



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 6 2025



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 6 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.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е.С.,

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент **Абдулвалеев Р.Р.** (Уфа); д.г.-м.н., проф., **Абильхасимов 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. **Ивашкевич 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. **Косякова И.В.** (Самара); д.с.-х.н., **Коцарева Н.В.** (Белгород); д.т.н., доцент **Кузяков О.Н.** (Тюмень); д.г.-м.н., проф. **Кучеренко И.В.** (Томск); д.б.н., проф. **Ларионов М.В.** (Саратов); д.г.-м.н., проф. **Лебедев В.И.** (Кызыл); д.ф.-м.н., проф. **Лерер А.М.** (Ростов-на-Дону); д.г.н., проф. **Луговской А.М.** (Москва); д.г.-м.н., проф. **Мельников А.И.** (Иркутск); д.т.н., проф. **Мусаев В.К.** (Москва); д.т.н., доцент **Нехорошева А.В.** (Ханты-Мансийск); д.с.-х.н., **Никитин С.Н.** (Ульяновск); д.с.-х.н., **Оказова З.П.** (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. **Партоев К.** (Душанбе); д.с.-х.н., проф. **Петелько А.И.** (Миценск); д.т.н., проф. **Петров М.Н.** (Красноярск); д.т.н., проф. **Пирумян Г.П.** (Ереван); д.с.-х.н., проф. **Проездов П.Н.** (Саратов); д.г.-м.н., проф. **Сакиев 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. **Ширанов Д.Ш.** (Улан-Удэ); д.т.н., проф. **Шишелова Т.И.** (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. **Шугунов 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

30.06.2025

Дата выхода номера

30.07.2025

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

10,25

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2025/6

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.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E.S.,
Dudkina N.A.

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 **Kuzakov 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. **Tikhonovsky 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	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.06.2025	Number issue date	30.07.2025
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	10,25
Circulation	1000 copies	Order	YCE 2025/6

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

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ TASSELED CAP В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ
ВЕГЕТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
КУЛЬТУР НА ПОЛЯХ САРАТОВСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ

*Косарев А.В., Чумакова С.В., Перетяцько А.В., Колганов Д.А.,
Симонова З.А., Атаманова О.В., Моринев А.Ю.*8

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА В ГОРОДЕ УФЕ

Закиров И.В., Арсланов А.Ш., Саттарова Г.А., Брыгин Е.В., Гильманов Д.Р.16

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В ЦЕЛЯХ
ПОДГОТОВКИ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ КАПИТАЛЬНОГО
РЕМОНТА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Мучкаева Н.С., Зарубин О.А., Козлова Е.А., Скобликова А.В.24

ОЦЕНКА И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
РИСКОВ ПРИ УТЕЧКЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Вартазарова А.Э.31

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УДОБРЕНИЙ, УСИЛИТЕЛЕЙ РОСТА
И БИОДЕСТРУКТОРОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ
В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ

Тавадзе Б.Д., Михай В.С., Масленников Д.А.38

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

СТАТЬИ

АНАЛИЗ МЕТЕОДААННЫХ НА КРАЮ КАРЬЕРА КИМБЕРЛИТОВОЙ
ТРУБКИ «МИР»

Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.45

ПРИРОДА ОБРАТНО НАМАГНИЧЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИИ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)

Урусова Б.И., Хатуаев Я.У., Чочуев Дж.Б.58

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ ЯДЕРНОГО
МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИЗМЕНЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ
УГЛЯ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Шилова Т.В., Шажко Я.В., Рыбалкин Л.А.64

Физико-математические науки (1.6.22)**СТАТЬЯ**

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБЩЕДОСТУПНОЙ ЦИФРОВОЙ
МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ
В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ BLENDER

Насеретдин Х.Х., Алексашина Е.В., Акель М.А.71

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

THE INFLUENCE OF ARIDITY ON THE DISTRIBUTION
OF SURFACE TEMPERATURE OF AGRICULTURAL
FIELDS IN THE SARATOV REGION

*Kosarev A.V., Chumakova S.V., Peretyatko A.V., Kolganov D.A.,
Simonova Z.A., Atamanova O.V., Morshnev A.Yu.*8

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

OPTIMIZATION OF TRAFFIC SCHEME IN THE CITY OF UFA

Zakirov I.V., Arslanov A.Sh., Sattarova G.A., Brygin E.V., Gilmanov D.R.16

ORGANIZATIONAL AND METHODOLOGICAL SUPPORT
OF ENGINEERING AND ECOLOGICAL SURVEYS
FOR THE PURPOSE OF PREPARING DESIGN DOCUMENTATION
FOR MAJOR REPAIRS OF HYDRAULIC STRUCTURES

Muchkaeva N.S., Zarubin O.A., Kozlova E.A., Skoblikova A.V.24

ASSESSMENT AND VISUALIZATION OF INDIVIDUAL
ENVIRONMENTAL RISKS IN CASE OF HYDROCHLORIC
ACID LEAKAGE

Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Vartazarova A.E.31

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

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF FERTILIZERS, GROWTH
ENHANCERS AND BIODESTRUCTORS ON PLANT GROWTH
AND DEVELOPMENT IN OIL-CONTAMINATED SOILS

Tavadze B.D., Mikhay V.S., Maslennikov D.A.38

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

ARTICLES

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DATA AT THE EDGE
OF THE MIR KIMBERLITE PIPE QUARRY

*Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamysheva A.A.,
Nevzorova I.V., Odintsov S.L.*45

THE NATURE OF REVERSELY MAGNETIZED MOUNTAIN
ORES OF KARACHAY-CHERKESSIA (NORTH CAUCASUS)

Urusova B.I., Khatuaev Ya.U., Chochuev J.B.58

REVIEW

USE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY
TO STUDY CHANGES OF HYDROGEN-CONTAINING
COMPONENTS OF COAL UNDER THERMAL INFLUENCE

Shilova T.V., Shazhko Ya.V., Rybalkin L.A.64

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLE

IMPROVING THE ACCURACY OF PUBLICLY AVAILABLE DIGITAL
TERRAIN MODELS USING SIMULATION MODELING OF AERIAL
PHOTOGRAMMETRIC SURVEYS IN BLENDER SOFTWARE

Nasereddin K.K., Aleksashina E.V., Akel M.A.71

СТАТЬЯ

УДК 631.4(470.44)

DOI 10.17513/use.38397

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ TASSELED CAP В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ
ВЕГЕТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
КУЛЬТУР НА ПОЛЯХ САРАТОВСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ****¹Косарев А.В., ¹Чумакова С.В., ¹Перетьятко А.В., ¹Колганов Д.А.,****²Симонова З.А., ²Атаманова О.В., ¹Моршнев А.Ю.***¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов;**²ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.», Саратов, e-mail: aleteia@inbox.ru*

Цель работы – оценка вегетационной активности сельскохозяйственных полей Ровенского района Саратовской области с помощью преобразования tasseled cap. Объектом исследования являются почвы полей, расположенных вблизи пос. Краснополье Ровенского района Саратовской области. Данные о влажности почвы и о значениях вегетационных индексов относились к периоду с 01 июля по 01 августа 2024 г. В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования применялись мультиспектральные снимки, полученные спутником Landsat 8. Обработка космоснимков и картографирование полученного материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0). Построение картограмм и расчет частотных гистограмм для главных компонент преобразования tasseled cap проводились с помощью программы SAGA GIS (версия 9.2.0). Построены картограммы распределения трех главных компонент Greenness, Brightness и Wetness, расположенных внутри периметра изучаемой территории, где находятся сельскохозяйственные угодья, различающиеся по фазе развития растений. При этом имеются как поля с открытой почвой, так и поля, занятые сельскохозяйственными культурами в разных фазах вегетации, при которых присутствуют зрелая, перезревшая, увядающая формы сельскохозяйственной продукции, а также открытая почва, различающаяся по яркости. Установлено, что территория изучаемых сельскохозяйственных угодий обладает неоднородностью в отношении вегетационной активности и представлена как участками с открытым почвенным слоем разного состава и влагосодержания, так и растениями, находящимися в разных фазах вегетационного процесса: зрелая, перезревшая, увядающая формы сельскохозяйственной продукции. Данное агроценоотическое разнообразие связано с проводимыми на территории данных сельскохозяйственных угодий мелиоративными мероприятиями. Эффективность главных компонент преобразования tasseled cap в отношении степени открытости почвы полей снижается в следующем порядке: Greenness – Wetness – Brightness.

Ключевые слова: метод главных компонент, преобразование tasseled cap, вегетация, сельскохозяйственные угодья, Саратовская область

**THE INFLUENCE OF ARIDITY ON THE DISTRIBUTION
OF SURFACE TEMPERATURE OF AGRICULTURAL
FIELDS IN THE SARATOV REGION****¹Kosarev A.V., ¹Chumakova S.V., ¹Peretyatko A.V., ¹Kolganov D.A.,****²Simonova Z.A., ²Atamanova O.V., ¹Morshnev A.Yu.***¹Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N.I. Vavilov, Saratov;**²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: aleteia@inbox.ru*

The purpose of the work was to assess the vegetation activity of agricultural fields in the Rivne district of the Saratov region using the “tasseled cap” transformation. Materials and methods. The object of the research is the soils of fields located near the village of Krasnopolye, Rivne district, Saratov region. Data on soil moisture and vegetation index values were used as of July 2024. Satellite images were processed, and the resulting material was mapped using the QGIS software package (version 3.28.0). The cartograms and frequency histograms for the main components of the tasseled cap transformation were constructed using the SAGA GIS program (version 9.2.0). Results and discussion. Cartograms of the distribution of the three main components “Greenness”, “Brightness” and “Wetness” located inside the perimeter of the study area are constructed. In the study area, there are agricultural lands that differ in the phenophase of plant development, while there are both fields with open soil and fields occupied by agricultural crops in different phases of the growing season, in which there are mature, overripe, wilting forms of agricultural products, as well as open soil, differing in brightness. Conclusion. It has been established that the territory of the studied agricultural lands has heterogeneity in terms of vegetation activity and is represented both by areas with an open soil layer of different composition and moisture content, and by plants that are in different phases of the vegetation process: mature, overripe, fading forms of agricultural products. This agroecoenotic diversity is associated with the reclamation measures carried out on the territory of these agricultural lands. The effectiveness of the main components of the tasseled cap transform in terms of soil openness degree of fields decreases in the following order: “Greenness” – “Wetness” – “Brightness”.

