



ИД «Академия Естествознания»

# УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 4 2025



# ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 4 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 *Кавцевич 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.В.* (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. *Луговой 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

30.04.2025

Дата выхода номера

30.05.2025

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

7,5

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2025/4

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.* (Novocherkassk); 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 *Kuzuyakov 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	30.04.2025
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	30.05.2025
Conditionally printed sheets	7,5
Order	YCE 2025/4

Distribution at a free price

Subscription index in the Russian Post electronic catalog: P7816

© LLC PH Academy of Natural History

## СОДЕРЖАНИЕ

### Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

#### СТАТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ БИОПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ МИКРОБНОГО  
СИНТЕЗА *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* И *BACILLUS SUBTILIS*  
НА НЕКОТОРЫХ ВИДАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

*Бородина Н.Н.* ..... 6

#### НАУЧНЫЙ ОБЗОР

МЕТОДЫ ИНТРОДУКЦИИ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СУЩЕСТВЕННЫЕ  
ИЗМЕНЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ РАСТЕНИЙ

*Дабиева У.М.* ..... 13

### Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

#### СТАТЬЯ

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОЗЕР У ЛЕДНИКА БАШКАРА  
(ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ) В 2023–2024 ГГ.

*Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р.* ..... 22

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

#### СТАТЬЯ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ  
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ГИПСА В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

*Наход В.А., Малов А.И., Дружинин С.В., Зыкова Е.Н.* ..... 29

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

#### СТАТЬИ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА МАЛОГЛУБИНЫХ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ РОССЫПНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА В ТИПИЧНЫХ УСЛОВИЯХ  
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

*Гаченко С.В., Степанов А.С., Кольга Л.В., Дмитриев А.Г., Трофимов И.В.* ..... 41

РОЛЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ  
НЕФТЕОТДАЧИ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СТАДИЯХ  
РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮГРЫ

*Кузьменков С.Г., Нанишвили О.А., Змеевец Р.О., Новиков М.В., Бутин В.С.* ..... 47

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ  
УГЛЕВОДОРОДОВ В АМУРСКОМ ЛИМАНЕ

*Стукова О.Ю.* ..... 53

## CONTENTS

### **Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)**

#### **ARTICLE**

APPLICATION OF A BIOLOGICAL PRODUCT BASED ON MICROBIAL SYNTHESIS OF BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS AND BACILLUS SUBTILIS ON CERTAIN TYPES OF AGRICULTURAL CROPS

*Borodina N.N.* ..... 6

#### **REVIEW**

INTRODUCTION METHODS AIMED AT SIGNIFICANT CHANGES IN PLANT HEREDITY

*Dabieva U.M.* ..... 13

### **Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)**

#### **ARTICLE**

FEATURES OF THE DYNAMICS OF LAKES NEAR THE BASHKARA GLACIER (CENTRAL CAUCASUS) IN 2023-2024

*Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Akaev A.R.* ..... 22

### **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)**

#### **ARTICLE**

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RADIATION COMPONENT AT THE GYPSUM DEPOSIT IN THE ARKHANGELSK REGION

*Nakhod V.A., Malov A.I., Druzhinin S.V., Zyкова E.N.* ..... 29

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

#### **ARTICLES**

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A COMPLEX OF NEAR-SURFACE GEOPHYSICAL METHODS IN THE SEARCH FOR PLACER GOLD DEPOSITS IN TYPICAL CONDITIONS OF EASTERN SIBERIA

*Gachenko S.V., Stepanov A.S., Kolga L.V., Dmitriev A.G., Trofimov I.V.* ..... 41

THE ROLE OF PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF ENHANCED OIL RECOVERY AT THE FINAL STAGES OF DEVELOPMENT OF YUGRA FIELDS

*Kuzmenkov S.G., Nanishvili O.A., Zmeevets R.O., Novikov M.V., Butin V.S.* ..... 47

THE RESEARCH OF MICROBIOLOGICAL PROCESSES OF TRANSFORMATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THE AMUR RIVER ESTUARY

*Stukova O.Yu.* ..... 53

## СТАТЬЯ

УДК 632.98

DOI 10.17513/use.38383

**ПРИМЕНЕНИЕ БИОПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ МИКРОБНОГО СИНТЕЗА *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* И *BACILLUS SUBTILIS* НА НЕКОТОРЫХ ВИДАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР****Бородина Н.Н.***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»,  
Тамбов, e-mail: nat\_nik\_borodina@mail.ru*

Биологизация сельского хозяйства предполагает необходимость введения в систему защиты растений от болезней препаратов биологического происхождения, не имеющих отрицательного воздействия на культуру и окружающую среду. Биостимуляторы позволяют у растений повышать комплексную устойчивость к широкой классификации вирусных, бактериальных и грибковых заболеваний, а также адаптивные свойства к различным факторам окружающей среды (температура, засуха, продолжительность светового дня и т.д.). Цель исследования заключалась в изучении эффективности применения биологически активного препарата на основе микробного синтеза *Bacillus amyloliquefaciens* и *Bacillus subtilis* на некоторых видах сельскохозяйственных культур. Опыт представлен комплексом исследований, заложенных на экспериментальных площадках агропредприятий, в разрезе исследуемых культур. Результаты проведения полевого опыта оценивались согласно следующим показателям: месторасположение экспериментальной площадки, ее площадь, сортовые особенности культуры, предшественник, метод и фазы обработки, морфометрические показатели растений, метеорологические показатели (среднесуточные температуры, осадки) в период вегетации, фактическая урожайность культуры относительно контрольного участка. Особое внимание уделялось схеме защиты растений контрольных участков, представленной преимущественно химпрепаратами, и экспериментальных участков с частичной заменой химических регуляторов препаратами с биологической основой. В ходе проведенного эксперимента установлено, что средняя урожайность опытных участков выше по сравнению с урожайностью контрольных участков. Расчет экономической эффективности от предложенной схемы защиты растений, с учетом полученных результатов, позволяет рекомендовать проведение дальнейших исследований по применению изучаемого биопрепарата.

**Ключевые слова:** биологически активные препараты, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, схема защиты растений, морфометрия, урожайность

**APPLICATION OF A BIOLOGICAL PRODUCT BASED ON MICROBIAL SYNTHESIS OF *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* AND *BACILLUS SUBTILIS* ON CERTAIN TYPES OF AGRICULTURAL CROPS****Borodina N.N.***Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, e-mail: nat\_nik\_borodina@mail.ru*

Biologization of agriculture requires the introduction of biological preparations into the plant disease protection system that do not have a negative impact on crops and the environment. Biostimulants allow plants to increase their complex resistance to a wide range of viral, bacterial and fungal diseases, as well as their adaptive properties to various environmental factors (temperature, drought, daylight hours, etc.). The aim of the study was to investigate the effectiveness of using a biologically active preparation based on the microbial synthesis of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis* on some types of agricultural crops. The experience is presented by a set of studies carried out on experimental sites of agricultural enterprises in the context of the studied crops. The results of the field experiment were assessed according to the following indicators: location of the experimental site, its area, varietal characteristics of the crop, predecessor, method and phases of processing, morphometric indicators of plants, meteorological indicators (average daily temperatures, precipitation) during the growing season, actual crop yield relative to the control site. Particular attention was paid to the plant protection scheme of the control plot, represented mainly by chemical preparations, and experimental plots with a partial replacement of chemical regulators with preparations with a biological basis. During the experiment it was found that the average yield of the experimental plots was higher than the yield of the control areas. Calculation of the economic efficiency of the proposed plant protection scheme, taking into account the results obtained, allows us to recommend further research on the use of the studied biopreparation.

**Keywords:** biologically active preparations, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, plant protection scheme, morphometry, yield

**Введение**

Успешное выращивание полевых культур без применения средств химизации на сегодняшний день трудно представить. Приоритетным направлением развития российского агропромышленного комплек-

са является экологизация за счет применения биологических агентов (биоудобрения, биоиндикаторы, биофунгициды) в качестве безопасной альтернативы химическим веществам [1]. Биологизация сельского хозяйства предполагает необходимость вве-

дения в систему защиты растений от болезней препаратов биологического происхождения, не имеющих отрицательного воздействия на культуру и окружающую среду [2]. Биостимуляторы позволяют повышать комплексную устойчивость растений к широкой классификации вирусных, бактериальных и грибковых заболеваний, а также адаптивные свойства к различным факторам окружающей среды (температура, засуха, продолжительность светового дня и т.д.) [3, 4]. При этом очень важно использовать безопасные препараты, которые, помимо высокой урожайности, сохраняют естественную микробиоту почвы [5]. Особое внимание уделяется разработке инновационных регуляторов роста и развития растений на бактериальной основе. С физиологической точки зрения важно, что бактерия заселяет преимущественно нижнюю поверхность листовой пластинки. Установлена ее способность не только проникать сквозь устьица листьев, но и колонизироваться в межклетниках эпидермиса и мезофилле листа [6]. Такое всеобъемлющее покрытие и проникновение не всегда достижимо для химических препаратов, а для биологических является исключительно особенностью [7].

**Цель исследования** – оценка эффективности применения биологически активного препарата на основе микробного синтеза *Bacillus amyloliquefaciens* и *Bacillus subtilis* на некоторых видах сельскохозяйственных культур.

#### **Материалы и методы исследования**

Опыт представлен комплексом исследований, заложенных на экспериментальных площадках агропредприятий Тамбовской области, в разрезе исследуемых культур. Результаты проведения полевого опыта по применению биологически активного препарата на основе микробного синтеза *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis* на сельскохозяйственных культурах *Hordeum vulgare L.*, *Triticum aestivum L.*, *Beta vulgaris L.* и *Pisum sativum L.* [8, 9]. Результаты проведения полевого опыта оценивались согласно следующим показателям: месторасположение экспериментальной площадки, ее площадь, сортовые особенности культуры, предшественник, метод и фазы обработки, морфометрические показатели растений, метеорологические показатели (среднесуточные температуры, осадки) в период вегетации, фактическая урожайность культуры относительно контрольного

участка. Особое внимание уделялось схеме защиты растений опытного и контрольного участков.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Экспериментальная площадка № 1 – северо-запад Тамбовской области, культура *Hordeum vulgare L.*, сорт Деспина, предшественник *Zea L.* площадь опытного участка 10 га, обработка проводилась в три этапа, представляющие полевое механизированное опрыскивание в фазу кущения, 2-я обработка в фазу выхода в трубку и 3-я обработка в фазу образования флагового листа, эффективность применения биопрепарата оценивали по фактической урожайности культуры, дата проведения уборки урожая 05.08.2024. Фактические схемы защиты растений опытного и контрольного участков представлены в табл. 1.

Метеорологические условия в период проведения эксперимента характерны для климатических условий весенне-летнего периода Тамбовской области. В фазу растений выхода в трубку были отобраны образцы для определения основных морфологических показателей [11]. Согласно проведенным исследованиям, на опытном участке установлено опережение роста и развития растений, что подтверждается средними значениями морфологических показателей по высоте и диаметру стебля, размерам листовой пластинки, мощности корневой системы, размерам колоса (рис. 1, 2).

Основополагающим экспериментальным этапом полевых опытов было определение урожайности исследуемых культур. Средняя урожайность опытного поля составила 55,0 ц/га, тогда как фактическая урожайность контрольного участка – 54,0 ц/га. Соответственно прибавка по урожайности составила 1,0 ц/га, что соответствует 1,8% с каждого гектара сельскохозяйственных площадей. При расчете экономических показателей применения средств защиты растений установлено, что контрольный вариант системы защиты растений финансово дороже. Прибавка по урожайности при применении исследуемых биологически активных средств защиты 1,0 ц/га, что позволяет получить экономическую эффективность от применения данной схемы защиты, и она, с учетом полученных результатов, может быть рекомендована к внедрению в производственном цикле следующего урожайного года.

Таблица 1

Схемы защиты растений *Hordeum vulgare L.* опытного и контрольного участков

Опытный участок			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода, л/га (т)
Протравливание семян	Систива, КС	Опрыскивание	0,50
	Тиара, КС		0,50
	Биопрепарат ( <i>Bacillus amylo-liquefaciens</i> + <i>Bacillus subtilis</i> )		0,02
1-я обработка, фаза кущения	Флора Стар, СЭ	Опрыскивание	0,50
	Прима, СЭ		0,50
	Биопрепарат ( <i>Bacillus amylo-liquefaciens</i> + <i>Bacillus subtilis</i> )		0,02
2-я обработка, фаза выхода в трубку	Альфаплан, КС	Опрыскивание	0,05
	Биопрепарат ( <i>Bacillus amylo-liquefaciens</i> + <i>Bacillus subtilis</i> )		0,02
	SOLAR (18-18-18)		2,00
3-я обработка, фаза образования флагового листа	Биопрепарат ( <i>Bacillus amylo-liquefaciens</i> + <i>Bacillus subtilis</i> )	Опрыскивание	0,02
	Борей, СК		0,10
Контрольный участок (контрольная хозяйственная схема)			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
Протравливание семян	Ломадор Про, КС	Опрыскивание	0,90
	Систива, КС		0,50
	Тиара, КС		0,50
1-я обработка, фаза кущения	Флора Стар, СЭ	Опрыскивание	0,50
	Прима, СЭ		0,50
2-я обработка, выход в трубку	Альфаплан, КС	Опрыскивание	0,05
	SOLAR (18-18-18)		2,00
3-я обработка, образование флагового листа	Альто Супер, КЭ	Опрыскивание	0,53
	Борей, СК		0,10

Примечание: контрольный участок представлен хозяйственной схемой защиты растений (предоставленной руководителем хозяйства), концентрации указаны согласно инструкциям применения пестицидов; опытный участок – с частичной заменой химпрепаратов на биологически активный препарат на основе *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis*. Источник: составлено автором на основе источника [10].

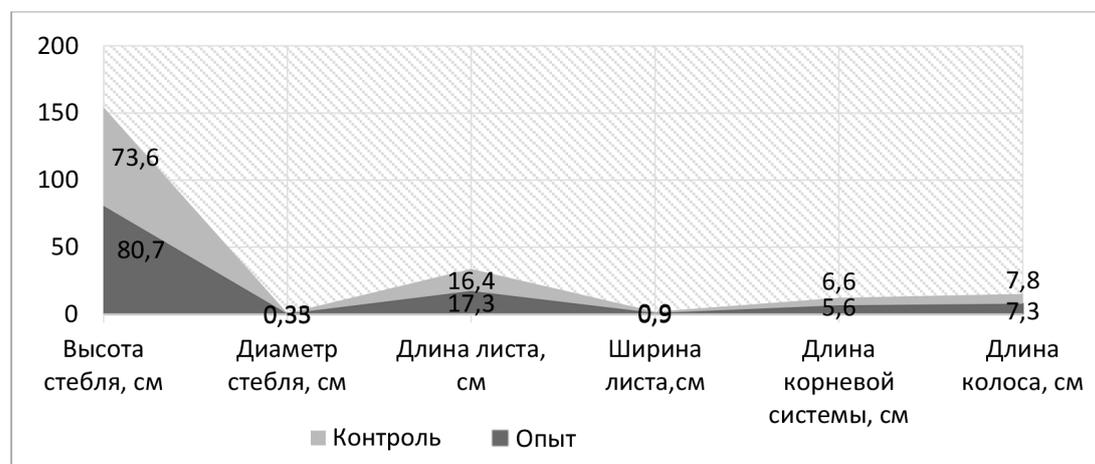


Рис. 1. Средние значения основных морфологических показателей растений *Hordeum vulgare L.* на 10.07.2024

Источник: составлено автором на основе [10]



Рис. 2. Механизированное опрыскивание экспериментального участка экспериментальной площадки № 1 – северо-запад Тамбовской области, культура *Hordeum vulgare* L., сорт Деспина, предшественник *Zea* L. площадь опытного участка 10 га

Таблица 2

Схемы защиты растений *Triticum aestivum* L.  
опытного и контрольного участков

Опытный участок			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка, фаза начала кущения	Прима, СЭ	Опрыскивание	0,50
	Биопрепарат		0,02
2-я обработка, конец кущения	Альбит	Опрыскивание	0,50
	Биопрепарат		0,05
3-я обработка, фаза выхода в трубку	Альфаплан, КС	Опрыскивание	0,05
	SOLAR (20-20-20)		3,00
4-я обработка, фаза образования флагового листа	Биопрепарат	Опрыскивание	0,05
5-я обработка, колошение	Борей, СК	Опрыскивание	0,10
Контрольный участок (контрольная хозяйственная схема)			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка, фаза начала кущения	Прима, СЭ	Опрыскивание	0,50
	SOLAR (15-30-15)		2,0
2-я обработка, конец кущения	Солигор, КЭ	Опрыскивание	0,50
	Альбит		0,05
3-я обработка, фаза выхода в трубку	Альфаплан, КС	Опрыскивание	0,05
	SOLAR (20-20-20)		3,00
4-я обработка, флаговый лист	Альто Супер, КЭ	Опрыскивание	0,50
5-я обработка, колошение	Борей, СК	Опрыскивание	0,10

Примечание: контрольный участок представлен хозяйственной схемой защиты растений (представленной руководителем хозяйства), концентрации указаны согласно инструкциям применения пестицидов; опытный участок – с частичной заменой химпрепаратов на биологически активный препарат на основе *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis*. Источник: составлено автором на основе [10].

Одновременно был заложен опыт на экспериментальной площадке № 2 – юго-восток Тамбовской области, культура – *Triticum aestivum* L., сорт Тимирязевская 150, предшественник *Zea* L., площадь опытного участка 15 га. Обработка биологически активным препаратом на основе микробного синтеза *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis* представляла двухэтапное механизированное опрыскивание в фазу кушения и образования флагового листа [12]. Дата проведения уборочных работ 02.08.2024. Схемы защиты растений опытного и контрольного участков представлены в табл. 2.

В ходе эксперимента установлено, что на опытном участке отмечено опережение роста и развития растений. Согласно фазам развития опережение по основным морфологическим показателям в среднем составляет 5–7 дней. Фактическая урожайность экспериментального поля составила 62,0 ц/га, тогда как контрольный участок, обработанный по хозяйственной схеме растений, показал урожайность 61,2 ц/га, соответственно, прибавка составила 0,8 ц/га (1,3%) хозяйственных площадей. При расчете экономических показателей применения исследуемых средств защиты растений установлено, что контрольный вариант

предложенной схемы защиты растений финансово дороже. Прибавка по урожайности с применением биопрепарата позволяет получить экономическую эффективность от предложенной схемы защиты.

На экспериментальной площадке № 3, расположенной в северной части Тамбовской области, был заложен полевой опыт со следующими характеристиками: культура – *Beta vulgaris* L., сорт Крокодил, предшественник *Hordeum* L., площадь опытного участка 10 га, метод обработки – механизированное полевое опрыскивание, проводилось в два этапа: появление двух-трех пар листьев и период смыкания листьев в междурядьях [13]. Дата проведения уборочных работ 02.10.2024. Схемы защиты растений опытного и контрольного участков представлены в табл. 3.

Фактическая урожайность растений *Beta vulgaris* L. на экспериментальном поле составила 430,00 ц/га, на контрольном поле – 400,0 ц/га, соответственно, прибавка составила 30,0 ц/га (+ 7,5%). На опытном участке биометрические показатели растений свидетельствовали об опережении роста в период вегетации, что позволило получить более высокую урожайность на 30,0 ц/га (7,5%).

Таблица 3

Схемы защиты растений *Beta vulgaris* L. опытного и контрольного участков

Опытный участок			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка	Бетагран Трио, КЭ	Опрыскивание	1,50
2-я обработка, 2–3 пары листьев	Бицепс 22, КЭ	Опрыскивание	1,50
	Трицепс, ВДГ		0,02
	Биопрепарат		0,02
3-я обработка, смыкание листьев в междурядьях	Бицепс 22, КЭ	Опрыскивание	0,05
	Трицепс, ВДГ		0,02
	Центурион, КЭ		0,40
	Биопрепарат	Опрыскивание	0,02
Контрольный участок (контрольная хозяйственная схема)			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка	Бетагран Трио, КЭ	Опрыскивание	1,50
2-я обработка, 2–3 пары листьев	Бицепс 22, КЭ	Опрыскивание	1,50
	Трицепс, ВДГ		0,02
3-я обработка, смыкание листьев в междурядьях	Центурион, КЭ	Опрыскивание	0,40

Примечание: контрольный участок представлен хозяйственной схемой защиты растений (представленной руководителем хозяйства), концентрации указаны согласно инструкциям применения пестицидов; опытный участок – с частичной заменой химпрепаратов на биологически активный препарат на основе *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis*. Источник: составлено автором на основе [10].

Таблица 4

Схемы защиты растений *Pisum sativum* L. опытного и контрольного участков

Опытный участок			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка, всходы	Агритокс, ВК	Опрыскивание	0,75
	Биопрепарат		0,02
2-я обработка, начальные этапы бутонизации	Биопрепарат	Опрыскивание	0,02
	Ци-Альфа, КЭ		1,00
	Данадим Эксперт, КЭ		0,15
Контрольный участок (контрольная хозяйственная схема)			
Обработка/Фаза	Препарат	Способ обработки	Норма расхода л/га (т)
1-я обработка, всходы	Агритокс, ВК	Опрыскивание	0,75
2-я обработка, начальные этапы бутонизации	Оптимо, КЭ	Опрыскивание	0,50
	Ци-Альфа, КЭ		1,00
	Данадим Эксперт, КЭ		0,15

Примечание: контрольный участок представлен хозяйственной схемой защиты растений (предоставленной руководителем хозяйства), концентрации указаны согласно инструкциям применения пестицидов; опытный участок – с частичной заменой химпрепаратов на биологически активный препарат на основе *Bacillus amyloliquefaciens* + *Bacillus subtilis*. Источник: составлено автором на основе [10].

Определение экономической эффективности от применения предложенной схемы защиты растений, с учетом полученных результатов, позволяет рекомендовать проведение дальнейших исследований по применению изучаемого биопрепарата.

Одновременно полевой опыт был заложен на экспериментальной площадке № 4 (центральная часть Тамбовской области): исследуемая культура – *Pisum sativum* L., сорт Рокет, предшественник *Zea mays* L., площадь опытного участка 15 га, обработка – механизированное опрыскивание в два этапа: всходы и начальные этапы бутонизации, эффективность применения биопрепарата оценивали по фактической урожайности культуры, дата проведения уборки урожая 04.08.2024 [14, 15]. Далее представлены фактические схемы защиты растений *Pisum sativum* L. опытного и контрольного участков (табл. 4).

Средняя урожайность опытного поля по культуре составила 27,6 ц/га, контрольного участка – 25,0 ц/га, прибавка по урожайности *Pisum sativum* L. составила +2,6 ц/га, что составляет 10,4%. Прибавка по урожайности при применении исследуемого биопрепарата позволяет получить экономическую эффективность от применения данной схемы защиты, следовательно, может быть рекомендована

для дальнейших исследований по внедрению в производственном цикле следующего урожая года.

### Заключение

Согласно проведенным исследованиям, применение биологически активного препарата на основе микробного синтеза *Bacillus amyloliquefaciens* и *Bacillus subtilis* в схеме защиты сельскохозяйственных растений, с частичной заменой химических регуляторов роста, оказывает стимулирующее действие на рост и развитие растений и способствует повышению урожайности согласно исследуемым культурам. Прибавка к урожайности с 1 га хозяйственных площадей составила: *Hordeum vulgare* L. – плюс 1,0 ц/га, что соответствует 1,8%; *Triticum aestivum* L. – плюс 0,8 ц/га (1,3%); *Beta vulgaris* L. на экспериментальном поле составила 430,00 ц/га, на контрольном поле 400,0 ц/га, соответственно, прибавка составила 30,0 ц/га (+ 7,5%); по *Pisum sativum* L. прибавка составила 2,6 ц/га, что соответствует 10,4%. Расчет экономической эффективности от предложенной схемы защиты растений, с учетом полученных результатов, позволяет рекомендовать проведение дальнейших исследований по применению изучаемого биопрепарата.

## Список литературы

1. Дрепа Е.Б., Пшеничный Р.Н. Применение биопрепаратов Bionovatic при выращивании озимой пшеницы // Агрохимический вестник. 2022. № 4. С. 73–78. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-4-013.
2. Долженко В.И. Защита растений: настоящее и будущее // Плодородие. 2018. № 1. С. 24–26. DOI: 10/25680/519948603.2018.100.06.
3. Емельянов Д.В., Ботвич И.Ю., Мальчиков Н.О., Шевырнов А.П. Оценка динамики температур сельскохозяйственных объектов по данным беспилотных воздушных судов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. № 13 (6). С. 757–765. DOI: 10.17516/1999-494X-0264.
4. Павловская Н.Е., Тупиков Н.Ю. Действие новых биологических препаратов на хозяйственно ценные признаки яровой пшеницы Дарья // Вестник аграрной науки. 2023. № 2 (101). С. 40–48. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2023.2.40.
5. Полоус В.С., Степанов С.П., Прокопова Л.О., Осауленко С.Н. Возможности стабилизации биологической активности почвы при использовании органических, минеральных удобрений, микроорганизмов и ресурсосберегающих обработок // Успехи современного естествознания. 2023. № 1. С. 13–19. DOI: 10.17513/use.37978.
6. Даштоян Ю.В., Степанов С.А., Касаткин М.Ю. Структура мезофилла пластинки листьев пшеницы // Бюллетень Ботанического сада Саратовского госуниверситета. Выпуск 11. С. 209–219. URL: <https://bbs.sgu.ru/ru/articles/struktura-mezofilla-plastinki-listev-pshenicy> (дата обращения: 18.02.2025).
7. Сухорученко Г.И., Буркова Л.А., Иванова Г.П., Васильева Т.И., Долженко О.В., Иванов С.Г., Долженко В.И. Формирование ассортимента химических средств защиты растений от вредителей в XX веке // Вестник защиты растений. 2020. Т. 103. Вып. № 1. С. 5–24. DOI: 10.31993/2308-6459-2020-103-1-05-24.
8. Кузнецова Н.И., Козловский Ю.Е. Таксономическая принадлежность, фунгицидная активность и протективные свойства штамма *Bacillus amyloliquefaciens* // Биотехнология. 2023. Т. 39, № 3. С. 3–11. DOI: 10.56304/S0234275823030031.
9. Ерегина С.В., Кузнецова М.М. Потенциал использования микроорганизмов рода *Bacillus* в растениеводстве // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2024. № 3 (77). С. 19–35. DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-19-35.
10. Попов А.С., Овсянникова Г.В., Сухарев А.А., Дуплий Н.Г. Влияние биопрепарата агримитин на урожайность и качество зерна озимой пшеницы в южной зоне Ростовской области // Зерновое хозяйство России. 2019. № 3 (63). С. 14–18. DOI 10.31367/2079-8725-2019-63-3-14-18.
11. Шевчук Н.И., Жаркова С.В. Влияние стимуляторов роста на формирование урожайности сортов ячменя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. Т. 2–2 (89). С. 100–102. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-2-2-100-102.
12. Слободчиков А.А. Влияние средств защиты растений на продуктивность сортов яровой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34, № 2. С. 10–14. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10202.
13. Семина С.А., Жеряков Е.В., Жерякова Ю.И. Особенности роста растений сахарной свеклы при использовании различных полифункциональных регуляторов роста растений // Нива Поволжья. 2022. № 2 (62). С. 1008–1014. DOI: 10.36461/NP.2022.62.2.021.
14. Орешникова О.П., Кожухова Е.В. Энергия прорастания и всхожесть разных морфотипов гороха при обработке стимуляторами роста // Вестник НГАУ. 2021. № 2 (59). С. 53–61. DOI: 10.31677/2072-6724-2021-59-2-53-61.
15. Жаркова С.В. Эффективность применения биологических препаратов на сое // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. Т. 10–1 (92). С. 147–149. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-10-1-147-149.

## НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 631/635

DOI 10.17513/use.38384

**МЕТОДЫ ИНТРОДУКЦИИ, НАПРАВЛЕННЫЕ  
НА СУЩЕСТВЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
НАСЛЕДСТВЕННОСТИ РАСТЕНИЙ****Дабиева У.М.***ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия  
имени В.Р. Филиппова», Улан-Удэ, e-mail: yrandabieva@mail.ru*

Сегодня существует необходимость подробного рассмотрения методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений с учетом современных достижений науки. Целью настоящей работы является обзор и обобщение исследований по изучению методов интродукции с существенным изменением наследственности растений. При рассмотрении и кратком обзоре этих методов автором использованы методы систематизации, анализа и синтеза научной литературы. При исследовании использованы базы данных о новых мутантных сортах совместного объединенного центра «Международного агентства по атомной энергии» и «Продовольственной и сельскохозяйственной Организации объединенных наций». Временной промежуток научных источников – с 1925 по 2024 г. При этом проанализировано более 80 источников, но наиболее актуальными оказались 56 из них, которые указаны в списке литературы. Известно, что методы с существенным изменением наследственности растений подразделяются на следующие три подхода: метод ступенчатой акклиматизации; методы отдаленной гибридизации; методы модификации геномов растений. Обзор литературы по методу ступенчатой акклиматизации растений показал, что он является весьма длительным процессом и в настоящее время используется для весьма ценных видов растений, а также для дендрофлоры северных регионов. Сегодня метод отдаленной гибридизации на основе подхода получения гаплоидных культур используется для создания новых сортов растений. Учитывая современные достижения науки, автор предлагает включить в методы интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений методы модификации геномов растений, которые включают в себя следующие подходы: индуцированный мутагенез, метод использования биологических мутагенов, а также трансгенез. Таким образом, в настоящее время методы интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений получили значительный импульс в развитии, появились новые сорта культурных растений, которые можно использовать для их интродукции в различных климатических условиях.

**Ключевые слова:** интродукция, методы, наследственность, гибридизация, ступенчатая, трансгенез, мутагенез, индуцированный

**INTRODUCTION METHODS AIMED  
AT SIGNIFICANT CHANGES IN PLANT HEREDITY****Dabieva U.M.***V.R. Filippov Buryat State Agricultural Academy,  
Ulan-Ude, e-mail: yrandabieva@mail.ru*

Today, there is a need for a detailed review of the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants, taking into account modern scientific achievements. The purpose of this work is to review and summarize research on the study of methods of introduction with a significant change in plant heredity. When reviewing and briefly reviewing these methods, the author used methods of systematization, analysis and synthesis of scientific literature. The study used databases on new mutant varieties from the joint center of the International Atomic Energy Agency and the Food and Agriculture Organization of the United Nations. The time period of the scientific sources is from 1925 to 2024. At the same time, more than 80 sources were analyzed, but the most relevant were 56 sources listed in the list of references. It is known that methods with significant changes in plant heredity are divided into the following three approaches: the method of stepwise acclimatization; methods of remote hybridization; methods of modification of plant genomes. A review of the literature on the method of stepwise acclimatization of plants has shown that it is a very long process, and it is currently used for very valuable plant species, as well as for the dendoflora of the northern regions. Today, the method of remote hybridization based on the haploid crop production approach is used to create new plant varieties. Taking into account modern scientific achievements, we propose to include in the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants the item: methods of modification of plant genomes, which include the following approaches: induced mutagenesis, the method of using biological mutagens, as well as transgenesis. Thus, at present, the methods of introduction with a significant change in the heredity of cultivated plants have received a significant boost in development, new varieties of cultivated plants have appeared that can be used for their introduction in various climatic conditions.

**Keywords:** introduction, methods, heredity, hybridization, stepwise, transgenesis, mutagenesis, induced

### Введение

В переводе с латинского *introduction* означает «введение, приведение». При этом обращает на себя внимание перевод слов *intro* – «входить, вникать, углубляться» и «*ductio*» – «ведение, увод, отведение» [1, с. 56]. Известно также словосочетание *in cultural introductus*, которое переводится как «введенный в культуру» [2, с. 84]. В соответствии с терминами и понятиями, принятыми Советом ботанических садов СССР в 1971 г. под *интродукцией растений* понимается целеустремленная деятельность человека по введению в культуру в данном естественно-историческом районе растений (родов, видов, подвидов, сортов и форм), ранее в нем не произраставших, или перенос их из местной флоры [3].

Учитывая, что теоретические изыскания в области теории интродукции растений в основном проводились в советский период, в настоящей работе автор попытался провести анализ перспектив развития методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений, оценить их прикладное значение для сельского хозяйства с учетом анализа библиографических данных и определить степень изученности предложенных методов интродукции, а также изучить современные достижения науки в теории и практике по этим подходам.

**Целью настоящей работы** является обзор и обобщение исследований по изучению методов интродукции с существенным изменением наследственности культурных растений.

### Материалы и методы исследования

При рассмотрении и кратком обзоре этих методов автором использованы методы систематизации, анализа и синтеза научной литературы по теме исследования. При исследовании использованы базы данных о новых мутантных сортах совместного центра объединенного центра «Международного агентства по атомной энергии» и «Продовольственной и сельскохозяйственной Организации объединенных наций». Временной промежуток научных источников – с 1925 по 2024 г. При этом проанализировано более 80 источников, но наиболее актуальными оказались 56 из них, которые указаны в списке литературы. Настоящая работа основана на современных принципах подготовки современных обзоров по протоколу PRISMA [4].

### Результаты исследования и их обсуждение

В 1957 г. известный советский ученый С.Я. Соколов выделял два основных подхода к интродукции культурных растений [5, с. 25]: методы предварительного выбора интродуцентов; методы непосредственной интродукции растений.

При этом методы непосредственной интродукции растений делятся на две основные категории: методы без существенного изменения наследственности растений; методы с существенным изменением наследственности растений, которые нужны для успешной интродукции растения в новых почвенно-климатических условиях. Методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений, указанные С.Я. Соколовым [5, с. 25] и Н.А. Базилевской [6, с. 112], несколько различаются. С.Я. Соколов выделяет пять подходов: ступенчатую акклиматизацию; изменение наследственности по стадии яровизации; изменение наследственности по световой стадии; вегетативную гибридизацию; половую гибридизацию, включая отдаленную, с направленной культурой гибридов. Н.А. Базилевская выделяет только два метода: ступенчатую акклиматизацию и метод отдаленной гибридизации, половой и вегетативный. В работе автор будет руководствоваться методами интродукции, направленными на существенные изменения наследственности растений, указанными Н.А. Базилевской. Однако, учитывая, что в последние несколько десятилетий произошли кардинальные изменения в методах модификации геномов растений, автор посчитал, что необходимо внести в методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений, еще один пункт: возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции, которые включают такие подходы как индуцированный мутагенез; мутагенез с помощью биологических мутагенов, трансгенез (табл. 1). Все эти методы рассмотрены ниже более подробно.

*Метод ступенчатой акклиматизации.* Известно, что метод ступенчатой акклиматизации открыл А. Гумбольдт, и это отмечал А. Декандоль, в России он был применен И.В. Мичуриным при интродукции абрикоса [6, с. 112]. Этот метод предполагает постепенный сдвиг растений к северу для их адаптации к более холодным условиям климата.

Таблица 1

Методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений

Методы интродукции, направленные на существенные изменения наследственности растений		
Соколов С.Я.	Базилевская Н.А.	
1. Ступенчатая акклиматизация. 2. Изменение наследственности по стадии яровизации. 3. Изменение наследственности по световой стадии. 4. Вегетативная гибридизация. 5. Половая гибридизация, особенно отдаленная, с направленной культурой гибридов	1. Ступенчатая акклиматизация. 2. Метод отдаленной гибридизации, половой и вегетативный	Возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции: – индуцированный мутагенез; – мутагенез с помощью биологических мутагенами; – трансгенез

В 1963 г. предлагалось создать целую систему ступенчатой акклиматизации растений сначала в масштабах нескольких регионов, а затем постепенно перейти на всесоюзный уровень. На начальном этапе организации ступенчатой акклиматизации предлагались конкретные растения, которые необходимо интродуцировать: персик, черешня, актинидия, виноград амурский, грецкий орех, орех черный, фундук, орех уссурийский, лещина дальневосточная, миндаль, каштан посевной, лавр благородный, каштан зубчатый, эвкоммия вязолистная, лимонник китайский, соя, которые можно было продвигать с южных территорий в Москву, Ленинград, Минск, Киев, Томск и т.д. Предлагалось также методом ступенчатой акклиматизации продвигать на северные территории или северно-восточные территории европейской части страны многие кормовые культуры, древесные породы и декоративные растения [6, с. 113]. С другой стороны, говорилось, что недостаточно были разработаны методы ступенчатой акклиматизации территории растений Урала и Сибири, особенно для зерновых культур, прежде всего озимой пшеницы, плодово-ягодных, кормовых лекарственных и других растений [7].

Вместе с тем в то же время известный ботаник А.Л. Лыпа утверждал, что существуют разногласия по поводу применимости ступенчатой акклиматизации растений, учитывая, что такие работы до 1963 г. не проводились. С одной стороны, исследователи говорили о длительности и неэффективности применения ступенчатой акклиматизации растений, но, оппонировав им, А.Л. Лыпа приводил в пример опыт И.В. Мичурина, в котором ученому удалось интродуцировать абрикос на 700 км севернее Ро-

стова всего за 12 лет по двум географическим ступеням [8].

В контексте географических аспектов акклиматизации растений, то есть их способности адаптироваться к более холодным климатическим условиям в течение одного поколения, были проведены исследования, касающиеся грецкого ореха. Согласно данным, представленным Ф.Л. Щепотьевым, максимальная дистанция, на которую может быть успешно продвинут грецкий орех в холодные регионы, составляет 500 км [9, с. 74].

Работы, которые велись с 1963 г. по акклиматизации в Центральном сибирском ботаническом саду г. Новосибирска винограда амурского (*Vitis amurensis* Rupr.) показали, что, несмотря на значительные различия климатических условий произрастания, он был оценен как перспективный для интродукции в Новосибирской области [10].

В целом несмотря на теоретическую правильность метода ступенчатой акклиматизации растений, практическое его применение является, по мнению Н.А. Базилевской, очень трудоемким и длительным процессом, и целесообразно его использование только для весьма ценных видов растений [6, с. 114].

Тем не менее в настоящее время метод ступенчатой акклиматизации получил развитие в работах по интродукции дендрофлоры северных регионов [11, с. 35; 12]. Ученые-северяне (Н.А. Бабич, М.М. Андропова и др.) указывают, что на значительное увеличение эффективности интродукции растений влияют границы и условия естественного ареала произрастания вида, и географическое направление интродукции, которые определяют такие значимые детерминанты теории ступенчатой акклиматизации, как первая ступень акклиматизации, величина интродукционной ступени [13, с. 67].

*Метод отдаленной гибридизации.* В начале XX в. метод отдаленной гибридизации на практике был воплощен в жизнь И.В. Мичуриным, который сделал его основным методом своей работы. Ученый добавил к нему ряд дополнительных методов – ментора, предварительного сближения и др., на основе которых ученый получил множество новых сортов плодово-ягодных растений для европейской части России [14].

Теоретическое изучение метода отдаленной гибридизации как одного из методов селекции началось в 1920-х гг. во Всероссийском институте растениеводства (ВИР), который тогда возглавлял выдающийся ученый Н.И. Вавилов [15].

Большую роль в развитии теории отдаленной гибридизации сыграл блистательный ученый-генетик Г.Д. Карпеченко, который был первым заведующим лаборатории генетики в ВИР. Ученый впервые в мире получил гибрид от разных родов растений – редьки посевной (*Raphanus sativus* L.) и капусты огородной (*Brassica oleracea* L.) [16].

Кроме того, сотрудниками лаборатории генетики ВИР методами отдаленной гибридизации были получены новые сорта: ранняя яровая пшеница, озимые формы мягкой пшеницы, отдаленные гибриды подсолнечника с земляной грушей, которые не подвержены ржавчине, засухоустойчивый гибрид дикого арбуза колоцинта с культурным его аналогом, а также гибриды плодово-ягодных культур, например гибриды малины и ежевики, которые имеют разное количество хромосом, и т.д. [17].

Однако начавшийся в 1930–1940-е гг. политический террор в отношении генетики и известных ученых-генетиков со стороны власти и представителей так называемой «лысенковщины», который продолжался до середины 1960-х гг., привел к полному уничтожению генетики как науки [18].

В настоящее время отдаленная гибридизация широко используется в селекции плодовых культур. Например, известны труды академика Г.В. Еремина по получению новых сортов плодовых культур на юге России [14].

Кроме того, методы отдаленной гибридизации используются для получения новых сортов растений с использованием гаплоидных технологий, при этом около половины этих технологий приходится на злаковые растения.

Для получения удвоенных гаплоидов (*double haploids* – *DH*) используют три подхода: культуру пыльников, культуру изоли-

рованных микроспор и отдаленную гибридизацию с последующей селективной элиминацией хромосом вида-опылителя [19]. При этом к преимуществам последнего метода относится отсутствие альбиносных культур, а также генетическая стабильность *DH*-линий [20].

Например, технологии получения гаплоидных линий для риса были описаны еще в 1982 г. [21]. А к 1986 г. китайские исследователи, используя методы культуры пыльников, получили более ста сортов риса, которые имели разные характеристики по устойчивости к неблагоприятным факторам: холодостойкие, скороспелые, устойчивые к разным болезням, что имеет важность для интродукции полученных сортов риса в различные регионы [22]. В исследованиях ученых из стран Южной и Центральной Америки 1991 г. были получены данные о хорошей устойчивости к холодным условиям, засоленности выведенных ими гаплоидных сортов риса [23]. С другой стороны, в Корею в 1993 г. был выведен новый сорт риса из пыльниковой культуры Joryeongbyeou, который характеризуется раннеспелостью и устойчивостью к проседанию стеблей [24].

Что касается получения гибридов ячменя с помощью *DH*-технологий, то оно связывается с так называемым методом *бульбосум bulbosum*, суть которого заключается в скрещивании диплоидных или тетраплоидных линий ячменя с диплоидными клонами *Hordeum bulbosum* [25]. Интересно отметить, что еще в 1979 г. канадское правительство дало добро на лицензию на распространение высокоурожайной линии *DH*-ячменя Mingo созданной предприятием Ciba-Geigy Limited [26].

Таким образом, сегодня современные методы получения гаплоидных культур массово используются для создания новых сортов риса, пшеницы, ячменя с различными характеристиками, которые можно использовать в том числе и для их интродукции. С другой стороны, учеными отмечается, что существуют ограничения применения этих технологий к сортам мягкой пшеницы, тритикале, связанные с реакцией на пыльники.

*Возможное использование методов модификации геномов растений в целях их интродукции.* В настоящее время существуют несколько способов мутационной селекции растений:

– индуцированный мутагенез, который является не чем иным, как получением мутаций в организме путем облучения расте-

ний (гамма-лучи, рентгеновские лучи, ионный пучок, ультрафиолетовое облучение, облучение лазером) или химическим путем, когда на наследственность растений воздействуют химическими мутагенами – ЭМС (этилметансульфонат), МНМ (М-метил-Н-нитрозомочевина), ФВ (фтористый водород), ММС (метилметансульфонат) [27];

– селекция биологическими мутагенами – агробактериями (например, *Agrobacterium tumefaciens*) и вирусами (*Tobacco mosaic virus*) [28];

– трансгенез, который получается путем геномного редактирования, которое в свою очередь подразделяется на следующие методы – использование генов ДНК-олигонуклеотидов, использование эндонуклеазов, использование белковых редакторов – ZF- и TALEN-нуклеазов, а также метода CRISPR/Cas, в котором используются короткие РНК [29].

#### *Индукцированный мутагенез*

Впервые радиационный мутагенез был получен в Советском Союзе Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым в 1925 г., которые изучили влияние рентгеновых лучей на появление наследственных изменений у низших грибов (*Mucoraceae*) [30; 31, с. 7].

В 1926 г. на Международном генетическом конгрессе в Берлине американский ученый Г.Дж. Мёллер показал на примере дрозофил, что существует возможность получения искусственного мутагенеза в организме при воздействии на него рентгеновскими лучами [32].

Первым ученым, применившим радиационный мутагенез у культурных растений, был американец Льюис Джон Стэдлер, который в 1928 г. получил мутации в кукурузе, пшенице и ячмене при их облучении рентгеновскими лучами и радием [33; 34]. Затем через сравнительно короткое время, в 1934 г., был получен первый сорт культурного растения с искусственным мутагенезом – табаком, который имел коммерческий успех [35].

Эти и другие исследования подтолкнули таких советских ученых-генетиков, как Н.Л. Делоне [36], Н.В. Тимофеев-Рессовский [37], А.А. Сапегин [38], к изучению влияния радиации на мутагенез растений, насекомых и грибов. При этом именно работы Н.Л. Делоне и А.А. Сапегина были направлены на изучение возможностей применения искусственного мутагенеза в селекции растений. Известно, что А.А. Сапегин в 1929 г. изучал влияние рентгеновских лучей на продуктивность озимой и яровой

пшеницы [38], Н.Л. Делоне в том же году получил экспериментальные данные мутаций пшеницы при облучении рентгеновскими лучами [36].

Первые эксперименты влияния индуцированного мутагенеза на растения были далеки от практического применения в селекции. Н.И. Вавилов, знакомый с этими исследованиями, говорил о том, что полученные результаты не давали каких-либо надежд на применение полученных индуцированных радиационным методом семян пшеницы в сельском хозяйстве ввиду их низкой продуктивности, для этого, видимо, необходимо выявить оптимальную дозу излучения рентгеновских лучей [39].

В советское время с использованием методов индуцированного мутагенеза было получено множество новых сортов сельскохозяйственных культур, которые отличались такими характеристиками, как устойчивость ко многим болезням, высокая продуктивность в сочетании с устойчивостью к неблагоприятным климатическим условиям, что очень важно для интродукции культурных растений в тех регионах, в которых они ранее не культивировались. Например, широкое применение в сельском хозяйстве Западной Сибири получил сорт яровой мягкой пшеницы Новосибирская-67, который был создан с применением методов радиационного мутагенеза [40, с. 33].

По данным 2024 г. в базе данных о новых мутантных сортах совместного центра Объединенного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства содержится 3433 мутантных сорта [41], из которых на Россию приходится 216 новых мутантных сортов. Таким образом, по селекции на основе мутаций на долю России приходится 6,3 % мировых мутантных сортов культурных растений. По этому показателю Россия находится на четвертом месте после КНР (817), Японии (500) и Индии (345) [42].

В настоящее время в России довольно успешно продолжают работы по созданию новых сортов культурных растений, которые имеют высокие адаптационные характеристики к новым природно-климатическим условиям, что говорит о том, что их можно использовать в целях интродукции.

Например, по данным 2019 г. учеными ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова при облучении семян сои малыми дозами радиации от 40 до 100 Гр, а растений – от 10 до 20 Гр были созданы новые ультра-

скороспелые сорта сои, которые были адаптированы к природно-климатическим условиям Московской области и имеют хорошие показатели продуктивности [43, с. 37].

Не менее интересны полученные в 2024 г. учеными Национального научного центра Республики Крым с помощью радиационного мутагенеза около сорока мутантных форм персика, которые приобрели такие преимущества, как высокая устойчивость к засухе, к морозам, раннеспелость, наличие более крупных плодов и т.д. [44].

Кроме того, следует отметить полученные советскими учеными ряд успешных сортов культурных растений с помощью методов химического мутагенеза, основоположником которых является выдающийся ученый И.А. Рапопорт, который за открытие химического мутагенеза был номинирован на Нобелевскую премию [45].

В настоящее время сотрудниками Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН под руководством Н.С. Эйгес на основе морозоустойчивого сорта пшеницы – пшенично-пырейного гибрида (ППГ) 186, с использованием химических мутагенов была создана целая линейка хемомутантных зимостойких сортов озимой пшеницы. При этом ученые отмечают, что зимостойкость является весьма сложным фактором, который состоит из множества компонентов: устойчивость к отрицательным температурам, устойчивость к задыханию под снегом, толерантность к низкотемпературному фитопатогену, устойчивость к вымоканию, устойчивость к ледяным коркам, устойчивость к выпиранию почвы, которое появляется при оттаивании замерзшей почвы. Таким образом, индуцируемое растение, которое было подвержено химическому мутагенезу в целях повышения зимостойкости, должно иметь не только устойчивость ко всем этим негативным подфакторам климатических условий, но дополнительно иметь комплекс ценных признаков – высокая урожайность и крупность плодов, высокое содержание белка и т.д. Ученые отмечают, что все эти полученные в течение длительного времени новые высокозимостойкие сорта озимой пшеницы (такие, как сорт имени Рапопорта, Белая, Московская 39 стандарт 2 ) выживали не только в благоприятные и неблагоприятные, но и в особо неблагоприятные зимние периоды [46].

Кроме вышеописанных видов индуцированного мутагенеза значительный интерес представляет метод аэрокосмического (космического) мутагенеза растений [47].

#### *Трансгенезили геномное редактирование*

В 1999 г. были осуществлены первые эксперименты направленного геномного редактирования растений с применением *химерных РНК-ДНК-олигонуклеотидов*, которые помогли исправить гены табака и кукурузы. Данный метод вызвал у этих растений устойчивость к определенным гербицидам [48]. Однако дальнейшие исследования показали, что этот метод не имеет больших перспектив, поскольку мутации, вызванные в растениях, оказались идентичны спонтанным мутациям, то есть мутагенным факторам окружающей среды [49]. Вызывает некоторый интерес метод геномного редактирования, основанный на *использовании эндонуклеаз*, специальных ферментов, с помощью которых добиваются замены участков генома растений [50].

В дальнейшем появились более совершенные методы геномного редактирования на основе белковых редакторов, как метод ZFNs (Zinc-finger nucleases)-нуклеазы, метод TALEN-нуклеазы. Эти подходы основаны на активизации двухцепочных разрывов в интересующих участках ДНК и позволяют рекомбинировать их [51]. ZFNs метод основан на использовании белковых доменов, сцепленных с ионами цинка, которые в свою очередь восприимчивы к определенным триплетам нуклеотидов в цепочке генома и связываются с ним. К недостаткам этого метода можно отнести то, что ZFN дают множественные нецелевые двуцепочечные разрывы ДНК (DSBs), что влияет на значительное увеличение мутаций [52]. Одним из новаторских методов геномного редактирования (ГР) до недавнего времени считался метод на основе химерных нуклеаз TALEN (transcription activator-like effector nucleases), в котором используются эффекторы нуклеаз отдельных бактерий, каждый из которых определяет один нуклеотид. Таким образом, распознавание необходимой цепочки ДНК является более точным по сравнению с методом редактирования ZFN-нуклеаз, и модели ГР, созданные на основе TALEN, более точно приводят к разрыву в ДНК в любом его участке [29]. Однако в последние годы более широкое применение получил метод геномного редактирования на основе CRISPR/Cas, в котором распознавание необходимой цепочки ДНК осуществляется не белками, а короткими РНК [53]. Успешность метода CRISPR/Cas связана с механизмом работы векторной конструкции на его основе по принципу комплементарности, что на порядок повышает точность редактирования, а также универсальностью и простотой метода.

В последние годы в большей части стран, в основном в развитых странах, началось широкое использование мутагенных сельскохозяйственных растений, тем не менее во многих странах не разрешаются или существуют ограничения на создание и выращивание генетически модифицированных организмов (ГМО). Вместе с тем законодательство многих стран, включая и Россию, разрешает ввозить генетически измененные сельскохозяйственные растения и применять их в качестве продуктов питания, кормов для животных и для исследовательских целей [54]. Несмотря на то, что существуют опасения и некоторая предвзятость по отношению к ГМО и использованию его в сельском хозяйстве, научными исследованиями доказана безопасность использования ГМО в пищу. С 1995 г., когда разрешили коммерческое использование ГМО, не зафиксировано негативных последствий для потребителей. ГМО повысили урожайность, устойчивость к вредителям, инфекциям, засухе, холоду, солености в почвах [55]. Необходимо отметить, что

применение генетически модифицированных организмов (ГМО) в агропромышленном комплексе может иметь потенциальные негативные последствия. В частности, существует вероятность горизонтального переноса генов устойчивости к патогенам или химическим веществам от культивируемых растений к диким сородичам через механизмы перекрестной гибридизации [56]. Тем не менее, учитывая безопасность использования генно-модифицированных методов по сравнению с такими методами увеличения урожайности сельскохозяйственной продукции, как использование пестицидов, антибиотиков, эмульгаторов, гормонов роста, и другими методами, использование генной инженерии в агропромышленном комплексе (АПК) имеет многоаспектные выгоды: рост эффективности агропроизводства; рост урожайности агрокультур; снижение болезней агрокультур и потерь от вредителей и неблагоприятных погодных условий; снижение затрат на борьбу с вредителями, в частности на пестициды и т.д. [54].

Таблица 2

Уникальные признаки некоторых сельскохозяйственных растений, полученные в результате инсерционного мутагенеза [28]

Виды растений	Мутаген	Мутагенное значение
Ячмень обыкновенный ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	GR, рентгеновские лучи и этиленмин	Повышает устойчивость к низким температурам, засухе и заморозкам
Рапс ( <i>Brassica napus</i> L.) и Капуста полевая ( <i>Brassica campestris</i> L.)	ГР	Устойчивость к солености
Чина посевная ( <i>Lathyrus sativus</i> L.)	ГР	Повышает устойчивость к засухе и высоким температурам
Арахис гипогейный ( <i>Arachis hypogaea</i> L.) и Азиатский культурный рис ( <i>Oryza Sativa</i> )	ГР	устойчивость к низким температурам и засухе
Мягкая пшеница ( <i>Triticum aestivum</i> )	GR и бета-лучи	Повышает устойчивость к низким температурам, засолению, щелочности и засухе
Ирис ( <i>Iris sp.</i> )	ГР	Повышенная устойчивость к низким температурам
Фазеолус обыкновенный ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Маш или Винья лучистая ( <i>Vigna radiata</i> L.) Wil.) и Голубиная крупа ( <i>Cajanus cajan</i> Millsp.)	ГМ	Устойчивость к засухе, засолению и дефициту фосфора
Азиатский культурный рис ( <i>Oryza Sativa</i> )	ГР	Устойчивость к засолению, засухе и низкому уровню pH
Сетария ( <i>Setaria sp.</i> )	GR & FNI	Устойчивость к засухе
Рапс ( <i>Brassica napus</i> L.)	GR & EMS	Устойчивость к низким температурам и засухе
Соя культурная ( <i>Glycine max.</i> )	Лазер и GR	Устойчивость к засухе
Арабидопсис талианский ( <i>Arabidopsis thaliana</i> ) и Азиатский культурный рис ( <i>Oryza Sativa</i> )	EMS	Устойчивость к солености
Мягкая пшеница ( <i>Triticum aestivum</i> )	NEU и EMS	Устойчивость к засухе, низким температурам и засолению
Мягкая пшеница ( <i>Triticum aestivum</i> )	EMS	Повышает переносимость соли

Нельзя не отметить, что для сельского хозяйства России интересны исследования геномных исследований, направленные на получение генетически модифицированных сельскохозяйственных растений, которые с успехом переносят как абиотические, так и биотические неблагоприятные условия. По мнению автора статьи, полученные геномным редактированием растения, которые являются стрессоустойчивыми к неблагоприятным абиотическим условиям, можно использовать для целей интродукции в различных климатических условиях России.

В табл. 2 показаны уникальные признаки некоторых сельскохозяйственных растений, полученные в результате инсерционного мутагенеза. Интерес для интродукции в северных широтах вызывают такие мутагенные сельскохозяйственные растения, как ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.), арахис гипогейный (*Arachis hypogaea* L.), азиатский культурный рис (*Oryza Sativa*), мягкая пшеница (*Triticum aestivum*), рапс (*Brassica napus* L.), которые обладают устойчивостью к низким температурам, заморозкам, засухе и т.д. [28].

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время в целях интродукции в той или иной мере используются методы с существенным изменением наследственности растений: метод ступенчатой акклиматизации; методы отдаленной гибридизации. Несмотря на трудоемкость получения новых интродуцированных видов растений, метод ступенчатой акклиматизации используется для весьма ценных видов растений, а также в работах по интродукции дендрофлоры северных регионов. Метод отдаленной гибридизации широко используется в сельском хозяйстве, при этом гаплоидные культуры можно использовать в том числе и для интродукции. Кроме того, автором предлагается включить в методы интродукции, направленные на существенные изменения, еще один пункт: возможное использование методов модификации геномов растений. Устойчивые к абиотическим факторам окружающей среды новые мутагенные сорта культурных растений, полученные в том числе и геномным редактированием, возможно также использовать для их интродукции в различных климатических условиях России.

### Список литературы

1. Левинский К.А. Латинско-русский, русско-латинский словарь. М.: АСТ, 2022. 320 с.

2. Шлыков Г.Н. Интродукция и акклиматизация растений: введение в культуру и освоение в новых районах. М.: Сельхозиздат, 1963. 488 с.

3. Понятия, термины, методы и оценка результатов работы по интродукции растений. М.: ГБС АН СССР, 1971. 23 с.

4. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // *Syst Rev.* 2021. № 10 (1). P. 89. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.

