increased radon risk for the population.

Keywords: radon, exhalation, suffusion-karst processes, control, safety

Введение

В настоящее время внимание многих ученых, занимающихся естественными науками, сосредоточено на установлении природных условий (с учетом обстоятельств антропогенного вмешательства) выделения радона из геологической среды, а также на разработке методологии крупномасштабного картирования зон повышенной эсхалации радона [1]. Эта деятельность также направлена на выявление зон повышенного радонового риска для населения с целью проведения мер по снижению доз облучения радоном в помещениях [2], что необходимо, поскольку масштабные исследования последних двух

десятилетий позволили достоверно установить линейный рост заболеваемости раком легкого с увеличением концентрации радона и продуктов его распада в жилых и общественных помещениях [3].

Установление влияния форм рельефа на эсхалацию радона на примере экспериментально определенной территории в окрестностях г. Казани явилось целью настоящей статьи.

Для достижения этой цели предполагалось решение ряда задач:

– мониторинг концентрации радона в подпочвенном воздухе в районе развития суффозионно-карстовых процессов;

– углубление существующих знаний о взаимосвязи развития экзогенных процессов и концентрации подпочвенного радона;
 – картирование результатов полевых измерений объемной активности радона в почвенном воздухе.

Изучение факторов, воздействующих на уровень фонового значения радона, имеет, таким образом, как теоретическую, так и практическую значимость.

Рассеивание радона-222 от глубины к поверхности почв связано с его физико-химическими свойствами. Образовавшись в материнских породах, этот инертный газ поднимается вверх через слои почвы, не вступая в химические взаимодействия с ее компонентами. Приближаясь к поверхности, газ частично растворяется в молекулах воды, присутствующих в почве, и частично адсорбируется частицами почвы различного гранулометрического состава. Достигая поверхности, радон-222 диффузно перемещается с атмосферным воздухом, но в силу своего большого атомного веса (в 7–8 раз тяжелее воздуха) он не поднимается в верхние слои атмосферы [4].

Данное исследование направлено на изучение факторов, управляющих динамикой

радона и уровнем его фонового значения. Среди главных факторов, влияющих на уровень фонового значения радона в почвенном воздухе, выделяются особенности геолого-геоморфологического строения территорий. Прежде всего, на проницаемость верхней части осадочного чехла оказывают влияние трещиноватость и процессы, которые способствуют ее образованию [5].

На территории Республики Татарстан суффозионно-карстовые процессы получили широкое распространение. В окрестностях г. Казани наблюдается развитие карста и провальных явлений, связанных с гипсоносными толщами сакмарского яруса перми. Неотектоническая и бэровская миграция глубоких врезов палеорусел Волги, Казанки, Камы и их притоков вскрывает в широких пределах верхние слои палеозоя в окрестностях Казани – до глубины 200–300 м, облегчая тем самым вертикальную миграцию радона из более глубоких горизонтов земной коры [6]. Влияние геолого-геоморфологических компонентов на «поведение» и выход радона на поверхность убедительно демонстрируется итоговыми данными проведенного автором исследования.



Рис. 1. Участок исследования на топографических картах различного масштаба [7] и на фрагменте снимка из геоинформационной системы Google Earth Pro

Цель исследования – определение воздействия особенностей геоморфологии на экспериментальной территории в окрестностях г. Казани на эскаляцию радона.

Материалы и методы исследования

Участок исследования находится к юго-востоку от Казани на расстоянии 14 км (по Оренбургскому тракту), между поселками Бол. Кабаны и Сокуры (рис. 1).

Его площадь составляет около 45 га. Ландшафт данной местности представляет собой слабоволнистую водораздельную равнину (плакор) с высотными отметками в интервале 100–120 м и является самой вы-

сокой частью рельефа между Волгой (Куйбышевским водохранилищем) и нижним течением реки Мёша.

В геолого-геоморфологическом отношении местность является озерно-аллювиальной равниной, отложения которой сформировались в неоген-четвертичное время в период существования Палео-Волги [8]. Четвертичные образования (IaE1) здесь представлены песками, суглинками и глинами, мощностью до 41 м (рис. 2). Под четвертичными отложениями лежат породы неогеновой системы мощностью до 38 м, которые, кроме песков и глин, включают прослой известняков [9].

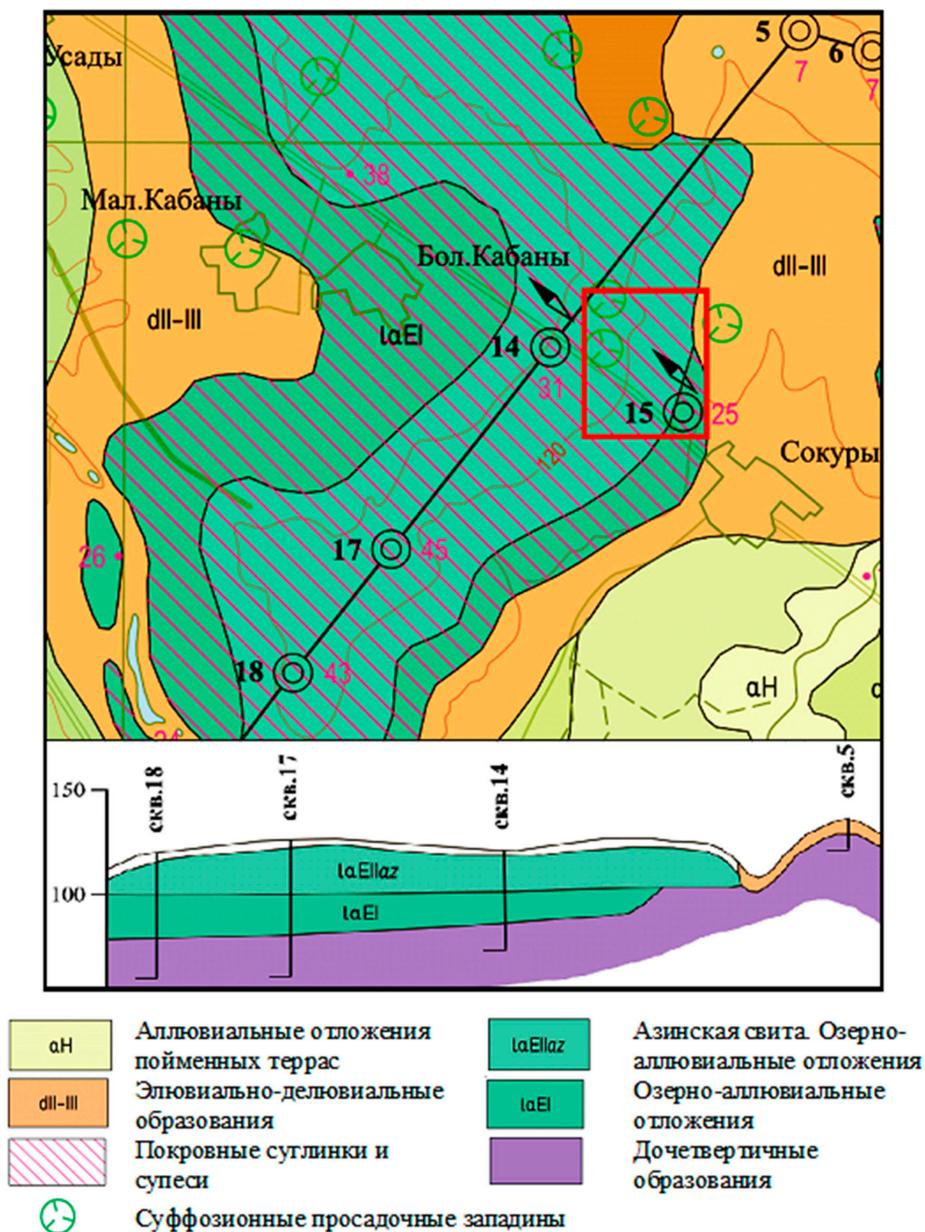


Рис. 2. Фрагмент карты и профиль четвертичных образований [9]



Рис. 3. Контрольные точки на территории исследования

Покровные суглинки и супеси в процессе почвообразования оказали влияние на физико-механические свойства почвенного покрова и грунтов исследуемой территории, от которых, в свою очередь, зависят интенсивность выхода радона и его величина.

При проведении полевых работ был использован радиометр RTM 1688-2 GeoStation производства немецкой фирмы SARAD, GmbH. Прибор имеет специальное устройство – зонд, который позволяет измерить величину радона в почвенном воздухе на заданной глубине [10]. Измерения проведены на контрольных точках, выбранных на различных элементах рельефа (суффозионная просадка, балка, овраг) (рис. 3). В результате получены значения объемной активности радона в почвенном воздухе на глубине 0,5 м в каждой точке.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенные данные полевых исследований приведены в таблице 1.

По метеорологическим данным видно, что за время наблюдений на контрольных точках в почве на глубине 0,5 м значения температур почвенного воздуха были в интервале 9–17°C, относительной влажности – 84–94%, атмосферное давление менялось в интервале 744–767 мм рт. ст. Существенной зависимости объемной активности радона от метеорологических факторов в данном случае не наблюдается.

При анализе данных с помощью программы Excel была выявлена зависимость полученных значений радона от положения в рельефе. По распределению полученных данных объемной активности радона от больших значений к меньшим видно, что высокие показатели относятся к контрольным точкам, расположенным в суффозионных просадках, что наглядно представлено в таблице 2. Просадки имеют овальные формы, их размеры варьируются в интервале 100–200 м, глубины в самых нижних точках равны около 1,5–2 м от поверхности плакора.

Таблица 1

Данные полевых исследований по контрольным точкам

№ точки	Объемная активность радона, Бк/м ³	Температура грунта, °С	Влажность грунта, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Положение в рельефе	Примечания
1	23 188	15	88	756	суффозионная просадка	кусты, древесной
2	17 311	17	92	755	плакор	поле
3	17 988	14	87	764	суффозионная просадка	кусты, древесной
4	12 520	17	89	754	плакор	поле
5	14 532	15	87	760	плакор	поле
6	7 475	12	92	759	балка	кусты, древесной
7	15 910	13	87	758	плакор	поле
8	17 714	13	89	759	суффозионная просадка	кусты, древесной
9	13 137	13	88	757	плакор	поле
10	21 592	12	92	755	суффозионная просадка	кусты, древесной
11	16 024	11	88	747	балка	кусты
12	13 489	12	94	746	плакор	поле
13	3 375	11	90	746	плакор	лесопосадка
14	16 997	10	87	764	плакор	лесопосадка
15	10 878	9	87	767	овраг	кусты
16	25 720	10	89	758	суффозионная просадка	кусты, древесной
17	21 303	9	84	763	суффозионная просадка	кусты, древесной
18	11 493	15	85	744	плакор	лесопосадка

Таблица 2

Зависимость эсхалиции радона от положения в рельефе

№ контрольной точки	Объемная активность радона, Бк/м ³	Положение в рельефе
16	25 720	суффозионная просадка
1	23 188	суффозионная просадка
10	21 592	суффозионная просадка
17	21 303	суффозионная просадка
3	17 988	суффозионная просадка
8	17 714	суффозионная просадка
2	17 311	плакор
14	16 997	плакор
11	16 024	балка
7	15 910	плакор
5	14 532	плакор
12	13 489	плакор
9	13 137	плакор
4	12 520	плакор
18	11 493	плакор
15	10 878	овраг
6	7 475	балка
13	3 375	плакор

Кроме суффозионных просядок, на участке исследования обнаружены эрозийные формы рельефа: балка и вторичный овраг. В комплексе они образуют единую отрицательную форму рельефа и на картах обозначены как начало Мавриного оврага. Балка по возрасту древнее, она покрыта древостоем и кустарниковой растительностью. Глубина ее в верхней части равна 1,5–2 м, а у начала (или вершины) оврага доходит до 4 м. Врез оврага в днище балки достаточно глубокий, равен примерно 2,5 м, а от поверхности плакора его глубина составляет больше 6 м.