Keywords: principal component method, tasseled cap transformation, vegetation, agricultural land, Saratov region

Введение

Цифровое земледелие с применением геоинформационных технологий в настоящее время является одним из перспективных направлений агрономии и агротехники. Это связано с тем, что данный инструмент позволяет дистанционно и бесплатно получать необходимую информацию для агротехнологического планирования, оценок влагообеспеченности, оптимальных сроков и объема сельскохозяйственных работ, а также создания условий для получения урожая [1, 2]. Интересными объектами сельскохозяйственной геоинформатики являются почвенная линия и преобразование tasseled cap (ТС). Почвенная линия характеризует отражательную способность почвы в различных спектральных диапазонах, из которых самыми информативными являются красная и ближняя инфракрасная части спектра, зависящие от фотосинтетической активности хлорофилла в вегетационном процессе. Это позволяет отличать спектральные свойства почвы от растительности, а также выявлять разные фазы вегетационной активности сельскохозяйственных культур вплоть до зрелой и перезревшей форм урожая. Выделение спектральной окрестности линии почв позволяет исследовать интенсивность землепользования и степень деградации сельскохозяйственных угодий [3]. Различие в отражательной способности открытой почвы и фотосинтетической биомассы растений задается треугольным множеством точек в RED-NIR спектральном диапазоне, получаемом в результате преобразования мультиспектрального космоснимка с помощью модели ТС [4]. Это преобразование позволяет получить три составляющие: «яркость» (Brightness), «зеленость» (Greeness) и «влажность» (Wetness), которые хорошо согласованы между собой при различении типов земельного покрова и отслеживания сезонных колебаний поверхности [5]. Рассчитанный в этом преобразовании показатель «влажность» чувствителен к водоемам и растительности, даже для многоспектральных данных, в которых отсутствует чувствительный к влаге коротковолновый инфракрасный (SWIR) диапазон [6]. Кроме того, известно, что сочетание компонент «яркость» и «зеленость» эффективно в задаче классификации при различении объектов растительного и нерастительного происхождения [7]. Показано, что на совокупностях получен-

ных спектральных значений отражательной активности в RED и NIR диапазонах в течение 30 лет на одном и том же типе мультиспектральных снимков ДЗЗ можно провести преобразование ТС не только для определенного снимка, но и для каждого его пикселя [8]. Еще одним достоинством преобразования ТС является его применимость в задаче классификации растительных объектов, при которой достигается качественное спектральное разделение признаков, не проявляющихся на необработанном изображении [9]. Метод классификации объектов на основе tasseled cap полезен при обновлении географической базы данных водных объектов и в управлении водными ресурсами, так как минимизирует влияние теней, техногенных объектов и наземной растительности [10]. Применение нейросетевых технологий к анализу почвенной линии позволяет вскрыть распространение высококонтрастных структур почвенного покрова на больших территориях с детальностью систем точного земледелия на значительных площадях с высокой точностью [11]. Разработанная на основе обсуждаемого подхода модель демидатных пикселей позволяет на основе спектральных данных остатков озимой пшеницы на сухом и влажном фоне почвы оценивать продуктивность данной культуры [12]. Применение подходов ДЗЗ на основе оценки спектральной яркости почв позволяет повысить эффективность мониторинга рационального землепользования, что является одной из ключевых задач обеспечения устойчивого развития аграрно-промышленного комплекса [13].

Цель исследования – с помощью преобразования tasseled cap оценить вегетационную активность сельскохозяйственных полей Ровенского района Саратовской области.

Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

а) на основе каналов В2–В7 мультиспектральных снимков Landsat 8–9 построить картограммы трех составляющих преобразования для исследуемой территории: Brightness, Greeness и Wetness;

б) построить диаграммы зависимостей Greeness vs Brightness; Wetness vs Brightness; Greeness vs Wetness; NIR (B5) vs RED (B4);

в) установить взаимосвязь между вегетационной активностью сельскохозяйственных культур на рассматриваемой территории и главными компонентами ТС на изучаемой территории.

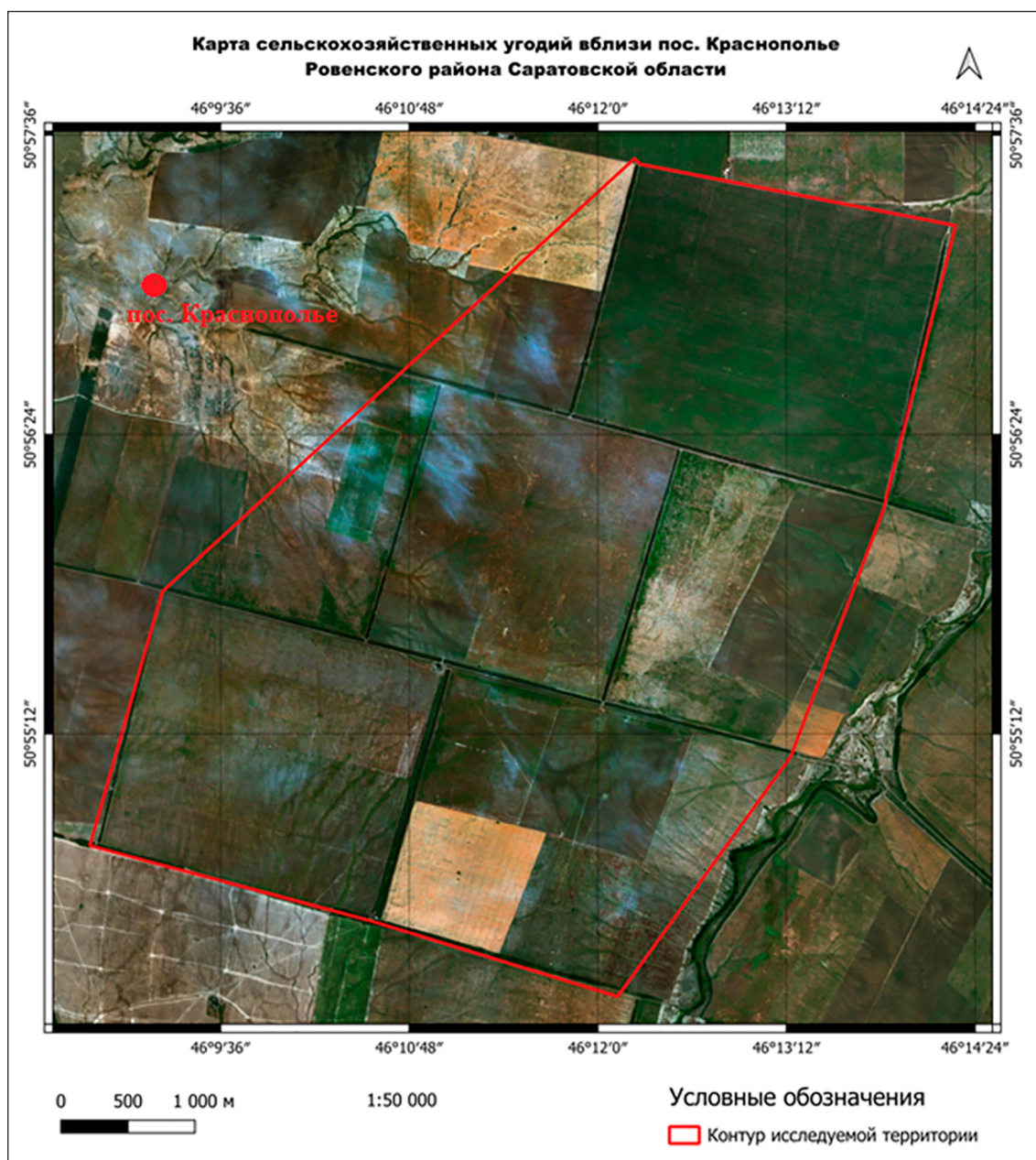


Рис. 1. Карта сельскохозяйственных угодий вблизи пос. Краснополье
Ровенского района Саратовской области
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Материалы и методы исследования

Объектом исследований являлись почвы полей, расположенных вблизи пос. Краснополье Ровенского района Саратовской области общей площадью 3880 га, что показано на рисунке 1.

В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования авторами применялись мультиканальные снимки, полученные спутником Landsat 8–9. Обработка данных SRTM и картографиро-

вание полученного материала проводилось с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0). В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования авторами применялись мультиканальные снимки, полученные из геоинформационного каталога [14].

Мультиканальные космоснимки относились к периоду с 01 июля по 01 августа 2024 г. Преобразование изображения ТС представляет собой изменение мультиспек-

тральных данных ДДЗ путем линейной трансформации спектра отражения космоснимков. Они обладают высокой информативностью при дешифрировании природных объектов, в частности при изучении фенологической стадии развития сельскохозяйственных культур. Вычисление коэффициентов трансформации изображения ТС основано на методе главных компонент преобразования спектральнозональных космических снимков, сводящемся к алгоритму машинного обучения, применяемому для

выявления наиболее информативных признаков данных дистанционного зондирования. Для реализации этого алгоритма применялись 6 из 11 каналов мультиспектрального космоснимка: синий В2 (450–515 нм), зеленый В3 (525–600 нм), красный В4 (630–680 нм), ближний ИК (NIR) В5 (845–885 нм), ближний ИК (SWIR2) В6 (1560–1660 нм), ближний ИК (SWIR3), В7 (2100–2300 нм). С применением линейной комбинации этих данных авторами рассчитывались три компоненты преобразования ТС:

а) Brightness («яркость»), характеризующая отражательную способность почвы, по формуле

$$\text{Brightness} = 0,3037B2 + 0,2793B3 + 0,4743B4 + 0,5585B5 + 0,5082B6 + 0,1863B7; \quad (1)$$

б) Greeness («зеленость»), характеризующая вегетационную активность растений, по формуле

$$\text{Greeness} = -0,2941B2 - 0,243B3 - 0,5444B4 + 0,7276B5 + 0,0713B6 - 0,1608B7; \quad (2)$$

в) Wetness («влажность»), характеризующая взаимодействие почвенной влаги с растительным покровом, по формуле

$$\text{Wetness} = 0,1511B2 + 0,1973B3 + 0,3283B4 + 0,3407B5 - 0,7117B6 - 0,4559B7. \quad (3)$$

Дополнительно был рассчитан EVI (enhanced vegetation index):

$$\text{EVI} = 2,5 \cdot \frac{B5 - B4}{B5 + 6B4 - 7,5B2 + 1}. \quad (4)$$

Картограммы трех составляющих преобразования ТС для исследуемой территории: Brightness, Greeness и Wetness (рис. 2) и индекса EVI, а также диаграммы преобразования ТС: Greeness vs Brightness; Wetness vs Brightness; Greeness vs Wetness; NIR (B5) vs RED (B4) (рис. 3, 4) проведены в программе SAGA GIS (версия 9.2.0).

Результаты исследования и их обсуждение

Авторами рассчитаны картограммы распределения трех главных компонент Greeness, Brightness и Wetness (рис. 2), расположенных внутри периметра изучаемой территории. Представленная на рис. 2, а, компонента Greeness содержит участки коричневой и зеленой окраски. Коричневые участки соответствуют открытой почве, включающей минералы, а также техногенные объекты.

При этом чем меньше растительности имеется на участке, тем выше его коричневая окраска. Зеленая компонента обусловлена наличием растительного покрова и связана с его вегетационной активностью. При

этом с увеличением фотосинтезирующей биомассы растений интенсивность зеленой окраски компоненты Greeness возрастает. Таким образом, на изучаемой территории находятся сельскохозяйственные угодья, различающиеся по фазе развития растений, при этом имеются как поля с открытой почвой, так и поля, занятые сельскохозяйственными культурами в разных фазах вегетации. Этот характер распределения растительности на исследуемой территории находит соответствие с распределением компоненты Wetness, определяющей влажность объекта (рис. 2, б). Оранжевая окраска соответствует территориям с оголенной почвой, сине-фиолетовая – территориям, занятым растительностью. Насыщенность оранжевой окраски возрастает с увеличением яркости открытой почвы, что связано со снижением влагосодержания в ней. Компонента Brightness (рис. 2, в), отражающая яркость поверхности, отображена с помощью черно-белого градиента, при этом увеличение интенсивности темной окраски возрастает с увеличением степени открытости почвенного покрова.