5. Соколов С.Я. Современное состояние теории интродукции и акклиматизации растений // *Интродукция растений и зеленое строительство.* 1957. Труды БИН АН СССР. Сер. VI. Вып. 2. С. 9–32.

6. Базилевская Н.А. Теории и методы интродукции растений. М.: Издательство Московского университета, 1964. 131 с.

7. Доброхвалов В.П. Система ступенчатой акклиматизации растений как возможная основа организации акклиматизационной работы в стране // *Бюллетень главного ботанического сада.* М., 1964. Вып. 55. С. 17–26.

8. Лыпа А.Л. Методологические и методические предпосылки к проведению работ по ступенчатой акклиматизации растений // *Бюллетень главного ботанического сада.* М., 1965. Вып. 59. С. 3–8.

9. Щепотьев Ф.Л., Рихтер А.А., Павленко Ф.А., Молотков П.И., Кравченко В.И., Ирошников А.И. М.: Агропромиздат, 1985. 224 с.

10. Горохова Г.И. Интродукция винограда амурского в Новосибирске // *Бюллетень главного ботанического сада.* М., 1984. Вып. 132. С. 41–44.

11. Андропова М.М., Бабич Н.А., Хамитов Р.С. Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. 412 с.

12. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // *Известия вузов. Лесной журнал.* 2021. № 3. С. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85.

13. Залывская О.С., Бабич Н.А. Интродукция арборифлоры в северные широты: монография. Архангельск: САФУ, 2023. 214 с.

14. Еремин Г.В., Еремин В.Г. Использование отдаленной гибридизации в селекции косточковых плодовых культур на юге России // *Труды Кубанского государственного аграрного университета.* 2021. № 91. С. 110–120. DOI: 10.21515/1999-1703-91-110-120.

15. Инге-Вечтомов С.Г. Н.И. Вавилов, ВИР, Университет... // *Экологическая генетика.* 2020. № 18 (1). С. 5–10. DOI: 10.17816/ecogen19140.

16. Захаров И.К. Влияние ВИР на становление и развитие научных направлений по генетике и селекции растений в Институте цитологии и генетики Сибирского отделения АН СССР/ РАН и *vice versa* // *Историко-биологические исследования.* 2020. Т. 12, № 3. С. 46–65. DOI: 10.24411/2076-8176-2020-13004.

17. Вишнякова М.А., Гончаров Н.П. Институционализация генетики и отдаленной гибридизации растений в 1920–1930 годах во Всесоюзном институте растениеводства // *Генетика.* 2019. Т. 55, № 11. С. 1241–1252. DOI: 10.1134/S001667581911016X.

18. Филин В.Р., Кожевникова А.Д. Воспоминания С.Ю. Липшица о Николае Ивановиче Вавилове и гербарии Московского государственного университета // *Историко-биологические исследования.* 2023. Т. 15, № 1. С. 129–148. DOI: 10.24412/2076-8176-2023-1-129-148.

19. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Хомякова О.В., Калашникова Э.В. Отдаленная гибридизация как метод получения гаплоидных растений у злаков (обзор проблемы) // *Биотехнология и селекция растений.* 2019. № 2 (2). С. 44–52. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-2-44-52.

20. Калинин Н.В., Донцова В.Ю., Черткова Н.Г., Марченко Д.М. Создание гаплоидных растений озимой пшеницы на основе метода отдаленной гибридизации с кукурузой

- зой // *Зерновое хозяйство России*. 2024. № 16 (6). С. 74–80. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-95-6-74-80.
21. S. Samantaray J., Ali K.L.C., Nicolas J.L., Katara R.L., Verma C., Parameswaran B.N., Devanna A., Kumar B., Dash S.S. Bhuyan. Doubled Haploids in Rice Improvement: Approaches, Applications, and Future Prospects // In: J. Ali, Sh.H.Wani (ed) *Rice Improvement, Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. 2021. P. 425–447. DOI: 10.1007/978-3-030-66530-2\_12.
22. Loo S-W., Xu Z-H. Anther culture for rice improvement in China // In: Y.P.S. Bajaj (ed.), *Biotechnology in agriculture and forestry: Rice*. Springer-Verlag, Berlin. 1990. P. 151–179. DOI: 10.1007/978-3-642-83986-3\_12.
23. Zapata F.J., Alejar M.S., Torrizo B., Novero A.U., Singh V.P., Senadhira D. Field performance of anther-culture-derived lines from F1 crosses of Indica rices under saline and non-saline conditions // *Theoretical and Applied Genetics*. 1991. № 83. P. 6–11. DOI: 10.1007/BF00229219.
24. Islam M.I., Arif M.R., Hasan Md.T., Robin A.H.K. Anther Culture in Crop Plants: Progress and Perspectives // *Plant Biotechnology and Breeding*. 2023. № 11. P. 69–96. DOI: 10.9787/PBB.2023.11.2.69.
25. Pendinen G.I., Scholz M. Homoeologous chromosome pairing at metaphase I of meiosis in *Hordeum vulgare* L. × *H. bulbosum* L. triploid hybrids (HvHbHb). // *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020. № 3 (2). P. 6–15. DOI: 10.30901/2658-6266-2020-2-02.
26. Dwivedi S.L., Britt A.B., Tripathi L., Sharma S., Upadhyaya H.D., Ortiz R. Haploids: Constraints and opportunities in plant breeding // *Biotechnology Advances*. 2015. № 33 (6). P. 812–829. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.07.001.
27. Chaudhary J., Deshmukh R., Sonah H. Mutagenesis Approaches and Their Role in Crop Improvement // *Plants (Basel)*. 2019. № 8 (11). P. 467. DOI: 10.3390/plants8110467.
28. Antwi-Boasiako A., Adu-Antwi P., Amoah R.A., Boateng A.B., Gyau J., Frimpong M., Boakye-Mensah I., Ahiamadia I.O. Mutagenesis Application in Plant Improvement: Advancements and Its Future // Open access peer-reviewed chapter. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.112510.
29. Щербань А.Б. Модификация геномов растений: от индуцированного мутагенеза до геномного редактирования // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. № 26 (7). С. 684–696. DOI: 10.18699/VJGB-22-83.
30. Курсанова Т.А. Основоположник отечественной микробиологии. К 150-летию со дня рождения академика Г.А. Надсона // *Вестник Российской академии наук*. 2017. Т. 87, № 7. С. 663–669. DOI: 10.7868/S086958731707009X.
31. Моссэ И.Б. Лекции по радиационной генетике. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2005. 208 с.
32. Курсанова Т.А. Между биохимией, физикой и политикой. Особенности молекулярной биологии в СССР (30–60-е гг.) // *Историко-биологические исследования*. 2021. Т. 13, № 3. С. 94–116. DOI: 10.24412/2076-8176-2021-3-94-116.
33. Stadler L.J. Genetic effects of x-rays in maize // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1928. № 14. P. 69–75. DOI: 10.1073/pnas.14.1.69.
34. Stadler L.J. Mutations in Barley induced by x-rays and radium // *Science*. 1928. № 68. P. 186–7. DOI: 10.1126/science.68.1756.186.
35. Acquah G. Principles of Plant Genetics and Breeding. John Wiley & Sons; Hoboken, N.J, USA: 2009. 740 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/details/PrinciplesOfPlantGeneticsAndBreeding/page/n3/mode/2up> (дата обращения: 16.02.2025).
36. Делоне Л.Н. Опыты по рентгенизации культурных растений. Пшеница // *Труды института селекции*. 1928. № 4. С. 3–16.
37. Timofeeff-Ressovsky N.W. Auslösung von Vitalitätsmutationen durch Röntgenbestrahlung bei *Drosophila melanogaster* // *Strahlentherapie*. 1934. № 51. P. 658–663.
38. Сапегин А.А. Рентгеномутации как источник новых сортов сельскохозяйственных растений // *Природа*. 1934. № 9. С. 28–34.
39. Баутин В.М. Научный вклад выдающегося ученого академика Н.И. Вавилова в развитие российского и мирового сельского хозяйства // *Известия ТСХА*. 2018. Вып.1. С. 147–160. DOI: 10.26897/0021-342X-2018-1-147-160.
40. Новохатин В.В., Драгавцев В.А. Научное обоснование эколого-генетической селекции мягкой яровой пшеницы // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34, № 12. С. 39–46. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11206.
41. The FAO/IAEA mutant variety database // *Plant Breeding & Genetics Newsletter*. 2024. № 52. 20 p.; URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Newsletters/pbg-52.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
42. Mutant Variety Database. [Электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Home.aspx> (дата обращения: 10.02.2025).
43. Шевченко В.А., Дорохов А.С., Бельшикина М.Е., Кобозева Т.П., Загоруйко М.Г., Попова Н.П., Синеговский М.О., Гуреева Е.В., Башмаков И.А., Дегтарева Е.Д. Технологии и технические средства в соеводстве Нечерноземья: монография. М.: ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2024. 140 с. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.43.78.001.
44. Смыков А.В. Радиационный мутагенез и изменчивость персика // *Бюллетень ГНБС*. 2019. Вып. 132. С. 60–67. DOI: 10.25684/NBG.boot132.2019.07.
45. Эйгес Н.С., Волченко Г.А., Волченко С.Г., Духаннин Ю.А., Кузнецова Н.Л., Упелник В.П. Пшеница в средней полосе России. Некоторые аспекты ее становления. К 70-летию открытия метода химического мутагенеза И.А. Рапопортом III. Свойства, сопутствующие высокой выносливости к неблагоприятным условиям внешней среды у озимой пшеницы // *История и педагогика естествознания*. 2018. № 3. С. 35–44. DOI: 10.24411/2226-2296-2018-10306.
46. Вайсфельд Л.И., Боме Н.А. Теоретические аспекты химических мутагенов и фенотипических активаторов роста растений, разработанные И.А. Рапопортом (обзор литературных источников) // *Биосфера*. 2022. № 3 (22). С. 245–253. DOI: 10.24855/biosfera.v14i3.689.
47. Jiang L., Zhang B., Chen W., Qiu T., Wang L., Yang Sh. Space breeding in modern agriculture // *American Journal of Agricultural Research*. 2020. № 5. P. 81. DOI: 10.28933/ajar-202-01-1005.
48. Beetham P.R., Kipp P.B., Sawycky X.L., Arntzen C.J., May G.D. A tool for functional plant genomics: chimeric RNA/DNA oligonucleotides cause in vivo gene-specific mutations // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1996. № 96 (15). P. 8774–8778. DOI: 10.1073/pnas.96.15.8774.
49. Ruiter R., Van Den Brande I., Stals E., Delaure S., Cornelissen M., D’Halluin K. Spontaneous mutation frequency in plants obscures the effect of chimeraplasty // *Plant Molecular Biology*. 2003. № 53 (5). P. 715–729. DOI: 10.1023/B:PLAN.0000019111.96107.01.
50. Watanabe K., Breier U., Hensel G., Kumlehn J., Schubert I., Reiss B. Stable gene replacement in barley by targeted double-strand break induction // *Journal of Experimental Botany*. 2015. № 67 (5). P. 1433–1445. DOI: 10.1093/jxb/erv537.
51. Mosbach V., Poggi L., Viterbo D., Charpentier M., Richard G.F. TALEN-induced double-strand break repair of CTG trinucleotide repeats // *Cell Reports*. 2018. № 22 (8). P. 2146–2159. DOI: 10.1016/j.celrep.2018.01.083.
52. Abdel-Hamid A.A., Galal O.A., Elmoghazy A., Abd Elrazek M.M. Using gamma rays for genetic improvement of Rice resistance to blast disease // *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*. 2022. № 13 (10). P. 85–89. DOI: 10.21608/jacb.2022.152986.1028.
53. Hunter CT. (2021) CRISPR/Cas9 targeted mutagenesis for functional genetics in maize // *Plants*. 2021. № 10 (4). P. 723. DOI: 10.3390/plants10040723.
54. Дудин М.Н. Трансгенные организмы (ГМО) в сельском хозяйстве: объективная необходимость в целях обеспечения глобальной продовольственной безопасности или способ увеличения прибыли ТНК АПК? // *Продовольственная политика и безопасность*. 2020. № 7 (2). С. 107–120. DOI: 10.18334/ppib.7.2.100666.
55. Goodman R.E. Twenty-eight years of GM Food and feed without harm: why not accept them? // *GM Crops Food*. 2024. № 15 (1). P. 40–50. DOI: 10.1080/21645698.2024.2305944.
56. Schütte G., Eckerstorfer M., Rastelli V., Reichenbecher W., Restrepo-Vassalli S., Ruohonen-Lehto M., Saucy A.-G.W., Mertens M. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants // *Environmental Sciences Europe*. 2017. № 29 (1). P. 5. DOI: 10.1186/s12302-016-0100-y.

## СТАТЬЯ

УДК 551.332.56

DOI 10.17513/use.38385

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОЗЕР У ЛЕДНИКА БАШКАРА  
(ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ) В 2023–2024 ГГ.****Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р.***ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, e-mail: inrush@bk.ru*

В условиях изменения климата и деградации ледников возникает большое количество ледниковых озер с угрозой их катастрофического прорыва. На Кавказе в долине реки Адылсу происходили прорывы озер у ледника Башкара в 1958, 1959, 1960 и 2017 гг. В последние годы произошли значительные изменения этих озер, и в 2024 г. наблюдался повышенный приток воды с ледника в озеро Башкара, что создало прорывоопасную обстановку. Целью исследования является оценка состояния озер у ледника Башкара в период увеличения притока воды в озеро Башкара и их динамики за 2017–2024 гг. Была проведена аэрофотосъемка с применением квадрокоптера 29.06.2024 и для сравнения использованы ортофотопланы и цифровые модели рельефа предыдущих аэрофотосъемок 2017 и 2023 гг. Выявлены значительное увеличение площади Башкара и уменьшение площади озера Лапа. На участке притока воды в озеро Башкара обнаружены следы прохождения селевого потока. Селевой режим наблюдался также на участке прорана на выходе с озера Башкара. В результате анализа материалов аэрофотосъемок был сделан вывод об изменении направления подледного канала стока с ледника Башкара и возможном повторном прорыве озера Башкара. Во избежание повторения прорыва озера Башкара в будущем предложено отвести водный поток с ледника, который питает озеро, влево, минуя озеро, путем прокопа на участке моренной перемычки минимальной высоты.

**Ключевые слова:** ледник Башкара, озеро Башкара, озеро Лапа, проран, селевой поток, подледниковая дренажная система

**FEATURES OF THE DYNAMICS OF LAKES NEAR  
THE BASHKARA GLACIER (CENTRAL CAUCASUS) IN 2023–2024****Bekkiev M. Yu., Dokukin M. D., Kalov R. Kh., Akaev A. R.***High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, e-mail: inrush@bk.ru*

In the conditions of climate change and glacier degradation, a large number of glacial lakes are emerging with the threat of their catastrophic outburst. In the Caucasus, in the Adylsu River valley, there were outbursts of lakes near the Bashkara glacier in 1958, 1959, 1960 and 2017 with catastrophic consequences. In recent years, there have been significant changes in these lakes and in 2024 there was an increased inflow of water from the glacier into Lake Bashkara, which created a dangerous situation. The purpose of the study is to assess the condition of lakes near the Bashkara glacier during the period of increased water inflow into Lake Bashkara and their dynamics for 2017–2024. Aerial photography was carried out using a quadcopter on 06/29/2024 and orthophotoplanes and digital terrain models from previous aerial surveys in 2017 and 2023 were used for comparison. Orthophotoplanes and digital terrain models of previous aerial surveys were used for comparison. A significant increase in the area of Bashkara and a decrease in the area of Lapa Lake were revealed. Traces of a debris flow have been identified in the area of the inflow of water into Bashkara Lake. A debris flow regime was also observed at the proran site at the outlet of Bashkara Lake. As a result of the analysis of aerial survey materials, a conclusion was made about a change in the direction of the subglacial runoff channel from the Bashkara glacier and a possible re-outburst of Bashkara Lake. In order to avoid a repeat of the Lake Bashkara outburst in the future, it is proposed to divert the water flow from the glacier that feeds the lake to the left, bypassing the lake, by digging a channel in the area of the minimum height of the moraine ridge.

**Keywords:** Bashkara glacier, Bashkara Lake, Lapa Lake, proran, debris flow, subglacial drainage system

**Введение**

В условиях изменения климата и деградации ледников во всем мире увеличивается количество ледниковых озер и возрастает опасность их прорыва. По данным обобщающего исследования, в настоящее время 15 млн человек проживают в зоне возможного поражения прорывными паводками и селями [1]. Одним из последних катастрофических событий был прорыв озера Лхонак Южное в Сиккиме 03.10.2023, в результате которого погибли 169 человек [2]. Перед ледником Башкара в долине р. Адылсу

бассейна р. Баксан на Центральном Кавказе существуют озера Башкара и Лапа, испытывавшие прорыв с прохождением разрушительного селевого потока по р. Адылсу и далее по р. Баксан 1 сентября 2017 г. [3]. Известно, что ранее прорывы озер происходили в 1958, 1959 и 1960 гг. [4, с. 116].

По данным анализа аэрофотоснимков был сделан вывод о том, что прорывы в середине XX в. происходили по подледному каналу стока с озера Башкара в процессе его формирования и прекратились после образования устойчивого постоянного подлед-

ного канала стока. Затем длительное время состояние озера было стабильным до тех пор, пока при наступании ледника Башкара в 1990-х годах не сформировался новый моренный вал, перекрывший поверхностный сток с озера [5]. С этого момента сток с озера в основном осуществлялся по подземным фильтрационным каналам, и уровень воды в озере испытывал сезонные колебания, достигавшие 1,5–2,0 м [6], в случаях с переливом воды через моренный вал повышение уровня достигало 4 м и более [7]. В многочисленных исследованиях озер Башкара отмечалась опасность прорыва озера [4, с. 120; 6; 8, с. 144]. Но прорыв 1 сентября 2017 г., несмотря на все прогнозы, стал неожиданностью и случился после выпадения аномальных осадков 45 мм и 98 мм [3]. Они вызвали цепочку процессов: на леднике Башкара возникли потоки, которые аккумулировались в подледниковой полости и прорвались со сходом селя в озеро и прохождением селевой волны по озеру, которая быстро размыла перемычку, и дальше по долине прошел катастрофический селевой поток [5]. В дальнейшем были проведены моделирования прорывного паводка и селевого потока [9, 10] и оценка изменений озер и гидрологического режима [11]. 24.04.2019 был выявлен факт и проведена оценка последствий схода снежно-ледово-каменной лавины на ледник Башкара [12].

В 2023–2024 гг. в ФГБУ «ВГИ» были проведены аэрофотосъемки ледниково-озерного комплекса Башкара. Уже в начале июня 2024 г. выявлен аномально высокий приток воды в озеро Башкара и изменилось состояние озер. Возникла необходимость оценки этого процесса и сравнения с событиями 2017 г.

**Целью исследования** является оценка состояния озер у ледника Башкара в период увеличения притока воды в озеро Башкара в 2024 г. и их динамики за 2017–2024 гг.

#### Материал и методы исследования

Для анализа были выбраны ортофотопланы аэрофотосъемок ФГБУ «ВГИ» с использованием квадрокоптера DJI Mavic Air 2 озер у ледника Башкара 05.08.2023, 22.10.2023 и 29.06.2024, а также 06.06.2024 (аэрофотосъемка ГУ МЧС России по КБР, квадрокоптер DJI Phantom 4) и 08.10.2017 (МГУ, квадрокоптер DJI Phantom 4). Разрешение ортофотопланов, построенных в программе Agisoft Metashape Professional, составляло около 0,10–0,13 м на пиксель.

Вследствие того что расхождения в плане между ортофотопланами составляли от 0,7 до 5,0 м, их привязывали по опорным точкам в программе ArcMap, в которой затем строили векторные слои контуров озер и определяли линейные и площадные параметры в системе координат WGS84 проекции UTM. Методы обработки материалов аэрофотосъемок подробнее представлены в работе [13].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение ортофотопланов и космоснимка Sentinel-2 28.08.2017 показало изменения, произошедшие с озерами Башкара и Лапа за период 2017–2024 гг. На рисунках 1 и 2 показаны контуры озер на ортофотопланах 08.10.2017 и 29.06.2024.

Данные площади озер Башкара и Лапа в разные годы представлены в таблице.

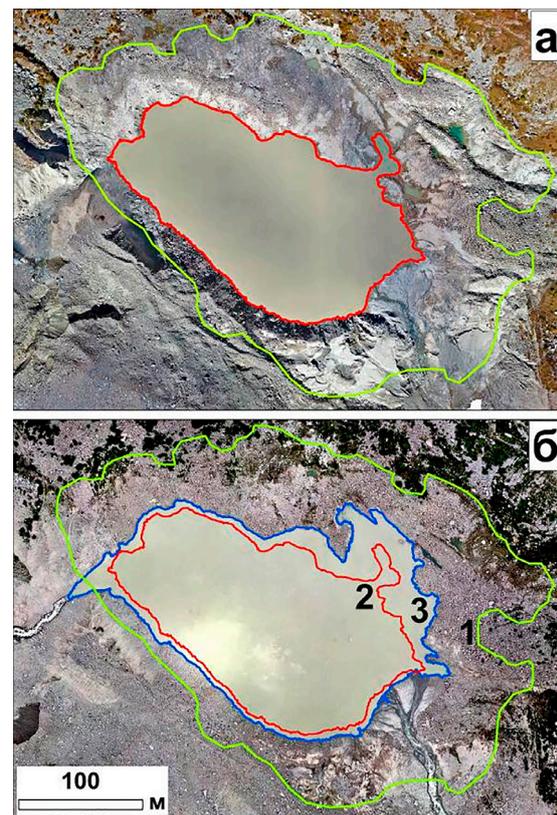


Рис. 1. Контурсы озера Башкара на ортофотопланах: а – 08.10.2017, б – 29.06.2024. 1 – контур озера до прорыва по космоснимку Sentinel-2 28.08.2017, 2 – контур озера 08.10.2017, 3 – контур озера 29.06.2024  
Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки МГУ 2017 г.

Таблица 1

Площади озер Башкара и Лапа в разные годы

Озеро	Площадь озера на соответствующую дату, тыс. м <sup>2</sup>				
	28.08.2017	08.10.2017	05.08.2023	22.10.2023	29.06.2024
Башкара	79,7	26,4	34,4	32,8	35,0
Лапа	58,6	44,7	27,9	21,0	24,5

Источник: составлено авторами.

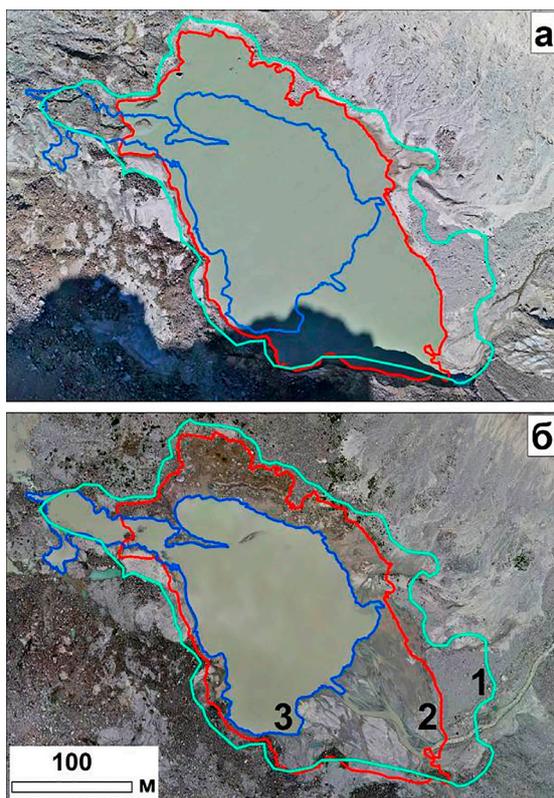


Рис. 2. Контуры озера Лапа на ортофотопланах: а – 08.10.2017, б – 29.06.2024. 1 – контур озера до прорыва по космоснимку Sentinel-2 28.08.2017, 2 – контур озера 08.10.2017, 3 – контур озера 29.06.2024

Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки МГУ 2017 г.

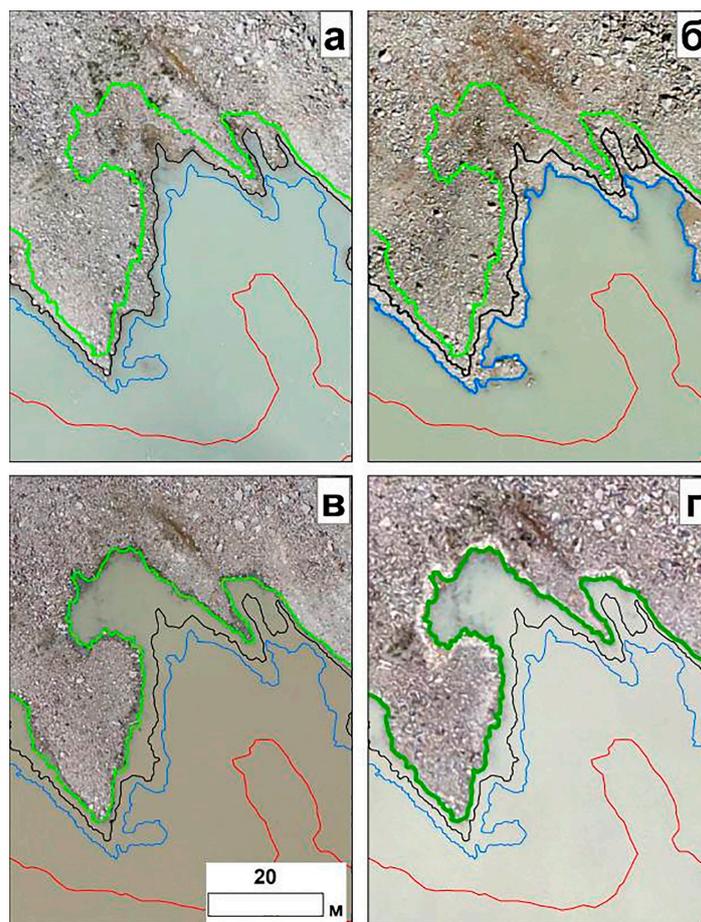
После прорыва озер 01.09.2017 наблюдался рост площади озера Башкара вследствие продолжения процесса оползания левого склона прорана и увеличения высоты плотины, а площадь озера Лапа уменьшалась вследствие размыва ледово-моренной перемычки и таяния в ней льда, а также из-за увеличения дельты на участке притока в озеро Лапа. Увеличение площади озера Башкара в 2017–2024 гг. после прорыва

составило 8,6 тыс. м<sup>2</sup> (32,6%), уменьшение площади озера Лапа – 20,2 тыс. м<sup>2</sup> (45,2%).

Уровень воды в озере Лапа уменьшился на 4,2 м, а в озере Башкара увеличился на 3,2 м [11]. При этом следует отметить значительное падение уровня воды и уменьшение площади озер в октябре 2023 г.: площадь озера Башкара стала меньше, чем в августе 2023 г., на 1,6 тыс. м<sup>2</sup>, а площадь озера Лапа – на 6,9 тыс. м<sup>2</sup> (частично из-за того, что берега были покрыты снегом и часть озера покрыта льдом со свежим снегом, что затруднило проведение границ).

На рисунке 3 показано изменение границ озера Башкара в северо-восточном углу. На фрагменте 22.10.2023 четко видна светлая полоса на участке берега, который 05.08.2023 был под водой. Значительное увеличение площади озера Башкара произошло в 2024 г. Оно видно на рисунке 3 (фрагменты в, г). Уровень озера 06.06.2024 и 29.06.2024 был практически одинаков, но 29.06.2024 на берегу появилась белая полоса только на участке именно северо-восточного угла (рис. 3г). В 2024 г. значительные изменения произошли на участке прорана озера Башкара (рис. 4). Здесь 22.10.2023 поверхностный сток на ортофотопланах был неразличим (рис. 4в), как и 08.10.2017 (рис. 4а). Но наземное обследование показало его наличие – вода стекала между камнями в виде ручья.

В 2024 г. сток с озера был аномальным, как и приток в озеро (рис. 5). На участке прорана в период 06.06.2024 – 29.06.2024 произошло изменение направления стока – он ушел вправо, и вход в подледный канал в массиве мертвого льда сместился на расстояние 30 м от прежнего (рис. 4д). 29.06.2024 перед входом в подледный канал ширина русла составляла 15 м, а 06.06.2025 – около 8 м, в то время как в августе 2023 г. она была 6 м. Наибольшие изменения произошли на участке прорана, где уклон русла резко увеличивался с 9–10° до 20–22°. В этом месте был подрезан правый осыпной склон на протяжении 30 м.