По данным автора, несмотря на большие глубины, в днище этих форм рельефа уровень эсхалиции радона значительно ниже по сравнению со значениями в суффозионных просядках. Объемная активность радона в контрольных точках балки равна примерно 7,5 тыс. и 16 тыс. Бк/м³, а в точке, расположенной в тальвеге оврага, – около 11 тыс. Бк/м³; среднее значение радона в суффозионных просядках, несмотря на малые глубины, равно более 21 тыс. Бк/м³. Среднее значение объемной активности радона в почвенном воздухе на исследованном участке равно 15,6 тыс. Бк/м³, при этом на плакоре среднее значение составило около 13 тыс. Бк/м³.

Образованию суффозионных просядок способствуют нарушения глубоко залегающих пластов; это приводит к нарушению плотности грунта на поверхности рельефа и является, по мнению автора, причиной повышенной эсхалиции на рассмотренной территории.

Заклучение

При мониторинге радона на выбранном участке для объективной оценки эсхалиции газа измерения проведены примерно при одинаковых метеорологических условиях и в один климатический сезон.

При определении мест контрольных точек, с целью оценки роли геоморфологического строения территории, учитывались особенности и детали строения рельефа и почвенного состава.

Результаты исследования автора вновь продемонстрировали, что для обеспечения радоновой безопасности населения при выборе участков под жилищное строительство и (или) другое использование важно знать не только геологическое строение территории, но также характер и особенности форм рельефа, образовавшихся в результате экзо-

генных и эндогенных процессов, протекающих на этой территории.

В работе специальный акцент был сделан на геологических аспектах картирования радонового риска. Полученное в работе геоизображение может быть использовано при разработке методологии крупномасштабного картирования зон повышенной эсхалиции радона на платформенных областях Восточно-Европейской равнины.

Список литературы

1. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М., Нефедов Н.А., Остапчук Т.В., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. Уровни эсхалиции радона на западном склоне горы Бештау, Кавказские Минеральные Воды // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2018. № 5. С. 20–30. URL: <https://sciencejournals.ru/list-issues/geokol> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.1134/S0869780318040063.
2. Tollefsen T., Cinelli G., De Kort M. Special issue of the journal “Environmental Radioactivity”: Geogenic radiation and its potential use for developing a geogenic radon map – Preface // *J. Environ. Radioact.* 2017. № 172. P. 143–144. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC103953> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.11.008.
3. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В. Обобщение онкоэпидемиологических исследований связи рака легкого с радоном // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. № 59 (2). С. 92–96. URL: <https://www.journal-irioh.ru/jour/article/view/1299/1278> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.31089/1026-9428-2019-2-92-96.
4. Алимова Г.С., Токарева А.Ю., Уткина И.А., Самкова М.В. Распределение радона-222 в почвах поймы и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 12. С. 168–177. URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/issue/view/140> (дата обращения: 10.11.2024). DOI: 10.18799/24131830/2022/12.
5. Микляев П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дис. ... докт. г-м. наук. Москва, 2015. 307 с. URL: <https://www.disscat.com/content/nauchnye-osnovy-otsenki-potentsialnoi-radonopasnosti-platfornennykh-territorii> (дата обращения: 15.11.2024).
6. Ашкин Р.Н., Сонин Г.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на эсхалицию радона в грунтах на территории Казани и ее окрестностей // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 12. С. 178–184. DOI: 10.17513/use.38189.
7. RETROMAP. Карта России 1:25K 2001 года [Электронный ресурс]. URL: https://retromap.ru/1420013_z15_55.633216,49.3717 (дата обращения: 25.10.2024).
8. Петрова Е.В. Перестройка речной сети и направленность смещения водоразделов в пределах территории Республики Татарстан в четвертичное время // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2019. Т. 29, № 2. С. 252–257. URL: <https://journals.udsu.ru/biology/article/view/4441> (дата обращения: 25.11.2024). DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-2-252-257.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Карта четвертичных образований. Средневолжская серия / Геологическая Библиотека [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geokniga.org/labels/22324> (дата обращения: 20.10.2024).
10. SARAD GmbH. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sarad.de/index.php> (дата обращения: 15.11.2024).

УДК 911.9(470.57-25)
DOI 10.17513/use.38373

АНТРОПОГЕННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УФЫ)

Хасанова Г.Ф.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,
Уфа, e-mail: galimakhasanova@gmail.com*

В последнее столетие изменения геологической среды урбанизированных территорий происходят с высокой скоростью, особенно в крупнейших городах. Целью данной работы является изучение техногенных форм рельефа города, прогноз их развития. Исследования были выполнены методами морфометрическим, картографическим, сравнительным и геоинформационного анализа. На территории г. Уфы выделены следующие типы рельефа: структурно-денудационный, денудационно-аккумулятивный, эрозионно-аккумулятивный, техногенный. Техногенные формы рельефа сформированы на протяжении последнего столетия в связи с ростом численности населения, промышленного освоения территории. На основании картографирования территории составлена картосхема эколого-геоморфологического состояния территории города. Выделены области с очень высоким, высоким, средним и низким антропогенным воздействием на рельеф изучаемой территории. Очень высокое антропогенное воздействие характерно для территории «Уфимского полуострова», ранее других освоенной и густозаселенной части города. Высоким антропогенным воздействием характеризуются северная и северо-восточная части города, которые менее заселены, но отличаются высокой концентрацией промышленных предприятий. Средним антропогенным воздействием характеризуются новые освоенные территории, которые расположены в западной и юго-западной частях Уфы, имеющие меньшие концентрации населения, застроек и промышленных объектов. Низкими показателями антропогенного воздействия на рельеф отличается восток города, где застройки и промышленные предприятия носят локальный характер.

Ключевые слова: денудационный, денудационно-аккумулятивный, эрозионно-аккумулятивный, техногенный типы рельефа, урбанизированные территории, эколого-геоморфологическое состояние

ANTHROPOGENIC LANDFORMS OF URBANIZED AREAS (ON THE EXAMPLE OF UFA)

Khasanova G.F.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, e-mail: galimakhasanova@gmail.com

In the last century, changes in the geological environment of urbanized areas have been occurring at a high rate. These processes have been identified especially in the largest cities. The purpose of this work is to study the technogenic forms of the relief of the city, to predict their development. The studies were performed by methods of morphometric, cartographic, comparative and geographic information analysis. The following types of relief are distinguished on the territory of the city of Ufa: structural-denudation, denudation-accumulative, erosion-accumulative, technogenic. Technogenic landforms have been formed over the past century, due to the growing population and industrial development of the territory. Based on the mapping of the territory, a map of the ecological and geomorphological state of the city is compiled. Areas with very high, high, medium and low anthropogenic impact on the relief of the studied territory have been identified. A very high anthropogenic impact is characteristic of the territory of the «Ufa Peninsula», the most previously densely populated part of the city. The high anthropogenic impact corresponds to the northern and northeastern parts of the city, which is less populated, but has a high concentration of industrial enterprises. Medium anthropogenic impacts are characterized by new developed territories, which are located in the western and southwestern parts of Ufa, having a lower concentration of population, buildings and industrial facilities. Low indicators of anthropogenic impact on the relief are distinguished by the east of the city, where buildings and industrial enterprises are local in nature.

Keywords: denudation, denudation-accumulative, erosion-accumulative, technogenic types of relief, urbanized territories, ecological-geomorphological state

Введение

В последние десятилетия рост населения мира и усиленное заселение территорий с высокой степенью опасности, таких как поймы и склоны большой крутизны, привели к росту риска бедствий. Эта тенденция усугубляется несколькими факторами: уязвимостью построенных сооружений и инфраструктур, ограничениями в усилиях по смягчению последствий и потенциальным воздействием изменения климата.

Таким образом, взаимодействие между урбанизированными территориями и природными рисками становится все более сложным, создавая все более трудно решаемые проблемы в контексте сокращения удобных для освоения земель. Исследования природных рисков в геоморфологии городов сталкиваются с двумя основными проблемами. Первая заключается в прогнозировании экстремальных событий и разработке прогностических моделей, задача, которая

становится неопределенной из-за непредсказуемых последствий антропогенного изменения климата. Вторая проблема сосредоточена на реконструкции прошлых редко встречающихся событий и редких случаев, скудная документация которых, особенно в современных инструментальных записях, усложняет понимание.

Город Уфа входит в десятку крупнейших городов России по численности и занимает пятое место по площади и протяженности. Высокая концентрация населения, промышленных и гражданских объектов, развитость инфраструктуры порождают ряд экологических проблем, ухудшение среды обитания (воздуха, почв, воды, геологической среды). Специфика города усложняется наличием неблагоприятных инженерно-геологических условий территории, обусловленных формами рельефа, широким развитием карстовых и склоновых процессов, суффозии, подтопления и затопления, заболачивания, которые встречаются и в других агломерациях, таких как Москва, Казань, Пермь и др.

Цель исследования – изучение техногенных форм рельефа города, прогноза их развития.

Материалы и методы исследования

Для изучения техногенных форм рельефа г. Уфы были использованы методы морфометрический, картографический, сравнительный, геоинформационного анализа. Были проведены полевые обследования, анализ снимков высокого разрешения и картографических материалов.

Э.А. Лихачева выделяет следующие методы эколого-геоморфологического исследования урбанизированных территорий: а) морфометрический – путем характеристики рельефа с помощью карт и цифровых моделей местности; б) балансовый – позволяющий определить приход и расход вещества и энергии; в) сравнительный; г) аналоговый – используется аналогия свойств объектов, их структуры и отношения; д) моделирования – метод исследования сложных объектов, явлений и процессов путем их упрощенного имитирования (натурного, математического, логического) [1, с. 51–54].

В работе В.З. Макарова при картографировании техногенной нагрузки на городскую среду осуществляется картирование эколого-геохимическое, литогенной основы города, эколого-геоморфологическая оценка рельефа, гидрохимических условий, микроклиматического районирования, состоя-

ния почвенного покрова, ландшафтно-экологического состояния города [2, с. 65–96].

Города мира начали развиваться еще до фундаментальных исследований в области экологической геологии, поэтому проблемы отражаются в зарубежных работах. Так, для исследования антропогенных форм рельефа авторами представлена MAGUS (модель анализа геоморфологических городских систем), методологическая структура на основе ГИС, разработанная для анализа сложного взаимодействия между урбанизацией и природными ландшафтами [3, с. 1–20]. Исследование использует исторические документы, оцифрованные и геопривязанные в картографическом пространстве, для выявления взаимосвязей между естественными и антропогенными формами рельефа с римского периода до XX в. Ключевым нововведением MAGUS является интеграция многовременных маркеров (MTM) и объемной единицы застройки (VUB), что повышает точность анализа исторических данных.

Понятие «Техногенный (антропогенный) рельеф» трактуется как рельеф земной поверхности, образованный или видоизмененный деятельностью человека [4]. Эколого-геоморфологический район (ЭГР) – это территориальный комплекс эколого-геоморфологических обстановок, характеризующийся единством морфологических, морфоструктурных и морфоклиматических условий, регулирующих прямые и обратные связи в системе «природа – хозяйство – население» [5, с. 24].

Эколого-геоморфологическое районирование обосновывается на комплексном изучении изменения геологической среды под влиянием совокупности факторов, как природных, так и антропогенных.

Эколого-геоморфологическое картографирование – основной метод при решении экологических задач. Оценка эколого-геоморфологической обстановки г. Уфы производилась путем наложения карт в ГИС-среде (QGIS, SAGAGIS, SRTM-космоснимки). Применялись карты топографические (1980–2020 гг.) по принципу MAGUS, геоморфологические, плотность населения, плотность застроек гражданских и промышленных построек, автодорог в ГИС-среде.