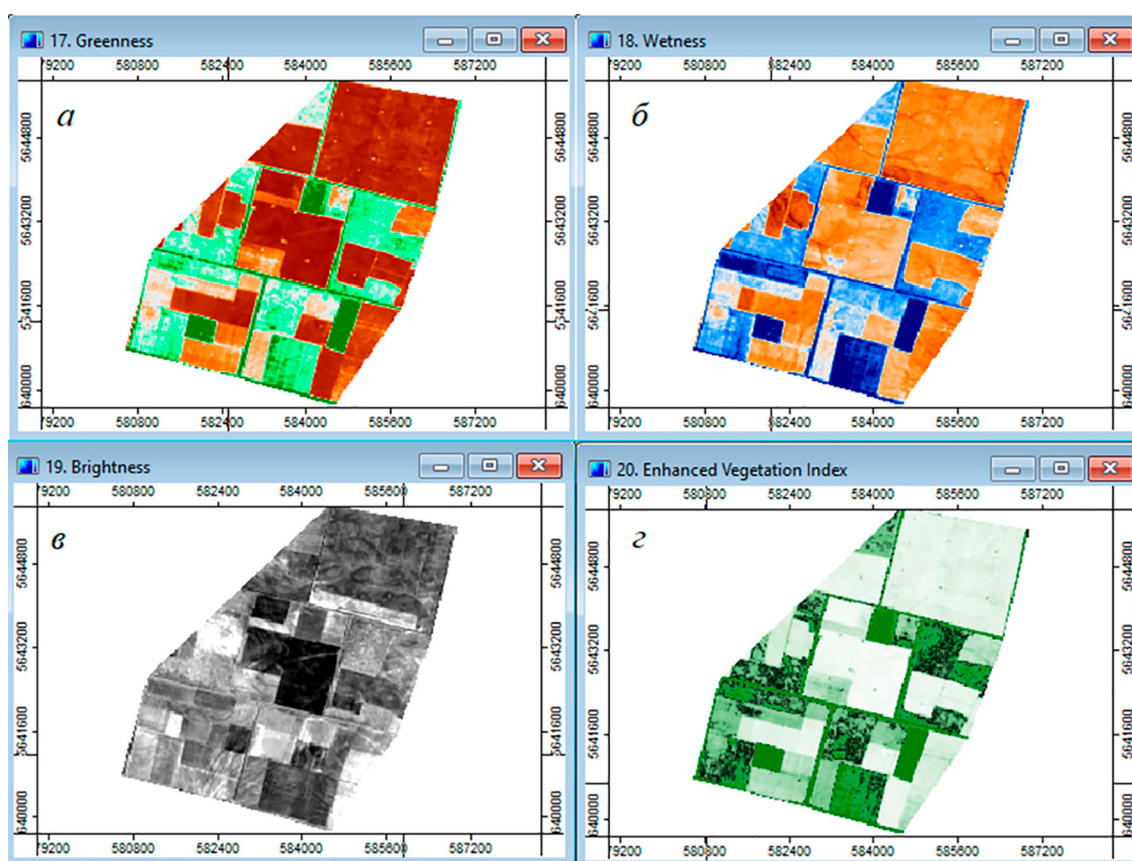


Рис. 2. Результат преобразования ТС для изучаемой территории
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Для повышения эффективности выделения вклада растительности в общую картину яркости исследуемой территории авторы применяли индекс EVI (рис. 2, г). Для коррекции почвенного фона в спектре отражения как густой, так и разреженной растительности использовался синий спектральный диапазон.

Результаты преобразования ТС в форме диаграмм рассеяния отражательной способности поверхности относительно почвенной линии в разных парах координат представлены на рис. 3, а–г. Данные диаграммы структурно представляют собой множество точек почвенной линии, находящейся в нижней части диаграммы. В этой же области незначительно выше находится желто-оранжевая область, соответствующая биомассе сельскохозяйственной продукции темного цвета. От линии почвы вверх распределяются рассеянные точки вегетации, соответствующие фотосинтетической биомассе растений. Желто-оранжевая область в центре соответствует перезревшей и увядающей формам урожая. Левому нижнему углу диаграммы Greenness

vs Brightness соответствует вода, правому нижнему углу – открытая почва. Максимальная вегетационная активность соответствует верхнему углу диаграммы.

Итак, соотношения между спектральными яркостями почвы и вегетации определяются направлениями почвенной и вегетационной линий (рис. 4). Рассматриваемая система сельскохозяйственных угодий обладает высокой вегетационной активностью, связанной с фотосинтезирующей биомассой. В этой системе присутствуют зрелая, перезревшая, увядающая формы сельскохозяйственной продукции, а также открытая почва, различающаяся по яркости. Данный факт может быть связан с проводимыми мелiorативными мероприятиями.

Насыщенность сине-фиолетовой окраски соответствует увеличению фотосинтетической биомассы на данной территории. Компонента Brightness, характеризующая яркость, не позволяет детализированно классифицировать открытую почву от покрытых растительностью участков, так как характеризует лишь обобщенную отражательную способность (альбедо) поверхностей.

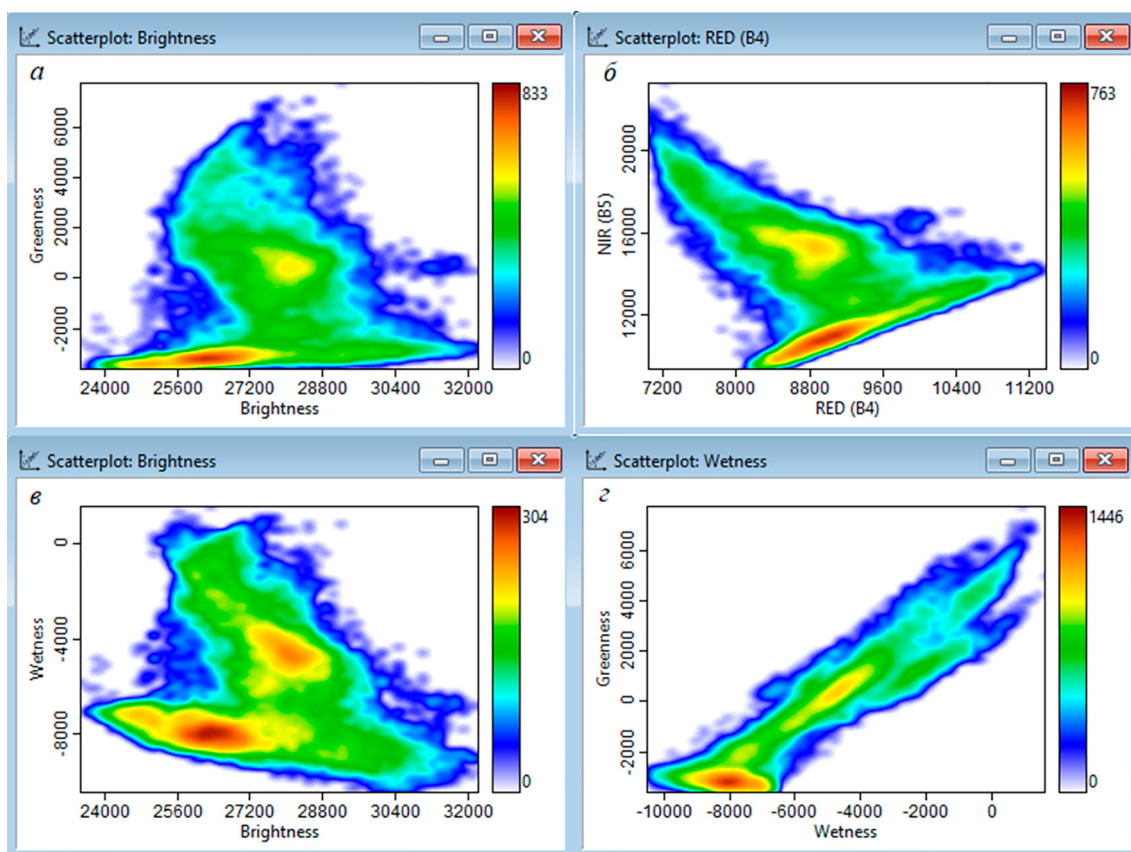


Рис. 3. Результат преобразования ТС для изучаемой территории. Двухмерные диаграммы рассеяния, показывающие взаимосвязь коэффициентов главных компонент по данным Landsat 8–9: а) Greenness vs Brightness; б) NIR (B5) vs RED (B4); в) Wetness vs Brightness; г) Greenness vs Wetness
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

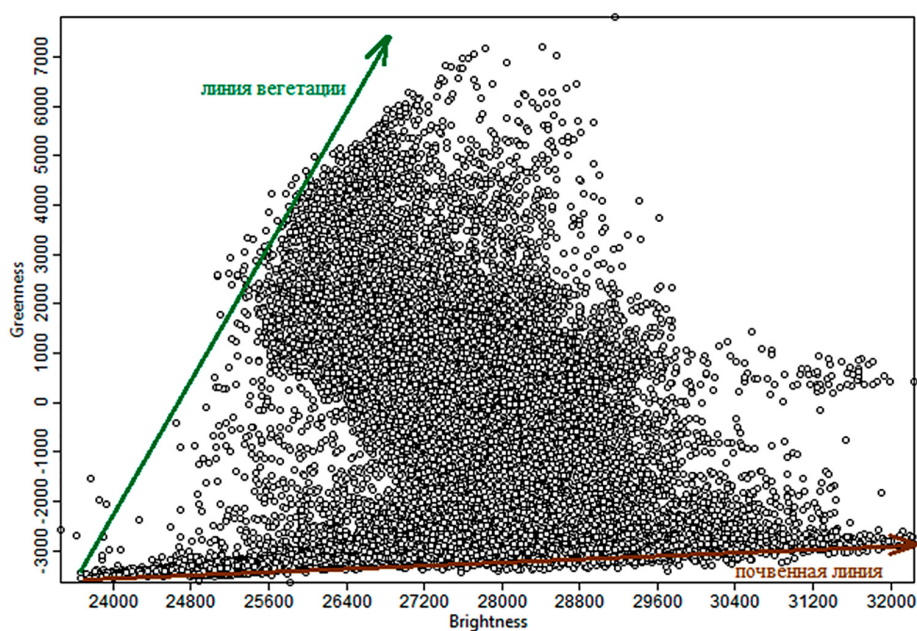


Рис. 4. Направления почвенной линии и линии вегетации на диаграмме преобразования ТС для изучаемой территории в координатах Greenness vs Brightness
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