*Рис. 3. Границы озера Башкара в северо-восточном углу на фрагментах ортофотопланов: а – 05.08.2023, б – 22.10.2023, в – 06.06.2024, г – 29.06.2024. Береговая линия обозначена цветными линиями: красная 08.10.2017, черная 05.08.2023, синяя 22.10.2023, зеленая 06.06.2024, зеленая утолщенная 29.06.2024. Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки 06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР*

Была проведена оценка изменений на участке притока воды в озеро Башкара (рис. 5). По сравнению с состоянием русла притока воды в озеро Башкара в 2023 г. (рис. 5а) в 2024 г. в течение всего летнего сезона наблюдался увеличенный приток воды – ширина русла увеличилась с 3–4 м до 7–8 м (рис. 5б, 5в). В 2024 г. в отдельные моменты отмечался селевой режим – боковая эрозия (срезан участок старых озерных отложений площадью 500 м<sup>2</sup>), два участка новых селевых отложений площадью 350 и 950 м<sup>2</sup> на левом берегу потока и новая дельта (конус выноса) площадью 2300 м<sup>2</sup> (рис. 5в).

По-видимому, так же как в 2017 г. [5], в результате схода селевого потока в озеро по нему проходила селевая волна с сохранением селевого режима в русле прорана ниже озера. Поэтому и появилась светлая полоса на берегу в северо-восточном углу

озера (см. рис. 3г). Как следствие селевого режима ниже прорана при впадении в озеро Лапа отложения потока увеличили площадь дельты на 1,4 тыс. м<sup>2</sup>. Выявленный длительный процесс увеличенного притока воды в озеро Башкара в течение всего летнего сезона 2024 г. и сход селевого потока с участка правой половины языка ледника Башкара позволили сделать вывод об изменении гидрологического режима ледника Башкара. Ранее гидрологический режим ледника Башкара характеризовался тем, что доля стока с озера Башкара составляла 35%, а стока с ледника Башкара – 65% [11]. С учетом обнаруженных морфологических изменений можно признать, что соотношение между стоком с участка озера Башкара и с языка ледника Башкара поменялось в противоположную сторону.

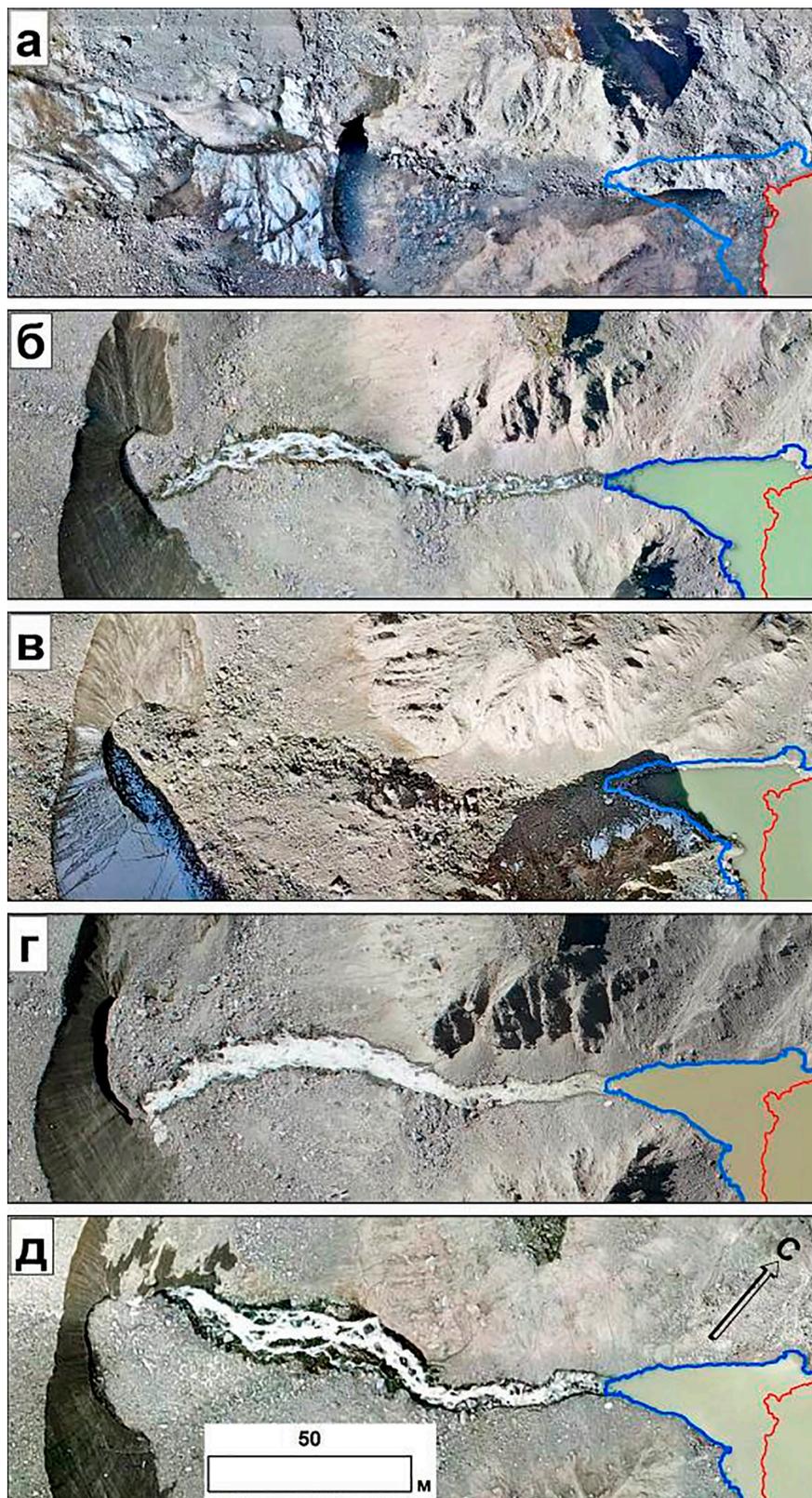


Рис. 4. Участок прорана озера Байкала в разные годы на ортофотопланах:  
а – 08.10.2017, б – 05.08.2023, в – 22.10.2023, г – 06.06.2024, д – 29.06.2024.  
Синяя линия – граница озера 29.06.2024, красная линия – граница озера 08.10.2017.  
Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки  
08.10.2017 МГУ и 06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР

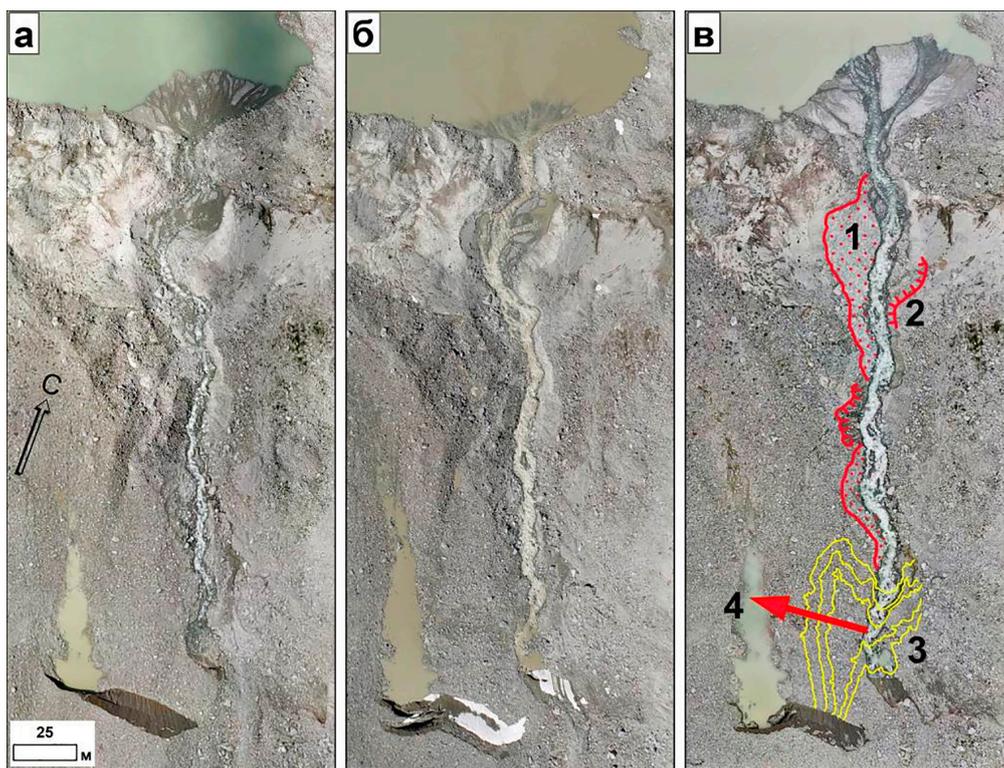


Рис. 5. Участок притока воды в озеро Башкара на ортофотопланах: а – 05.08.2023, б – 06.06.2024, в – 29.06.2024. 1 – селевые отложения в русловой зоне, 2 – участки боковой эрозии, 3 – горизонтали рельефа сечением 1 м, 4 – направление возможного отвода стока от озера. Источник: составлено авторами с использованием материалов съемки 06.06.2024 ГУ МЧС России по КБР

Следовательно, в подледной дренажной системе ледника Башкара произошла смена направления русла основного подледного стока талых вод. Раньше выход этого основного канала стока находился у конца языка ледника Башкара, теперь – на участке начала русла притока воды в озеро Башкара. Это – выходной грот у конца массива мертвого льда перед правым активным потоком льда ледника Башкара, берущего начало со склона горы Башкара. 24.04.2019 в основном на этот поток ледника обрушилась снежно-ледово-каменная лавина [12], и в дальнейшем предположительно это стало причиной изменения направления подледного канала стока, так как в результате замедления таяния изменилась динамика правого потока льда.

В случае стабилизации создавшейся в 2024 г. ситуации с увеличенным притоком воды возникает угроза нового прорыва озера Башкара, который может произойти при сочетании аномального таяния ледника в условиях высоких температур воздуха и выпадения аномальных осадков. Новый

селевой поток в результате пятащейся эрозии в зоне прорана ниже озера Башкара может привести к размыву оставшейся моренной перемычки и выплеску воды из озера, объем которого составляет около 340 тыс. м<sup>3</sup> [11], но может увеличиться при активизации оползней на подрезанных стенках прорана и увеличении высоты перемычки. Чтобы снизить риск нового прорыва озера Башкара, можно отвести увеличенный водный поток от озера Башкара, сделав прокоп на участке ниже выходного грота с массива мертвого льда (отмечено стрелкой на рисунке 5в), где русло слева сдерживает вал высотой около 1 м, как показывают горизонтали рельефа.

#### Заключение

Анализ результатов исследования показал, что в современных условиях изменения климата и активизации обвальных процессов происходят резкие изменения в динамике ледников и приледниковых озер, и при этом возникает угроза прорыва озер, длительное время находящихся в стабильном

состоянии. Мониторинг с использованием материалов космосъемок и аэрофотосъемок позволяет выявлять эти изменения и предупреждать о возникновении чрезвычайной ситуации с целью заблаговременно осуществить необходимые мероприятия по снижению риска прорыва озер.

### Список литературы

1. Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial lake outburst floods threaten millions globally // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article 487. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x
2. Zhang T., Wang W., An B. A massive lateral moraine collapse triggered the 2023 South Lhonak Lake outburst flood, Sikkim Himalayas // *Landslides*. 2024. Vol. 22. P. 299–311. DOI: 10.1007/s10346-024-02358-x.
3. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22, № 2. С. 70–80. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80).
4. Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с. URL: <https://sites.google.com/view/glaciobiblio/книги> (дата обращения: 02.02.2025).
5. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озер в долине р. Адыл-су (Центральный Кавказ) // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в 2-ух частях. Т. X. Ч. 2. Грозный: ООО «Формат», 2020. С. 369–375. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/343691924/?ysclid=m8zm2fjvas815358139> (дата обращения 02.02.2025).*
6. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // *Криосфера Земли*. 2007. Т. XI, № 1. С. 72–84. URL: [https://earthcryosphere.ru/archive/2007\\_1/09.Chernomorets\\_1\\_2007.pdf?ysclid=m8zl48yfs3663237207](https://earthcryosphere.ru/archive/2007_1/09.Chernomorets_1_2007.pdf?ysclid=m8zl48yfs3663237207) (дата обращения 02.02.2025).
7. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья // *Геориск*. 2013. № 3. С. 20–27. URL: [https://www.researchgate.net/publication/294206224\\_Kolebania\\_urovna\\_vody\\_v\\_gornyh\\_lednikovyh\\_ozerah\\_Prielbrusa](https://www.researchgate.net/publication/294206224_Kolebania_urovna_vody_v_gornyh_lednikovyh_ozerah_Prielbrusa) (дата обращения: 02.02.2025).
8. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/508508/?ysclid=m8znhicy4b531122568> (дата обращения: 02.02.2025).
9. Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // *Геориск*. 2018. Т. 12, № 2. С. 38–46. URL: <https://www.geomark.ru/articles/opyt-modelirovaniya-proryva-bashkarin/> (дата обращения: 02.02.2025).
10. Солодова А.С., Петраков Д.А., Пуганов К.А. Моделирование селевого потока при прорыве оз. Башкара в 2017 г. // *Лёд и Снег*. 2024. Т. 64, № 4. С. 527–542. DOI: 10.31857/S2076673424040043.
11. Pavlyukevich E.D., Krylenko I.N., Krylenko I.V. Modern evolution and hydrological regime of the Bashkara Glacier Lakes system (Central Caucasus, Russia) after the outburst on September 1, 2017 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2024. Vol. 17. № 4. P. 66–75. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3717.
12. Докукин М.Д., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Гяургиев А.В., Хаджиев М.М. Снежно-ледово-каменная лавина на леднике Башкара в ущелье Адыл-Су (Центральный Кавказ) 24 апреля 2019 года // *Криосфера Земли*. 2020. Т. 24, № 1. С. 64–70. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(64-70).
13. Акаев А.Р., Шидугов И.Ж. Применение БПЛА для мониторинга экзогенных процессов в приледниковой зоне (на примере ледника Мижирги) // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIII / Науч. ред. И.А. Керимов, В.А. Широкова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашин. М.: ИИЕТ РАН, 2023. С. 425–430. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.54.78.054.*

## СТАТЬЯ

УДК 550.35(470.11)  
DOI 10.17513/use.38386

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ  
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ГИПСА В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Наход В.А., Малов А.И., Дружинин С.В., Зыкова Е.Н.**

*ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова» УрО РАН, Архангельск, e-mail: Nakhod.Vitaliy@knauf.ru*

Основополагающим в современной жизни стало понятие экологической безопасности жизнедеятельности человека, одной из составляющих которого представляется допустимый радиационный фон. Современный уровень развития общества приводит к тому, что одним из важнейших параметров, который оказывает непосредственное влияние на выбор строительных материалов для обеспечения деятельности человека, служит экологическая безопасность, в том числе радиационная составляющая. Целью работы является комплексная оценка антропогенного влияния на изменение естественной радиационной составляющей на месторождении гипса в Холмогорском районе Архангельской области. В летний период 2024 года были выполнены работы по измерению мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения, удельной активности радионуклидов и плотности потока радона на разрабатываемом месторождении. По итогам экспериментальных работ выявлен локальный перенос радионуклидов в отвалы вскрышных пород, выделены два участка первого и второго классов по степени радионормативности. Количественные показатели активности радионуклидов находятся в пределах нормативных значений. Деятельность горного предприятия приводит к локальным изменениям радиационного фона, на фоне снижения гамма-излучения и плотности потока радона на территории карьера фиксируются повышенные значения гамма-излучения в отвалах вскрышных пород, а в карьерных водах повышаются концентрации урана.

**Ключевые слова:** радионуклиды, гамма-излучение, плотность потока радона, изотопы урана, донные отложения, гипс, Архангельская область

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова» УрО РАН FUUW-2025-0011 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № государственной регистрации 125022002727-2.*

**COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RADIATION COMPONENT  
AT THE GYPSUM DEPOSIT IN THE ARKHANGELSK REGION**

**Nakhod V.A., Malov A.I., Druzhinin S.V., Zykova E.N.**

*Federal Center for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov, Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, e-mail: Nakhod.Vitaliy@knauf.ru*

The concept of ecological safety of human life has become fundamental in modern life, one of the components of which is the permissible radiation background. The modern level of society development leads to the fact that one of the most important parameters, which has a direct impact on the choice of construction materials to ensure human activity, is environmental safety, including the radiation component. The purpose of the work is a comprehensive assessment of anthropogenic influence on the change of the natural radiation component at the gypsum deposit in Kholmogorsky district of Arkhangelsk region. In the summer period of 2024 the works on measurement of the ambient gamma radiation dose equivalent rate, specific activity of radionuclides and radon flux density at the developed deposit were carried out. According to the results of experimental works local transfer of radionuclides to overburden dumps was revealed, two areas of the first and second classes by radon hazard degree were singled out. Quantitative indicators of radionuclide activity are within the normative values. Activity of the mining enterprise leads to local changes of radiation background, against the background of decrease of gamma-radiation and radon flux density on the territory of the quarry, increased values of gamma-radiation in overburden dumps are fixed, and uranium concentrations in quarry waters increase.

**Keywords:** radionuclides, gamma radiation, radon flux density, uranium isotopes, bottom sediments, Arkhangelsk region, gypsum

*The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences FUUW-2025-0011 “Features of the migration of elements and their isotopes in the components of the environment of the Western sector of the Russian Arctic under conditions of climatic and man-made changes”, state registration number 125022002727-2.*

### Введение

Основополагающим в современной жизни стало понятие экологической безопасности жизнедеятельности человека, одной из составляющих которого является допустимый радиационный фон. Современный уровень развития общества приводит к тому, что одним из важнейших параметров, оказывающим непосредственное влияние на выбор строительных материалов для обеспечения деятельности человека, служит экологическая безопасность, в том числе радиационная составляющая.

Функционирование предприятий по добыче общераспространенных полезных ископаемых оказывает глобальное кратно увеличивающееся влияние на основные биогеоценозы [1]. Радионуклиды представлены во всех оболочках Земли, они содержатся в педосфере, гидросфере, атмосфере, а также в донных отложениях. Ряд ключевых природных радионуклидов представлен в основном  $Rn^{222}$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Th^{232}$ ,  $U^{234}$ ,  $U^{238}$ ,  $K^{40}$ , к антропогенным относится  $Cs^{137}$ .

В данной работе рассматриваются комплексный подход к определению возможного негативного воздействия радионуклидов, а также антропогенное влияние на изменение естественной радиационной составляющей. В течение 2024 года были выполнены работы по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, удельной активности радионуклидов и плотности потока радона на разрабатываемом месторождении.

**Цель исследования** – комплексная оценка антропогенного влияния на изменение естественной радиационной составляющей на месторождении гипса в Архангельской области.

### Материалы и методы исследования

Исследовательские работы проводились в Холмогорском районе Архангельской области в 10 км от Светлозерского поселения на участке недр Чугская площадь. Точки отбора проб располагались на территории горного отвода месторождения гипса «Глубокое», а также в непосредственной близости от него (рис. 1).

В летний период 2024 года в пределах горного отвода и на прилегающих территориях были проведены работы по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения и плотности по-

тока радона. Также изучалось распределение удельной активности радионуклидов  $Cs^{137}$ ,  $K^{40}$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Th^{232}$  в донных отложениях и  $U^{234}$ ,  $U^{238}$  в поверхностных водотоках.

Для определения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения участка, разрабатываемого открытым способом месторождения, а также прилегающих территорий в радиусе до 300 м использовался дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКГ-03 (производитель – НПУП «АТОМТЕХ»), диапазоны измерений мощности амбиентного эквивалента дозы от 0,03 до 300 мкЗв/ч; пределы допускаемой основной относительной погрешности  $\pm 20\%$ ). Всего выполнено 230 измерений МАЭД как на территории карьера, так и за его пределами (на близлежащих фоновых территориях, прилегающих к карьере).

Для выполнения гамма-спектрометрических измерений радионуклидов цезия-137, радия-226, тория-232, калия-40 пробы донных осадков сушили до воздушно-сухого состояния в лаборатории. Счетные образцы из проб подготовлены согласно Инструкции № И-04.15 по подготовке счетных образцов для последующего определения активности радионуклидов на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс-гамма». Измерение удельной активности изотопов проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс-гамма» (полное наименование прибора – Комплекс спектрометрический для измерений активности альфа-, бета- и гамма-излучающих нуклидов «Прогресс» с блоком детектирования БДЭГЗ-2У) по методике «Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения Прогресс (утверждена начальником ЦМИИ ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Ярыной В.П. 07.05.1996)» [2] в геометрии Маринелли объемом 1 л. Полученные с помощью программного обеспечения гамма-спектры были расшифрованы с целью получения значений удельной активности цезия-137, радия-226, тория-232 и калия-40 в счетных образцах. Также выполняли заверку значений с использованием низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксильного детектора GEM10P4-70 из особо чистого германия (HPGe): цифровой анализатор DSPEC LF, программное обеспечение MAESTRO-32.

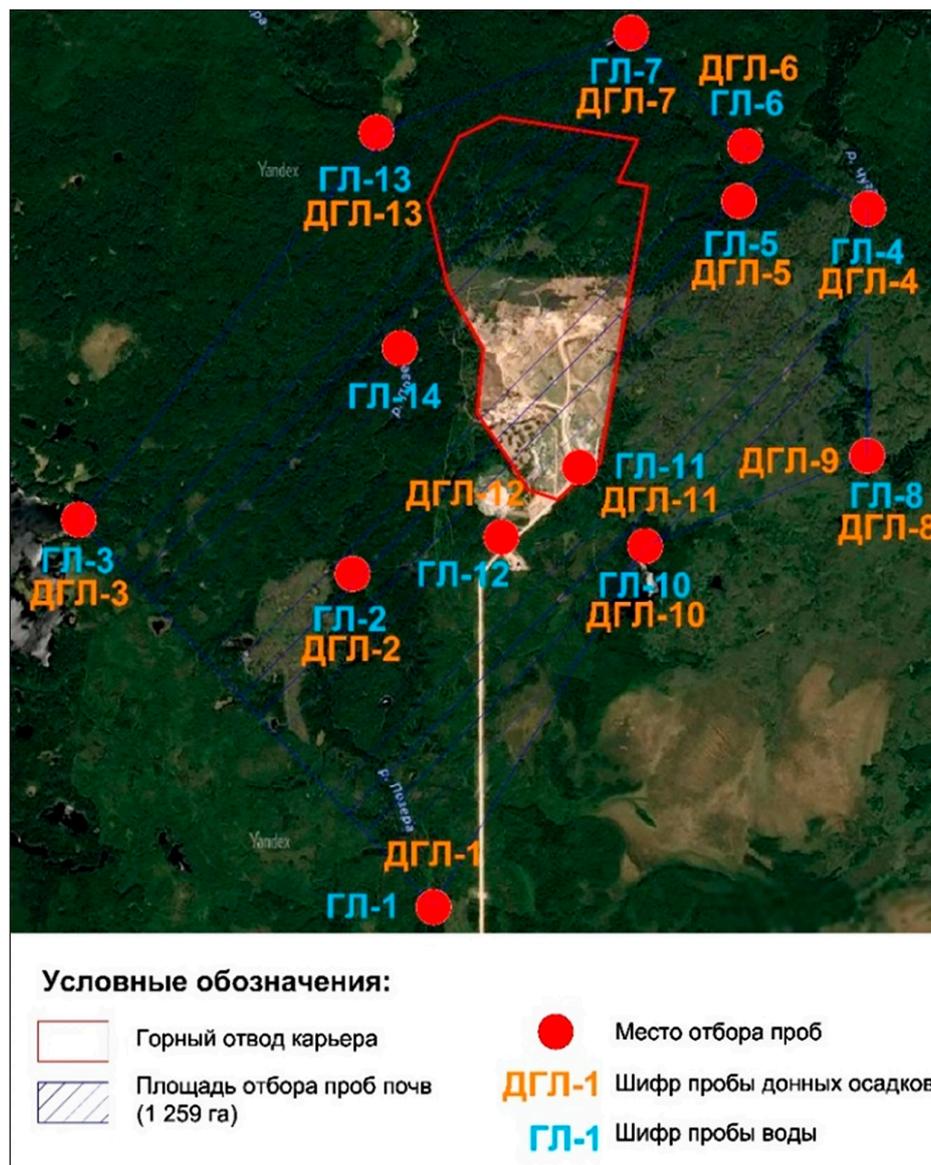


Рис. 1. Район исследования  
Источник: составлено авторами

Для определения растворенного урана отбирали пробы воды объемом не менее 5 л. Выделение изотопов урана из подземных вод осуществляли методом осаждения на гидроксиды железа, подготовку счетных образцов и измерение изотопов урана в водах выполняли по методике ФР.1.40.2013.15389 «Методика измерений объемной активности изотопов урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой», разработанной ФГУП «ВИМС» [3]. Выход урана контролировали введением в пробу изотопного трассера  $^{232}\text{U}$ , энергия альфа-

излучения которого заметно отличается от энергии естественных изотопов урана. Определение концентраций урана (мкг/л) и изотопного отношения ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) выполняли после радиохимической подготовки, включавшей переводение пробы в азотнокислый раствор; выделение определяемых изотопов с отделением мешающих радионуклидов; приготовление электролитическим способом тонкого счетного образца на подложке из нержавеющей стали. Спектрометрическое детектирование осуществляли с помощью полупроводникового альфа-спектрометра «Мультирад-АС» с погрешностью 3–7%. Общую концентрацию урана определяли по активности изотопа

$^{238}\text{U}$ , составляющего более 99% по массе в изотопной смеси природного урана. При измерении подготовленных счетных образцов (подложек) на альфа-спектрометре получены спектры, расшифровка которых позволила определить такие параметры, как концентрация общего урана, активность урана-238, урана-235 и урана-234, и рассчитать изотопное отношение урана-234 к урану-238.

Определение плотности потока радона (ППР) выполняли на профиле, состоящем из 14 точек отбора. Для полевых измерений ППР применяли Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» – АР (производитель Производственная компания «НТМ-Защита», Россия) с использованием автономной воздуходувки, фильтров-осушителей, накопительной камеры. Диапазон измерения величины плотности потока радона с поверхности грунта составляет от 20 до  $10^3$  мБк/с·м<sup>2</sup>. Предел допускаемой относительной погрешности при измере-

ниях величины плотности потока радона-222 с поверхности грунта не более  $\pm 30\%$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Для определения МАЭД гамма-излучения был выбран участок площадью более 250 га, который включал территорию горного отвода месторождения гипса, а также 300-метровую зону по периметру карьера. Замеры производили по квадратной сетке с шагом 100 на 100 м, общее количество замеров составило 229 штук. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М, оснащенный блоком обработки информации (БОИ) и блоком детектирования гамма-излучения (БДКГ-03), использовали для получения полевых данных. Идея исследования состояла в том, что предполагалось, что в глинах и суглинках содержится повышенное значение естественных радионуклидов, которые в результате деятельности карьера концентрируются в отвалах вскрышных пород. Обобщенная информация представлена в таблице 1.

Таблица 1

Результаты определения МАЭД гамма-излучения

№ п/п	Название точки отбора	Показания МАЭД, мкЗв/ч	СанПиН 2.6.1.2523-09 МАЭД гамма-излучения на рабочем месте, мкЗв/ч	% от допустимой нормы
1	Г-1	0,029	2,5	1,16%
2	Г-10	0,048	2,5	1,92%
3	Г-100	0,03	2,5	1,20%
4	Г-101	0,037	2,5	1,48%
5	Г-102	0,054	2,5	2,16%
6	Г-103	0,015	2,5	0,60%
7	Г-104	0,022	2,5	0,88%
8	Г-105	0,039	2,5	1,56%
9	Г-106	0,048	2,5	1,92%
10	Г-107	0,034	2,5	1,36%
...	....	.....	...	....
222	Г-92	0,047	2,5	1,88%
223	Г-93	0,058	2,5	2,32%
224	Г-94	0,053	2,5	2,12%
225	Г-95	0,038	2,5	1,52%
226	Г-96	0,029	2,5	1,16%
227	Г-97	0,028	2,5	1,12%
228	Г-98	0,027	2,5	1,08%
229	Г-99	0,055	2,5	2,20%
	Среднее	0,0379		1,52%
	Максимум	0,0690		2,76%
	Минимум	0,0110		0,44%
	Станд.откл.	0,0133		0,53%

Примечание: составлено авторами.