Антропогенное воздействие на рельеф выражается двойственно – прямо или косвенно. Прямое воздействие оказывается путем механического, химического влияния на поверхностные и приповерхностные части земной коры. Косвенное антропогенное влияние формируется за счет изменения

естественных геологических условий: например, нарастание агрессивности сточных вод приводит к интенсификации карстовых, карстово-суффозионных и эрозионных процессов, изменению микрорельефа, в виде нарушения сплошности слоев горных пород – к образованию оползней.

Результаты исследования и их обсуждение

В геолого-тектоническом отношении территория города расположена на восточ-

ной окраине Русской платформы, где кристаллический фундамент перекрыт мощной (до 8 км) толщей осадочных пород палеозойского возраста. В верхней части осадочного чехла развиты пермские, неогеновые и четвертичные осадки.

На территории г. Уфы по генетическим признакам выделяются три типа рельефа [6, с. 248–253]:

- 1) денудационный;
- 2) денудационно-аккумулятивный;
- 3) эрозионно-аккумулятивный (рис. 1).

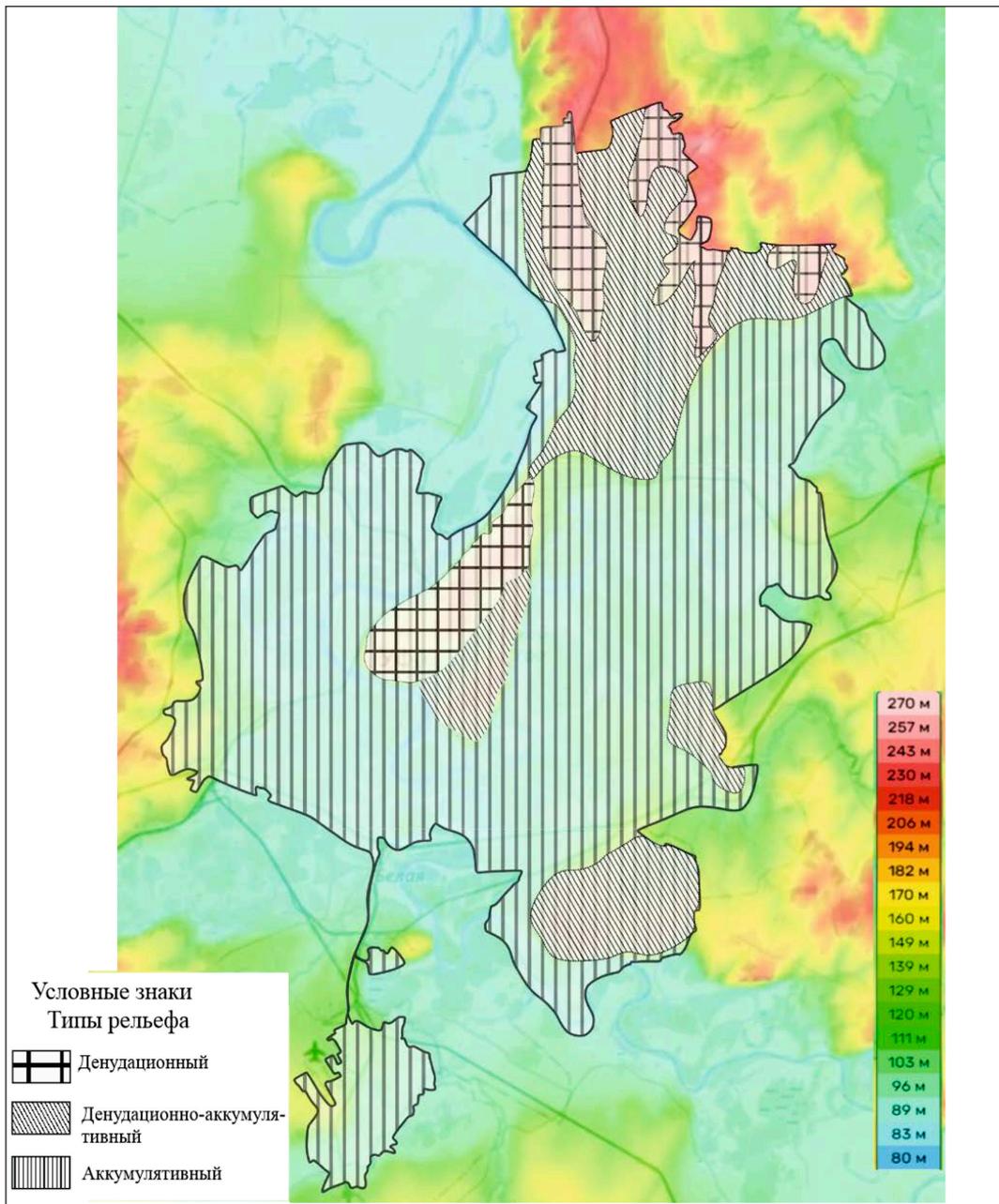


Рис. 1. Геоморфологическая карта г. Уфы
Источник: составлено автором

Денудационный тип рельефа – это водораздельное плато и склоны правобережья р. Белой по пермским терригенным породам (карбонаты, сульфаты), перекрытым четвертичными отложениями. Абсолютные отметки поверхности рельефа 160–270 м. Отдельные вершины водораздельных увалов и холмов (гор) прилегающей к «Уфимскому полуострову» части территории достигают 250 м, в северо-восточной части – 270 м. Рельеф грядово-всхолмленный, имеющий северо-восточное направление, переходящее постепенно в северо-западное. Холмы имеют округлую форму, выровненные процессами денудации, осложненные системами оврагов, суффозионно-карстовыми воронками.

Микрорельеф территории осложнен склоновыми и карстово-суффозионными процессами. Пораженность карстовыми формами достаточно высокая.

Развитие эрозионных процессов связано с большой крутизной склонов, резкой амплитудой высот (около 180 м), переходящих к речным террасам. Овражно-балочная сеть представляет рытвины и промоины глубиной до 0,5–1 м. Они особенно широко развиты на крутых склонах правобережья р. Белой.

Карстовые и карстово-суффозионные формы рельефа распространены практически на всей территории, которая сложена карбонатами и сульфатами. На территории г. Уфы развиты три класса карста: карбонатный, сульфидный, карбонатно-сульфатный. По степени защищенности сверху некарстующимися породами преобладают два подкласса – перекрытый (камский) в пределах долин р. Белой и Уфы и закрытый (русский) на междуречье. Наряду с закрытым на междуречье имеются участки перекрытого, покрывающего и голого карста [7, с. 81–90].

Наиболее интенсивно карстовые формы рельефа проявляются в его присклоновой части, с высокими градиентами потока.

Денудационно-аккумулятивный тип рельефа – это пологоволнистая равнина, сформировавшаяся на морских, озерных, аллювиальных отложениях кинельской свиты (акчагыл) и частично на породах уфимского яруса, перекрытых четвертичными породами. Она занимает водораздельные понижения и пологие склоны с абсолютными отметками 150–207 м (правобережье р. Белой и правобережье р. Уфы, по берегам р. Сутолки и на правом берегу р. Шугуровки). Прилегает к наиболее приподнятым участкам территории, занимает около 25 % общей площади.

Характеризуется полого-волнистым рельефом, переходящим крутыми обрывами к речным долинам. Микрорельеф осложнен склоновыми, карстовыми и суффозионными формами рельефа. На пониженных участках, сложенных водоупорными породами, наблюдается заболачивание.

Эрозионно-аккумулятивный тип рельефа распространен на аллювиальных террасированных долинах р. Белой и Уфы, сложенных комплексом четвертичных аллювиальных озерных и делювиальных отложений по неогеновым и нижнепермским породам. Занимает низкие гипсометрические уровни – 80–88 м над уровнем моря.

Наибольшую часть территории Уфы занимает данный тип рельефа, около 60 % территории. На исследуемой территории распространены карстовые формы рельефа, аккумулятивные – в виде конусов выноса, аллювиальных и делювиальных отложений. Широко развиты речные террасы, на меандрирующих участках рек – озера-старицы и болота.

Техногенный тип рельефа является неотъемлемой частью крупных городов мира, к которым в том числе относится г. Уфа. Образование техногенных форм рельефа связано с антропогенными, геологическими и геоморфологическими процессами в совокупности. Основными механизмами образования техногенных форм рельефа являются:

1. Механическое воздействие – прямое, вызывающее за короткий промежуток времени значительные изменения геолого-геоморфологических условий и микрорельефа территорий (земляные работы, перемещение грунта при строительстве зданий и сооружений, добыча полезных ископаемых (ПИС)). При механическом воздействии образуются денудационные и аккумулятивные формы рельефа.

2. Искусственно вызванные геологические процессы – это процессы, усиливающиеся в результате деятельности человека, иногда являющиеся не характерными для данной территории. Например, строительство на неустойчивых склонах может привести к образованию обвалов или оползней. Они отличаются от естественных геологических процессов тем, что их основным движущим фактором является человеческая деятельность, а не природные силы.

В результате анализа определено, что формирование техногенных форм рельефа напрямую зависит от таких факторов, как плотность застройки, сложность инженерных сооружений, плотность населения и условия самой поверхности. Учитывая

данные показатели, можно выделить четыре области распространения техногенных форм, имеющие присущие им особенности: 1) области с очень высоким антропогенным воздействием на рельеф; 2) области высокого антропогенного воздействия на рельеф; 3) области среднего воздействия на рельеф; 4) области низкого воздействия на рельеф.

Области с очень высоким антропогенным воздействием на рельеф характерны для территории «Уфимского полуострова» (рис. 2). На данном участке сосредоточена большая часть населения, его наибольшая плотность (более 10 тыс. чел/км²) и наибольшая плотность застроек. Высокая освоенность обусловлена особенностями истории развития города, в пределах которого

располагалась Уфимская крепость, откуда шло расширение мегаполиса. Мощность техногенных отложений в пределах Уфимской крепости достигает 2–4 м. Прямое антропогенное воздействие началось еще в IV в., о чем свидетельствуют мощные культурные слои [8, с. 45–51].

Высокое антропогенное воздействие началось в XX в. в связи с ростом населения города, развитием техники и технологий строительства, когда осваиваться начали участки со сложными геоморфологическими условиями [9, с. 229–233].