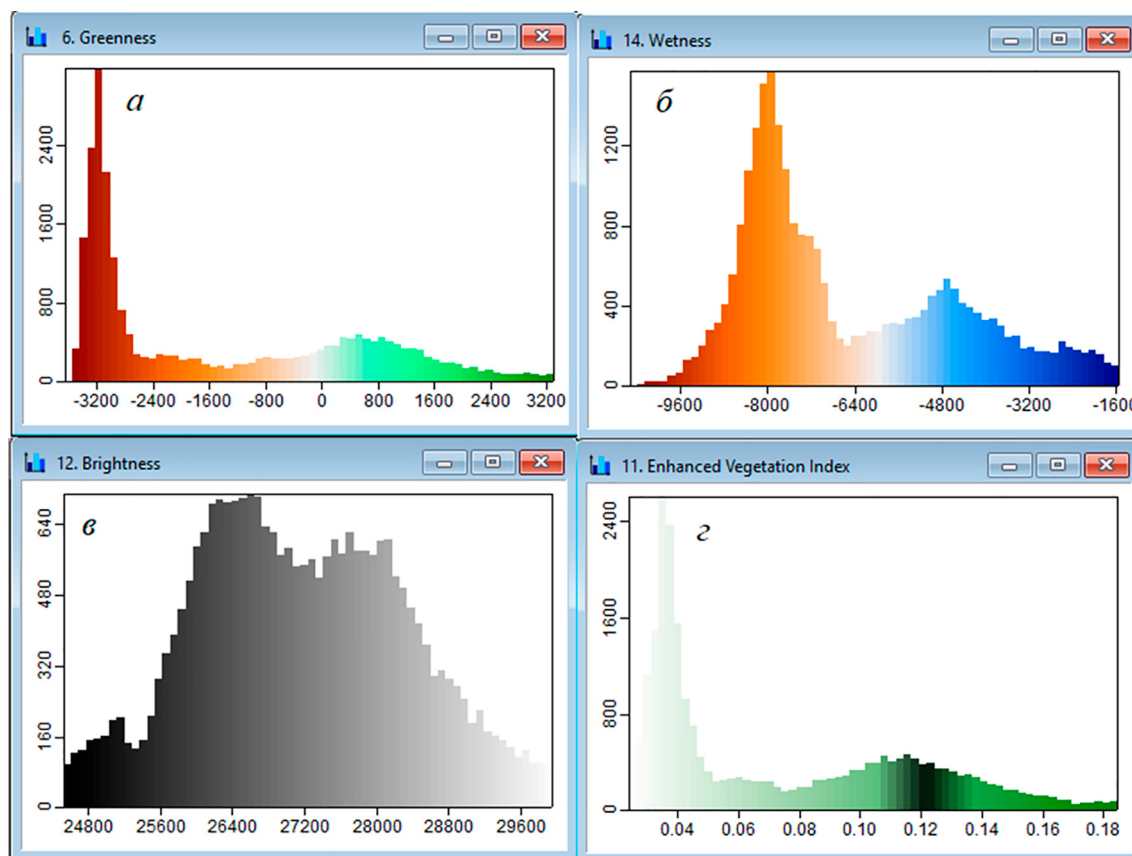


Рис. 5. Частотные гистограммы распределения значений компонент преобразования ТС и индекса EVI для изучаемой территории
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Отражательная способность открытой почвы и почвы, занятой растительностью, соответствуют друг другу, так как они могут иметь приблизительно одинаковую яркость. Это может быть вызвано светлой окраской участков почв, разреженной растительностью, открывающей подстилающий почвенный покров, и другими факторами. За счет этого участки на картограмме Brightness с явно выраженной растительностью смешиваются по уровню яркости с участками открытой почвы.

Для оценки уровня эффективности для классификации открытого почвенного покрова от почвы, занятой сельскохозяйственной продукцией, авторами рассчитывались частотные гистограммы распределения значений компонент преобразования ТС и индекса EVI (рис. 5).

Распределение EVI по структуре в значительной степени соответствует тренду распределения компоненты Greenness, что может объясняться одной и той же задачей обеих величин – регистрацией зеленой составляющей спектра отражения растений

в ходе вегетационного процесса. При этом обе гистограммы имеют четкий максимум, соответствующий отражению открытой почвы, и последующий за ним участок спектра отражения растительности. В отличие от них гистограмма яркости Brightness не имеет выраженной дифференциации в разных участках области определения и наименьшим образом подходит для классификации участков сельскохозяйственных угодий по степени открытости почвы. Гистограмма частотного распределения компоненты Wetness имеет более выраженную дифференциацию на своей области определения, чем компонента Brightness, но меньшую, чем компонента Greenness и индекс EVI. Таким образом, эффективность главных компонент преобразования ТС в отношении классификации открытости почвы полей снижается в следующем порядке: Greenness – Wetness – Brightness.

Заключение

Применение преобразования tasseled car к мультиспектральным космоснимкам

сельскохозяйственных территорий вблизи пос. Краснополье Ровенского района Саратовской области выявило неоднородность данного агроценоза, характеризующуюся мозаикой участков с различной степенью вегетационной активности. Это проявляется в наличии открытого почвенного слоя с различными характеристиками, а также сельскохозяйственных культур, находящихся на разных стадиях развития, от зрелой до увядающей. Выявленная неоднородность может являться следствием проводимых на данной территории мелиоративных мероприятий.

Эффективность главных компонент преобразования tasseled cap в отношении классификации открытости почвы полей снижается в следующем порядке: Greeness – Wetness – Brightness. Планирование комплекса агротехнических мероприятий на основе геоинформационных технологий с применением преобразования tasseled cap позволяет улучшить процессы мелиорации с обеспечением устойчивого развития агроценоза.

Список литературы

1. Пашков С.В., Мажитова Г.З. Разработка геоинформационного обеспечения для агроландшафтного проектирования на уровне сельскохозяйственного предприятия // Географический вестник. 2022. № 4 (63). С. 167–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-4-167-179.
2. Латкин В.А. Применение цифровых технологий для определения свойств растительного покрова в сельском хозяйстве // Геодезия и картография. 2023. № 4. С. 20–27. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-20-27.
3. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Си-макова М.С., Куляница А.Л., Королева П.В. Применение технологии спектральной окрестности линии почв для анализа интенсивности использования почвенного покрова в 1985–2014 гг. (на примере трех районов Тульской области) // Почвоведение. 2018. № 3. С. 357–371. DOI: 10.7868/S0032180X18030103.
4. Kauth R.J., Thomas G.S. The Tasselled-Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat // Proceedings, Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University. West Lafayette, IN. 29 June–1 July 1976. P. 41–51. URL: https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1160&context=lars_symp (дата обращения: 15.04.2025).
5. Zhai Y., Roy D.P., Martins V.S., Zhang H.K., Yan L., Li Zh. Conterminous United States Landsat-8 top of atmosphere and surface reflectance tasseled cap transformation coefficients // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 274. P. 112992. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112992.
6. Wei Yu., Chen Yi., Wang Ji., Peiheng Yu., Xu Lu, Zhang Chi, Shen H., Liu Y., Zhang G. Mapping soil organic carbon in fragmented agricultural landscapes: The efficacy and interpretability of multi-category remote sensing variables // Journal of Integrative Agriculture. 2025. DOI: 10.1016/j.jia.2025.02.049.
7. Liu Q., Huang Ch., Li H. Mapping plant communities within quasi-circular vegetation patches using tasseled cap brightness, greenness, and topsoil grain size index derived from gf-1 imagery // Earth Science Informatics. 2021. T. 14. № 2. P. 975–984. DOI: 10.1007/s12145-021-00608-3.
8. Rukhovich D., Koroleva P., Rukhovich A., Komissarov M. A detailed mapping of soil organic matter content in arable land based on the multitemporal soil line coefficients and neural network filtering of big remote sensing data // Geoderma. 2024. Vol. 447. 116941. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116941.
9. Shnain S. Features extraction of Landsat 7 images using tasseled cap transformation // Journal of Al-Rafidain University College For Sciences. 2021. № 1. P. 215–222. DOI: 10.55562/jruacs.v48i1.48.
10. Chen Ch., Chen H., Liang J., Huang W., Xu W., Li B., Wang J. Extraction of water body information from remote sensing imagery while considering greenness and wetness based on tasseled cap transformation // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, Is. 13. P. 3001. DOI: 10.3390/rs14133001.
11. Рухович Д.И., Шаповалов Д.А., Королева П.В. Детектирование геологически контрастных структур почвенного покрова пахотных угодий при нейросетевой фильтрации больших данных дистанционного зондирования // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 4 (400). С. 364–367. URL: https://mshj.ru/wp-content/uploads/2024/09/MSHJ_2024-4_text__p-364-367.pdf (дата обращения: 17.01.2025).
12. Yao Y., Ren H., Liu Y. Remote sensing estimation of winter wheat residue cover with dry and wet soil background // Agricultural Water Management. 2025. Vol. 307. P. 109227. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109227.
13. Ефимова Г.А., Мкртчян Л.А. Применение данных дистанционного зондирования Земли в системе регулирования земельных отношений // International Agricultural Journal. 2024. Т. 67. № 5. С. 1. EDN: AGFILO.
14. USGS. Science for changing world. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 15.03.2025).

СТАТЬИ

УДК 911.3.33:625.712.1(470.57-25)
DOI 10.17513/use.38398

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА В ГОРОДЕ УФЕ

Закиров И.В., Арсланов А.Ш., Саттарова Г.А., Брыгин Е.В., Гильманов Д.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, e-mail: ziv7702@yandex.ru

Цель исследования – определение самой эффективной схемы организации сложного узла, находящегося на пересечении улиц 50 лет Октября, Цюрупы и Революционной в городе Уфе. Рассматриваемый узел является местом концентрации транспортных и пешеходных потоков с большим количеством мест приложения труда и точек притяжения. Также через «Центральный рынок» проходят основные автобусные маршруты, трамвайная линия и пригородные маршруты общественного транспорта. Оценка схем производится с точки зрения пешеходной доступности, удобства для движения на общественном транспорте, пропускной способности узла для индивидуального транспорта. Сравнимые транспортные схемы: существующее положение, локальная реконструкция существующего положения, предложение от главного управления архитектуры и градостроительства, предложение авторов статьи. Схемы включают в себя размещение полос движения, тротуаров, размещение остановочных пунктов и посадочных площадок, размещение пешеходных переходов и велопереездов и режим работы светофора с пофазным разъездом. Кроме того, учитывается площадь, занимаемая улично-дорожной сетью, и площадь озеленения, что является одним из важных критериев устойчивого развития территории. Определено, что сокращение площади улично-дорожной сети не снижает пропускную способность перекрестка. Результаты проведенных исследований могут быть применены для изменения транспортной схемы и реконструкции узла.

Ключевые слова: транспортное планирование, общественный транспорт, пропускная способность узла, пофазный разъезд

OPTIMIZATION OF TRAFFIC SCHEME IN THE CITY OF UFA

Zakirov I.V., Arslanov A.Sh., Sattarova G.A., Brygin E.V., Gilmanov D.R.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, e-mail: ziv7702@yandex.ru

The objective of the study is to determine the most effective scheme for organizing a complex junction located at the intersection of 50 Let Oktyabrya, Tsyurupy, and Revolyutsionnaya Streets in Ufa. The junction in question is a place where transport and pedestrian flows are concentrated, with a large number of places of employment and points of attraction. The main bus routes, a tram line, and suburban public transport routes also pass through the Central Market. The schemes are assessed from the point of view of pedestrian accessibility, convenience for public transport, and the junction capacity for individual transport. The compared transport schemes: the current situation, a local reconstruction of the current situation, a proposal from the Main Department of Architecture and Urban Development, and a proposal by the authors of the article. The schemes include the placement of traffic lanes, sidewalks, placement of stopping points and boarding areas, placement of pedestrian crossings and bicycle crossings, and the operation mode of the traffic light with a phased passing lane. In addition, the area occupied by the street and road network and the area of greenery are taken into account. In addition, the area occupied by the street and road network and the area of greenery is taken into account, which is one of the important criteria for sustainable development of the territory. It has been determined that reducing the area of the street and road network does not reduce the capacity of the intersection. The results of the studies can be used to change the transport scheme and reconstruct the junction.