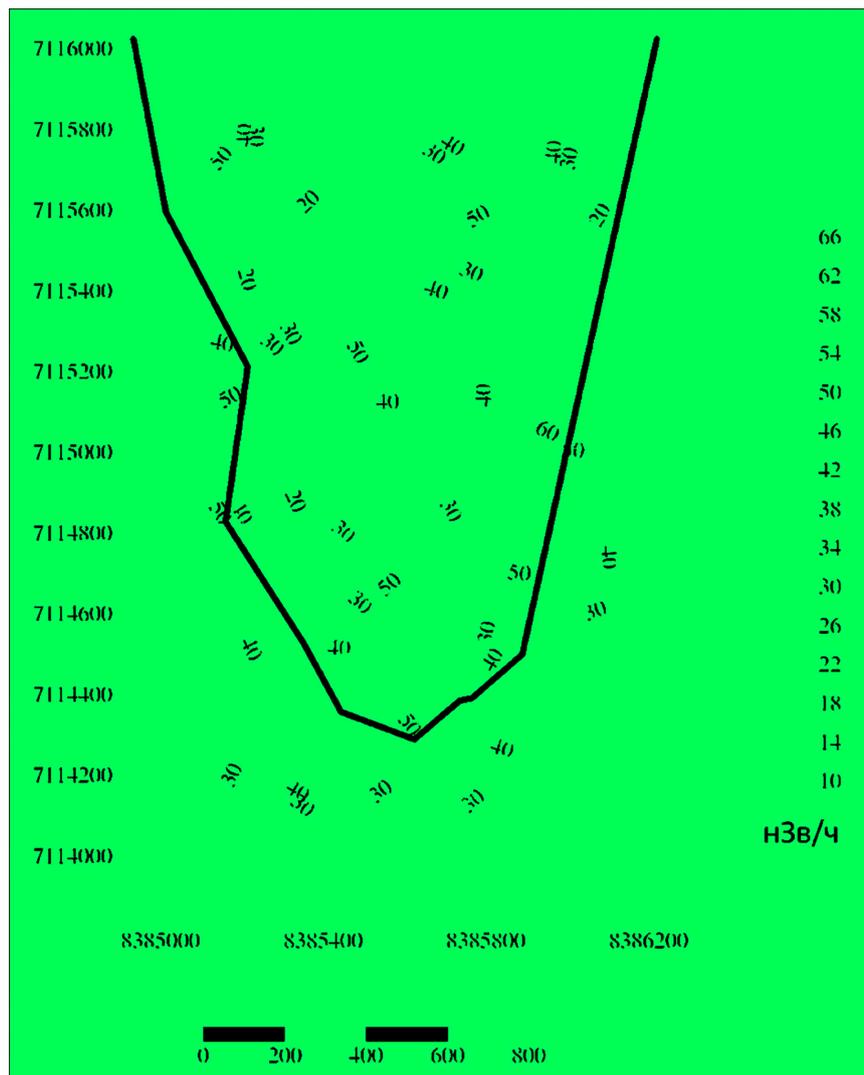


Рис. 2. Площадное распределение МАЭД  
 Источник: составлено авторами

В результате было установлено, что максимальное значение гамма-излучения составляет не более 2,76% от предельных дозовых нагрузок (ПДН), установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 для рабочих мест. Экспериментальные данные стали основой для построения схемы площадного распределения (рис. 2), на которой были выделены участки с пониженными значениями МАЭД. Эти участки приурочены к открытым гипсовым массивам, так как гипсы имеют низкие значения активности естественных радионуклидов. Согласно данным предприятия, разрабатывающего карьер гипса «Глубокое»,  $A_{эфф}$  составляет 11,1 Бк/кг. Однако в карьере отмечаются участки с повышенными значениями, которые приурочены к отвалам вскрышных пород, представленных смесью суглинков, глин и обломков

гипса в разных пропорциях. Следовательно, в результате горных работ происходило локальное перераспределение естественных радионуклидов на территории карьера.

Оценку плотности потока радона (ППР) осуществляли на 14 точках вдоль профиля, пересекающего территорию горного отвода месторождения с юга на север (рис. 3). Для определения ППР использовали радиометр Альфарад+ с автономной воздуходувкой. Основные результаты показаны на рисунке 3. Установлено, что на территории карьера гипса отмечаются значения ППР от 6 до 61 мБк/(м<sup>2</sup>с), что соответствует первому классу по радоноопасности (ППР менее 80 мБк/м<sup>2</sup>с). Здесь для устранения проблемы достаточно организовать обычную вентиляцию помещений, в которых располагается рабочий персонал.

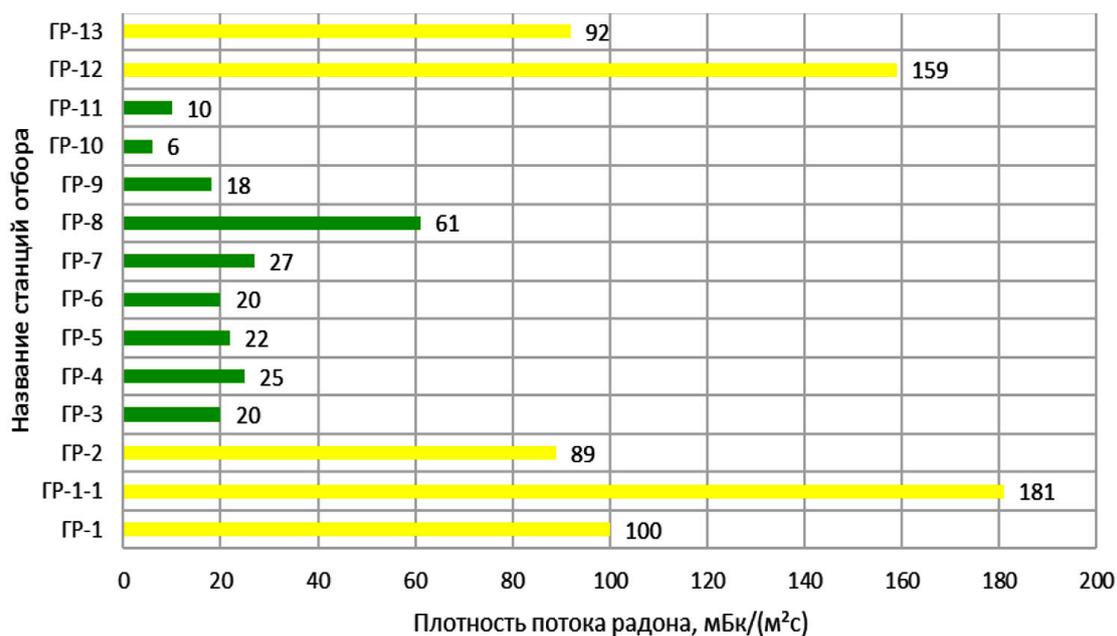
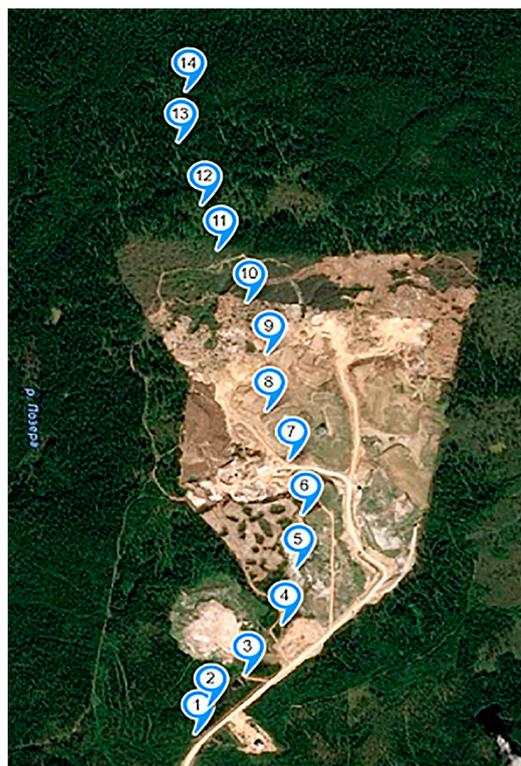


Рис. 3. Распределение плотности потока радона  
Источник: составлено авторами

Максимальные значения в 159 и 181 мБк/(м²·с) выявлены на территориях за пределами карьера, где отсутствует антропогенное воздействие на почвенный покров. Значения ППП от 80 до 200 мБк/м²·с соответствуют второму классу по радоноопасности. Из этого можно сделать вывод, что гипсовая толща представляет собой не-

проницаемую оболочку, которая минимизирует выходы радона на поверхность, что, в свою очередь, подтверждает фактор влияния геологии подстилающих пород [4–6]. Деятельность горнорудного предприятия изменяет естественный фон, снижая плотность потока радона в выработанном пространстве карьера.

Таблица 2

Распределение радионуклидов и химических элементов в донных отложениях и физико-химические параметры донных отложений

	Na	K	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Mo	Cd	Co	Ti	V
ДГЛ-1	48	455	2880	1740	32	7300	163	22	2,3	9	2,3	7,2	5,1	0,8	3	73	11
ДГЛ-2	44	373	3030	1250	31	6020	124	16	1,8	7	1,4	5,4	3,6	0,6	1	61	8
ДГЛ-3	35	75	383	241	2	791	8	2	0,3	1,4	0,7	0,8	2,9	0,1	0	68	2
ДГЛ-4	43	312	4560	2470	57	3330	98	9	1,8	3,5	0,8	3,8	6,5	0,4	0	41	4
ДГЛ-5	49	652	3280	2060	23	6500	74	18	5,3	9,6	2,3	9,4	5	0,7	2	73	11
ДГЛ-6	84	1080	28900	4000	121	7070	95	27	43	19	8,2	15	6,7	1,2	1	145	22
ДГЛ-7	79	1150	16400	2550	96	10300	74	36	16	20	5,1	16	9,9	1,3	2	121	19
ДГЛ-8	71	484	12700	3950	290	3140	171	8	2,3	4,2	1,2	4,4	0	0,5	0	45	5
ДГЛ-10	40	136	5370	1080	15	2740	52	13	7,1	5,9	4,8	5,6	3	0,5	0	78	8
ДГЛ-13	45	226	3100	1000	34	5490	196	15	1,9	5,2	1,3	4,6	2	0,6	1	50	6
	> 500μ	250-500μ	100-250μ	45-100μ	<45μ	CO3	OM	pH	Eh	SS	<sup>137</sup> Cs	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K			
ДГЛ-1	4,7	16,3	46,5	21,4	11,1	0,63	6,47	5,9	118	0,9	4,5	20,9	13,2	374			
ДГЛ-2	6,5	16,5	57,9	13,6	5,5	0,53	5,37	6,6	83	0,7	3,5	16,6	11,3	350			
ДГЛ-3	28,2	44,6	22,6	4	0,6	0,14	0,39	5,9	127	0,2	6,2	11,2	3,3	339			
ДГЛ-4	42,6	46,5	7,8	2,2	0,9	1,13	0,74	6,6	96	0,4	1,6	10,8	4,7	252			
ДГЛ-5	14,4	21,3	37,7	15,6	11	1,31	6,05	6,2	85	1,1	6,1	17,5	19,9	407			
ДГЛ-6	64,9	15,8	10,9	4,9	3,5	2,41	45,6	6,7	67	3,3	20,8	23,5	11,9	302			
ДГЛ-7	11,5	24,1	30,8	17,8	15,8	1,61	44,5	6	116	3,5	10,2	13,3	8,7	209			
ДГЛ-8	10,3	36,5	46,6	5	1,6	1,32	3,72	7	73	0,9	1,3	20,6	12,1	381			
ДГЛ-10	20,2	14,5	33,9	24,2	7,2	0,45	38,3	5,5	132	0,6	10,3	27	5,2	199			
ДГЛ-13	7	34	43,6	11	4,4	0,6	5,83	6,5	63	0,8	1,5	18	5,9	396			

Примечание: составлено авторами.

Распределение удельной активности радионуклидов  $Cs^{137}$ ,  $K^{40}$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Th^{232}$  в донных отложениях является частой практикой для анализа экологического состояния регионов [7–9]. Донные отложения служат накопителями радионуклидов, при этом они поглощают более 80% радиоактивности [10, 11]. В период летней экспедиции 2024 года было отобрано 10 проб донных отложений в реках и озерах, расположенных в непосредственной близости от месторождения гипса (рис. 1). Полученные данные, а также данные по химическому составу и физико-химическим свойствам проб представлены в таблице 2. Полученные значения удельной активности радионуклидов сравнивали с кларковыми значениями изотопов в земной коре или почвах. Для  $Ra^{226}$  и  $Th^{232}$  среднее значение удельной активности радионуклидов составило 17,94 Бк/кг и 10,09 Бк/кг соответственно, что не превышает 62% и 41% от кларковых значений почв [12]. При сравнении полученных значений радионуклида  $K^{40}$  с кларками элемента в почвах (370 Бк/кг), а также в земной коре (655 Бк/кг) авторами выявлено четыре пробы, в которых значения превышают кларк для почв, а именно ДГЛ-1 – 1 373,6 Бк/кг; ДГЛ-5 – 407,4 Бк/кг; ДГЛ-8 – 380,7 Бк/кг; ДГЛ-13 – 396,2 Бк/кг. Точки отбора проб с превышенными значениями находятся в отложениях рек Чуга и Позера. Средний показатель для удельной активности  $K^{40}$  320,87 Бк/кг не превышает кларк для почв и земной коры. При сравнении удельной активности антропогенного радионуклида  $Cs^{137}$  использовали данные, полученные при исследовании озер и рек Архангельской области и Республики Карелия [13]. Показатели в 1–124 Бк/кг были установлены в озерах Архангельской области. Выявленные значения в 1,6–20,8 Бк/кг не превышают фоновых значений для региона. Кроме сравнения результатов исследования с кларковыми значениями, была рассчитана удельная эффективная активность естественных радионуклидов:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085 A_K,$$

где  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$  – удельные активности радия, тория и калия в Бк/кг.

Результаты расчетов представлены в таблице 3. В рамках радиационно-гигиенической оценки полученные значения удельной эффективной активности сравнивали с показателями ГОСТ 8267-93, в котором установлено что при  $A_{эфф}$  менее 370 Бк/кг материал (щебень и гравий) может применяться во вновь строящихся и общественных

зданиях. Полученные результаты показали отсутствие точек отбора проб с превышением предельного значения  $A_{эфф}$  в 370 Бк/кг, среднее значение  $A_{эфф}$  – 58,4 Бк/кг, что составляет 15,8% от нормативного.

Таблица 3

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов

Донные осадки (шифр)	$A_{эфф}$ , Бк/кг	% от ПДС (370 Бк/кг)
ДГЛ-1	69,95	19%
ДГЛ-2	61,19	17%
ДГЛ-3	45,23	12%
ДГЛ-4	38,37	10%
ДГЛ-5	78,2	21%
ДГЛ-6	64,76	18%
ДГЛ-7	42,45	11%
ДГЛ-8	68,81	19%
ДГЛ-10	55,97	15%
ДГЛ-13	59,41	16%
Среднее	58,432	16%
Min	38,369	10%
Max	78,198	21%

Примечание: составлено авторами.

В рамках статической обработки результатов была подготовлена корреляционная матрица (табл. 4). На ее основе выявлен ряд элементов с сильными положительными связями (коэффициент корреляции более 0,87). Также на основе корреляционной матрицы можно сделать вывод об отсутствии элементов с сильной отрицательной связью. Отмечается сильная положительная зависимость между  $Cs^{137}$  и  $Pb$   $r=0,95$ ;  $Cs^{137}$  и  $Ti$   $r=0,94$ ;  $Cs^{137}$  и  $Cu$   $r=0,93$ , что свидетельствует об их антропогенном источнике. График взаимодействия сильных связей представлен на рисунке 4.

Эксперимент, направленный на изучение распределения изотопов урана в поверхностных водах, включал в себя отбор 14 проб для определения активности изотопов  $U^{238}$ ,  $U^{234}$ ,  $U^{235}$ ,  $U^{232}$ , соотношения между  $U^{234}$  и  $U^{238}$ , а также концентрации урана. Подготовка (осаждение изотопов на хлорном железе), а также замеры на альфа-спектрометре выполняли в лаборатории радиологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. Результаты исследования представлены в таблице 5.

Таблица 4

Корреляционная матрица связей

	<sup>137</sup> Cs	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	Na	K	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Mo	Cd	Co	Ti	V
<sup>137</sup> Cs	1	0,42	0,1	-0,42	0,56	0,62	0,77	0,34	-0,01	0,33	-0,43	0,55	<b>0,93</b>	0,74	<b>0,95</b>	0,72	0,49	0,61	0,09	<b>0,94</b>	0,8
<sup>226</sup> Ra	0,42	1	0,27	-0,02	0,21	0,06	0,32	0,24	0,19	0,05	0,24	0,17	0,36	0,19	0,54	0,21	-0,3	0,22	0,05	0,27	0,29
<sup>232</sup> Th	0,1	0,27	1	0,52	0,34	0,48	0,18	0,42	0,21	0,5	0,24	0,38	0,18	0,37	0,15	0,43	0,09	0,43	0,58	0,19	0,42
<sup>40</sup> K	-0,42	-0,02	0,52	1	-0,16	-0,19	-0,3	-0,05	0,1	-0,06	0,51	-0,28	-0,3	-0,32	-0,48	-0,31	-0,54	-0,25	0,27	-0,39	-0,27
Na	0,56	0,21	0,34	-0,16	1	<b>0,9</b>	<b>0,93</b>	0,85	0,69	0,59	0,16	0,67	0,75	0,8	0,67	0,8	0,41	0,79	0,21	0,69	0,79
K	0,62	0,06	0,48	-0,19	<b>0,9</b>	1	0,81	0,7	0,37	0,81	0	0,86	0,75	<b>0,95</b>	0,7	<b>0,95</b>	0,7	<b>0,93</b>	0,48	0,79	<b>0,93</b>
Ca	0,77	0,32	0,18	-0,3	<b>0,93</b>	0,81	1	0,8	0,56	0,44	0,01	0,59	<b>0,92</b>	0,78	0,83	0,77	0,41	0,73	0,03	0,79	0,81
Mg	0,34	0,24	0,42	-0,05	0,85	0,7	0,8	1	0,82	0,33	0,28	0,37	0,59	0,51	0,46	0,55	0,22	0,55	0	0,37	0,54
Sr	-0,01	0,19	0,21	0,1	0,69	0,37	0,56	0,82	1	0,02	0,4	0,03	0,22	0,14	0,1	0,17	-0,23	0,19	-0,23	0,02	0,14
Fe	0,33	0,05	0,5	-0,06	0,59	<b>0,81</b>	0,44	0,33	0,02	1	0,26	<b>0,95</b>	0,44	0,85	0,49	0,85	0,69	<b>0,92</b>	0,84	0,59	0,81
Mn	-0,43	0,24	0,24	0,51	0,16	0	0,01	0,28	0,4	0,26	1	0,1	-0,15	-0,07	-0,23	-0,06	-0,33	0,14	0,31	-0,34	-0,04
Zn	0,55	0,17	0,38	-0,28	0,67	0,86	0,59	0,37	0,03	<b>0,95</b>	0,1	1	0,61	<b>0,95</b>	0,7	<b>0,94</b>	0,76	<b>0,98</b>	0,73	0,77	<b>0,92</b>
Cu	<b>0,93</b>	0,36	0,18	-0,3	0,75	0,75	<b>0,92</b>	0,59	0,22	0,44	-0,15	0,61	1	0,8	<b>0,92</b>	0,79	0,5	0,72	0,12	<b>0,9</b>	0,86
Cr	0,74	0,19	0,37	-0,32	0,8	<b>0,95</b>	0,78	0,51	0,14	0,85	-0,07	<b>0,95</b>	0,8	1	0,83	<b>0,99</b>	0,76	<b>0,97</b>	0,55	<b>0,9</b>	<b>0,99</b>
Pb	<b>0,95</b>	0,54	0,15	-0,48	0,67	0,7	0,83	0,46	0,1	0,49	-0,23	0,7	<b>0,92</b>	0,83	1	0,82	0,52	0,76	0,19	<b>0,93</b>	<b>0,88</b>
Ni	0,72	0,21	0,43	-0,31	0,8	<b>0,95</b>	0,77	0,55	0,17	0,85	-0,06	<b>0,94</b>	0,79	<b>0,99</b>	0,82	1	0,75	<b>0,97</b>	0,54	<b>0,87</b>	<b>0,98</b>
Mo	0,49	-0,3	0,09	-0,54	0,41	0,7	0,41	0,22	-0,23	0,69	-0,33	0,76	0,5	0,76	0,52	0,75	1	0,72	0,47	0,65	0,71
Cd	0,61	0,22	0,43	-0,25	0,79	<b>0,93</b>	0,73	0,55	0,19	<b>0,92</b>	0,14	<b>0,98</b>	0,72	<b>0,97</b>	0,76	<b>0,97</b>	0,72	1	0,65	0,8	<b>0,96</b>
Co	0,09	0,05	0,58	0,27	0,21	0,48	0,03	0	-0,23	<b>0,84</b>	0,31	0,73	0,12	0,55	0,19	0,54	0,47	0,65	1	0,34	0,54
Ti	<b>0,94</b>	0,27	0,19	-0,39	0,69	0,79	0,79	0,37	0,02	0,59	-0,34	0,77	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,93</b>	<b>0,87</b>	0,65	<b>0,8</b>	0,34	1	<b>0,92</b>
V	0,8	0,29	0,42	-0,27	0,79	<b>0,93</b>	0,81	0,54	0,14	0,81	-0,04	<b>0,92</b>	0,86	<b>0,99</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	0,71	<b>0,96</b>	0,54	<b>0,92</b>	1

Примечание № 1: составлено авторами.

Примечание № 2: Красным цветом обозначены значения, которые являются значимыми. Из них были выбраны пары элементов, у которых коэффициент корреляции выше 0,87.

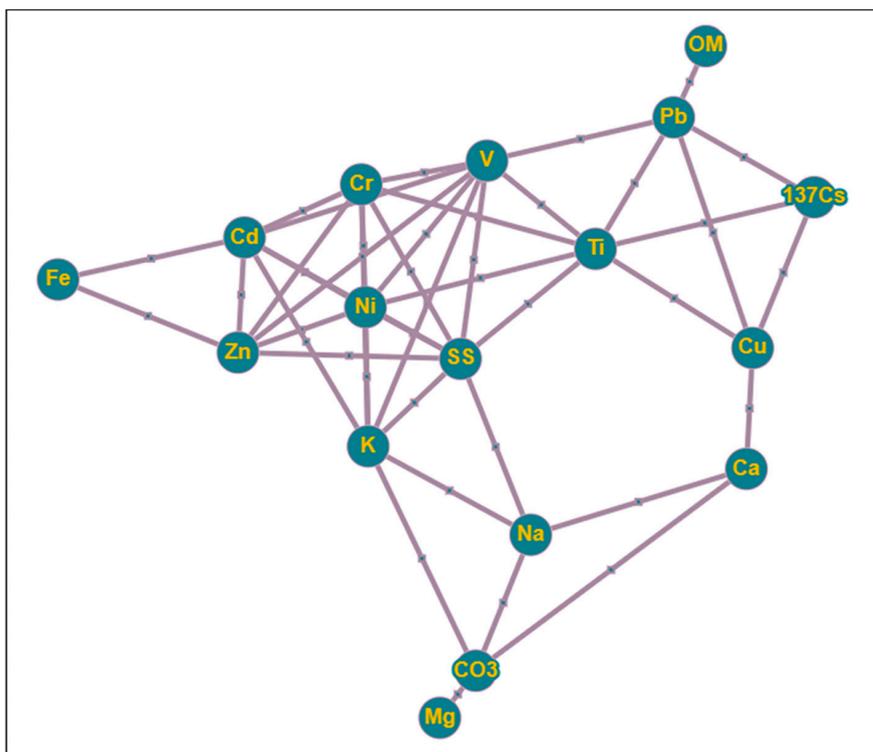


Рис. 4. График сильных связей между элементами  
Источник: составлено авторами

Таблица 5

Результаты отбора проб поверхностных вод на изотопы урана

№	Название, дата	U-238 (Бк/л)	U-234 (Бк/л)	U-235 (Бк/л)	U-232 (Бк/л)	234U/238U	Концентрация, мкг/л (по урану 238)
ГЛ-1	15.08.23.	0,00304	0,00314	0,00038	0,03800	1,03	0,246
ГЛ-2	р. Позера, 15.08.23.	0,01053	0,01721	0,00114	0,03800	1,63	0,85
ГЛ-3	Сенное, 15.08.23.	0,00096	0,00137	0,00027	0,03800	1,43	0,078
ГЛ-4	Чугаз, 16.08.23.	0,02205	0,03304	0,00081	0,03800	1,50	1,781
ГЛ-5	Озеро 4 , 16.08.23.	0,00018	0,00024	0,00001	0,03800	1,33	менее 0.015
ГЛ-6	Озеро 1 , 16.08.23.	0,00938	0,01003	0,00040	0,03800	1,07	0,757
ГЛ-7	Озеро 2, 16.07.23.	0,00511	0,00578	0,00012	0,03800	1,13	0,413
ГЛ-8	р. Чуга, 17.08.23.	0,00851	0,01176	0,00078	0,03800	1,38	0,687
ГЛ-9	Приток Чуга, 17.08.23.	0,01673	0,01865	0,00134	0,03800	1,11	1,351
ГЛ-10	оз. Карос, 17.08.23.	0,00983	0,01296	0,00134	0,03800	1,32	0,794
ГЛ-11	ЗУМПФ, 17.08.23.	0,09090	0,11090	0,00453	0,03800	1,22	7,342
ГЛ-12	18.08.23.	0,02431	0,02945	0,00192	0,03800	1,21	1,963
ГЛ-13	Позера 4 , 18.08.23.	0,01795	0,02126	0,00129	0,03800	1,18	1,449
ГЛ-14	Позера 3, 18.08.23.	0,00577	0,01009	0,00052	0,03800	1,75	0,47
	максимальное	0,09090	0,11090	0,00453	0,03800	1,7487	7,3420
	минимальное	0,00018	0,00024	0,00001	0,03800	1,0329	0,0780
	среднее	0,01609	0,02042	0,00106	0,03800	1,3076	1,3985
	стандартное отклонение	0,02280	0,02783	0,00114	0,00000	0,2132	1,8771

Примечание: составлено авторами.

Максимумы активностей изотопов урана, а также его концентрации отмечаются в точке ГЛ-11 (зумпф для сбора карьерных вод), минимум же приурочен к естественному небольшому озеру, находящемуся за пределами карьера и имеющему атмосферное питание. Во время проведения экспедиции уровень поверхностных вод был низкий, в связи с этим питание озера было преимущественно за счет атмосферной воды, которая, в свою очередь, имеет низкие значения активности изотопов урана. К тому же экспедиция проводилась в летнюю межень, в связи с чем были отмечены максимальные значения из-за концентрирования в результате испарения. Максимальные концентрации урана в водах карьера обусловлены интенсивным химическим выветриванием вскрышных пород в отвалах. В зумпфе также выявлены максимальные значения минерализации воды за счет подземного питания. В истоках реки Позера выше по течению от карьера урана меньше из-за большей составляющей атмосферных вод, далее идет смешивание с подземными водами. Пробы в р. Чуга отбирались в местах, где отмечались выходы подземных карстовых вод, поэтому в них также наблюдаются повышенные концентрации урана [14]. Отношение активностей изотопов урана  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  соответствует природному, что свидетельствует об отсутствии поступления данного изотопа из техногенных источников [15]. Влияние карьера на состав прилегающих водотоков обусловлено тем, что в результате проведения добычных, взрывных работ возрастает трещиноватость породного массива, что увеличивает скорость растворения пород и приводит к увеличению концентрации урана в зумпфе, а также в водах рек Позера и Чуга.

### Заключение

Итогом исследовательской работы по изучению радиационного фона на месторождении гипса в Архангельской области является тот факт, что общий фон находится в пределах нормативных требований. Параметры МАЭД гамма-излучения составляют не более 3% от предельно допустимых значений. На территории горного отвода выделяются два участка по степени радоноопасности, первого и второго классов, при этом умеренная защита необходима на участке второго класса, а на участке

первого класса достаточно обычной вентиляции помещений, в которых находится рабочий персонал. Активности радионуклидов в донных отложениях и воде не превышают кларковых значений и нормативных показателей.