Антропогенные формы рельефа выражены следующими чертами:

1) мощными толщами техногенных отложений (+2 м – +4 м);

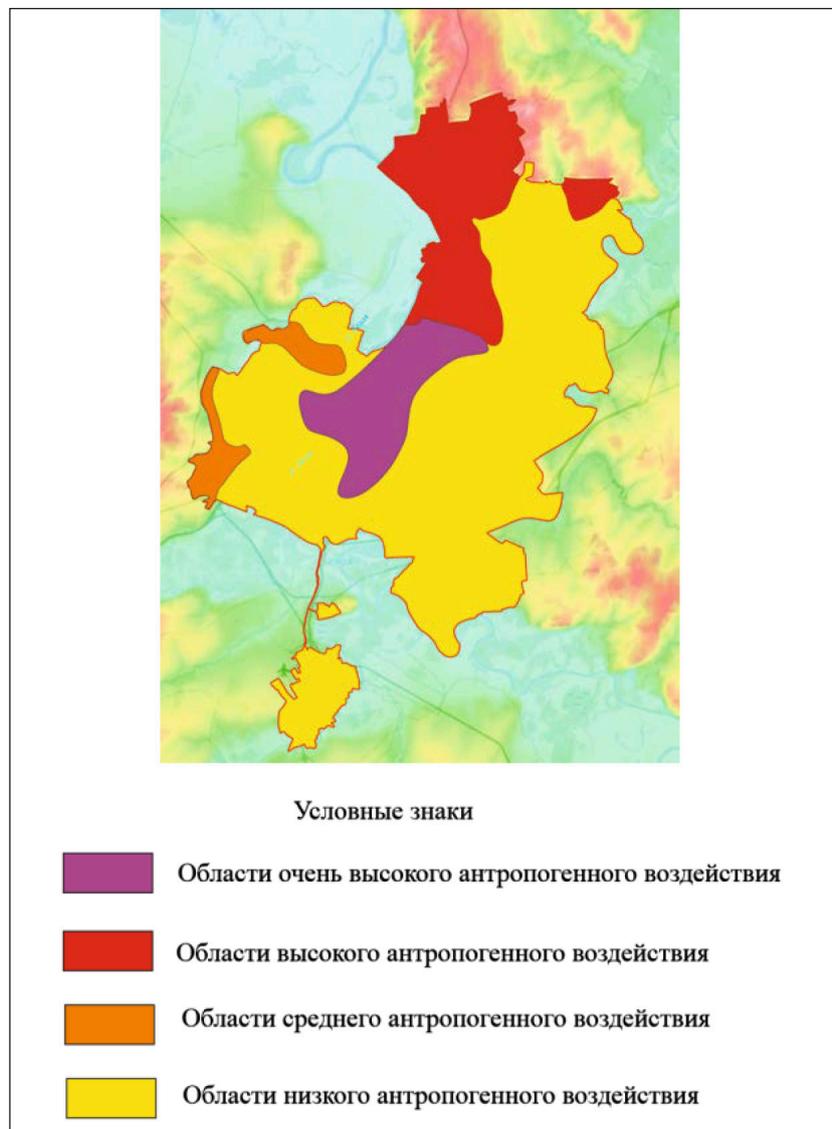


Рис. 2. Эколого-геоморфологические области по степени антропогенного воздействия на рельеф
 Источник: составлено автором

2) образованием областей денудации в процессе строительства зданий на крутых склонах (-0,5 м – -2 м);

3) образованием областей аккумуляции, засыпные отложения, перемещенные с мест естественного залегания, представлены погребенными оврагами, ручьями (+2 м – +4 м);

4) изменениями русел малых рек (например, засыпка русла Сутолоки, проложение проспекта Салавата Юлаева) (+5 м – +10 м), гидрологических условий территории;

5) изменениями физических свойств грунтов (уплотнение, цементация, просадка), из-за высокой степени закарстованности территории, чрезмерно высокого давления ежегодно фиксируются десятки новых провальных явлений.

Вторая область с высокой антропогенной нагрузкой расположена в северной части города, соответствующая эрозионно-аккумулятивному типу рельефа. Данная часть города имеет более низкие показатели плотности населения (5 тыс. и более чел/км²) и более низкие показатели застроек, но высокую концентрацию промышленных предприятий.

На данной территории выделены следующие техногенные типы рельефа:

1) образование областей денудации, в районах перехода к крутым склонам, разрезка склонов для развития железных дорог (до -5 м);

2) активизация склоновых процессов (эрозионных) в местах вырубки леса;

3) высокие темпы развития техногенных грунтов под влиянием нефтеперерабатывающих и нефтехимических, деревоперерабатывающих предприятий, полигонов по хранению отходов.

Третья область со средней антропогенной нагрузкой занимает отдельные микрорайоны г. Уфы, представляющие собой разрозненные территории в западной части города, соответствующие эрозионно-аккумулятивному типу рельефа. Характеризуется сравнительно низкими показателями плотности населения (около 2 тыс. чел/км²) и застроек.

Антропогенное воздействие на рельеф имеет следующие черты:

1) образование областей аккумуляции, за счет низких гипсометрических уровней создаются насыпи для строительных площадок (+2 м – +5 м);

2) изменение русел рек и их засыпка, осушение заболоченных территорий и, как следствие, изменение гидрологических условий территории (+2 м – +5 м);

3) изменение гидрологических и гидрогеологических условий приводит к учащению просадочных явлений, образованию карстово-суффозионных воронок.

Четвертая область (с низкими показателями антропогенной нагрузки) характеризуется самыми низкими показателями плотности населения (менее 2 тыс. чел/км²) и плотности застроек, локальным развитием техногенных форм рельефа.

Выражаются техногенные формы в следующем:

1) образование областей аккумуляции в районах точечных застроек;

2) ухудшение гидрологических условий, которые приводят к затоплению и заболачиванию;

3) активизация карстово-суффозионных процессов.

Заключение

Город Уфа располагается на восточной окраине Русской платформы, где кристаллический фундамент перекрыт мощной (до 8 км) толщей осадочных пород палеозойского возраста. Рельеф города имеет характеристики от слабо расчлененного до сильно расчлененного, амплитуда высот достигает 180 м. В условиях неоднородности рельефа при освоении города происходят прямо противоположные процессы антропогенного освоения: образование областей денудации в процессе строительства зданий на крутых склонах (-0,5 м – -2 м), областей аккумуляции, засыпные отложения, перемещенные с мест естественного залегания (+2 м – +4 м), выполаживание участков с крутыми склонами. В совокупности эти процессы приводят к образованию техногенных форм рельефа и накоплению техногенных отложений. Процессы техногенной трансформации геологической среды протекают с разной интенсивностью, для определения которой было проведено эколого-геоморфологическое районирование территории. По результатам исследования выделены четыре эколого-геоморфологические области по степени воздействия человека на рельеф. Распространение техногенных форм рельефа в г. Уфе крайне неравномерное: около 40 % занимают площади с очень высоким и высоким антропогенным воздействием, менее 10 % – со средним влиянием человека на рельеф, около 50 % – низкое. Это связано с неравномерностью освоения и развития самой городской среды. В каждой области прослеживается ряд последствий,

которые ухудшают состояние геологической среды. При дальнейшем развитии и планировании урбанизированных территорий необходимо составлять эколого-геоморфологический прогноз для устранения и минимизации этих последствий.

Список литературы

1. Лихачева Э.А., Локшин Г.П., Просунцова Н.С., Тимофеев Д.А. Эколого-геоморфологическая оценка территории г. Москвы // Геоморфология и палеогеография. 2000. № 1. С. 48-55.
2. Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. М.: Научный мир, 2002. 196 с.
3. Bernardi A., Licata M., Seitone F., Fubelli G. MAGUS (Model for the Analysis of Geomorphological Urban Systems): From Conception to Validation on the Historic City Center of Turin (Italy) // Land. 2024. Vol. 13. P. 1851. DOI: 10.3390/land13111851.
4. Тимофеев Д.А. Антропогенный рельеф // Большая российская энциклопедия. [Электронная версия]. 2016.

URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/702272> (дата обращения: 12.09.2024).

5. Новаковский Б.А., Симонов Ю.Г., Тульская Н.И. Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области. М.: Научный мир, 2005. 72 с.
6. Барышников В.И. О геодинамике Уфимского «полуострова» // Матер. ГС НС РАН, «Сергеевские чтения». М.: Изд-во РУДН, 2016. Вып. 18. С. 248–253.
7. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г., Смирнов А.И. Распространение карста на территории Башкортостана и его значение для практики // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. № 4 (84). С. 81–90.
8. Ахатов А.Т., Бахшиев И.И., Камалеев Э.В., Колонских А.Г., Тузбеков А.И. Археология Нового времени и проблемы изучения городского культурного слоя Уфы (материалы исследований ИЭИ УНЦ РАН 2012–2013 годов) // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 6 (361). С. 45–51.
9. Хасанова Г.Ф. Применение индикаторов и индексов в моделировании процессов трансформации природных комплексов (на примере среднегорий Южного Урала) // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 229–233. DOI: 10.17513/use.37976.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 622.7

DOI 10.17513/use.38374

**О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ
НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ МЕДНЫХ РУД****Лушина Е.А., Александрова Т.Н.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Санкт-Петербург, e-mail: lushina_ea@mail.ru, Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru*

Оборотное водоснабжение является важным аспектом в процессе переработки сырья флотационным методом. Несмотря на экономические и экологические преимущества, при повторном использовании воды происходит усложнение ее ионного состава, что может повлиять на результат процесса флотации. Целью исследования является анализ научно-технической литературы и систематизация данных о факторах, формирующих ионный состав жидкой фазы пульпы при флотации медьсодержащих руд, и оценка их влияния на технологические показатели обогащения. В исследовании проведен анализ более 100 научно-технических источников, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также опубликованных в ведущих специализированных изданиях по горному делу за последние десять лет, 40 из которых отобраны для более глубокой проработки. В работе рассмотрено влияние ионов кальция, магния и меди, а также хлоридсодержащих и сульфоксидных солей на характеристики жидкой фазы пульпы при флотации медных руд. В результате теоретических исследований установлены источники упомянутых ионов в жидкой фазе пульпы и определены закономерности их влияния. Выявлено, что ионы кальция и магния негативно влияют на процесс образования пены и снижают скорость кинетики флотации медных минералов. Наличие хлоридов калия и натрия в воде способно положительно влиять на процесс флотации халькопирита, способствуя образованию устойчивого адсорбционного слоя собирателя на поверхности минерала. Окисление поверхности минералов под воздействием антропогенных факторов и наличие водорастворимых минералов меди обуславливает присутствие сульфат-ионов и катионов меди в воде. Ввиду нарастающих требований по рациональному использованию природных ресурсов актуальным направлением является создание регламентированных требований к химическому составу оборотных вод и внедрение этапа оценки влияния ионного состава пульпы при разработке реагентных режимов флотации.

Ключевые слова: флотация, медные руды, оборотная вода, ионы примеси, жесткость воды, поверхностное натяжение

**INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE LIQUID PHASE
ON THE FLOTATION PROCESS OF COPPER ORE****Lushina E.A., Aleksandrova T.N.***Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg,
e-mail: lushina_ea@mail.ru, Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru*

Water recycling is an important aspect in the flotation processing of raw materials. Despite the economic and environmental benefits in the reuse of water there is a complication of its ionic composition, which can affect the result of the flotation process. The purpose of the study is to analyze scientific and technical literature and systematization of data on the factors that form the ionic composition of the liquid phase of the pulp during flotation of copper-bearing ores and assess their impact on the technological performance of beneficiation. The study analyzes more than 100 scientific and technical sources indexed in the international databases Scopus and Web of Science, as well as published in leading specialized mining publications over the past ten years, 40 of which have been selected for deeper study. The paper considers the influence of calcium, magnesium and copper ions, as well as chloride and sulfide salts on the characteristics of the liquid phase of the pulp during flotation of copper ores. As a result of theoretical researches the sources of the mentioned ions in the liquid phase of pulp are established and the regularities of their influence are determined. It is revealed that calcium and magnesium negatively affect the process of froth formation and reduce the rate of flotation kinetics of copper minerals. The presence of potassium and sodium chloride in water can positively influence the flotation process of chalcopyrite, contributing to the formation of a stable adsorption layer of the collector on the mineral surface. Oxidation of the mineral surface under the influence of anthropogenic factors and the presence of water-soluble minerals. In view of the increasing requirements for the rational use of natural resources, the creation of regulated requirements for the chemical composition of recycled water and the introduction of the stage of assessing the impact of the ionic composition of the slurry in the development of reagent modes of flotation is an important direction.

Keywords: flotation, copper ores, recycled water, impurity ions, water hardness, surface tension

Введение

Согласно прогнозам аналитиков, уровень прироста медных запасов с каждым годом снижается и в долгосрочном аспекте Россия может столкнуться с дефицитом медных ресурсов [1]. Ввиду истощения минерально-сырьевой базы в переработку во-

влекается все больше руд с низким содержанием меди, дальнейшее обогащение которых осложнено присутствием в большом количестве окисленных форм меди, шламов, сростков меди с породообразующими минералами [2]. Для получения медных концентратов из сырья с низким содержа-

нием меди применение традиционных схем обогащения затруднено в связи с непостоянством минералогического состава руды, в том числе каолинизацией и серитизацией вмещающих пород, низкой вкрапленностью и различием флотационных свойств сульфидов меди, поэтому разработка технологии обогащения потребует более глубокого изучения и комплексирования физико-химических факторов [3]. Результат флотационного обогащения во многом зависит от химических реакций, происходящих на всех поверхностях раздела фаз (жидкость – газ, твердое – газ и твердое – жидкость). Изучение факторов, определяющих формирование ионного состава жидкой фазы флотационной пульпы, является актуальным направлением, так как ее состав определяет взаимодействие флотационных реагентов с минеральной поверхностью. Формирование ионного состава жидкой фазы пульпы происходит в основном за счет:

- ионов, выщелачивающихся в воду с поверхности минералов;
- ионов, которые являются примесями в технической и оборотной воде;
- ионов – остатков реагентов, добавляемых на всех этапах обогащения [4; 5].