Keywords: transport planning, public transport, hub capacity, phased interchange

Введение

В последние годы приоритеты планирования движения городского транспорта сместились с личного транспорта на общественный и пешеходное движение. Современные требования формирования городского пространства основываются на гуманном подходе [1, с. 90]. Такой подход основан на оптимальной территориальной организации движения транспорта и пространств для людей, согласуется с критериями устойчивого развития и зарекомендовал себя эффективным с точки зрения эволюции хозяйства города [2, с. 17].

Такое комплексное пространственное видение проблем и путей их решения заключено в общественно-географическом подходе к исследованию городских транспортных проблем. В работах географов С.А. Тархова [3], И.А. Семиной [4], Ю.М. Гришасовой [5] анализируется пространственное развитие городской транспортной структуры, методы совершенствования территориальной организации транспортного обслуживания населения в городах.

Теоретико-методологической основой исследования также послужили работы В. Вучика [6], Я. Гейл и Л. Гемзе [7], А.Э. Го-

рева [8]. В этих работах доказывается, что причиной многих городских проблем является неэффективное транспортное регулирование. В статьях Д.В. Завьялова [9], В.М. Комарова и В.В. Акимовой [10] изучены различные аспекты транспортной мобильности. Объект данного исследования ранее изучался Н. Стадничуком и Р. Рангуловым [11]. Повышение эффективности транспортного регулирования является одной из важных задач развития «умных городов» [12, с. 213]. Эффективное планирование транспортной инфраструктуры является ключевой частью обеспечения устойчивого развития любого города. Обзор соответствующей тематике литературы подтверждает актуальность выбранной темы.

Исследование посвящено общественно-географическому анализу транспортной системы г. Уфы: закономерностей и факторов, определяющих основной территориальный каркас транспортной сети; современного уровня развития транспорта города; проблем функционирования транспортной инфраструктуры; влияния транспортной системы на мобильность населения, экологические проблемы и пространственное развитие Уфимской агломерации. Однако в статье представлены только результаты части изысканий – возможности оптимизации схемы движения транспорта в одном из проблемных транспортных узлов г. Уфы.

При реконструкции и новом строительстве улиц и других городских пространств принято создавать транспортные схемы. Они являются предпроектной работой перед подготовкой строительной рабочей документации. В них с достаточной точностью представлено расположение основных элементов улицы (проезжая часть с полосами движения, тротуары, остановочные площадки, пешеходные переходы и т.д.) в масштабе с учётом основных коммуникаций на географической основе (космические снимки и т.п.). В дальнейшем транспортная схема обсуждается со всеми заинтересованными сторонами и корректируется. После окончательного согласования на основе транспортной схемы составляется строительный проект.

Цель исследования – провести оценку транспортных схем на пересечении улиц 50 лет Октября, Цюрупы и Революционной («Центрального рынка») в Уфе с точки зрения пешеходной и транспортной доступности и географической оптимизации территории города.

Материал и методы исследования

Объектом исследования является пересечение улиц 50 лет Октября, Революционная, Цюрупы, сокращенно называемое «Центральным рынком» в г. Уфе. В границу проектирования входят подходы к перекрёстку. Данный участок является одним из самых загруженных пересечений главных артерий г. Уфы.

Для исследования схем выбраны параметры, существующие в настоящее время: площадь улично-дорожной сети (УДС), пешеходная связанность улиц, расстояние пересадки между видами транспорта (автобуса и трамвая), суммарная пропускная способность узла.

Площадь улично-дорожной сети измеряется в квадратных метрах от наиболее удаленных от центра перекрестка начал закруглений проезжих частей. Этот параметр противоположен площади, занятой тротуаром и зелёными насаждениями – пешеходными пространствами, и определяет устойчивость территории.

Пешеходная связанность территории рассчитывается по балльной шкале. За каждый сегмент (перегон) проезжей части с наземным пешеходным переходом начисляется 1 балл.

Расстояние пересадки рассчитывается в метрах как среднее от остановок трамвая и автобуса в обоих направлениях. Расчёт начинается и заканчивается от середины посадочной площадки.

Пропускная способность узла рассчитывается в единицах транспорта в час [13, с. 70]. Определение производится по подходам к узлу с учётом пофазного разъезда.

Расчёт пропускной способности узла производится согласно п. 5.8.3а СП 396.1325800.2018 [14]. Соответственно, потоки насыщения равны:

- при движении прямо – 1650 ед./ч;
- при движении налево – 1625 ед./ч;
- при движении направо – 1500 ед./ч.

Интенсивность транспортных потоков рассчитана с камер «Уфанета» [15] в наиболее загруженное время – в утренний час пик с 8:00 до 9:00 (табл. 1).

Применялись в основном описательный, сравнительно-географический, математические и другие методы научных исследований. В работе использовались транспортные схемы, составленные авторами работы в AutoCAD.

Сравнивались следующие схемы: существующее положение, локальные (изменения) реконструкции существующего положения, схема от Главархитектуры города Уфы, схема от авторов работы.

Таблица 1

Интенсивность движения
транспортных средств

Направление	Интенсивность движения (ТС/час)
ул. 50 лет Октября	2300
ул. Революционная с востока	800
ул. Цюрупы с юга	1150
ул. Революционная с запада	750
ул. Цюрупы с севера	1000

Примечание: составлено авторами.

Эффективность транспортной схемы оценивалась согласно методическим рекомендациям к СП 396.1325800.2018 [14]. Основным критерием оценки эффективности является «уровень обслуживания».

Результаты исследования и их обсуждения

Существующая транспортная схема (рис. 1) составлена на основе космоснимка «Яндекса». Режим работы светофора и пофазный разъезд составлен по камерам «Уфанета» [15, с. 356].

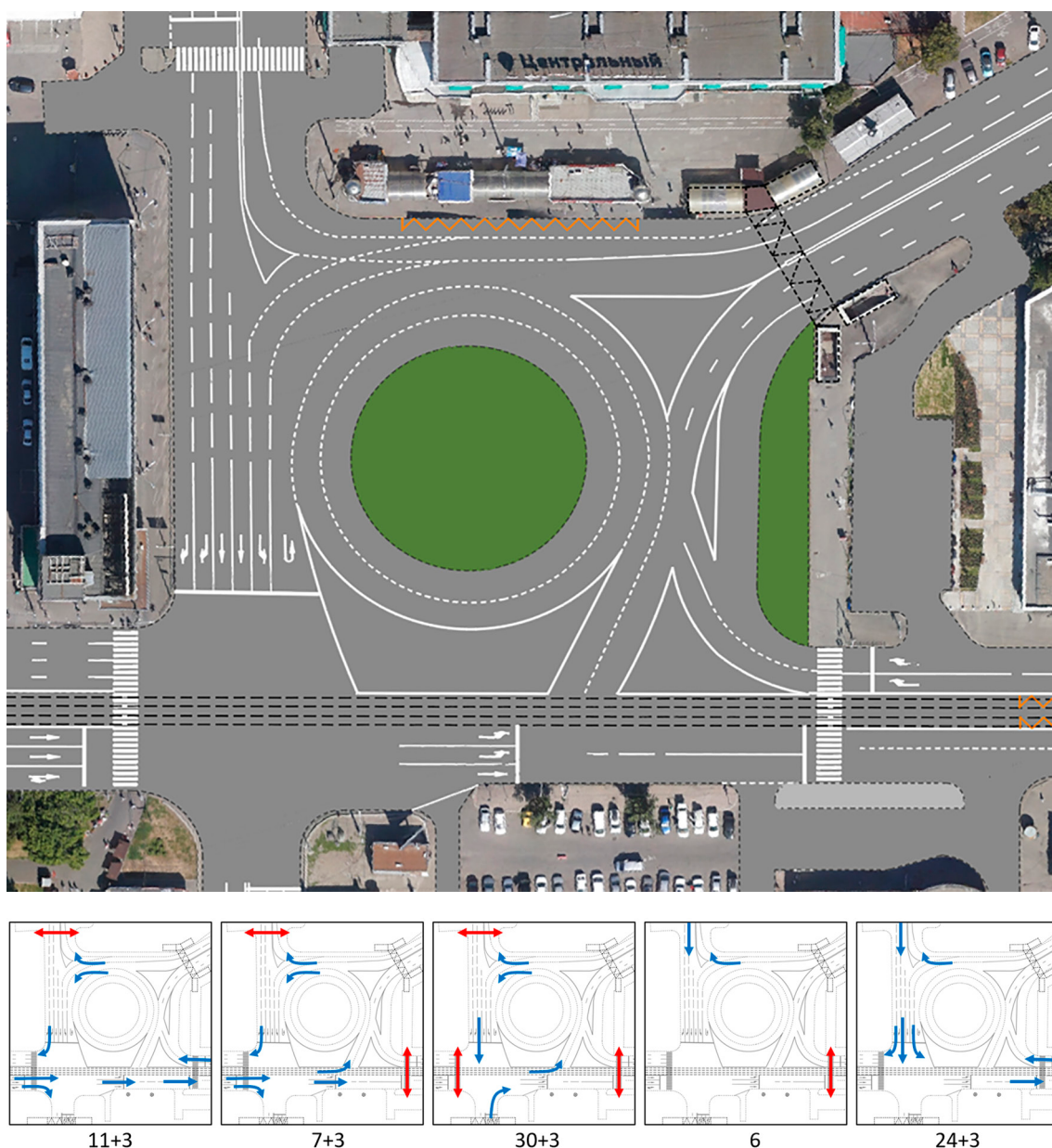


Рис. 1. Транспортная схема существующего положения
Источник: составлено авторами

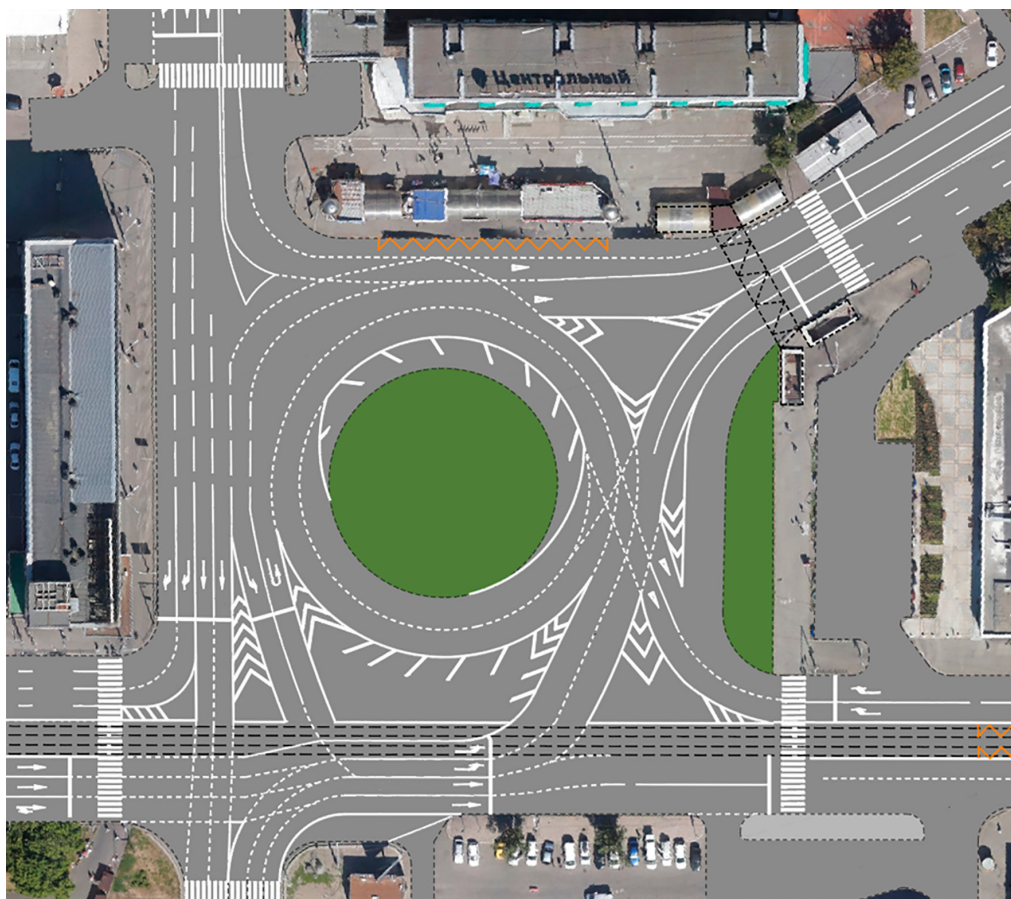


Рис. 2. Транспортная схема локальных мероприятий
Источник: составлено авторами

Локальные изменения (мероприятия) выполнены на основе существующего положения без изменения конфигурации проезжей части (без переноса бортового камня) (рис. 2).