Также нужно отметить, что деятельность горного предприятия приводит к локальным изменениям радиационного фона. Так, на фоне снижения гамма-излучения и плотности потока радона на территории карьера фиксируются повышенные значения гамма-излучения в отвалах вскрышных пород, а в карьерных водах повышаются концентрации урана.

### Список литературы

1. Mirzoyeva N., Gulina L., Gulina S., Plotitsina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea // *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2015. V. 33. № 6. P. 1413–1425. DOI: 10.1007/s00343-015-4374-5.
2. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения Прогресс (утверждена начальником ЦМИИ ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Ярыной В.П. 07.05.1996).
3. Методика измерений объемной активности урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП ВИМС, 2013. 16 с.
4. Ciotoli G., Voltaggio M., Tuccimeie P. et. al. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: a methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation // *J. Environ. Radioact.* 2017. Vol. 166. Is. 2. P. 355-375.
5. Pasztor L., Szabo K., Szatmari G. e. a. Mapping geogenic radon potential by regression kriging // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 544. P. 883-891.
6. Bossew P., Cinelli G., Ciotoli G., Crowley Q.G., De Cort M., Elío Medina J., Gruber V., Petermann E., Tollefsen T. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences // *Int J Environ Res Public Health*. 2020. Vol. 17. Is. 11. P. 4134. DOI: 10.3390/ijerph17114134.
7. Caridi F., Agostino M.D., Marguccio S., Belvedere A., Belmusto G., Marcianò G., Sabatino G., Mottese A. Radioactivity, granulometric and elemental analysis of river sediments samples from the coast of Calabria, south of Italy // *European Physical Journal Plus*. 2016. DOI: 10.1140/epjp/i2016-16136-1.
8. Гусева А.С., Устинов С.А., Петров В.А. Распределение природных радионуклидов в почвах на территории Новой Москвы // *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*. 2019. № 5. С. 88-94. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-5-88-94.
9. Наход В.А., Малов А.И., Дружинин С.В. Исследование негативного воздействия разработки карьера по добыче гипса на состав донных отложений и почвенного покрова (на примере Холмогорского района Архангельской области) // *Успехи современного естествознания*. 2024. № 3. С. 58-67. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38230> (дата обращения: 29.02.2025). DOI: 10.17513/use.38230.
10. Monged M.H.E., Hassan H.B., El-Sayed S.A. Spatial distribution and ecological risk assessment of natural radionuclides and trace elements in agricultural soil of northeastern Nile Valley, Egypt // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2020. Vol. 231. Is. 7. P. 338. DOI: 10.1007/s11270-020-04678-9.

11. Трапезников А.В., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н., Николкин В.Н. Миграция и накопление техногенных радионуклидов в пресноводных экосистемах на примере рек Самсоновская, Лев и Вандрас, относящихся к Обь-Иртышскому речному бассейну // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 2. С. 197. DOI: 10.7868/S0869803116020120.
12. Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли // Л.: Недра, 1979. 345 с.
13. Киселев Г.П., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Киселева И.М., Баженов А.В., Быков В.М. Естественная и техногенная радиоактивность донных отложений озер Северо-Запада России (на примере республики Карелия и Архангельской области) // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 152-157. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36622> (дата обращения: 29.03.2025).
14. Малов А.И., Киселев Г.П., Зыков С.Б. Особенности разделения изотопов урана в подземных водах венда Мезенской синеклизы // Матер. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Ин-та геологии и нефтегазового дела НИТПУ. Томск, 2010. С. 112–116.
15. Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., Яковлев Е.Ю., Ларионов Н.С. Четные изотопы урана в поверхностных водах группы малых озер Северо-Запада Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 114-120. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36734> (дата обращения: 29.03.2025).

СТАТЬИ

УДК 550.83  
DOI 10.17513/use.38387

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА  
МАЛОГЛУБИННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ПРИ ПОИСКАХ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА  
В ТИПИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

**Гаченко С.В., Степанов А.С., Кольга Л.В., Дмитриев А.Г., Трофимов И.В.**

*ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
Иркутск, e-mail: gsv@geo.istu.edu*

Целью исследования является оценка эффективности и демонстрация типичных проблем постановки наиболее экспрессных методов геофизической разведки при решении задачи картирования потенциально перспективных на россыпи участков в условиях заболоченности и вечной мерзлоты северных районов Восточной Евразии. Несмотря на значительное исчерпание запасов россыпных месторождений в целом и смену фокусировки рудной отрасли на коренные месторождения, и в настоящее время большинство новых горных проектов связаны с поисками россыпного золота. Традиционный подход к поискам месторождений такого типа основан на бурении, что медленно, дорого и неэкологично. Основным способом оптимизации затрат на поиски и разведку россыпных залежей золота являются геофизические исследования, которые позволяют уменьшить район поисков и, соответственно, снизить затраты на бурение. В настоящее время приходится вести поиски в районах со сложными ландшафтно-морфологическими и геологическими условиями, такими как заболоченность, мерзлота, сложное тектоническое строение. Эти факторы могут затруднять постановку традиционно применяемых при поисках россыпей методов, таких как магнитная съемка или методы электроразведки на постоянном токе. В данной работе анализируются результаты проведенных опытно-методических работ комплексом малоуглубинных методов геофизики в типичных геологических условиях Восточной Сибири. Рассматриваются результаты магнитных и электромагнитных съемок, анализируются возникшие проблемы и описываются перспективы и пути их решения и делается вывод о целесообразности применения каждого метода. В результате даны рекомендации по наиболее рациональному способу геофизических поисков россыпных месторождений в условиях заболоченности и криолитозоны.

**Ключевые слова:** россыпные месторождения золота, поиски, геофизическая разведка, магниторазведка, электроразведка

**EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A COMPLEX  
OF NEAR-SURFACE GEOPHYSICAL METHODS  
IN THE SEARCH FOR PLACER GOLD DEPOSITS  
IN TYPICAL CONDITIONS OF EASTERN SIBERIA**

**Gachenko S.V., Stepanov A.S., Kolga L.V., Dmitriev A.G., Trofimov I.V.**

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: gsv@geo.istu.edu*

The aim of the study is to evaluate the effectiveness and demonstrate typical problems of setting the most express methods of geophysical exploration in solving the problem of mapping potentially promising areas for places in the conditions of swampiness and permafrost of the northern regions of Eastern Eurasia. Despite the significant depletion of placer deposits in general and the change in the focus of the ore industry to primary deposits, most new mining projects are currently associated with the search for placer gold. The traditional approach to searching for deposits of this type is based on drilling, which is slow, expensive and not environmentally friendly. The main way to optimize the costs of searching and exploring placer gold deposits is geophysical research, which allows you to reduce the search area and, accordingly, reduce drilling costs. At present, it is necessary to search in areas with complex landscape-morphological and geological conditions, such as swamps, permafrost, and complex tectonic structure. These factors can complicate the implementation of traditionally used methods for placer exploration, such as magnetic survey or direct current electrical exploration methods. This paper analyzes the results of experimental and methodological work carried out using a set of shallow geophysical methods in typical geological conditions of Eastern Siberia. The results of magnetic and electromagnetic surveys are considered, the problems that have arisen are analyzed, the prospects and ways of solving them are described, and a conclusion is made on the expediency of using each method. As a result, recommendations are given on the most rational method of geophysical prospecting for placer deposits in swampy and permafrost conditions.

**Keywords:** placer gold deposits, prospecting, geophysical exploration, magnetic exploration, electrical exploration

**Введение**

Несмотря на смещение фокуса горнодобывающих компаний на рудные месторождения, более трех четвертей всех новых лицензий, выданных по заявительному прин-

ципу, составляют россыпные месторождения золота [1]. В связи с этим оптимизация процесса поисков и разведки россыпных месторождений имеет большое значение для экономики [2–4]. Традиционным спо-

собом геологоразведочных работ на россыпях являются шурфовка и бурение, то есть медленные и дорогостоящие, а кроме того, еще и неэкологичные работы. Поскольку рентабельные запасы легко открываемых месторождений в развитых в инфраструктурном отношении районах уже исчерпаны [3–5], работы приходится вести в удаленных районах со сложной проходимостью, удаленных от существующих автодорог [6], что является дополнительным экономическим и геологопоисковым фактором, требующим применения инновационных мобильных геологоразведочных решений [7]. Часто это северо-восточные районы РФ, в которых тяжелая техника еще и наносит непоправимый вред хрупким экосистемам, разрушая мерзлоту и приводя к деградации почв и грунтов [8]. Такой ущерб на поисковой стадии весьма нежелателен, и встает вопрос более качественного выбора участков для проведения буровых работ. Эту задачу позволяют решить геофизические методы [9–11], которые могут обеспечить исследования большой территории в течение одного полевого сезона. При этом на первый план выходит поиск критериев геофизических признаков или аномалий, которые соответствуют наличию полезного ископаемого.

Базис применения геофизики при поисках россыпных месторождений основан на том, что тяжелая фракция, содержащая рудные минералы и их спутники, концентрируется в пониженных частях рельефа или палеорельефа [9, 10, 12]. Выявление этих ловушек, например меандр палеорусел, является задачей геофизики, которая решается либо за счет наличия в тяжелой фракции магнитных минералов – в таком случае применяются методы магниторазведки, либо для поиска и картирования самих структур можно применить малоуглубинные волновые методы [9]. Как правило, рекомендуется сперва выполнить опытные работы по линиям буровых скважин с известным содержанием полезного минерала, полученным по результатам лабораторных исследований, однако на практике, когда речь идет об исследованиях новых объектов, буровых скважин еще нет, и в таком случае приходится проводить методические геофизические работы без достоверных априорных данных. К такому случаю относится и данная работа. Поэтому основной задачей опытно-методических работ (ОМР) является оценка эффективности применения нескольких потенциально возмож-

ных методов при решении задачи геофизического картирования структур верхней части разреза в конкретной геологической и ландшафтно-морфологической ситуации, подтверждения гипотезы о наличии или отсутствии магнитных минералов и выявлении лучшего способа их обнаружения, отделении полезных объектов от геологических помех, которые могут быть сложными и многочисленными. Данная постановка задачи типична не только для поисков россыпей и в зависимости от ситуации может быть решена различными способами – как наземными, так и маловысотными [13].

В данной работе авторы хотят поделиться опытом апробации комплекса потенциально быстрых и недорогих малоуглубинных геофизических методов в составе магнитной съемки в обычном и градиентометрическом варианте и георадиолокационных зондирований в типичных для Восточной Сибири ландшафтно-морфологических и геологических условиях.

**Цель исследования** – оценка эффективности и демонстрация типичных проблем постановки наиболее экспрессных методов геофизической разведки при решении задачи картирования потенциально перспективных на россыпи участков в условиях заболоченности и вечной мерзлоты северных районов Восточной Евразии.

#### **Материалы и методы исследования**

Участок работ расположен в Северном Забайкалье, его границы не могут быть приведены в работе по причине коммерческой тайны, однако, как и большинство участков вблизи водотоков, перспективных на обнаружение россыпных месторождений, он характеризуется наличием заболоченностей, в том числе кочкарника высотой до 1–1,5 м, а также многолетней мерзлотой. Отложения русел рек представлены современными аллювиальными осадками: галечниками, песками, суглинками, глинами, валунно- и гравийно-галечными, а также верхнечетвертичными песками, глинами, галечниками.

Основные поисковые критерии объекта базировались на следующих двух позициях.

Во-первых, главную роль при формировании россыпной залежи играют процессы переноса и накопления полезного минерала. Минералы железа, обладающие повышенной плотностью и магнитной восприимчивостью, сопутствуют, как правило, золоторудной фракции, что позволяет выполнять их поиск методами магниторазвед-

ки, которые регистрируют создаваемые ими магнитные поля. При этом определяющую роль играет повышенное содержание магнитных минералов в россыпи. Кроме того, измеренное магнитное поле фиксирует зоны минерализации, контролирующее положение россыпей.

Во-вторых, крайне важным является картирование палеорусел водотоков и плотика, как наиболее перспективных участков для поиска россыпных полезных ископаемых. Для нахождения поисковых критериев выполнены опытные работы с применением методов магниторазведки и георадиолокации. Георадиолокационные зондирования (ГРЛЗ) позволяют анализировать распределение электрических параметров (диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления) в разрезе, что дает информацию о структурном строении изучаемой территории. Вертикальная и латеральная изменчивость геоэлектрических горизонтов показывает структурные особенности геологического разреза.

*Магниторазведочные работы* выполнялись методом магнитной градиентометрии. В качестве полевой аппаратуры использовался протонный магнитометр-градиентометр на эффекте Оверхаузера ММPOS-2, разработанный в НИЛ Квантовой магнитометрии под руководством В.А. Сапунова [14]. Градиентометр ММPOS-2 позволяет выполнять высокоточные измерения модуля магнитной индукции с абсолютной составляющей систематической погрешности не более +/- 1 нТл и случайной составляющей погрешности 0,03 нТл. Работы выполнялись в режиме нон-стоп без предварительной разбивки профилей, с навигацией по GNSS. Разнос между датчиками градиентометра составлял 1 м (по вертикали). Осуществлялось сравнение модуля полного вектора напряженности магнитного поля Земли с одного датчика и вертикального градиента для оценки целесообразности усложнения технологии съемки. Обработка данных проводилась по стандартному графу и включала построение карт и карт графиков магнитного поля и его вертикального градиента, анализ ландшафтной и морфоструктурной обстановки района работ.

*Георадиолокационное зондирование* основано на явлении отражения электромагнитных волн от поверхностей, на которых меняются электрические свойства. Основными параметрами среды, определяющими глубинность исследований, являются ее диэлектрическая проницаемость

и удельное электрическое сопротивление. В состав георадара входят излучающая (источник) и приемная (приемник) антенны. Источник излучает электромагнитную волну заданной частоты в виде конечного полупериода импульса. При георадиолокационной съемке генераторная и приемная антенны перемещаются вдоль по профилю с неизменным расстоянием между антеннами. Электромагнитная волна отражается от границ слоев, имеющих различные диэлектрические свойства. В каждой точке профиля записывается трасса – зависимость амплитуды сигнала от времени прихода отражения. Набор трасс по всему профилю составляет радарограмму эхо глубины до геоэлектрических границ в разрезе. В данном случае целью апробации являлась оценка возможности картирования поверхности плотика.

Работы выполнялись георадаром ОКО-2, при использовании антенного блока с центральной частотой 700 МГц, что обеспечивает глубинность до 5 м с разрешающей способностью порядка 10 см [15]. Съемка производилась в движении, при частоте зондирующих импульсов 14 имп/с без накопления, независимо от скорости перемещения антенного блока. В данном режиме шкала расстояний в записанном файле рисуется условно без специальной привязки и не несет в себе полезной информации. Привязка осуществлялась с помощью GPS-приемника, с записью координат начала и конца движения оператора и рабочего с антенной.

Радарограммы при обработке подвергнуты воздействию процедур, обеспечивающих повышение отношения сигнал/помеха, а именно: введение статических поправок, частотная фильтрация, регулятивная усиления, деконволюция, горизонтальная фильтрация. Примененный граф обработки позволил выявить на фоне помех полезный сигнал.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены графики изменения магнитного поля и его вертикального градиента по профилям съемки.

Видно, что в целом результаты, получаемые в варианте обычной магнитной съемки и магнитной градиентометрии, принципиально схожи. На большей части участка интенсивность градиента незначительна и характеризует территорию, не затронутую процессами формирования россыпи.

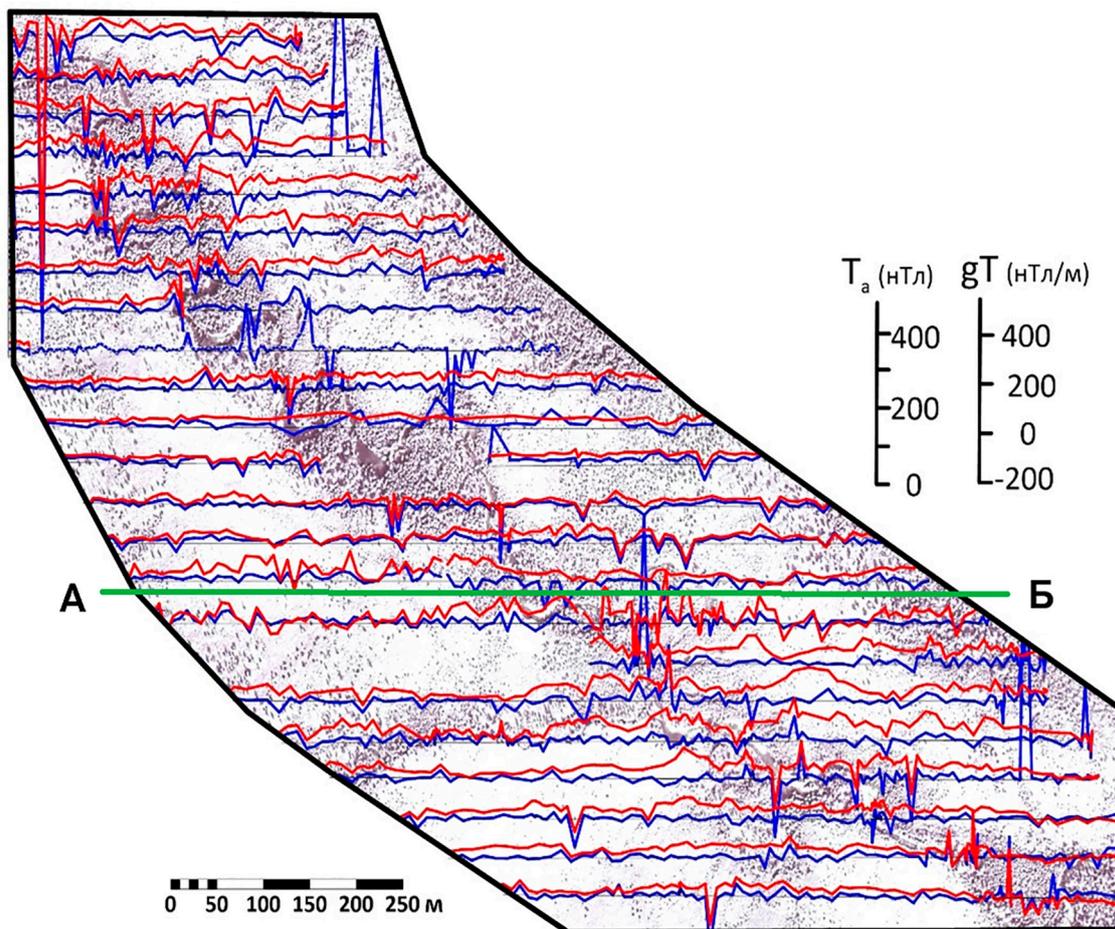


Рис. 1. Карты графиков градиента магнитного поля (синий цвет) и модуля вектора напряженности магнитного поля (красный цвет)  
 Источник: составлен авторами по результатам проведенных ОМР

В то же время на участке выявляются зоны повышенной изменчивости обоих параметров, которые достаточно контрастно оконтуривают границы потенциально перспективных зон. Они тяготеют к пойме долинного ручья, что свидетельствует о наличии магнитных минеральных форм и позволяет выявить местоположение зон из концентраций, а также говорит о формировании потенциальной россыпи постоянными водными потоками. Участки повышенных значений градиента магнитного поля и повышенной дисперсии модуля полного вектора напряженности указывают на интенсивное накопление аллювиальных осадков, происходящее в процессе формирования россыпных отложений. Естественно, до получения результатов буровых работ остается неизвестным, является ли россыпной участок рудным в экономическом смысле, но методы магниторазведки определенно позволяют вы-

делять участки для постановки более дорогостоящих методов.

В данном случае таким методом являлась георадиолокация как потенциально наиболее экспрессный и недорогой метод детальных малоглубинных зондирований. Опытные профили были заложены в различных частях участка с наличием потенциального плотика. При этом следует отметить, что первоначально получаемый разрез был совсем нечитаем: отсутствовал интервал вступления прямой волны, который характеризуется одинаковой в первых вступлениях волновой картиной. Это произошло вследствие недостаточно плавного перемещения аппаратуры в пространстве в условиях сильно зачехленного участка (кочка до 1,0–1,2 м). После ручной коррекции статических поправок по прямой волне (черно-красные оси синфазности на временах 3–8 нс) и подбора оптимального усиления, картина стала более представительной (рис. 2).

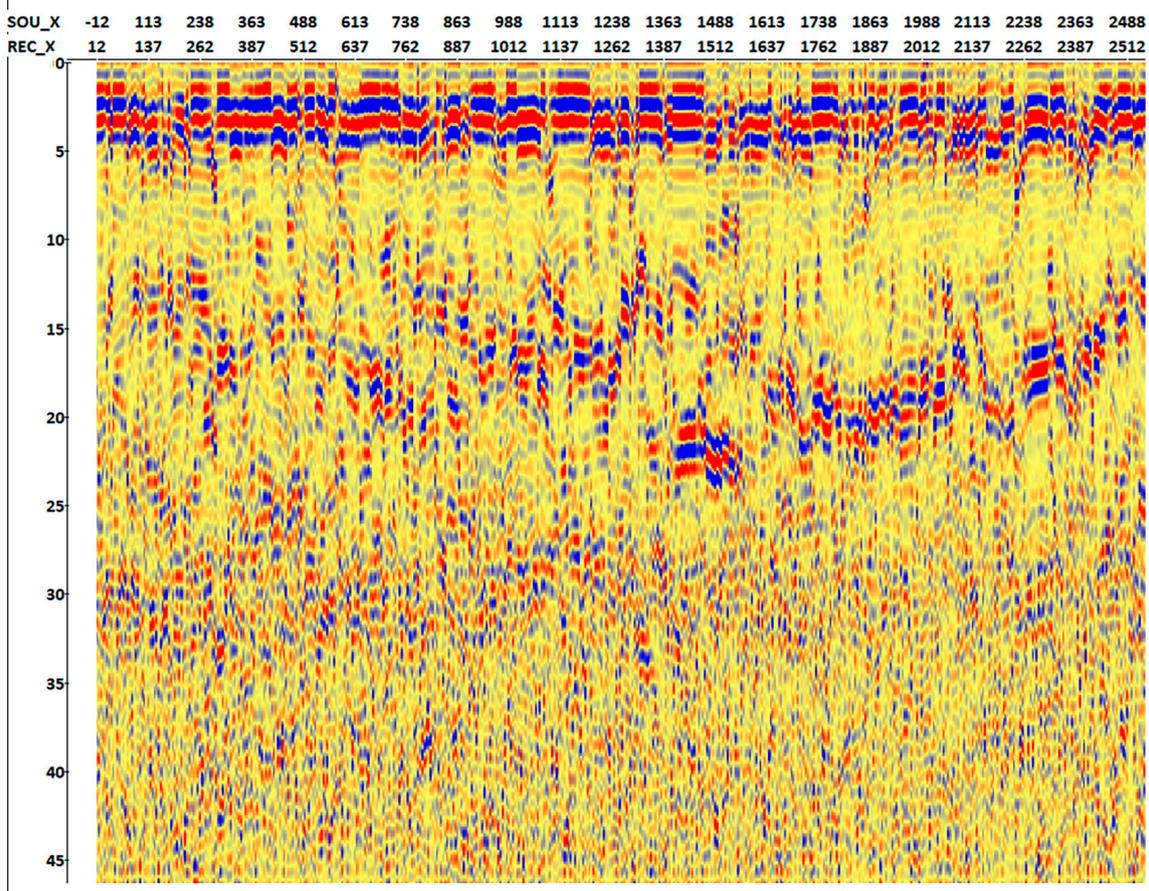


Рис. 2. Временной разрез ГРПЗ по линии АБ  
 Источник: составлен авторами по результатам проведенных ОМР

На временах 10–20 нс уверенно выделяется отражающий горизонт. Горизонт прерывист, очень неустойчив, но характер отражений, их интенсивность свидетельствуют о наличии контрастной отражающей границы на глубине 3–3,5 м. Однако, по существу, следует признать, что в данном и подобных случаях ландшафтные и мерзлотные условия являются довольно серьезной проблемой и затрудняют эффективное проведение георадарных исследований. Повысить качество и информативность георадарных исследований можно за счет соответствующей подготовки профилей и перемещения антенного блока по ровной поверхности, например по доскам, положенным на кочки. Кроме того, возможен переход на поточечные измерения на отдельных пикетах с шагом 0,5–1,0 м в режиме старт/стоп. Такой подход снижает производительность, ведет к необходимости проведения дополнительных топогеодезических работ, но он значительно увеличивает разрешенность записи, точность структурных

построений и, как следствие, обеспечивает получение количественных временных и глубинных разрезов.

**Выводы**

По результатам опытно-методических работ можно сделать следующие выводы:

1. Магниторазведка в пешеходном варианте может быть рекомендована для постановки для решения рассматриваемого класса геолого-поисковых задач. И по схеме градиента магнитной съемки, и по данным обычных магнитометрических измерений (ориентируясь на параметр дисперсии), среди довольно ровного фона коренных пород отчетливо выделяются зоны знакопеременного поля повышенной дисперсии в виде локальных объектов. Они расположены на изгибах русла реки, где изменяется скорость водотока и оседает тяжелая фракция породы. Абсолютные значения аномалий незначительны, что требует точных съемок. Выбор конкретной методики зависит исключительно от предпочтений специали-

стов, выполняющих работы, и от наличия у них соответствующей аппаратуры.

2. Данные георадиолокационных зондирований потенциально позволяют дополнить результаты магнитной съемки, подтвердив наличие плотика в разрезе и определив глубину бурения или шурфовки. Однако простой и быстрый метод измерения в движении не работает в данной ландшафтно-морфологической обстановке – из-за наличия кочки требуется специальная подготовка профилей и измерения с остановкой на точках, что делает георадиолокацию медленной и дорогой. Возможно, на практике будет быстрее и дешевле заверять аномалии, выделенные по результатам магнитной съемки, с помощью мобильного бурения или шурфовки, что в отличие от геофизики позволит получить еще и прямое минералогическое подтверждение перспективности выделенных зон.

### Список литературы

1. Казанов О.В., Гермаханов А.А., Горохов К.Д., Козловский Д.С., Мальшева Е.С., Танин Е.В., Фатеева А.А. Геологоразведочные работы на твердые полезные ископаемые. Анализ тенденций и задачи управления лицензированием // *Разведка и охрана недр*. 2025. № 1. С. 3–10. DOI: 10.53085/0034-026X\_2025\_1\_03.
2. Бортников Н.С., Волков А.В., Лаломов А.В., Бочнева А.А., Иванова Ю.Н., Лаломов Д.А. Роль россыпных месторождений в обеспечении воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья России на современном этапе // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. № 1. С. 1–16. DOI: 10.2205/2024ES000897.
3. Краденых И.А. Современное состояние и перспективы отечественной россыпной золотодобычи // *Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей XI международной научной конференции*. Ч. 2. Волгоград: ООО «Конверт», 2021. 248 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_47554439\\_53581063.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47554439_53581063.pdf) (дата обращения: 04.02.2025). ISBN 978-5-6047622-3-3.
4. Распоряжение Правительства РФ от 11 июля 2024 г. № 1838 «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/TNB3oQkPRJtmDE3AMaxuTn2KRSHG9X0S.pdf> (дата обращения: 04.02.2025).
5. Коротков В.В., Овсянникова Т.М., Ржевская А.К. Инновационные технологии прогнозирования, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых // *Информационно-аналитический обзор*. ФГБУ «ВИМС». М.: РИС «ВИМС», 2016. 55 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=938be4f076e8040b8e80d2a15de92ecf&irbDb=ESVODT> (дата обращения: 04.02.2025). ISBN 978-5-9906776-3-0.
6. Блинов А.В., Паршин А.В., Костерев А.Н. Особенности постановки геофизических методов поисков золотоурановых объектов в горных районах Северного Забайкалья // *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2014. № 1 (44). С. 55–60. URL: [https://journals.istu.edu/\\_sys/mod/attach.php?journals/2014/01/articles/07/article\\_07\\_0.pdf](https://journals.istu.edu/_sys/mod/attach.php?journals/2014/01/articles/07/article_07_0.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).
7. Паршин А.В., Цирель В.С., Анцев В.Г. Настоящее и будущее беспилотной аэрогеофизики в России // *Разведка и охрана недр*. 2017. № 8. С. 33–38. URL: <http://rion-journal.com/2017/08/31/8-2017/> (дата обращения: 04.02.2025).
8. Ромашкина Е.А. Экологические последствия освоения россыпных месторождений золота на Дальнем Востоке // *Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: материалы VII международной научно-практической конференции* (Хабаровск, 04 мая 2018 г.). Тихоокеанский государственный университет. Вып. 7. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. С. 91–95. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_35023365\\_28753335.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35023365_28753335.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).
9. Татьков И.Г., Предин П.А., Дмитриев А.Г. Возможности применения магнитной градиентометрии при поисках золоторудных месторождений // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН*. 2015. № 2. С. 63–70. URL: <https://journals.istu.edu/nzn/journals/2015/02/articles/07> (дата обращения: 04.02.2025).
10. Хасанов И.М., Прейс В.К., Муравьев Л.А. Перспективы применения геофизических методов при поисках и разведке золотых россыпей в Магаданской области // *Уральский геофизический вестник*. 2015. № 1 (25). С. 62–67. URL: [http://igfuroan.ru/images/ugv/2015/2015-01\\_11.pdf](http://igfuroan.ru/images/ugv/2015/2015-01_11.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).
11. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов // *Геофизика*. 2016. № 2. С. 54–60. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_25955501\\_16610696.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25955501_16610696.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).
12. Давыдов В.А., Бакаев В.П. Геофизика на россыпных месторождениях золота // *Разведка и охрана недр*. 2012. № 4. С. 41–47. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_17655759\\_54451730.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17655759_54451730.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).
13. Давыденко С.Ю., Терешкин С.А., Давыденко А.Ю., Снопков С.В., Паршин А.В., Давыденко Ю.А. Применение БПЛА и наземных геофизических методов при изучении древнего металлургического комплекса на участке Барун-Хал II (Западное Прибайкалье) // *Геоархеология и археологическая минералогия*. 2021. № 8. С. 35–40. URL: <https://meetings.chelscience.ru/wp-content/uploads/sites/10/2022/10/Давыденко.pdf> (дата обращения: 04.02.2025).
14. Alekseenkov A., Kuntsevich Yu., Narkhov E., Sapunov V., Sergeev A. Results of a preliminary magnetic survey at Dyatlov pass using a professional MMPOS – 2GPS Overhauser magnetometer – gradiometer // *AIP Conf. Proc.* 2466 (1). P. 040010. DOI: 10.1063/5.0088721.
15. Денисова Е.В., Гаврилов С.Ю. Численное моделирование процесса отражения электромагнитного сигнала георадара от проводящего объекта // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2010. № 4. С. 116–121. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_15266460\\_34924905.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15266460_34924905.pdf) (дата обращения: 04.02.2025).