С целью снижения потребления свежей воды предприятия используют замкнутый водооборот, однако усложнение ионного состава жидкой фазы ввиду накопления тонкодисперсной взвеси, остатков флотореагентов, растворенных ионов солей и тяжелых металлов может привести к снижению контрастности флотационных свойств минералов, а также эффективности процесса флотации. Основным источником оборотной воды обогатительных фабрик является хвостохранилище, которое выполняет роль очистного сооружения. Химический состав оборотной воды может повлиять на флотуемость минералов, например вызвать механизмы активации минералов пустой породы, когда это нежелательно, или ухудшить процесс пенообразования и нарушить селективность процесса флотации [6; 7].

Для снижения концентрации нежелательных ионов, например ионов солей жесткости, могут применяться технологии кондиционирования, что не всегда вполне обоснованно ввиду высоких капитальных и эксплуатационных затрат [5], а также потери растворенных в воде ионов ценных компонентов, например, если медные минералы в руде представлены водорастворимыми формами и склонны к ошламование, вследствие чего разработка технологически

обоснованных требований к оборотным водам для конкретных предприятий должна учитывать закономерности влияния ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические процессы переработки [8-10].

Таким образом, **целью данной работы** является анализ научно-технической литературы и систематизация данных о факторах, формирующих ионный состав жидкой фазы пульпы при флотации медьсодержащих руд, и оценка их влияния на технологические показатели обогащения.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования был проведен анализ русскоязычной и англоязычной научно-технической литературы по теме обогащения полезных ископаемых за последние 10 лет. В результате работы проанализированы более 100 научно-технических источников, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также опубликованных в ведущих специализированных изданиях в области горного дела. Для более глубокого анализа было отобрано 40 наиболее релевантных и авторитетных источников, которые послужили основой для формирования выводов и рекомендаций, представленных в данном исследовании.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные ионы в водной фазе пульпы

Поверхность минералов во флотационной пульпе и жидкая фаза находятся в динамическом состоянии за счет непрерывно протекающих химических реакций под воздействием добавляемых реагентов, турбулентности потока пульпы в камере флотомашин, воздуха, температуры и т.д. [11]. О фактическом ионном составе флотационной пульпы можно судить по прямым потенциметрическим измерениям пульпы или водной вытяжки [12], однако этот процесс в подавляющем большинстве обогатительных фабрик не является фактором оценки технологического процесса и не применяется из-за его сложности и дороговизны.

Проводимый в начале технологических исследований анализ водной вытяжки позволяет обнаружить ионы, свободно переходящие в водную фазу, но их концентрация в различных точках процесса флотации непостоянна. По результатам химического анализа водной вытяжки медьсодержащих руд зачастую отмечается высокое содер-

жание ионов кальция, магния, хлоридов натрия и калия, сульфоксидных анионов, а также катионов тяжелых металлов, в число которых входит медь [13; 14]. Высокое содержание активного кислорода в оборотной воде, а также повышенная концентрация ионов восстановителей (H^+) могут привести к значительному увеличению скорости окисления сульфидных минералов [15].

Ионы солей жесткости

Ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} обуславливают жесткость воды, что вызывает ухудшение работы пенообразователей, являющихся поверхностно-активными веществами, за счет образования нерастворимых солей жесткости ($CaCO_3$, $MgCO_3$), препятствующих снижению поверхностного натяжения воды на границе раздела фаз жидкость – газ, тем самым снижая качество пенного слоя. Более того, данные соли снижают скорость флотации, например, в работе [16] установлено, что с повышением жесткости воды в процессе флотации снижается извлечение быстрофлотируемых фракций меди. Наличие высокорастворимых карбонатов и сульфатов способствует ускорению перехода ионов с поверхности минералов в раствор [17], а также повышению уровня pH, что может оказать негативное влияние на дальнейшую селективность операций флотации [18].

Свободные ионы меди

Наличие ионов меди в оборотной воде обусловлено тем, что нижних стоках хвостохранилищ происходит интенсивное выщелачивание Cu^{2+} в фильтрат из твердой фазы вследствие изменения уровня pH, при котором термодинамически возможно растворение окисленных соединений меди. Интенсифицирующим фактором в данном случае является проникающий в объем кислород, находящийся в атмосферном воздухе, а также природные воды, включающие атмосферные осадки и подземные речные воды [19]. Дополнительное влияние на выделение свободных катионов меди оказывает постепенное снижение уровня pH пульпы до 5-7, что приводит к растворению солеобразных минералов. Наличие ионов меди в жидкой фазе пульпы негативно отражается на качестве медного концентрата, например если в руде присутствует пирит, активирующийся катионами меди [20], а кроме того, к повышенному расходу флотационных реагентов [13]. Согласно литературным данным [21], повышенная концентрация Cu^{2+} в растворе пропорциональ-

на образованию гидроксида меди, снижающего эффективность адсорбции собирателя на поверхности минерала.

Сульфоксидные анионы

Наличие в перерабатываемом сырье сульфатов меди, таких как халькантит ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), халькокианит ($CuSO_4$), бонатит ($CuSO_4 \cdot 3H_2O$), бутит ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$), является индикатором значительного содержания сульфоксидных анионов в жидкой фазе пульпы. Характерной особенностью лежалых руд является высокое содержание кристаллических сульфатов меди, образующихся в результате выветривания [22]. Сульфат-ион является конечной формой окисления всех серосодержащих анионов, однако при pH 4-6 наибольшую устойчивость имеют бисульфит-ионы, при pH 6-7 ионы SO_3^{2-} , при pH 8-10 сульфид и тиосульфат анион. Также сульфат, соединяясь с катионами кальция (источником которых может быть известь, добавляемая для повышения щелочности воды), может снизить извлечение халькопирита. В работе [23] значительное снижение флотации халькопирита наблюдалось только при повышенных содержаниях $CaSO_4$, а также подчеркивается необходимость обработки вод с высоким содержанием сульфатов (>1500 мг/л).

Хлорид-ионы

Большое количество исследований, посвященных флотации меди в морской и соленой воде (термины seawater и saline переводятся как морская и соленая вода соответственно, различие в том, что морская вода содержит на порядок больше хлорида натрия, чем соленая), выполнено учеными из Китая, Австралии, Чили [23]. Содержание хлоридов натрия и калия характерно для оборотных вод, но регламентированных требований на их предельно допустимую концентрацию пока нет ввиду того, что применение соленой воды в качестве оборотной на обогатительных фабриках на данный момент не актуально в России.

В работе [24] были проведены опыты флотации монофракций халькопирита при наличии в воде хлоридов кальция, магния, натрия и калия, при этом отмечено положительное влияние NaCl и KCl на извлечение полезного компонента в концентрат, а также ускорение кинетики флотации. Предполагается, что катионы натрия и калия образуют на поверхности халькопирита стабильный гидратационный слой за счет сжатия двойного электрического слоя.

Сводная таблица влияния ионов в жидкой фазе пульпы при флотации медьсодержащих руд

Ион	Источники	Влияние
Ca ²⁺ Mg ²⁺	Естественные: подземные воды с высокой минерализацией	Ухудшение пенообразования Снижение скорости флотации медных минералов Образование гидрофильных пленок на поверхности минералов Ускорение растворения поверхности минералов
Na ⁺ K ⁺ Cl ⁻	Искусственные: обратная вода	Ускорение кинетики флотации халькопирита Усиление пенообразования (при избытке – нарушение селективности) и стабильности пенного слоя
SO ₄ ²⁻	Окисление минеральной поверхности под действием антропогенных факторов	Образование малорастворимых солей с кальцием на поверхности медных минералов, снижающих адсорбцию ксантоганата
Cu ²⁺	Повышенное содержание водорастворимых минералов меди	Повышенная концентрация ухудшает адсорбцию собирателя и влечет перерасход реагентов

При этом в опытах флотации халькопирита с добавлением хлоридов кальция и магния отмечено, что CaCl₂ увеличивает значение дзета-потенциала и, следовательно, флотирруемость халькопирита. Несмотря на сходство свойств хлорида кальция и магния, в случае добавления MgCl₂ механизм снижения гидрофобности связан с адсорбцией осадков Mg(OH)₂ на поверхности минерала [25].

Помимо этого, присутствие NaCl может привести к значительному снижению значения дзета-потенциала (уменьшение поверхностного заряда мицелл), что улучшит пенообразование и стабильность пенного слоя за счет уменьшения размера пузырьков, а, следовательно, усилению межфазной пленки пузырька, что подтверждается в исследовании [26].

В присутствии электролитов происходит сжатие двойного электрического слоя на поверхности минерала, снижается энергетический барьер, что увеличивает вероятность столкновения минеральной частицы и пузырька, поскольку электростатическое воздействие уменьшается. Однако это может негативно повлиять на селективность флотации из-за высокой степени агрегации частиц [27; 28].

Таким образом, механизм положительного действия хлоридсодержащих солей в воде при флотации сводится к улучшению пенообразования, изменению заряда поверхности минералов и усилению строения межфазных пленок пузырьков [29; 30].

В таблице приведены результаты анализа научных исследований по оценке влияния неорганических ионов на процесс флотационного обогащения медьсодержащих руд.

Влияние ионов на поверхностное натяжение границы раздела фаз жидкость – газ

Сложность процесса флотации обусловлена одновременным взаимодействием жидкой, твердой и газообразной фаз. Поверхностная энергия на границе раздела фаз жидкость – газ и структура поверхностного слоя молекул изменяется в зависимости от химического состава воды [30]. Например, в работе [31] была предложена классификация ионов на структурообразующие и нарушающие структуру ионы. К первой группе относятся ионы натрия и фтора, так как обладают высокой плотностью поверхностного заряда и способны удерживать вокруг себя молекулы воды. К нарушающим структуру ионам относят слабогидратированные ионы (Cs⁺, I⁻).

Значение поверхностного натяжения на границе фаз жидкость – газ является ключевым параметром термодинамики элементарного акта флотации, пленочной флотации, закона капиллярности и т.д., ввиду чего изучение влияния растворенных солей во флотационной пульпе актуально [32; 33], в особенности исследование их синергетического эффекта с добавляемыми реагентами, например пенообразователями, так как их поверхностная активность и пенообразующая способность зависят от наличия и концентрации растворенных солей [34; 35].

Несмотря на то, что рассматриваемые в данной статье ионы относятся к поверхностно-инактивным веществам, существует ряд исследований, где показано, что соли способны снижать поверхностное натяжение в определенном диапазоне концентраций [36]. В работе [36] молярные концентрации хлорида натрия расположены

в диапазоне 0,01–0,08М и уточняется, что в области низких концентраций водно-солевых систем возможно наличие эффекта Джонса – Рэя, и предполагается, что его существование связано с методикой измерения поверхностного натяжения. В исследовании [37] авторы приводят примеры работ, в которых поверхностное натяжение солей натрия линейно падает с ростом температуры, что не находит подтверждения в теории адсорбции жидкостей. Также в данном исследовании экспериментально установлено, что растворы хлорида натрия проявляют поверхностно-инактивные свойства лишь при концентрациях выше 0,35 М.