В схеме подземные пешеходные переходы продублированы наземными, изменена конфигурация полос движения, добавлены островки безопасности, ликвидирована избыточная проезжая часть.

Схема, представленная Главархитектурой города Уфы (рис. 3), представляет собой схему реконструкции перекрёстка с созданием сквера вместо центрального кольца. Соответственно, кольцевое движение заменяется на два перекрёстка: Т-образный (ул. 50 лет Октября – ул. Цюрупы) и Х-образный (ул. Цюрупы – ул. Революционная). Восточная часть кольцевого движения закрывается для общего пользования. И на этом месте организовывается остановочная площадка с двумя платформами. Пофазный разъезд для схемы составлен авторами работы.

Автором данной планировки является итальянский транспортный инженер Лука Гуала. Проект реконструкции Центрального рынка был представлен в 2014 году на градостроительном форуме «Урбан Байрам» в г. Уфе [16].

Заключительная схема выполнена по аналогичным принципам – замещение центрального кольца сквером, однако происходит перекрытие южной проезжей части. Это сделано для обеспечения полной безопасности общественного транспорта (трамвайной остановки) (рис. 4). Таким образом, создаётся три Т-образных перекрёстка, что позволяет развести транспортные потоки в 4 фазы светофорного регулирования.

В существующем положении под улично-дорожную сеть отводится более 1 га. В проектах реконструкции удаётся существенно сократить площадь асфальта и занять освободившееся пространство тротуарами и зелёными зонами. В схеме, предложенной авторами работы, площадь улично-дорожной сети уменьшается более чем в 2 раза.

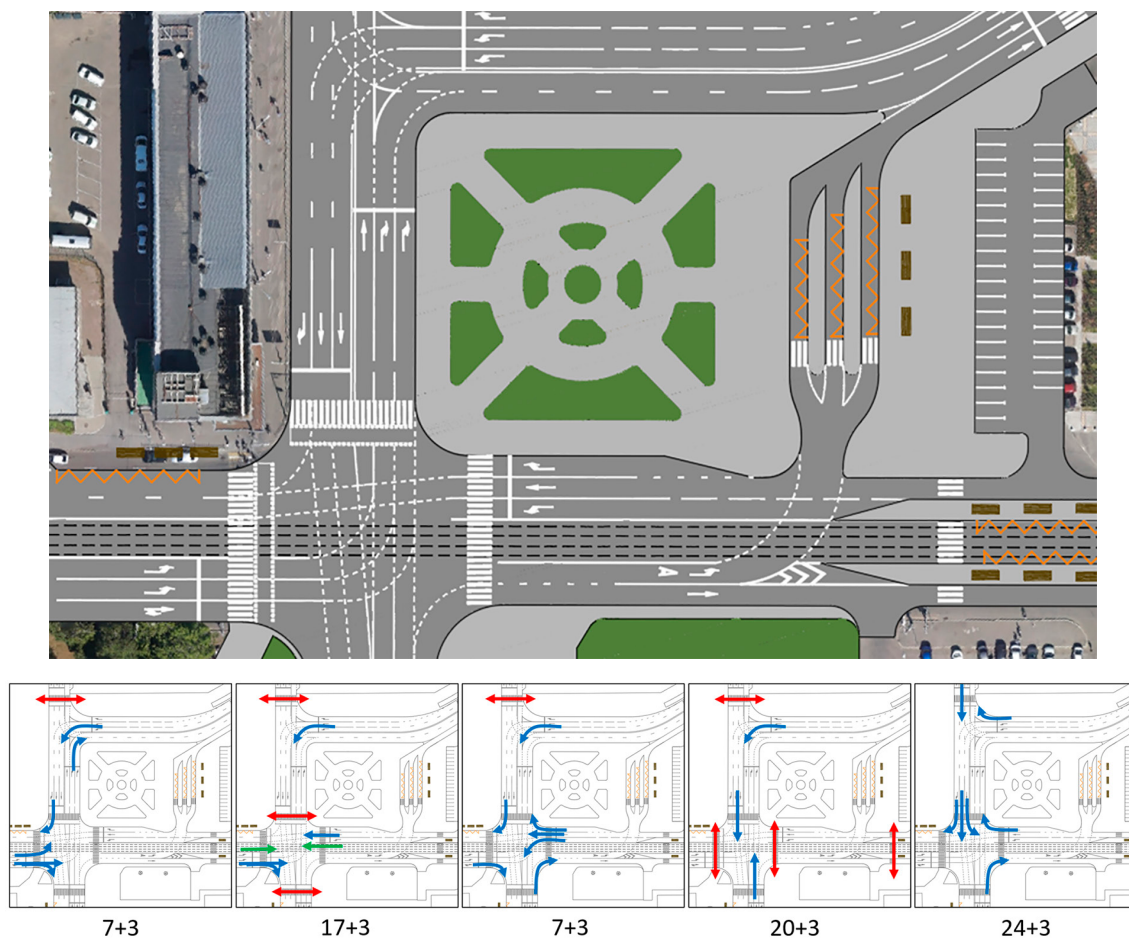


Рис. 3. Транспортная схема от Главархитектуры
Источник: составлено авторами

Существующая пешеходная связанность крайне ограничена. Для направлений вдоль ул. Цюрупы по чётной стороне и ул. Революционной по нечётной стороне отсутствует линия тротуара. Кроме того, два из трёх пешеходных переходов – подземные, что существенно ограничивает перемещение для маломобильных групп населения.

Все предложенные варианты схем улучшают пешеходную связанность. Локальные мероприятия обеспечивают полную пешеходную связанность, обеспечив все пять подходов, и соответственно перегонов, наземными пешеходными переходами. Однако сама конфигурация кольцевого пересечения существенно увеличивает длину пешеходных маршрутов.

В схеме от авторов работы достигается абсолютная связанность, все восемь перегонов обеспечиваются наземными пешеходными переходами. При этом нигде не происходит излома линий тротуара вдоль сторон улиц.

«Центральный рынок» можно считать транспортно-пересадочным узлом, так как имеются пересадки на общественный транспорт разных видов, движущийся в разных направлениях (трамвай и автобус). В существующем положении и при локальных мероприятиях длина пересадок превышает нормативные значения согласно п. 6.1.4 СП 395.1325800.2018 [17].

Для создания оптимальных условий необходима реконструкция узла с приоритетом движения общественного транспорта [18, с. 84] и пешеходов. Подобным образом выполнена схема от авторов работы. Таким образом, длину пересадки удаётся сократить более чем в 2,5 раза, до 74 метров.

Результаты расчёта пропускной способности по примыкающим улицам приведены в таблице 2. Базовым значением можно считать пропускную способность существующего положения. В настоящее время наибольшие задержки наблюдаются с ул. Революционной с запада в вечерний час пик.

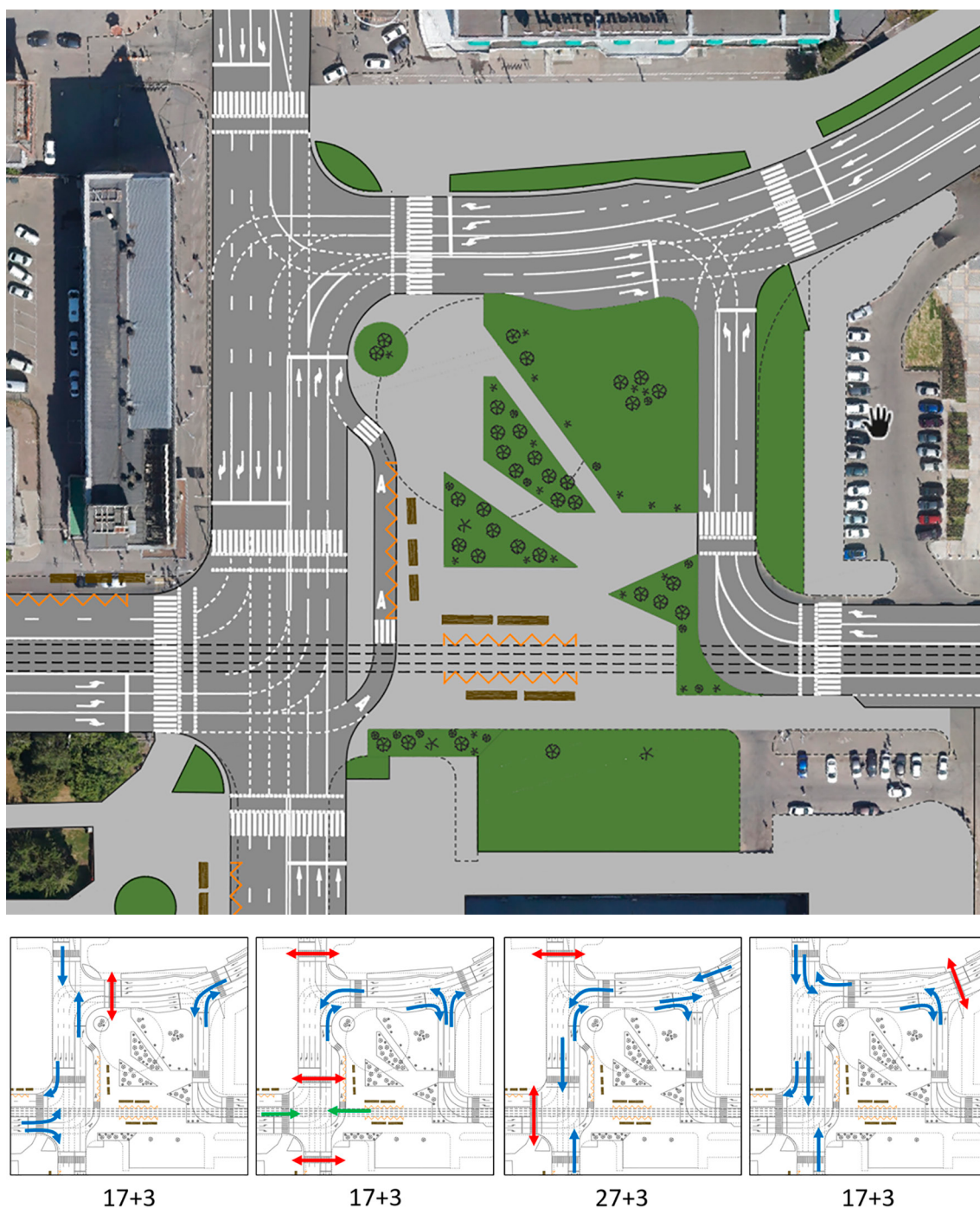


Рис. 4. Транспортная схема
Источник: составлено авторами

Увеличение пропускной способности по ул. Революционной удалось достичь в варианте с локальными изменениями. Однако по пофазному разрезу видно, что это сделано за счёт трамвайного движения.