УДК 550.812  
DOI 10.17513/use.38388

## РОЛЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮГРЫ

<sup>1</sup>Жузьменков С.Г., <sup>1</sup>Нанишвили О.А., <sup>2</sup>Змеевец Р.О., <sup>3</sup>Новиков М.В., <sup>4</sup>Бутин В.С.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск,  
e-mail: ksg.1948@yandex.ru, olgayugu@yandex.ru;

<sup>2</sup>ТТП Когалымнефтегаз ООО «Лукойл Западная Сибирь», Когалым,  
e-mail: roman.zmeevets@yandex.ru;

<sup>3</sup>Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского  
автономного округа – Югры, Ханты-Мансийск, e-mail: NovikovMV@admhmao.ru;

<sup>4</sup>АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпилмана»,  
Ханты-Мансийск, e-mail: butinvs@nacrn.hmao.ru

Цель статьи заключается в анализе применения физико-химических методов увеличения нефтеотдачи пластов при эксплуатации залежей месторождений Югры, находящихся на заключительных стадиях разработки. Для заключительных стадий разработки нефтяных месторождений характерно применение в промышленных масштабах геолого-технических мероприятий по интенсификации добычи нефти и увеличению нефтеотдачи пластов. Среди мероприятий по увеличению нефтеотдачи пласта наибольшее применение нашли гидродинамические и физико-химические методы. В статье, на примере находящегося на третьей стадии разработки месторождения ЗС, проведен анализ эффективности физико-химических методов увеличения нефтеотдачи пласта. В результате ретроспективного анализа фондовых, геолого-геофизических исследований и промысловых данных непосредственно на указанном месторождении, были определены успешные и не показавшие успешность технические решения и рассмотрены некоторые особенности применения технологий физико-химического воздействия. По степени влияния на продуктивный пласт, в статье рассмотрены потокоотклоняющие, доотмывающие и интенсифицирующие технологии. Анализ эффективности рассмотренных методов показал, что использование той или иной технологии требует постоянного контроля со стороны геолого-технологической служб предприятия, а решения об их использовании и/или прекращении должны приниматься в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** заключительная стадия разработки, геолого-технические мероприятия, физико-химические методы, ретроспективный анализ, потокоотклоняющие технологии

## THE ROLE OF PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF ENHANCED OIL RECOVERY AT THE FINAL STAGES OF DEVELOPMENT OF YUGRA FIELDS

<sup>1</sup>Kuzmenkov S.G., <sup>1</sup>Nanishvili O.A., <sup>2</sup>Zmeevets R.O., <sup>3</sup>Novikov M.V., <sup>4</sup>Butin V.S.

<sup>1</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk,  
e-mail: ksg.1948@yandex.ru, olgayugu@yandex.ru;

<sup>2</sup>Territorial production enterprise Kogalymneftegaz LLC Lukoil Western Siberia,  
Kogalym, e-mail: roman.zmeevets@yandex.ru;

<sup>3</sup>Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi  
Autonomous Okrug – Yugra, Khanty-Mansiysk, e-mail: NovikovMV@admhmao.ru;

<sup>4</sup>V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil,  
Khanty-Mansiysk, e-mail: butinvs@nacrn.hmao.ru

The purpose of the article is to analyse the application of physical and chemical methods of oil recovery enhancement during the exploitation of deposits of Yugra fields, which are at the final stages of development. The final stages of oil fields development are characterised by the application on an industrial scale of geological and technical measures to intensify oil production and increase oil recovery. Among the measures to increase oil recovery, the greatest use of hydrodynamic and physical-chemical methods. In the article, on the example of the third stage of development of the ZS field, analysed the effectiveness of physical and chemical methods of enhanced oil recovery. As a result of retrospective analysis of stock, geological and geophysical studies and field data directly, successful and unsuccessful technical solutions have been identified at the field and some features of the application of technologies of physicochemical influence have been considered. According to the degree of influence on the productive formation, the article considers flow-rejecting, pre-washing and intensifying technologies. The analysis of efficiency of the considered methods has shown that the use of this or that technology requires constant control on the part of geological and technological services of the enterprise, and decisions on their use and/or termination should be made in real time.

**Keywords:** final stage of development, geological and technical measures, physical and chemical methods, retrospective analysis, flow-deflecting technologies

### Введение

Значительная часть месторождений Ханты-Мансийского автономного округа-Югры вышли либо на максимальные объемы добычи (третья стадия), либо находятся на последней, заключительной четвертой, стадии разработки.

Основной задачей предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) Югры является усовершенствование применяемых при добыче нефти технологий увеличения нефтеотдачи пласта, включая разработку, опробование и внедрение в промышленных масштабах новых геолого-технических мероприятий (ГТМ) на действующих объектах нефтедобычи. В работе [1] достаточно убедительно доказано, что эффективность применения методов повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти в ТЭК Югры позволит в перспективе увеличить коэффициент извлечения нефти (КИН) до 0,35 – 0,4, что позволит дополнительно добыть на разрабатываемых месторождениях более 4 млрд т нефти. Но для этого необходим существенный прорыв в совершенствовании применяемых сегодня технологий, направленных, в первую очередь на устранение интенсивно нарастающей обводненности добываемой продукции и снижение эффективности методов воздействия на разрабатываемый объект [2, 3]. Указанные проблемы требуют совершенствования используемых и поиска новых методов доизвлечения запасов и повышения КИН [4, 5].

Основным фактором снижения эффективности разработки месторождений, наряду с установленной ранее [1] диспропорцией между подготовкой запасов и их извлечением, на современном этапе является существенное ухудшение структуры запасов, увеличение в них доли малоэффективных, трудноизвлекаемых запасов [6, 7].

Высокопродуктивные месторождения и залежи, определявшие прирост и уровни добычи нефти в прошлом, вступили в позднюю стадию разработки, что характеризуется интенсивным снижением добычи нефти, резким ростом обводненности продукции скважин. На поздней стадии разработки месторождений, имеющих сложное геологическое строение, промышленное внедрение методов повышения нефтеотдачи пластов влияет на качественные показатели разработки, основными из которых являются снижение и стабилизация темпов обводнения месторождений путем применения физико-химических методов воздействия на пласт [8].

На примере месторождения ЗС (условное название), находящегося по состоянию на 2024 год на третьей стадии разработки, более подробно рассмотрена эффективность применения физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (ФХ МУН).

**Цель исследования** – анализ эффективности применения технологий физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, включая потокоотклоняющие, доотмывающие и интенсифицирующие модификации.

### Материалы и методы исследований

Месторождение ЗС, основными объектами разработки которого являются шельфовые пласты неокома группы БС (БС<sub>11</sub><sup>1</sup> и БС<sub>11</sub><sup>2</sup>), открыто в 1982 году. Оно расположено в северо-восточной части Сургутского нефтегазоносного района Среднеобской нефтегазоносной области, находится на завершающей стадии разработки, для которой характерно снижение добычи нефти и увеличение обводненности объектов эксплуатации.

В промышленную эксплуатацию введено в 1988 году. К 1991 году была достигнута максимальная добыча нефти (958 тыс. т) и на протяжении 5 лет она варьировала в интервале 0,5 – 0,7 млн т, после чего началось резкое ежегодное её снижение до 470 тыс. т в год. Такая тенденция потребовала пересмотра технических решений по стабилизации добычи и, начиная с 2006 года, на месторождении началось внедрение геолого-технических мероприятий, что позволило стабилизировать добычу на прежнем уровне 0,6-0,7 млн т/год без резкого увеличения обводнённости добываемой продукции.

Из проведенных на месторождении геолого-технических мероприятий наиболее успешными были резка боковых стволов, и физико-химические методы увеличения нефтеотдачи.

Авторами был проведен анализ динамики применения технологий физико-химического воздействия на пласт с целью увеличения добычи нефти на месторождении ЗС. Также была проанализирована эффективность различных составов ФХ МУН за период 2013-2023 гг. на рассматриваемом месторождении.

### Результаты исследований и их обсуждение

При разработке месторождения наибольшую экономическую эффективность дало внедрение технологий физико-хими-

ческого воздействия на пласт различных модификаций, которые по принципу воздействия на коллектор условно подразделяются на доотмывающие, интенсифицирующие и потокоотклоняющие, причем последние (ГОС и её усовершенствованные аналоги) составляют основу промышленного применения на производстве. В результате проведения почти 300 мероприятий за анализируемый период (2013-2023 гг.) было получено дополнительно 149 тыс. т нефти.

Потокоотклоняющие технологии основаны на физико-химических процессах, в результате которых в пласте формируется барьер, препятствующий дальнейшему движению воды. Этот барьер создается благодаря взаимодействию реагентов в условиях пласта, что приводит к образованию водоизолирующего экрана. В состав большинства геолообразующих композиций входит полиакриламид с различными сшивателями [9].

При применении потокоотклоняющих технологий химические реагенты, попадая в высокопроницаемые каналы коллектора, блокируют эти зоны, что создает условия для перераспределения потока закачиваемой воды. В результате этого закачиваемая вода попадает в ранее слабодренлируемые участки пласта и тем самым повышается охват пласта заводнением [10, 11].

Использование нефтеотмывающих составов способствует доотмыву остаточной нефти в слабодренлируемых участках разрабатываемого пласта, вследствие снижения поверхностного натяжения вытесняющего агента на границе с нефтью и повышения его вязкости в результате внутрипластового образования стойких и вязких эмульсий [12].

Период 2013-2014 гг. ФХ МУН характеризуется применением малого спектра апробируемых и применяемых технологий, с годами внедрения под средством опытно-промышленных работ (ОПР) происходит увеличение объемов обработок и видов технологий, формируется круг эффективных технологий (рис. 1).

В период 2015-2016 гг. объем операций ФХ МУН был снижен для оценки эффекта от прекращения влияния обработок химическими композициями. Сокращение обработок ФХ МУН привело к увеличению объемов попутно добываемой воды, что указывает на формирование устойчивых каналов фильтрации в высокопроницаемых интервалах нефтенасыщенных коллекторов и подтверждает необходимость применения ФХ МУН. В связи с этим с 2017 года объем операций ФХ МУН был увеличен.

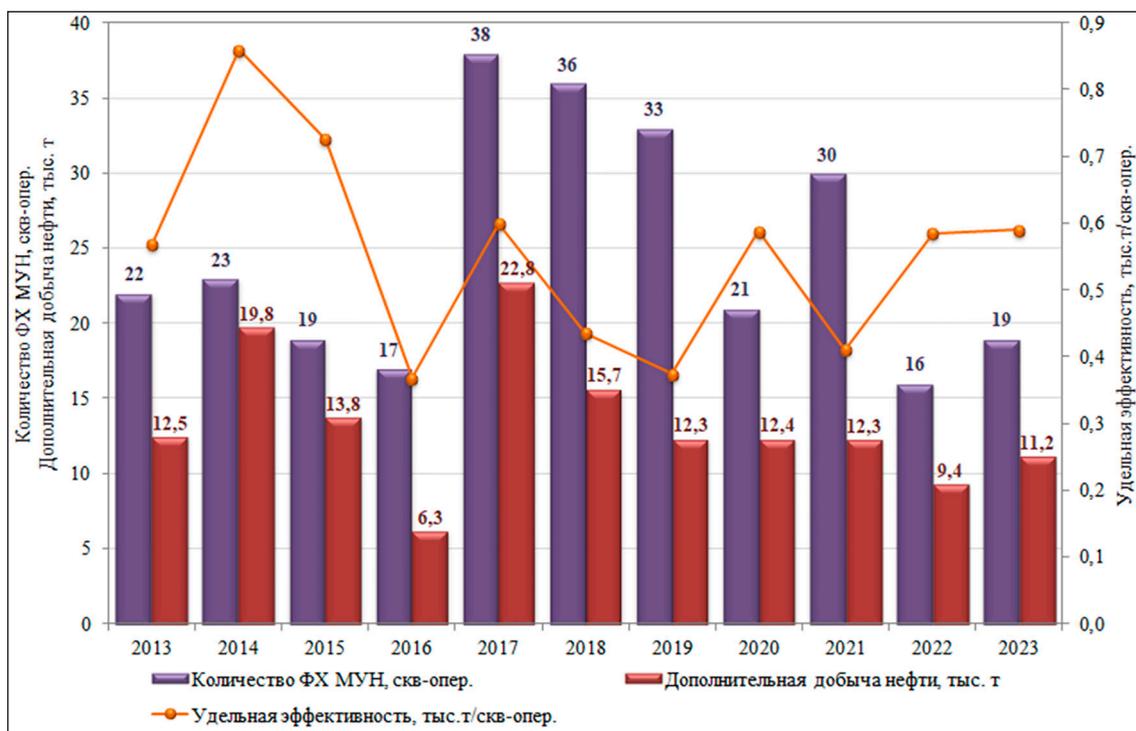


Рис. 1. Распределение операций ФХ МУН и показателей их эффективности за период 2013-2023 гг.  
Источник: составлено авторами

В 2017 и 2018 году на месторождении, с применением той или иной технологии физико-химического воздействия на пласт, было выполнено 38 и 36 геолого-технических мероприятий соответственно. На работающих скважинах были проведены исследования по актуализации химического состава применяемых композиций и их адаптации к реальным геологическим условиям разрабатываемых объектов. В зависимости от геологических характеристик были разработаны и прошли промышленную апробацию методы с увеличенной и/или уменьшенной концентрацией того или иного компонента в составе потокоотклоняющих технологий. Всё это позволило, без нарушения технологического режима добычи нефти, увеличить площадь дренирования эксплуатируемых объектов.

Наименьшая эффективность применения ФХ МУН отмечена в 2019 году (удельный эффект – 0,37 тыс. т/скв-опер.), что было вызвано началом внедрения водорастворимой осадкообразующей технологией СОТ-12, которую используют на участках с низким ФЭС и, как правило, с малой приемистостью и отборами в окружении. Технология заключается в закачке композиции СОТ-12 в нагнетательные скважины. В пластовых условиях, под действием повышенной температуры, компоненты состава генерируют осадок кристаллической структуры, который обеспечивает изоляцию водопромытых зон, что выравнивает фронт вытеснения нефти рабочим агентом [13].

Основным компонентом гелеобразующего состава (ГОС) является гидролизованный полиакриламид (ПАА), в качестве сшивателя используется ацетат хрома [14, 15]. Также в состав входит поверхностно-активное вещество (МЛ-80) обладающее повышенными нефтеотмывающими свойствами. В результате применения композиции ГОС происходит активное перераспределение фильтрационных потоков, как по площади обрабатываемого участка, так и по разрезу продуктивного пласта.

Применение модификации композиции ГОС на основе ПАА (ГОС-1АС) и технологии ЭСС в промышленных масштабах началось с 2011 года и продолжается по настоящее время. Технология ГОС-1АС показала свою эффективность при работе с «разбуженной» нефтью в результате прорывов нагнетаемой в залежь воды. Суть технологии заключается в поочередной закачке в эксплуатируемый объект полимерных растворов и наполнителей различного состава с постепенным (от цикла к циклу) увеличе-

нием их концентрации. Это позволяет повысить фильтрационное сопротивление в обводненных зонах залежи, выровнять фронт вытеснения и, в конечном итоге, снизить обводненность добываемой продукции.

Эмульсионно-суспензионная технология (ЭСС) заключается в повышении вязкости закачиваемого в пласт концентрата эмульсии при разбавлении его водой в глубине пласта, а также в снижении фазовой проницаемости по воде при фильтрации закачиваемой воды через гидрофобизированную эмульсией, ранее гидрофильную часть высокопроницаемого пласта. В качестве наполнителя в технологии ЭСС используется глина, мел, древесная мука.

Эффективность эмульсионно-суспензионного состава (ЭСС) основана на увеличении вязкости эмульсионного концентрата, закачиваемого в пласт, при его разбавлении пластовой водой, а также на снижении фазовой проницаемости для воды при фильтрации ее через гидрофобизированную эмульсией высокопроницаемую зону пласта, изначально обладавшую гидрофильными свойствами. В качестве наполнителя в эмульсионно-суспензионном составе используется глина, мел, древесная мука.

Удельная эффективность ГОС-1АС за анализируемый период 0,69 тыс. т/скв-опер., а ЭСС – 0,53 тыс. т/скв-опер., при продолжительности эффекта более 8 месяцев, после чего повторные обработки также имели положительную динамику (рис. 2). Все это предопределило максимальное их использование в качестве основных потокоотклоняющих технологий месторождения.

Максимальный удельный эффект получен от единичных обработок с применением большеобъемной осадко-гелеобразующей технологии БО ГОС-1АС (1,2 тыс. т/скв-опер.).

Обработки водорастворимой осадкообразующей технологией СОТ-12 показали среднюю удельную эффективность (0,42 тыс.т/скв-опер.) что закономерно, так как обработки данной технологией проводятся на участках с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЭС).

Наименьшая удельная эффективность отмечается у обработок с применением технологий ТермоГОС (0,36 тыс. т/скв-опер.) и РВ-ЗП-1МС (0,25 тыс. т/скв-опер.). В технологиях используются термотропные гелеобразующие составы, то есть генерация геля происходит непосредственно в пласте под действием температуры. Основными компонентами, генерирующими гель, в композициях являются карбамид (мочевина) и соль алюминия.

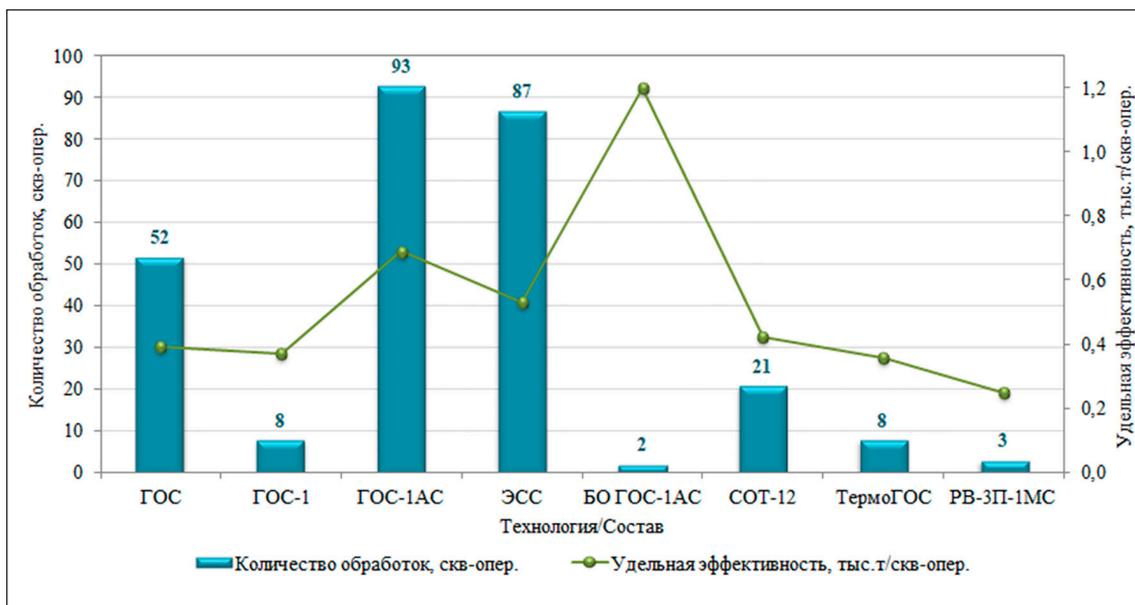


Рис. 2. Распределение операций ФХ МУН по технологиям за период 2013-2023 гг.  
 Источник: составлено авторами

В результате анализа проведенных обработок в качестве основных рекомендуемых технологий предлагается увеличить применение осадко-гелеобразующего состава ГОС-1АС и эмульсионно-суспензионного состава ЭСС.

### Заключение

Опыт использования ФХ МУН на месторождении ЗС показал, что:

- внедрение технологий следует начинать уже на этапе прогрессирующего обводнения продукции, чтобы контролировать фильтрацию закачиваемого агента. В водонефтяных зонах залежей применение технологий целесообразно начинать одновременно с организацией системы поддержания пластового давления (ППД);

- для достижения максимальной эффективности необходимо ежегодно проводить повторные закачки химических композиций. Практический опыт подтверждает, что периодическое применение ФХ МУН (1–2 раза в год) обеспечивает более высокий совокупный технологический эффект по сравнению с разовой закачкой аналогичного объема химического состава;

- подбор состава физико-химического воздействия необходимо осуществлять на основе оценки его применимости для конкретного объекта разработки, учета геолого-физических характеристик продуктивного пласта и пластовых флюидов, а также

подтвержденной эффективности химического состава в аналогичных условиях;

- потокоотклоняющие технологии рекомендуется применять в послойно-неоднородных коллекторах с разницей в величине проницаемости прослоев в несколько раз, а также в мощных пластах с существенной вертикальной и латеральной изменчивостью проницаемости.

В числе положительных эффектов от проведения физико-химических методов увеличения нефтеотдачи можно отметить значительное снижение объемов закачиваемой и добываемой попутной воды, а также вовлечение в эксплуатацию запасов нефти из низкопроницаемых участков пласта.

Так как в дальнейшем разработка месторождения будет сопровождаться высокой обводненностью продукции, роль методов увеличения нефтеотдачи будет возрастать. Ключевыми задачами ФХ МУН в данных условиях являются: снижение проницаемости обводненных пропластков, оптимизация профиля приемистости, расширение зоны охвата пласта воздействием.

### Список литературы

1. Кузьменков С.Г., Аюпов Р.Ш., Новиков М.В., Исаев В.И., Лобова Г.А., Стулов П.А., Бутин В.С., Астапенко Е.О. Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 4. С. 96–106. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2597.

2. Королев М.И., Рогачев М.К. Подбор химической композиции для вытеснения нефти из обводненных коллекто-

ров // Инженер-нефтяник. 2017. № 2. С. 48-53. URL: [http://инженер-нефтяник.pdf/file/dijest/2017/2\\_2017.pdf](http://инженер-нефтяник.pdf/file/dijest/2017/2_2017.pdf) (дата обращения: 21.03.2025).

3. Баталов Д.А., Мухаметшин В.В., Андреев В.Е., Дубинский Г.С., Федоров К.М. Сравнительный анализ прогнозной эффективности осадкогелеобразующих технологий увеличения нефтеотдачи в условиях месторождений ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь» // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 3. С. 40–46. URL: <https://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/3/ngdelo-3-2016-p40-46.pdf> (дата обращения: 19.03.2025).

4. Бриллиант Л.С., Старкова Н.Р., Чернавских С.Ф., Козлов А.И. Экспериментальные исследования по совершенствованию технологии полимерного заводнения // Нефтяное хозяйство. 2000. № 9. URL: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=224&art=940](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=224&art=940) (дата обращения: 21.03.2025).

5. Кузьменков С.Г., Королев М.И., Новиков М.В., Паляница А.Н., Нанишвили О.А., Исаев В.И. Эффективность применения методов повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти на месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 3. С. 129-139. DOI: 10.18599/grs.2023.3.16.

6. Кузьменков С.Г., Нанишвили О.А., Новиков М.В., Захарова Л.М., Захарова В.А. Состояние и перспективы развития ресурсной базы Югры // Успехи современного естествознания. 2024. № 12. С. 133-139. DOI: 10.17513/use.38360.

7. Андреев В.Е., Хузин Р.Р., Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С., Чижов А.П., Чибишев А.В. Результаты геолого-технологического обоснования методов воздействия на остаточные запасы в условиях Западно-Сибирской нефтегазонасыщенной провинции // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 11. С. 67-71. DOI: 10.30713/2413-5011-2018-11-67-71.

8. Фахретдинов Р.Н., Фаткуллин А.А. Актуальные направления и инновации в развитии химических технологий повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2023. № 8. С. 88-93. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-8-88-93.

9. Трифонов Т.В., Саттаров Р.И., Хурматуллин А.В., Сазонов Д.В. Физико-химические МУН на поздней стадии разработки месторождений // Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 7(46). С. 26-29. URL: <https://www.runeft.ru/upload/iblock/d57/d571eab041f3022ce1d4e36c2b5dcb38.pdf> (дата обращения: 18.03.2025).

10. Эпов И.Н., Зотова О.П. Потокотклоняющие технологии как метод увеличения нефтеотдачи в России и за рубежом // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-4. С. 806-810. URL: <https://fundamental-research.ru/article/view?id=41173> (дата обращения: 19.03.2025).

11. Земцов Ю.В., Баранов А.В., Гордеев А.О. Обзор физико-химических МУН, применяемых в Западной Сибири, и эффективности их использования в различных геолого-физических условиях // Нефть. Газ. Новации. 2015. № 7. С. 11-21. URL: [https://oilgasconference.ru/upload/iblock/f18/neft.gaz.novatsii\\_2015.pdf](https://oilgasconference.ru/upload/iblock/f18/neft.gaz.novatsii_2015.pdf) (дата обращения: 18.03.2025).

12. Москальчук А.В., Пахаруков Ю.В. Применение поверхностно-активных веществ для увеличения нефтеотдачи пластов с трудноизвлекаемыми запасами нефти // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 10. С. 69-73. URL: [http://www.vniioeng.ru/user\\_files/file/ants/ge/Geology\\_Geophysics\\_2014-10\\_rus.pdf](http://www.vniioeng.ru/user_files/file/ants/ge/Geology_Geophysics_2014-10_rus.pdf) (дата обращения: 18.03.2025).

13. Ишков А.А., Мазитов Р.Ф., Хорюшин В.Ю. Применение потокотклоняющих технологий в условиях низкопроницаемых коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 1. С. 59-66. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-1(337)-59-66.

14. Ганиев И.М., Магязнов И.Р., Калимуллина Г.З., Тахмезов Т.А., Оприлов И.Г., Андреев А.Е. Исследование сшитых полимерных составов для условий месторождений ООО «РН-Пурнефтегаз» // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 3. С. 30-39. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-3-30-39.

15. Калимуллина Г.З., Ганиев И.М. Изучение влияния молекулярных характеристик полимеров ряда акриламида на свойства сшитых полимерных систем // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 3. С. 71–79. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-3-71-79.

УДК 551.468.4:574.5:577.114.7  
DOI 10.17513/use.38389

## ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В АМУРСКОМ ЛИМАНЕ

Стукова О.Ю.

*ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск,  
e-mail: olgastukova1@rambler.ru*

В статье представлены результаты модельного исследования микробиологических процессов трансформации полициклических ароматических углеводородов, влияющих на формирование качества воды в Амурском лимане. Целью работы являлось исследование микробиологических процессов трансформации полициклических ароматических углеводородов бактериобентосом на разных участках в Амурском лимане. В работе использовали микробные комплексы, выделенные из донных отложений на различных участках Амурского лимана. В качестве основного метода был использован микробиологический анализ. Численность бактериобентоса определяли общепринятыми в водной микробиологии приемами и выражали в колониеобразующих единицах на 1 г сырого веса донных отложений. Методом эколого-физиологических исследований определяли потенциальную способность бентосных микробных комплексов к трансформации полициклических ароматических углеводородов. Культивирование микробных комплексов осуществляли на жидких питательных средах, содержащих ароматические углеводороды разного строения. В качестве источников углерода использовали бициклический нафталин и трициклический фенантрен в концентрации 1 г/л. Потенциальную активность бактериобентоса оценивали по изменению оптической плотности накопления биомассы (490 нм) и образованию окрашенных продуктов (400 нм) через 30 и 90 суток. Как показали модельные исследования, интенсивность их трансформации может существенно изменяться на различных участках Амурского лимана. Выполненные микробиологические исследования в Амурском лимане показали, что скорость трансформации ПАУ и образования метаболитов зависела от множества факторов, включая природную соленость, от адаптации деструкторов микробного сообщества и концентрации полициклических ароматических углеводородов. Трансформация полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях происходит с участием сложных микробных комплексов, что предполагает поэтапное разложение углеводородов и возможность накопления различных метаболитов в придонных слоях воды.

**Ключевые слова:** донные отложения, полициклические ароматические углеводороды, эстуарий реки Амур, бактериобентос

## THE RESEARCH OF MICROBIOLOGICAL PROCESSES OF TRANSFORMATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THE AMUR RIVER ESTUARY

Stukova O.Yu.

*Pacific State University, Khabarovsk, e-mail: olgastukova1@rambler.ru*

The article presents the results of a modeling study of the biotransformation of polycyclic aromatic hydrocarbons, influencing the water quality in the Amur estuary. The aim of work was to study the microbiological processes of bacteriobenthos, taking part in the transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in Amur estuary. In this, study microbial complexes isolated from the sediments in the various areas of the Amur estuary. Microbiological analysis was used as the main method. The number of bacteriobenthos was studied by generally methods accepted in aquatic microbiology expressed in colony-forming units per gramme of fresh weight. The potential ability of benthic microbial complexes to biodegrade polycyclic aromatic hydrocarbons was determined by the method of ecological and physiological studies. Microbial complexes were cultivated on liquid nutrient media containing aromatic hydrocarbons of various structures. Bicycle naphthalene and tricycle phenanthrene at a concentration of 1g/l were used as carbon sources. The potential activity of bacteriobenthos was assessed by changes in the optical density of biomass accumulation (490 nm) and the formation of colored products (400 nm) after thirty and ninety days. As shows by model studies, the rate of their transformation can vary significantly in different areas of the Amur River estuary. Microbiological studies carried out in the Amur Estuary showed that the rate of polycyclic aromatic hydrocarbons transformation and formation of metabolites depended on many factors, including natural salinity, the adaptation of microbial community destructors and the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons. The transformation of PAHs in sediments occurs with the participation of microbial complex, which suggests a step-by-step decomposition of hydrocarbons and the possibility of accumulation of various intermediate products in the bottom layers of water.

**Keywords:** sediments, polycyclic aromatic hydrocarbons, Amur River estuary, bacteriobenthos

### Введение

Речной сток приводит к распространению различных поллютантов в моря [1]. Загрязнение прибрежных акваторий Охот-

ского и Японского морей токсическими веществами, поступающих с водами р. Амур, представляет собой серьезную экологическую угрозу для функционирования мор-

ских биоценозов, тем самым вызывая мутагенный, тератогенный и канцерогенный эффект [2]. Река Амур, являясь крупнейшей речной системой на Дальнем Востоке, играет ключевую роль в формировании экологического состояния прибрежных вод. Амурский лиман не просто пропускает речные воды, но и накапливает значительную часть загрязняющих веществ, поступающих с Амуром [3, 4]. Устье реки иначе называют маргинальными фильтрами, где происходит осаждение большей части взвешенных веществ антропогенного и природного генезиса [5].

Среди этих веществ особого внимания заслуживают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). ПАУ – это группа органических соединений, многие из которых обладают высокой токсичностью и канцерогенностью. В воды Амура они попадают из различных источников: от промышленных выбросов и сбросов сточных вод, выветривания почвы, с поверхностным стоком. Состав и концентрации ПАУ в речном стоке варьируют в зависимости от сезона, гидрологического режима реки и антропогенной нагрузки на бассейн р. Амур. Не менее важны гуминовые вещества (ГВ), которые являются естественными компонентами р. Амур [6]. ГВ могут также связывать и транспортировать ПАУ, изменяя их доступность для живых организмов и скорость деградации. ГВ образуют комплексы с ПАУ, что влияет на их адсорбцию в донных отложениях (ДО) и, следовательно, на накопление в пищевой цепи. Попадая в прибрежные воды, ПАУ подвергаются сложным процессам трансформации и деструкции, которые определяются комплексами экологических факторов. Ключевую роль в этом играют микроорганизмы, способные к биодеградации ПАУ. Однако эффективность биодеградации зависит от множества факторов, включая концентрацию ПАУ, тип ПАУ (некоторые молекулы более устойчивы к разложению), доступность для микроорганизмов кислорода и питательных веществ, а также наличие сопутствующих продуктов трансформации ПАУ. Более того, некоторые микроорганизмы не только деградируют ПАУ, но и используют их в качестве источника углерода, что влияет на структуру и продуктивность прибрежных экосистем. Механизмы биодеградации ПАУ являются предметом интенсивных исследований в связи с глобальным загрязнением экосистем сырой нефтью и нефте-

продуктами [7], поскольку понимание этих процессов крайне важно для разработки эффективных стратегий по снижению загрязнения морской среды.

Нефтяные загрязнения приводят к катастрофическим последствиям для гидробионтов, вызывая гибель животных, разрушая целые экосистемы и нанося непоправимый ущерб биоразнообразию. Именно поэтому изучение влияния абиотических и биотических факторов на процессы деградации ПАУ в системе река – лиман – море является актуальной и важной задачей современной экологии. Разработка методов биологической очистки, улучшение качества воды в бассейне р. Амур, а также мониторинг содержания ПАУ в морской воде и ДО – необходимые меры защиты прибрежных экосистем Охотского и Японского морей. Более глубокое изучение взаимодействия ГВ и ПАУ, а также исследование разнообразия и активности микроорганизмов, участвующих в биодеградации ПАУ, позволяет создать модели прогнозирования состояния прибрежных экосистем и разработать эффективные стратегии их защиты от антропогенного воздействия.

Результативность разложения ПАУ достигается благодаря активности микробиологических сообществ. В ходе экспериментов было выявлено, что в условиях длительного загрязнения водных ресурсов органическими веществами (ОВ) у сообществ микроорганизмов возрастают их адаптивные способности, что включает в себя улучшение ферментных систем, которые способствуют разложению ПАУ. Этот процесс активно используется в методах биоиндикации и биотестирования для оценки экологического состояния водных экосистем [8]. Скорость превращения ПАУ во многом зависит от химического строения молекулы и структуры микробных сообществ. Используя три активных штамма, *Rhodococcus sp.*, *Acinetobacter sp.* и *Pseudomonas sp.*, была проведена утилизация смеси фенантрена и флуорена за одну неделю, в то время как биодеградация пирена заняла больше времени [9]. Штамм *Sphingobium sp. FB3* разрушал различные углеводороды в течение 10 дней: фенантрен – 99%, флуорантен – 97%, антрацен – 67%; пирен – 72%, бенз(а)пирен всего 6% [10].

**Цель исследования** – изучение микробиологических процессов трансформации ПАУ бактериобентосом на разных участках в Амурском лимане.



Рис. 1. Карта-схема расстановки точек по отбору проб ДО в Амурском лимане (июнь, 2006 г.)

### Материалы и методы исследования

Для модельных исследований механизмов трансформации ароматических углеводородов (АУ) различного строения использовали пробы ДО, отобранных на различных участках в Амурском лимане, где происходило смешение речных и морских вод. Отбор проб ДО проводили по направлению к северу и югу от устья р. Амур, где имеет место изменение режима солености (рис. 1) [11].

В качестве основного метода был применен микробиологический анализ. В этом

методе осуществляли селективное культивирование МК на жидких питательных средах, содержащих ПАУ. В микробиологических исследованиях в качестве модели и источников углерода использовали бициклический нафталин и трициклический фенантрен в концентрации 1 г/л. Численность бактериобентоса определяли общепринятыми в водной микробиологии методами. Активность бактериобентоса оценивалась по изменению оптической плотности (ОП) накопления биомассы (490 нм) и образованию окрашенных продуктов (400 нм) через 30 и 90 суток [11].

### Результаты исследования и их обсуждение

В прибрежные воды Охотского и Японского морей с речным стоком поступают ПАУ разного строения. Согласно сведениям, данным в литературных источниках, их содержание варьировалось от 24,1 до 50 нг/л для гидрофильных форм, от 0,7 до 1,35 мкг/л для гидрофобных форм [4]. По оценке химических исследований, Амурский лиман относится к эстуариям со средним уровнем загрязнения. По результатам расчетов с использованием специальных маркеров, как выяснилось, основными источниками поступления ПАУ являются процессы сжигания различного вида топлива (угля, древесины, нефти) [12].

Исследователи использовали метод биоиндикации и установили, что ДО в разных местах различаются не только по гранулометрическому составу, но и по содержанию ОВ, что во многом определяет структуру микробного сообщества, численность и активность микробоценозов. Общее количество гетеротрофных бактерий (ОЧГБ) на текущий момент исследования составило от  $4,3 \cdot 10^5$  КОЕ/г в песчаных грунтах до  $470 \cdot 10^5$  КОЕ/г в ДО, обогащенных детритом (рис. 2) [11].

Исследователями установлена максимальная численность гетеротрофных бактерий (ГБ) в эстуарии, где изменение гидрологического режима (скорости течения, градиента естественной солености) [11] снизило растворимость некоторых ПАУ и может быть объяснено тем, что происходит их осаждение в ДО. Здесь же присутствовали фенолрезистентные бактерии (ФРБ). Это

говорит о том, что в других районах эстуария фенольные соединения отсутствовали либо быстро утилизировались гетеротрофными бактериями. Микробиологические процессы, протекающие в ДО Амурского лимана, определяют качество природной воды за счет образования различных продуктов преобразования ОВ. Их состав будет определяться адаптивными свойствами микроорганизмов к ПАУ и изменением гидрологического режима солености и присутствием вторичных продуктов превращения поллютантов.

Исследование микробиологических процессов трансформации ПАУ в ДО Амурского лимана показало сложную картину, зависящую от множества факторов, включая соленость, тип микроорганизмов и концентрацию самих ПАУ (рис. 3).

Микробиологическая трансформация ОВ, включая ПАУ в Амурском лимане, определяет качество воды, влияя на ее химический состав. Образующиеся продукты трансформации зависят от нескольких ключевых биологических и физико-химических факторов: видового состава сообщества и их способности к деградации ПАУ, гидрологического режима (включая приливно-отливные колебания, которые влияют на перемешивание воды и доступность кислорода), а также солености воды. Изменение солености, например, может селективно влиять на видовой состав микроорганизмов, преимущественно подавляя рост некоторых видов и стимулируя другие, обладающие повышенной солеустойчивостью (галофилы). Это отражается на их скорости и характере трансформации ПАУ.



Рис. 2. Количество микроорганизмов в донных отложениях Амурского лимана

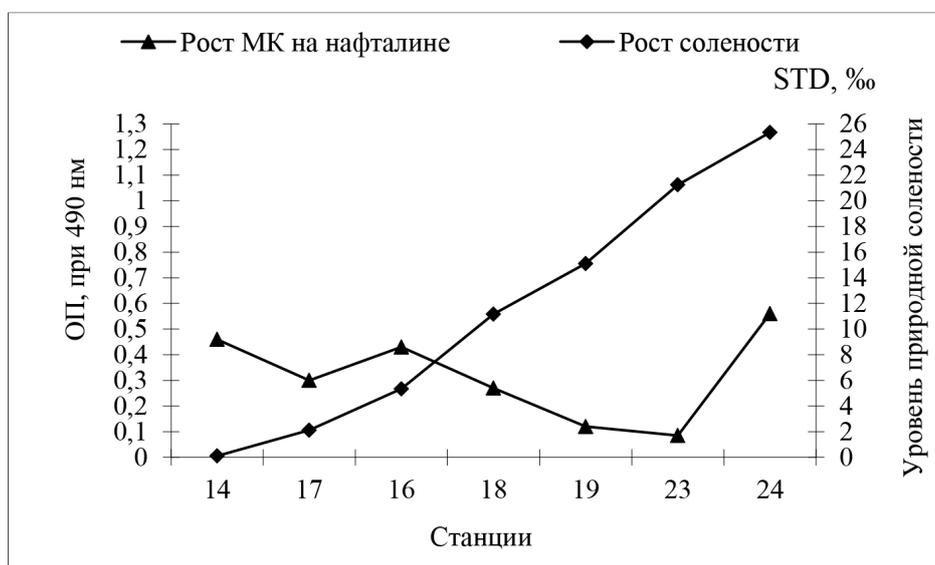
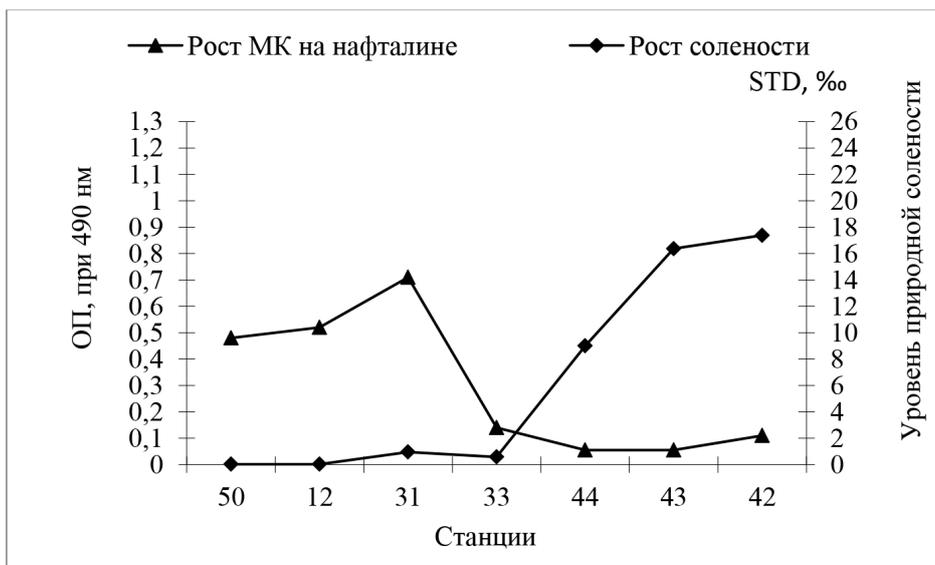


Рис. 3. Рост бактерий из различных донных отложений на нафталине

Наиболее активное разложение ПАУ, в частности нафталина (как модельного представителя ПАУ), наблюдалось у микроорганизмов, обитающих в осадках устьевой и южной части лимана. Это указывает на адаптацию микробиоты к условиям среды, характеризующимся как высоким содержанием ОВ и повышенной соленостью в южной части, связанной с влиянием морской воды Татарского пролива. Однако в южной части, где соленость воды значительно возрастает, активность микробных сообществ снижается, исключение составляет станция 24. Это явление требует дальнейшего исследования и может быть связано с присутствием специфических галофильных бактерий, эффективно деградирующих ПАУ в условиях высокой солености. Модельные исследования показали не только образование цветных продуктов разложения, свидетельствующих о метаболической активности микроорганизмов, но и использование ими нафталина как источника углерода. Рост бактериобентоса в культуральной жидкости служит прямым доказательством этого процесса.

Интенсивная деградация нафталина характеризуется оптимальным сочетанием факторов, благоприятствующих развитию микроорганизмов. К этим факторам относятся: эффективно разлагающийся нафта-

лине. Это явление требует дальнейшего исследования и может быть связано с присутствием специфических галофильных бактерий, эффективно деградирующих ПАУ в условиях высокой солености. Модельные исследования показали не только образование цветных продуктов разложения, свидетельствующих о метаболической активности микроорганизмов, но и использование ими нафталина как источника углерода. Рост бактериобентоса в культуральной жидкости служит прямым доказательством этого процесса.

лин, достаточное количество ОВ, оптимальный уровень кислорода и, на станциях 11, 12, расположенных в устьевой зоне, и на станции 31 в центральной части лимана, умеренная соленость. Следует отметить, что различия в активности микроорганизмов могут быть связаны не только с соленостью, но и с другими факторами, такими как содержание кислорода в ДО, наличие других источников углерода и видовой состав микробного сообщества. Также вторичные продукты деструкции ПАУ могут как стимулировать, так и ингибировать активность микроорганизмов, участвующих в деградации ПАУ.

В северной части Амурского лимана в некоторых образцах ДО, отобранных

из наиболее удаленных участков, где функционировал бактериобентос, адаптированный к олиготрофным условиям – низкому содержанию ОВ, разложение нафталина происходило значительно медленнее и не образовались вторичные продукты хиноидной структуры в результате трансформации нафталина. Следует подчеркнуть разнообразие метаболических путей разложения ПАУ у разных сообществ микроорганизмов, обитающих в различных экологических условиях. Включение этих данных позволяет создать экологическую модель процессов трансформации ПАУ в Амурском лимане и разработать эффективные стратегии по биоремедиации загрязненных участков.

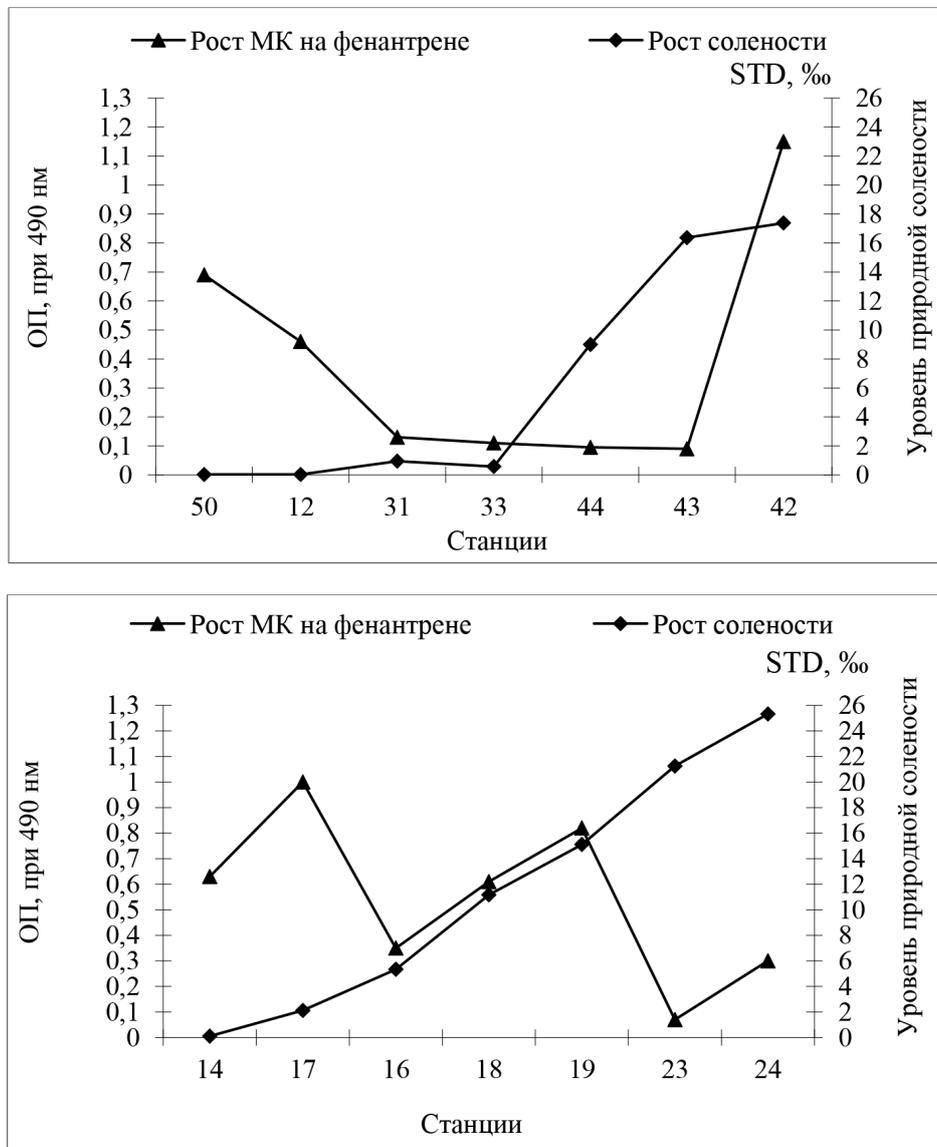


Рис. 4. Рост бактерий из различных донных отложений на фенантрене

Интенсивный рост бактериобентоса на фенантрене наблюдается в различных экосистемах, что связано с широким распространением ПАУ в ДО. Фенантрен имеет многообразные источники поступления в водные экосистемы как природные, так и антропогенные. Деструкция фенантрена, одного из наиболее распространенных ПАУ, сопровождается заметным изменением цветности культуральной жидкости, что указывает на активные биохимические процессы, происходящие в среде. Ранее в ходе исследования было идентифицировано наличие токсичного 1,2-бензохинона среди окрашенных продуктов, образующихся в процессе разложения фенантрена [13]. Этот промежуточный продукт представляет собой значительную угрозу для экосистем, так как обладает высокой токсичностью и может негативно влиять на гидробионты. Также исследования показали, что фенантрен может разлагаться с образованием промежуточных продуктов, таких как фталевые кислоты, нафтол и салициловая кислота, которые также могут иметь различную степень токсичности [14].

Преобразование ПАУ в ДО происходит с участием сложных МК, что предполагает поэтапное разложение углеводов и возможность накопления различных промежуточных продуктов в придонных слоях воды [14]. Это явление требует дальнейшего изучения, так как накопление токсичных веществ может привести к ухудшению состояния экосистем и нарушению их функциональности. Например, ученые отметили медленное самоочищение природных экосистем от стойких углеводов после разлива нефти у берегов Испании. После аварии в течение двух лет в морской воде наблюдали нафталин, метил и диметилнафталин, в ДО фиксировалось депонирование различных стойких ОВ разного строения [15]. Эти исследования подчеркивают важность экологического мониторинга состояния водоемов после антропогенных воздействий, таких как разливы нефти и нефтепродуктов, и необходимость разработки эффективных методов для восстановления экосистем.

Из наблюдений и проведенных экспериментов обнаруживается, что активность микроорганизмов на фенантрене снижалась с увеличением природной солености. Это может быть связано с тем, что высокие концентрации соли оказывают осмотическое давление на микроорганизмы, что, в свою очередь, негативно сказывается

на их жизнедеятельности и способности к разложению углеводов. Например, наблюдения в северной части Амурского лимана показали, что рост бактериобентоса на фенантрене был более интенсивным, чем в центральной части лимана. Это может быть связано с различиями в условиях среды, такими как содержание ОВ и уровень солености (рис. 4) [16].

Таким образом, изучение процессов разложения фенантрена и других ПАУ в водных экосистемах является актуальной проблемой, требующей комплексного подхода и междисциплинарного сотрудничества. Важно учитывать как микробиологические, так и физико-химические аспекты взаимодействия углеводов с окружающей средой. Эти знания помогут не только в оценке состояния экосистем, но и в разработке эффективных стратегий для их защиты и восстановления.

### Заключение

Микробиологическая трансформация органических веществ, включая ПАУ в Амурском лимане, определяет химический состав воды. Трансформация ПАУ и образование конечных продуктов распада зависит от следующих экологических факторов: видового состава микробиологического сообщества, присутствия деструкторов ПАУ и их способности к деградации ПАУ; гидрологического режима, включая приливно-отливные колебания, которые способствуют перемешиванию воды и доступности кислорода; изменения солености, что селективно воздействует на эколого-физиологический состав микроорганизмов, подавляя рост некоторых видов, стимулируя других, солеустойчивых (галофилов), что отражается на скорости и характере трансформации ПАУ в Амурском лимане. Включение полученных данных микробиологического исследования позволяет создать научную картину процессов трансформации ПАУ бентосными МК в Амурском лимане и разработать методы по биоремедиации загрязненных участков.

Выполненные экспериментальные исследования в Амурском лимане показали, что скорость трансформации ПАУ и образования метаболитов зависела от множества факторов, включая природную соленость, адаптацию деструкторов микробного сообщества и концентрации ПАУ. Можно сказать, что для исследования устойчивости экосистем к углеводородному загрязнению и возможности их восстановления необ-

ходимы дальнейшие исследования микробиологических процессов в зоне смешения пресных и соленых вод для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе деструкции ПАУ, а также для разработки методов, позволяющих минимизировать негативное воздействие на гидробионты.

#### Список литературы

1. Rajpara R.K., Dudhagara D.R., Bhatt J.K., Gosai H.B. and Dave B.P. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at the Gulf of Kutch, Gujarat, India: occurrence, source apportionment, and toxicity of PAHs as an emerging issue // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 119. P. 231–238.
2. Abdel-Shafy H.I. and Mansour M.S. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation // *Egyptian Journal of Petroleum* 2016. Vol. 25. P. 107–123.
3. Kuppusamy S., Thavamani P., Venkateswarlu K., Lee Y.B., Naidu R. and Megharaj M. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: technological constraints, emerging trends and future directions // *Chemosphere*. 2017. Vol. 168. P. 944–968.
4. Чинова Т.Л., Тищенко П.Я., Кондратьева Л.М., Кудряшова Ю.В., Каваниши Т. Полициклические ароматические углеводороды в эстуарии р. Амур // *Вода: Химия и Экология*. 2013. № 10. С. 14–22.
5. Adeniji A., Okoh O. and Okoh A. Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and sediment of Buffalo River Estuary, South Africa and their health risk assessment // *Archives contamination and toxicology*. 2019. Vol. 76. P. 657–669.
6. Шестеркин В.П. Многолетняя динамика содержания органического вещества в воде среднего Амура в зимнюю межень // *Вестник ДВО РАН*. 2018. № 2. С. 130–136.
7. Немеровская И.А. Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова // *Геохимия*. 2020. Т. 65, № 7. С. 679–692 DOI: 10.31857/S0016752520070079.
8. Белых Л.И., Глызина О.Ю. Закономерности распределения полиароматических углеводородов в системе вода – гидробионты озера Байкал // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2023. Т. 8, № 2. С. 126–134. DOI: 10.21285/2500-1582-2023-2-126-134.
9. Yu S.H., Ke L., Wong Y.S., Tam N.F.Y. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterial consortium enriched from mangrove sediments // *Environment International*. 2005. Vol. 31. № 2. P. 149–154.
10. Bo Fu., Qing X. Li, Ting Xu, Zhong L. Cui, Ying Sun, Ji Li *Sphingobium* sp. FB3 degrades a mixture of polycyclic aromatic hydrocarbons // *International biodegradation*. 2014. Vol. 87. P. 44–51.
11. Кондратьева Л.М., Стукова О.Ю. Биотрансформация полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях // *Вода: химия и экология*. 2014. № 10. С. 101–107.
12. Халиков И.С. Оценка возможности диагностики источников загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами по их компонентному составу: монография. ФГБУ «НПО» «Тайфун» Росгидромета России. Тамбов: Юнкоф, 2024. 80 с.
13. Кондратьева Л.М., Стукова О.Ю. Биоиндикация загрязнения эстуария реки Амур полиароматическими углеводородами // *Гидробиологический журнал*. 2008. № 5. С. 54–68.
14. Patel A.B., Singh S., Patel A., Jain K., Amin S., Madamwar D. Synergistic biodegradation of phenanthrene and fluoranthene by mixed bacterial cultures // *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 284. P. 115–120.
15. Grueiro-Noche G., Andrade J.M., Muniategui-Lorenzo S., Lopez-Mahia P., Prada-Rodriguez D. 3-Way pattern-recognition of PAHs from Galicia (NW Spain) seawater samples after the Prestige's wreck // *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158. P. 207–214.
16. Стукова О.Ю. Влияние солености на биотрансформацию полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях Амурского лимана // *Современные науки: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные науки*. 2022. № 04/2. С. 35–39.