При изучении влияния ионного состава воды на механизм действия поверхностно-активных веществ и технологические показатели флотационного обогащения в ряде работ отмечается, что присутствие неорганических ионов в воде улучшает характеристики флотационной пены, проявляется синергетический эффект с добавляемыми в процесс флотационными реагентами, что в итоге может снизить их расход и повысить рентабельность процесса [38–40].

Заключение

Был проведен анализ литературных источников в области исследований химического состава жидкой фазы флотационных пульп и влияния его компонентов на процесс флотации. В качестве основных ионов, присутствующих в воде при флотации медных руд, определены ионы солей жесткости (кальция и магния), ионы меди (II), хлорид-ионы и сульфоксидные ионы. При этом установлено, что образованию SO_4^{2-} и Cu^{2+} способствует окисление минеральной поверхности под действием антропогенных факторов, а также повышенное содержание водорастворимых минералов меди. Естественным источником солей жесткости и хлоридсодержащих солей являются подземные воды с высокой степенью минерализации, но влияние данных солей на процесс флотации неоднозначно. При повышенных концентрациях солей кальция и магния отмечается снижение пенообразования за счет увеличения жесткости воды и связывания данных солей с сульфат-ионами. Хлоридсодержащие соли способствуют сжатию двойного электрического слоя на поверхности минерала, что увеличивает вероятность столкновения минеральной частицы и пузырька, поскольку электростатическое воздействие уменьшается.

На основе анализа литературных источников установлено, что ионный состав жид-

кой фазы пульпы оказывает влияние на процесс флотации медных руд, однако на данный момент регламентированные требования к предельным концентрациям ионов в оборотной воде не разработаны. Чаще всего на практике оборотная вода лишь подвергается регулированию кислотами или щелочами для установления необходимого уровня pH, но ввиду вышеперечисленных факторов внедрение исследования ионного состава жидкой фазы на разных стадиях является важным этапом для оценки условий процесса флотации.

Актуальным направлением дальнейших научных исследований является более глубокий анализ флотационного обогащения с точки зрения физико-химических процессов, происходящих на границе раздела фаз жидкость – газ. Жидкая фаза пульпы содержит большое количество ионов и остатков реагентов в широком диапазоне концентраций, и их взаимодействие приводит к изменению механизма действия флотационных реагентов. Внедрение разработки реагентных режимов флотации на основании потенциометрических исследований необходимо в связи с нарастающими требованиями по рациональному использованию природных ресурсов.

Список литературы

1. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development // *Journal of Mining Institute*. 2020. № 244(4). P. 428–438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5.
2. Cherepovitsyn A., Stroykov G., Nevolin A. Efficiency of Low-Carbon Technologies Implementation at Non-Ferrous Metallurgy Enterprises under the Conditions of Carbon-Regulation Development in Russia // *Sustainability (Switzerland)*. 2023. № 15(24). DOI: 10.3390/su152416640.
3. Boduen A.Y., Petrov G.V., Kobylansky A.A., Bulaev A.G. Sulfide leaching of high-grade arsenic copper concentrates // *Obo-gashchenie Rud*. 2022. № 1. P. 14–20. DOI: 10.17580/or.2022.01.03.
4. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. № 12 (4). С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
5. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // *Записки Горного института*. 2023. Т. 260. С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
6. Залесов М.В., Григорьева В.А., Трубилов В.С., Бодуэн А.Я. Разработка технических решений для повышения эффективности переработки высокомедистой золотосодержащей руды // *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 51–56. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-51-56.
7. Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Артемьев А.В., Поспелова Ю.П., Смирнова Н.А., Бармин И.С. Исследование свойств и действия полиэлектролитов при очистке сливов обогатительной фабрики // *Записки Горного института*. 2024. Т. 265. С. 95–103.
8. Пономарева М.А., Черемисина О.В., Машукова Ю.А., Лукьянцева Е.С. Повышение эффективности извлечения РЗМ из технологических растворов в процессе переработки

- апатитового сырья // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 917-926. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.13.
9. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reimmöller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise // Applied Sciences. 2021. № 11(14). DOI: 10.3390/app11146615.
10. Dvoichenkova G.P., Morozov V.V., Chanturia E.L., Kovalenko E.G. Selection of recycled water electrochemical conditioning parameters for preparation of diamond-bearing kimberlite for froth separation // Mining Science and Technology (Russia). 2021. № 6(3). P. 170-180. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-170-180.
11. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В., Каюмов А.А., Каюмова В.Р. О регулировании электродных процессов для формирования контрастных технологических свойств сульфидов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 39-50. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_39.
12. Яковлева Т.А., Ромашев А.О., Машевский Г.Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 2. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_175.
13. Cao M., Bu H., Li S., Meng Q., Gao Y., Ou L. Impact of differing water hardness on the spodumene flotation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. № 107159. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107159.
14. Saleh Tawfik A., Mujahid Mustaqeem, Mazen Khaled. Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022. Vol. 17. № 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617.
15. Witecki K., Polowczyk I., Kowalczyk P.B. Chemistry of wastewater circuits in mineral processing industry – A review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 45. № 102509. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102509.
16. Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотиремость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 263-278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_1_0_263.
17. Feng Q., Yang W., Wen S., Wang H., Zhao W., Han G. Flotation of copper oxide minerals: A review // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. № 32(6). P. 1351-1364. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.011.
18. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В., Каюмов А.А., Каюмова В.Р. Влияние модификаторов класса сульфоксидов на флотиремость сульфидных минералов и технологические показатели флотации руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 20-33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_20.
19. Mäkinen Jarno, Grzegorz Pietek, Ville Miettinen, Mohammad Khoshkhou, Jan-Eric Sundkvist, Päivi Kinnunen. Removal of Pyrrhotite from High-Sulphur Tailings Utilising Non-Oxidative H₂SO₄ Leaching // Minerals. 2022. Vol. 12(12). № 1610. DOI: 10.3390/min12121610.
20. Ключников А.М. Исследование процессов цементационного извлечения меди из подотвальных вод горнодобывающих предприятий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 1. С. 155-161. DOI: 10.15372/FTPRP120200117.
21. Han Wang, Shuming Wen, Guang Han, Yongxin He, Qicheng Feng. Adsorption behavior and mechanism of copper ions in the sulfidization flotation of malachite, International Journal of Mining Science and Technology // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Т. 32, № 4. С. 897-906. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.06.006.
22. Алексеев Е.Е., Якунчиков Е.А., Сиверин О.О., Бахмапов Д.Я., Кутергин А.В. Технология обогащения меди из руды удоканского месторождения с возможностью извлечения благородных металлов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2023. Т. 23, № 3. С. 5-15. DOI: 10.14529/met230301.
23. Li Y., Li W., Xiao Q., He N., Ren Z., Lartey C., Gerson A.R. The Influence of Common Monovalent and Divalent Chlorides on Chalcopyrite Flotation // Minerals. 2017. Vol. 7. № 111. DOI: 10.3390/min7070111.
24. Hirajima T., Suyantara G.P.W., Ichikawa O., Elmahdy A.M., Miki H., Sasaki K. Effect of Mg²⁺ and Ca²⁺ as divalent seawater cations on the floatability of molybdenite and chalcopyrite // Minerals Engineering. 2016. Т. 96. С. 83-93. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.023.
25. Majeed T., Kamal M.S., Zhou X., Solling T. A review on foam stabilizers for enhanced oil recovery // Energy & Fuels. 2021. № 35(7). P. 5594-5612. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
26. Laskowski J., Castro S. Flotation in concentrated electrolyte solutions // International Journal of Mineral Processing. 2015. № 144. P. 50-55. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.023.
27. Xing Y., Gui X., Pan L., Pinchasik B.E., Cao Y., Liu J., Butt H.J. Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation // Advances in colloid and interface science. 2017. № 246. P. 105-132. DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.019.
28. Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Чупрова Л.В., Ершова О.В. Влияние химической природы модифицирующих добавок неорганического происхождения на электрокинетический потенциал угольных дисперсий // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 51-55. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35721> (дата обращения: 14.01.2025).
29. Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Ma X., Nguyen A.V. Crucial roles of ion-specific effects in the flotation of water-soluble KCl and NaCl crystals with fatty acid salts // Journal of Colloid and Interface Science. 2023. № 636. P. 413-424. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.01.038.
30. Sun K., Nguyen N.N., Nguyen A.V. Unique selective activating effect of lead ions on the flotation of NaCl crystals against KCl crystals with fatty acid collector colloids // Minerals Engineering. 2024. Vol. 216. № 108908. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108908.
31. Michaux B., Rudolph M., Reuter M.A. Challenges in predicting the role of water chemistry in flotation through simulation with an emphasis on the influence of electrolytes // Minerals Engineering. 2018. № 125. P. 252-264. DOI: 10.1016/J.MINENG.2018.06.010.
32. Alvarado O., Quezada G.R., Saavedra J.H., Rozas R.E., Toledo P.G. Species Surface Distribution and Surface Tension of Aqueous Solutions of MIBC and NaCl Using Molecular Dynamics Simulations // Polymers. 2022. Vol. 14. № 1967. DOI: 10.3390/polym14101967.
33. Vallejos P., Yianatos J., Grau R., Yañez A. Evaluation of flotation circuits design using a novel approach // Minerals Engineering. 2020. Vol. 158. № 106591. DOI: 10.1016/J.MINENG.2020.106591.
34. Corin K.C., Tetlow S., Manono M.S. Considering the action of frothers under degrading water quality // Minerals Engineering. 2022. Vol. 181. № 107546. DOI: 10.1016/J.MINENG.2022.107546.
35. Manono M.S., Corin K.C. Considering Specific Ion Effects on Froth Stability in Sulfidic Cu-Ni-PGM Ore Flotation // Minerals. 2022. Vol. 12. № 3. DOI: 10.3390/min12030321.
36. Александрова Т.Н., Лушина Е.А. Влияние ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические показатели обогащения // Цветные металлы. 2024. № 8. С. 13-20. DOI: 10.17580/tsm.2024.08.02.
37. Заводовский А.Г. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора хлорида натрия от концентрации и температуры // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 75-80. DOI: 10.35266/1999-7604-2024-1-10.
38. Jia M., Farid M.U., Kharraz J.A., Kumar N.M., Chopra S.S., Jang A., An A.K. Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: small bubbles making a big difference // Water Research. 2023. № 120613. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120613.
39. Wang H., Yang W., Yan X., Wang L., Wang Y., Zhang H. Regulation of bubble size in flotation: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8(5). № 104070. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070.
40. Yang X., Li Y., Fan R., Duan W., Huang L., Xiao Q. Separation mechanism of chalcopyrite and pyrite due to H₂O₂ treatment in low-alkaline seawater flotation system // Minerals Engineering. 2022. Vol. 176. № 107356. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107356.

СТАТЬЯ

УДК 528.48:627.8

DOI 10.17513/use.38375

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДОХРАНИЛИЩА
ПЛОТИНЫ РВЕГУРА ПО ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ****Биханга Бьенвеню***Государственный университет по землеустройству, Москва, e-mail: bihangab@gmail.com*

Данное исследование направлено на определение значимости пьезометрических данных в мониторинге безопасности и структурной целостности водохранилищ плотин в Республике Бурунди. В ходе исследования был проведен комплексный анализ пьезометрических измерений, собранных в период с 1992 по 2018 годы, с изучением изменений уровня воды и пьезометрического давления в различных точках конструкции плотины. Автор использовал данные из множества точек измерений, уделяя особое внимание сравнению характеристик левого и правого берегов с учетом тропического климата Республики Бурунди. Отмечено различие в пьезометрических показаниях, что указывает на возможность структурных деформаций и неравномерность сил внутри плотины. Эти колебания были сопоставлены с климатической динамикой, с годовым количеством осадков. Полученные результаты проясняют сложную взаимосвязь между условиями окружающей среды и устойчивостью гидроэнергетической инфраструктуры. В исследовании делается вывод о том, что непрерывный пьезометрический мониторинг необходим для выявления потенциальных структурных проблем, вопросов технического обслуживания и изменения эксплуатационных параметров. Исследование подчеркивает важность разработки усовершенствованных моделей прогнозирования для обеспечения долгосрочной структурной целостности и безопасной эксплуатации плотин. Рекомендуется дальнейшее изучение механизмов дифференциальных деформаций в гидроэнергетической инфраструктуре.