Наиболее худшие показатели по пропускной способности наблюдаются в схеме от Главархитектуры. Основная причина

в том, что появляется Х-образное пересечение ул. Цюрупы и ул. Революционной со всеми пешеходными переходами, необходимы четыре фазы светофорного регулирования.

Результаты расчёта уровней загрузки по интенсивности транспортного потока (отношение интенсивности движения к пропускной способности) приведены в таблице 3.

Таблица 2

Пропускная способность узла по примыкающим улицам, авт./час

Вариант транспортной схемы Направление	Существующее положение	Локальные изменения	Главархи- тектура	Вариант авторов статьи
50 лет Октября	2925	3250	2165	1700
Революционная с востока	1270	1800	1140	1230
Цюрупы с юга	1500	1500	1250	2580
Революционная с запада	1155	1485	660	900
Цюрупы с севера	1650	1320	1320	1640
Сумма	8500	9355	6535	8050

Примечание: составлено авторами.

Таблица 3

Уровень загрузки по направлениям

Вариант транспортной схемы Направление	Существующее положение	Локальные изменения	Главархи- тектура	Вариант авторов статьи
50 лет Октября	0,79	0,71	1,06	1,35
Революционная с востока	0,63	0,44	0,70	0,65
Цюрупы с юга	0,77	0,77	0,92	0,45
Революционная с запада	0,65	0,51	1,14	0,83
Цюрупы с севера	0,61	0,76	0,76	0,61
Среднее значение	0,69	0,64	0,92	0,78

Примечание: составлено авторами.

Таблица 4

Результаты исследования транспортных схем

Вариант транспортной схемы	S УДС, м ²	Пешех. связан.	L пересадок, м	P узла, авт./час
Существующее положение	11 423	1/5	190	8500
Локальные изменения	11 423	5/5	190	9355
Главархитектура	7 359	7/8	137	6535
Вариант авторов статьи	5 742	8/8	74	8050

Примечание: составлено авторами.

Стоит отметить, что добавление пешеходных переходов либо не снижает пропускную способность, либо снижает её незначительно (табл. 4). Это объясняется тем, что в пофазном разъезде существуют разрывы транспортного движения, в которые добавляются пешеходные потоки.

По результатам исследований видно, что существующая схема организации движения может быть усовершенствована и с транспортной, и с пешеходной точек зрения.

Наивысший показатель пропускной способности достигается при локальных изменениях существующего положения. Наилучшие показатели по трём из четырёх параметров демонстрирует предложенная авторами схема.

Полученные результаты сопоставимы с аналогичными реконструкциями в российской и мировой практике. При проектировании схем применялись принципы тактического урбанизма [19, с. 27]. Данные принци-

пы применяют и в других странах, например в Италии, что благоприятно сказывается на пространственном развитии города [20].

Заключение

По результатам проведённого исследования можно сделать вывод о том, что наилучшую пешеходную доступность обеспечивает предложенная авторами схема. В то же время локальные изменения обеспечивают увеличение пропускной способности узла на 9%. Изменение схемы движения общественного транспорта не предлагается. Но были предусмотрены остановки общественного транспорта, которые могут быть обслужены существующими маршрутами. Возможным негативным эффектом изменения транспортной схемы может быть вероятное увеличение пробега автомобильного транспорта.

Дальнейшие мероприятия по применению какой-либо конкретной схемы должны включать обсуждение заинтересованных и компетентных сторон.

Для более детального анализа схемы с точки зрения транспортной доступности необходимо проводить микро моделирование транспортных потоков. Рекомендуется сравнивать предложенную схему и схему локальных изменений. Стоит отметить, что схема, предложенная Главархитектурой города, уступает по всем показателям и менее конкурентоспособна для дальнейшего использования в данной конфигурации.

Список литературы

1. Меренков А.О. Пути повышения информированности населения на городском пассажирском транспорте // Вестник университета. 2016. № 11. С. 86-93. URL: <https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/465> (дата обращения: 12.05.2025).
2. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография. 2-е изд., перераб. и доп. Пермь: Агентство РАДАР, 2022. 536 с. ISBN 978-5-6048401-0-8.
3. Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск – Москва: Универсум, 2005. 384 с.
4. Семина И.А., Фолomeйкина Л.Н., Крылов П.М. География транспорта. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2023. 200 с. ISBN 978-5-7103-4611-2.
5. Гришаева Ю.М., Матанцева О.Ю., Спирин И.В., Савосина М.И., Ткачева З.Н., Васин Д.В. Устойчивое развитие транспорта в городах России: опыт и актуальные задачи // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 4. С. 24-46. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-24-46.
6. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / Пер. с англ. М.: Альпина ПРО, 2023. 676 с. ISBN 978-5-206-00045-0.

7. Гейл Я., Гемзо Л. Новые городские пространства / Пер. с англ. 3-е изд. М.: Концерн Крост, 2012. 263 с. ISBN 978-5-9614-1937-5.
8. Горев А.Э. Основные принципы организации приоритета транспорта общего пользования // Путь навигатор. 2018. № 34 (60). С. 47-55. URL: <https://www.dropbox.com/scl/fi/qwcZ2uihdtkrb1rmn67u/pn-34.pdf?rlkey=z7hjs2xsd-80f5gzubhhuorbqa&e=1&dl=0> (дата обращения: 12.05.2025).
9. Завьялов Д.В. Управление развитием транспортной мобильностью // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13. № 4. С. 1007-1022. URL: <https://1economic.ru/journals/epp/archive/117216> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.18334/epp.13.4.117491.
10. Комаров В.М., Акимов В.В. Стратегии устойчивой мобильности: лучшие мировые практики // Экономическая политика. 2021. Т. 16. № 1. С. 82-103. URL: <https://www.espolicy.ru/jour/article/view/91> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103.
11. Стадничук Н., Рангулов Р. Проблема загруженности пересечений главных артерий г. Уфа на примере кольцевой развязки на Центральном рынке // Архйорт. 2016. № 2 (4). С. 37-42. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?issueid=1747810> (дата обращения: 12.05.2025). EDN: XE-FBWx.
12. Закиров И.В., Сафина Г.Л., Гильманов Д.Р., Магасумов Т.М., Арсланов А.Ш. Становление «умных городов» в России // ЦИТИСЭ. 2025. № 1. С. 206-215. URL: <https://ma123.ru/ru/journal/%e2%84%96-143-2025/> (дата обращения: 12.05.2025).
13. Якимов М.Р. Транспортное планирование: терминологический словарь. М.: Агентство РАДАР, 2022. 87 с. ISBN 978-5-6048401-1-5.
14. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/17951/> (дата обращения: 12.05.2025).
15. Арсланов А.Ш. Моделирование организации движения на перекрестке ул. Революционная – ул. Цюрупы – ул. 50 лет СССР г. Уфы // Геосфера. Современные проблемы естественных наук: сб. стат. Всеросс. науч.-практ. конф. Вып. 14. Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. С. 355-358. DOI: 10.33184/gspen-2021-12-01.32.
16. Аппенцеллер М, Беллосо Х.К., Бишоп П., Гуала Л., Секи Ф., Уолл Р., Головин А., Гудзь Т., Голубева Я. Строительство Уфы, которая уже не будет прежней: комментарии приглашенных экспертов о развитии Уфы. Уфа: взгляд в будущее; Уфа: Главархитектура, 2013. С. 54-71.
17. СП 395.1325800.2018. Транспортно-пересадочные узлы. Правила проектирования. URL: <https://www.minstroyrf.ru/docs/17937/> (дата обращения: 12.05.2025).
18. Орехов С.Ю., Закиров И.В. Применимость систем скоростных автобусов типа bus rapid transit (BRT) в городах России // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8. № 8. С. 79-95. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_8_399.
19. Щербинин Э.М. Применение методов тактического урбанизма в формировании социальной и комфортной городской среды // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2023. №2 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-takticheskogo-urbanizma-v-formirovaniisotsialnoy-i-komfortnoy-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 25.05.2025).
20. Tira M., Bonfantini B. Tactical Urbanism in Italy: From Grassroots to Institutional Tool – Assessing Value of Public Space Experiments // Sustainability. 2021. Т. 13. № 16. С. 8999. DOI: 10.3390/su13168999.

УДК 911:631.67

DOI 10.17513/use.38399

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В ЦЕЛЯХ ПОДГОТОВКИ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Мучкаева Н.С., Зарубин О.А., Козлова Е.А., Скобликова А.В.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: kozlova.ea.10@yandex.ru

Проведение инженерно-экологических изысканий вместе с другими видами инженерных изысканий является важным этапом подготовки мероприятий по охране окружающей среды в составе проектной документации. Цель настоящей статьи заключается в анализе особенностей организационного и методического обеспечения инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации, необходимой для капитального ремонта гидротехнических сооружений. Работы выполнены на примере плотины водоема, расположенного в поселке Юрьевка Рузаевского муниципального района Республики Мордовия. В результате проведения инженерно-экологических изысканий осуществлены сбор, обработка и анализ полевых материалов, дана характеристика природных и антропогенных условий территории (геологические и инженерно-геологические условия, климатическая, гидрологическая, гидрогеологическая, почвенная характеристика, анализ структуры землепользования и социально-экономических условий). В рамках выполнения работ проведена оценка современного экологического состояния территории (покомпонентные маршрутные наблюдения, отбор и анализ проб воздуха, вод, почв, исследование радиационной обстановки, физических факторов неионизирующей природы), сформулированы рекомендации по охране окружающей среды и минимизации экологических рисков. По итогам обработки и обобщения материалов сделан вывод о текущем и прогнозируемом соответствии основных параметров состояния природных компонентов предельным показателям, установленным нормативами.

Ключевые слова: инженерно-экологические изыскания, технический отчет, гидротехническое сооружение, плотина, водоем

ORGANIZATIONAL AND METHODOLOGICAL SUPPORT OF ENGINEERING AND ECOLOGICAL SURVEYS FOR THE PURPOSE OF PREPARING DESIGN DOCUMENTATION FOR MAJOR REPAIRS OF HYDRAULIC STRUCTURES

Muchkaeva N.S., Zarubin O.A., Kozlova E.A., Skoblikova A.V.

National Research Mordovia State University, Saransk,
e-mail: kozlova.ea.10@yandex.ru

Engineering and environmental surveys and other types of engineering surveys are an important stage in the preparation of environmental protection measures as part of design documentation. The purpose of this article is to analyze the features of organizational and methodological support for engineering and environmental surveys for the preparation of design documentation for major repairs of hydraulic structures. The research was conducted using the example of a dam of a reservoir in the village of Yuryevka, Ruzaevsky municipal district, Republic of Mordovia. Collection, processing and analysis of field materials were carried out as a result of engineering and environmental surveys. The natural and anthropogenic conditions of the territory (geological and engineering-geological conditions, climatic, hydrological, hydrogeological, soil characteristics, analysis of the structure of land use and socio-economic conditions) have been characterized. An assessment of the current ecological state of the territory (component-by-component route observations, sampling and analysis of air, water, soil, radiation conditions, physical factors of non-ionizing nature) was carried out as part of the research. Recommendations for environmental protection and minimization of environmental risks have been formulated. The conclusion on the current and predicted compliance of the main parameters of the state of natural components with the limit values was made based on the results of processing and summarizing the materials.