Ключевые слова: плотина, климатические условия, деформация, пьезометрические данные, водохранилище, уровень воды, эксплуатация, давление

**ASSESSMENT OF CHANGES IN THE LEVEL OF THE RWEGURA
DAM RESERVOIR BASED ON PIEZOMETRIC DATA****Bihanga Bienvenu***State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: bihangab@gmail.com*

The objective of this study is to ascertain the significance of piezometric data in monitoring the safety and structural integrity of dam reservoirs in the Republic of Burundi. The study employed a comprehensive analysis of piezometric measurements collected between 1992 and 2018, with an examination of water level and piezometric pressure variations across different points of the dam structure. We used data from a multitude of measurement points, with a specific emphasis on comparing the characteristics of the left and right banks, while taking into account the tropical climate of the Republic of Burundi. The analysis yielded significant variations in piezometric readings, which suggest the potential for structural deformations and unequal forces within the dam. These variations were contextualized against the climatic dynamics, mainly annual rainfall patterns. The findings elucidate the complex interrelationship between environmental conditions and the stability of hydropower infrastructure. The research concludes that continuous piezometric monitoring is essential for identifying potential structural problems, maintenance issues, and operational parameter changes. The study underscores the importance of developing improved prediction models to ensure long-term dam structural integrity and safe operation, recommending further investigation into the mechanisms of differential deformation in hydropower infrastructure.

Keywords: dam, climatic conditions, deformation, piezometric data, reservoir, water level, operation, pressure

Введение

При строительстве сложных инженерных сооружений первостепенное значение имеет обеспечение безопасности окружающей среды. Возможность значительного материального ущерба и человеческих жертв в случае разрушения конструкции делает всесторонний мониторинг критически важным. Разрушение конструкций не является внезапным событием, а представляет собой прогрессирующий процесс с идентифицируемыми предвестниками. Это подчеркивает важность непрерывного мониторинга состояния конструкций и своевременного профилактического вмешательства как важ-

нейших стратегий поддержания эксплуатационной безопасности [1].

Гидротехнические сооружения представляют собой сложные инженерные системы, предназначенные для использования водных ресурсов и управления ими в различных целях, включая производство электроэнергии, управление водными ресурсами, орошение сельскохозяйственных угодий, борьбу с наводнениями, судоходство, аквакультуру и отдых. Являясь важнейшей инфраструктурой, прерывающей естественный поток воды, плотины подвержены постоянному воздействию сложных гидродинамических сил. Несмотря

на строгий инженерный дизайн и протоколы строительства, эти сооружения по своей природе обладают потенциальными факторами риска. Следовательно, систематические и передовые методы мониторинга имеют решающее значение для обнаружения ранних признаков отклонения конструкции или потенциальных режимов отказа. Архитектурная конфигурация и структурный состав гидроэнергетических комплексов определяются несколькими взаимозависимыми факторами: выбранной стратегией использования энергии реки (системы водохранилищ или отводов), экономическими целями инфраструктурного проекта и конкретными геоморфологическими и экологическими характеристиками места строительства [1, 2].

Пьезометрические данные имеют большее значение для мониторинга плотин, поскольку дают неоценимое представление о гидравлическом поведении плотинных сооружений. Они включают в себя мониторинг просачивания и внутреннего уровня воды, что необходимо для понимания нагрузки, оказываемой водой на плотину, и обнаружения утечек или потенциальных отказов. Регулярно анализируя пьезометрические данные, инженеры могут принимать обоснованные решения о необходимом техническом обслуживании и мерах по предотвращению катастрофических разрушений [3, 4].

Цель данного исследования – проанализировать пьезометрические данные водохранилищ плотин в Республике Бурунди, плотина Рвегура, изучив изменения уровня воды и пьезометрического давления за период с 1992 по 2018 годы, чтобы выявить потенциальные структурные деформации и предложить меры по улучшению мониторинга и прогнозу моделирования устойчивости гидроэнергетической инфраструктуры.

Материалы и методы исследования

Актуальное состояние гидроэнергетических плотин в государстве Бурунди

Плотина Рвегура является основным сооружением гидроэнергетического проекта, она находится в провинции Чибитоке в Республике Бурунди и была введена в эксплуатацию в 1986 году. Конструкция плотины является результатом сложного взаимодействия важнейших инженерных параметров, включая требования к размерам, функциональные задачи, экологические и геологические характеристики конкретного объекта, а также свойства основ-

ных материалов. В инженерном отношении существует критическое различие между плотинами водохранилищ и водосливами, последние специально предназначены для регулирования уровня поверхности воды в верхнем течении. Классификация плотин представляет собой многомерную оценку гидравлической инфраструктуры, характеризующейся различными функциональными архетипами. Непроницаемые плотины предназначены для всестороннего ограничения водного потока и служат основным гидравлическим барьером. Водосбросные плотины стратегически спроектированы для управления и перенаправления избыточных объемов воды с помощью механизмов поверхностных водосбросов (открытых или механически управляемых) и инженерных систем сброса воды в глубокие каналы. Гидроэлектрические плотины имеют точную конфигурацию со специализированными водозаборными сооружениями и гидравлическими каналами, оптимизированными для питания турбинных систем, что способствует эффективному преобразованию энергии. С точки зрения материаловедения, плотины систематически классифицируются по их первичному структурному составу: геотехнические сооружения на основе грунта/почвы, конфигурации из литической (каменной) кладки и железобетонные инженерные решения. Каждая классификация отражает тонкие инженерные соображения, конструктивные возможности и адаптивные стратегии, разработанные с учетом уникального гидрологического и геологического контекста конкретного объекта. Все типы плотин используются на гидроэлектростанциях [5].

Строительство плотин включает в себя тщательно спланированную последовательность гидротехнических мероприятий, которые динамически управляют гидрологией реки в процессе развития инфраструктуры. Первоначально река поддерживает свой естественный поток через беспрепятственный участок русла. На последующих этапах строительства стратегически используются временный пропуск потока через специально спроектированные отверстия в насыпи, которые после завершения строительства систематически заделываются. В случае с более узкой морфологией реки строительство бетонной плотины может быть синхронизировано с временными изменениями реки для обеспечения непрерывного управления водными ресурсами и минимального воздействия на окружающую среду.

Бетонная плотина представляет собой сложное гидротехническое сооружение, спроектированное с учетом точных конструктивных особенностей. Обычно возводимые на тщательно подготовленном неармированном основании, эти сооружения предназначены для обеспечения контролируемой динамики водного потока при оптимальном градиенте давления. В конфигурацию сооружения часто входят сложные гидравлические элементы, в том числе бетонные волнорезы, соединенные между собой специализированными гидравлическими шлюзовыми механизмами, которые создают сложные русловые структуры.

Проект инфраструктуры часто включает в себя компоненты водохранилища, технически характеризующиеся как водоприемные ямы, иногда разделенные на специализированные подсекции, а также вспомогательные структурные элементы, такие как фартуки. Эти инженерные компоненты взаимодействуют друг с другом, управляя потоком воды, контролируя гидравлическое давление и обеспечивая общую структурную целостность и эксплуатационную эффективность гидротехнической системы. Под коллектором устанавливается дренаж.

Гидроэнергетическая инфраструктура Республики Бурунди сталкивается с особым набором проблем, обусловленных уникальными географическими и климатическими особенностями страны, которые представляют собой целый ряд специфических вопросов. Регион отличается наличием двух основных сезонов. Сезон дождей определяется как период времени, в течение которого выпадает наибольшее количество осадков. Сухой сезон отличается малым количеством воды и потенциальной нестабильностью почвы. Разнообразный рельеф страны, включающий в себя крутые горы и различные типы почв, создает значительные инженерные трудности при строительстве плотин. Некоторые регионы отличаются обилием воды и растительности, в то время как другие представляют собой более сложные топографические условия. Несмотря на признание электричества в качестве ключевого элемента национального развития, Республика Бурунди также не обладает значительным местным опытом в области строительства плотин. Это подчеркивается необходимостью наращивания технического опыта и использования возможностей международного сотрудничества для содействия развитию устойчивой гидроэнергетической инфраструкту-

ры. Следует отметить также что, для того чтобы оценить функциональность плотин в Республике Бурунди, необходимо рассмотреть ряд факторов, включая стабильность почвы, управление водными ресурсами, геологическую оценку строительных площадок и долгосрочные стратегии технического обслуживания.

Несмотря на трудности, есть несколько гидроэлектростанций, которые имеют большое значение для производства электроэнергии и развития энергетического сектора страны. В настоящее время в эксплуатации находятся не менее 20 гидроэлектростанций, еще три находятся в стадии строительства. Все эти объекты в совокупности обеспечивают наиболее стабильное электроснабжение.

Однако из 20 гидроэлектростанций три являются самыми мощными с точки зрения выработки электроэнергии. Самые значительные из них – Рвегура, Рузибази и недавно открытая Кабу 16. Рвегура, в частности, считается основной гидроэлектростанцией и ключевым элементом энергетической инфраструктуры государства Бурунди. В настоящее время установленная мощность производства электроэнергии в стране составляет около 97,2 МВт, из которых на долю гидроэлектростанций приходится почти 49 МВт. Большинство гидроэлектростанций находятся в собственности и под оперативным контролем REGIDESO (Régie de Production et de Distribution de l'Eau et de l'Électricité) – национального коммунального предприятия, отвечающего за производство и распределение электроэнергии. Однако доступ к электроэнергии в государстве Бурунди остается одним из самых низких в мире по сравнению с другими странами [6].

В данной работе изучены данные из 27 пьезометров, которые были установлены в нескольких точках, распределенных по нескольким профилям плотины. При установке пьезометры были спроектированы таким образом, чтобы их фундаменты достигали высоты 2110 м. Некоторые пьезометры успешно достигли данного уровня, другие были установлены на несколько меньшей высоте.

Динамика климата и мониторинг гидроэлектростанций в Бурунди с использованием пьезометрических данных

Географическое положение Бурунди обуславливает сложный тропический климат, характеризующийся значительными про-

странственными колебаниями температуры. На климатические условия страны в первую очередь влияет топографическое разнообразие, которое привело к формированию отдельных микроклиматических зон. Центральный регион характеризуется умеренным климатом со средней температурой около 20°C. Напротив, в районах, прилегающих к озеру Танганьика, климат теплее – средняя температура составляет около 23°C. Контраст между горными территориями и заметно более низкими температурами, которые они обеспечивают, подчеркивает сложный метеорологический ландшафт.

Благодаря своему расположению государство имеет тропический климат, который является относительно жарким и влажным. Температуры значительно варьируются от одного региона к другому, главным образом из-за различий в высоте местности. Выпадения осадков также неравномерны между южной и северной частями страны. Годовое количество осадков составляет от 1200 до 1700 мм в год (рис. 1) [7, 8].

График хорошо отображает сезонный характер осадков в регионе. На нем четко прослеживается сезонность: наибольшее количество осадков выпадает в сезон дождей, а наименьшее – в июне, июле и августе, что соответствует более сухому сезону.

Эти колебания количества осадков оказывают значительное влияние на гидрологические системы страны, которые, в свою

очередь, влияют на потенциал выработки гидроэлектроэнергии.

В последних исследованиях в области изменения климата и его влияния на управление гидроэнергетикой особое внимание уделяется значению метеорологических переменных, в частности температуры и осадков. В научной литературе, посвященной влиянию изменения климата на гидроэнергетическую инфраструктуру, наблюдается значительное разнообразие подходов. Некоторые исследователи ограничиваются моделями осадков, признавая, что осадки являются основным фактором, определяющим доступность воды для производства электроэнергии. Альтернативные методологические схемы предлагают комплексный анализ, изучающий взаимосвязи между изменением климата, трансформацией землепользования и потребностями в ирригации [9].

Гидроэнергетический сектор сталкивается с серьезными проблемами, обусловленными локальной динамикой климата. Потенциал изменения климата вносит значительную степень неопределенности в планирование и эксплуатационную надежность энергетической инфраструктуры [10, 11]. Для поддержания стабильного энергоснабжения и развития устойчивой инфраструктуры необходимо разработать комплексные стратегии адаптации, учитывающие экстремальную изменчивость климата.

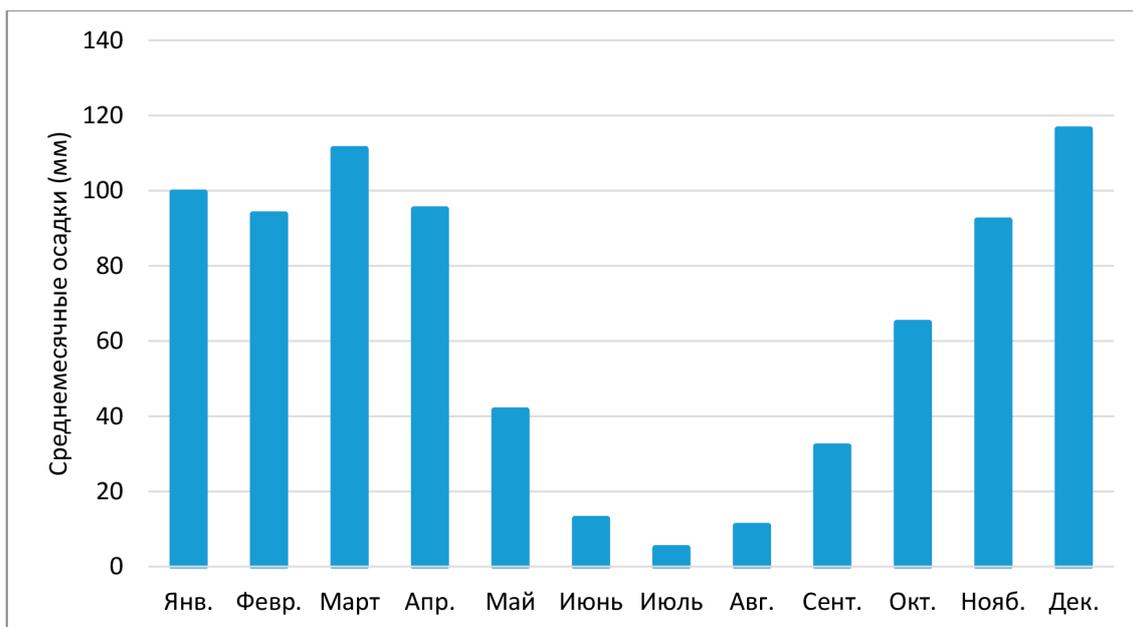


Рис. 1. Среднемесячное количество осадков (1992–2018 гг.)

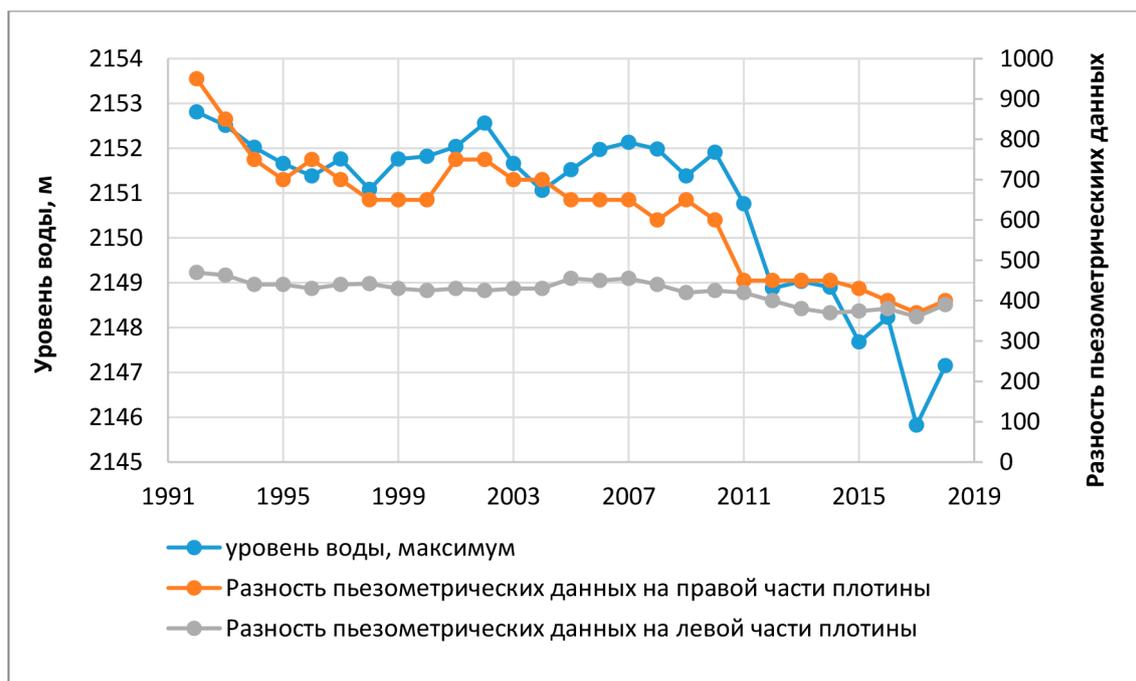


Рис. 2. Взаимосвязь между уровнем воды и пьезометрическими данными, показывающая, как сильно уровень воды влияет на правую и левую стороны

Еще одним подходом является использование взаимозависимости между уровнем воды и пьезометрическими данными в плотинах, так как она очень важна для поддержания их безопасности и эксплуатационной эффективности. Необходимо продолжать исследования, чтобы усовершенствовать методики учета этих сложных взаимосвязей и разработать передовые модели прогнозирования [12]. Показатели пьезометрического давления отражают гидравлическое состояние плотины, где уровень воды влияет на давление пороговой воды в окружающих материалах. Исследования показали устойчивую положительную линейную зависимость между пьезометрическим давлением и уровнем воды, указывающую на то, что с повышением уровня воды повышается и давление пороговой воды. Для оценки взаимосвязи между уровнем воды и пьезометрическим давлением используются различные методы мониторинга [13, 14]. Пьезометры устанавливаются в стратегических местах внутри и вокруг плотины для измерения напора (рис. 2).

Графики демонстрируют колебания уровня воды и пьезометрических показаний за период с 1992 по 2018 годы. Рассмотрена взаимосвязь между уровнем воды и пьезометрическими показаниями, так как наблюдается, что пьезометрические показатели

реагируют на изменения уровня воды. Заметные колебания и отклонения наблюдаются между уровнем воды и пьезометрическими измерениями, особенно в последние годы, что указывает на возможность структурных или эксплуатационных проблем с плотиной.

За 26-летний период уровень воды снижается, и пьезометрические измерения по обеим сторонам плотины также имеют определенную тенденцию к снижению. Однако снижение пьезометрических показателей более выражено на правом берегу, и оно зеркально отражает снижение уровня воды.

Колебания и отклонения, наблюдаемые при пьезометрических измерениях, могут свидетельствовать о наличии структурных проблем, проблем с техническим обслуживанием или об изменении условий эксплуатации плотины с течением времени.

Заключение

Реакции на левой и правой сторонах плотины зависят от пьезометрических данных и, следовательно, должны оставаться стабильными независимо от уровня воды. Если пьезометрические измерения на левой и правой сторонах совпадают, можно предположить, что силовые реакции также будут одинаковыми, что указывает на однородность условий нагружения на обеих

сторонах плотины. Однако данные демонстрируют заметные несоответствия между пьезометрическими показаниями на левой и правой сторонах плотины, это свидетельствует о том, что силы, действующие на плотину, не являются равномерными.

Отсутствие корреляции между уровнем воды и пьезометрическими данными свидетельствует о наличии внешних сил, действующих на плотину и приводящих к деформации.

Геодезические методы могут быть использованы для определения степени и характера деформации, однако они не дают полного представления о причинах, лежащих в ее основе. Расхождение пьезометрических измерений на левой и правой сторонах плотины указывает на наличие деформирующих сил, которые могут привести к возникновению структурных проблем, если их не устранить.

Для выяснения конкретных механизмов, ответственных за дифференциальную деформацию, необходимы дальнейшие исследования и анализ. Совмещение пьезометрических данных на левой и правой сторонах при одинаковом уровне воды станет важным шагом в выявлении основных причин нестабильности. Крайне важно устранить дифференциальные силы, действующие на плотину, чтобы гарантировать ее долгосрочную структурную целостность и безопасную эксплуатацию.

Список литературы

1. СП 40.13330.2012, Свод правил. Плотины бетонные и железобетонные. М., 2012. 3 с.
2. ГОСТ Р 22.2.09-2015 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. М.: Стандартинформ, 2016. 6 с.
3. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: Use of instrumentation in dams // *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 11. Is. 1. P. 145-202. DOI: 10.47260/jesge/1115.
4. Demianiuk A., Stefanyshyn D. The prognostic modelling of piezometric levels based on seepage monitoring in earthen dams // *In MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 322. Is. 01047. P. 1-8. DOI: 10.1051/mateconf/202032201047.
5. Титов Н.Г., Кузякина М.В., Лебедев К.А. Построение теоретической модели прогнозирования уровня воды в реке горного типа с применением цепей Маркова // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. № 114(10). С. 1528-1538.
6. W. Wang P., Xing C., Pan X. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets // *Sensors (Basel)*. 2020. Vol. 20(2). № 396. DOI: 10.3390/s20020396.
7. Burundi: analyse des facteurs de risques, évaluation des dommages et propositions pour un relèvement et une reconstruction durables. Evaluation rapide conjointe suite à la catastrophe du 9-10 février 2014 aux alentours de Bujumbura. Avril, 2014. URL: <https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/pda-2014-burundi-fr.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).
8. Биханга Б. Анализ деформационных процессов на плотине рвегура с помощью пьезометрических измерений в Республике Бурунди // *Успехи современного естествознания*. 2024. № 5. С. 116-120. DOI: 10.17513/use.38275.
9. Mukheibir P. Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation // *Climatic Change*. 2013. Vol. 121. Is. 1. P. 67–78. DOI: 10.1007/s10584-013-0890-5.
10. Муравьева Е.В., Сибгатуллина Д.Ш., Галимова А.И. Риски функционирования гидротехнических сооружений – хранилищ производственных отходов: проблемы и решения // *Безопасность жизнедеятельности*. 2017. № 5 (197). С. 52-58.
11. Шакирова А.И. Технология снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях с помощью 154 волоконно-оптических систем // *Вестник НЦБЖД*. 2019. № 1 (39). С. 144-152.
12. Kang G., Kim D., Yoon S., Jang B.S., Kim J. Assessing the Stability of Fill Dams by Relationship between Water Level and Porewater Pressure // *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2020. Vol. 36. Is. 6. P. 5–15. DOI: 10.7843/KGS.2020.36.6.5.
13. Малаханов В.В. Использование температурных пьезометрических наблюдений для мониторинга состояния грунтовых плотин // *Вестник МГСУ*. 2012. № 3. С. 79-89.
14. Ескин А.Ю., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В. Геофизические исследования на земляной плотине иркутской ГЭС с целью изучения ее фильтрационной устойчивости // *Вестник ИрГТУ*. 2014. № 11 (94). С. 64-70.