Keywords: engineering and environmental surveys, technical report, hydraulic structure, dam, reservoir

Введение

Содержание гидротехнических сооружений в нормативном состоянии – одно из важных направлений развития водохозяйственного комплекса любого региона. Так, по данным Министерства лесного, охотничьего хозяйства и природопользования Республики Мордовия на территории республики находятся 174 гидротехнических

сооружения [1]. Согласно аналитической информации государственной программы «Развитие водохозяйственного комплекса Республики Мордовия» [2], состояние гидротехнических сооружений в регионе, большая часть которых представлена водоподпорными сооружениями малых и средних водохранилищ, требует повышения эксплуатационной надежности путем при-

ведения к безопасному техническому состоянию. Многие из них эксплуатируются без ремонта и реконструкции более 30 лет. При недостаточной пропускной способности гидротехнические сооружения являются потенциально опасными, поскольку в нижнем бьефе прудов и водохранилищ расположены населенные пункты, инженерные сооружения, которые могут оказаться подтоплены в период активного снеготаяния, что может стать причиной чрезвычайной ситуации.

В настоящее время в регионе ведется работа по приведению гидротехнических сооружений в нормативное состояние. По итогам 2023 г. проведены работы на четырех объектах в Большеберезниковском, Лямбирском (сдача объекта IV квартал 2024 г.), Краснослободском (срок реализации – 2023–2025 гг.) районах и городском округе Саранск на сумму более 127 155,3 тыс. руб., разработана проектная документация на объект в Старошайговском районе [1]. Согласно вышеуказанной программе, в республике в период с 2024 по 2030 г. количество гидротехнических сооружений в неудовлетворительном и опасном статусе, приведенных в нормативное состояние, предполагается увеличить с 36 до 41 [2].

Масштабы и ответственность задач, планируемых для решения, определяют потребность глубокого анализа организационных и методических аспектов подготовки проектной документации, необходимой для проведения капитального ремонта гидротехнических сооружений.

В соответствии с действующей нормативной правовой базой [3, 4] основой для разработки проектной документации являются результаты инженерных изысканий. Законодательством [5, 6] определены основные и специальные виды инженерных изысканий. Одним из основных видов являются инженерно-экологические изыскания, которые призваны обеспечивать комплексную оценку инженерно-экологических условий территории, получение сведений для подготовки документов, необходимых для осуществления градостроительной деятельности [7].

Несмотря на то, что регулирование сферы инженерно-экологических изысканий является предметом научных дискуссий в части поиска путей совершенствования методологических подходов и нормативного обеспечения [8, 9], данный процесс занимает важнейшее положение в общем механизме реализации градостроительной деятельности и анализе экологических по-

следствий хозяйственной деятельности [10, 11]. Результаты изысканий являются исходными данными для проектирования, принятия управленческих, технических и иных решений.

Цель исследования – анализ особенностей организационного и методического обеспечения инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации, необходимой для капитального ремонта гидротехнических сооружений.

Материалы и методы исследования

Проблема проведения инженерных изысканий в отношении гидротехнических объектов неоднократно рассматривалась в научных публикациях (например, [12, 13]). В настоящем исследовании авторами предпринята попытка анализа процесса и результатов инженерно-экологических изысканий в отношении объекта «Гидротехническое сооружение пруда (плотина водоема п. Юрьевка) г. п. Рузаевка Рузаевского муниципального района Республики Мордовия». Водоем находится в северо-западной части с. Юрьевка, на ручье Шебдас (правый приток реки Инсар) (рис. 1).

На основе анализа нормативной технической документации [6, 7] и сложившейся практики проведения инженерно-экологических изысканий целесообразно структурировать технологию проведения изыскательских работ, выделив три основных этапа: подготовительный, полевой и камеральный (рис. 2).

Лабораторные и полевые исследования компонентов среды осуществлялись в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Мордовия». Для подготовки технического отчета использованы материалы, предоставленные по запросу Минлеса Республики Мордовия, Минкультнацем Республики Мордовия, органами муниципальной власти и другими ведомствами и организациями.

Результаты исследования и их обсуждение

Объект инженерно-экологических изысканий – подлежащее капитальному ремонту гидротехническое сооружение пруда, расположенное на ручье Шебдас, северо-западнее села Юрьевка Рузаевского муниципального района Республики Мордовия, на расстоянии 1,66 км от д. Александровка и 2,08 км от п. Красный Уголок. По целевому назначению исследуемой участок относится к категории земель водного фонда.

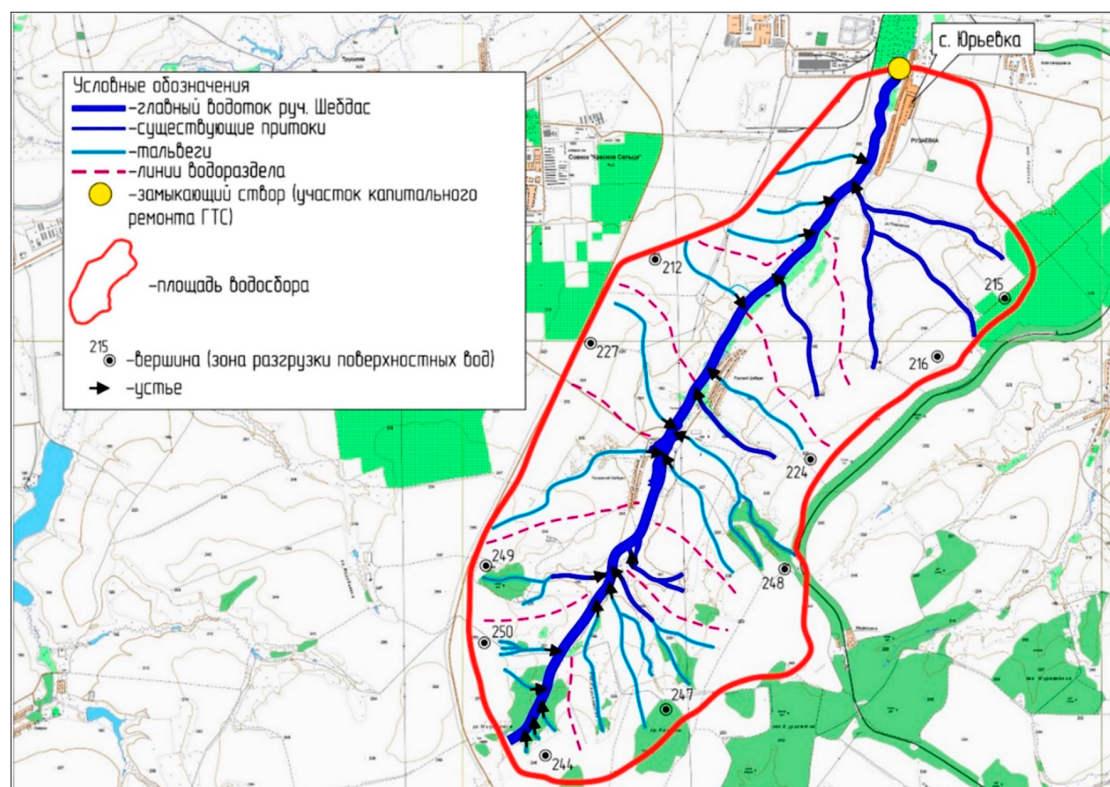


Рис. 1. Местоположение гидротехнического объекта
Источник: составлено авторами

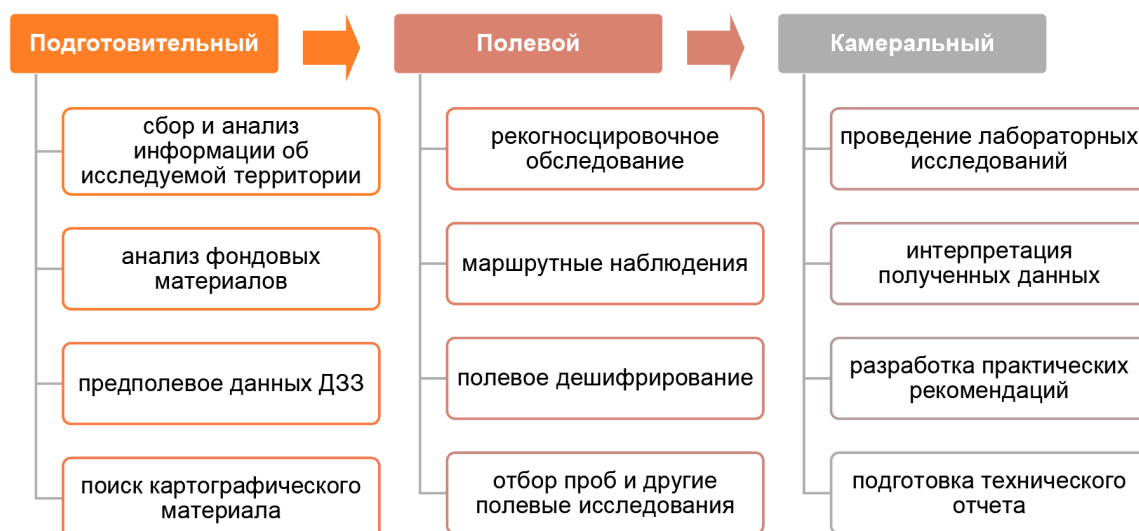


Рис. 2. Основные этапы проведения инженерно-экологических изысканий
Источник: составлено авторами

Ручей Шебдас – правый приток реки Инсар. Общая длина реки составляет 12,0 км. Водосборная площадь 37 км². Участок проектирования приурочен к нижне-

му течению водотока. Назначение пруда: комплексное (противоэрозионные цели, любительское рыболовство, рекреационные цели).

В состав сооружения, подлежащего капитальному ремонту, входят:

- плотина – средненапорная, грунтовая, проезжая, укрепленная верховым откосом железобетонными плитами и с укреплением гребня асфальтобетоном;
- водосбросное сооружение – трубчатое с ковшовым оголовком из сборно-монолитного железобетона, водопроводящая часть состоит из двух ниток железобетонных прямоугольных труб;
- донный водоспуск – трубчатый из труб диаметром 325 мм.
- ледозащитное сооружение.

В ходе подготовительного этапа были проведены следующие виды изыскательских работ:

- сбор и анализ информации о характеристике природных и антропогенных условий исследуемой территории посредством рекогносцировочного обследования в благоприятный период года. По опубликованным и фондовым материалам Минприроды России, Минлесхоза Республики Мордовия, Минкультнаца Республики Мордовия, Минсельхозпрода Республики Мордовия, администрации городского поселения Рузаевка и ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» было получено представление о состоянии природных компонентов и социально-экономических условиях участка изысканий;

– дешифрирование и анализ материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ввиду отсутствия материалов инженерно-экологических изысканий прошлых лет сравнение разновременных снимков территории позволило проанализировать динамику изменений состояния компонентов окружающей среды под влиянием техногенного воздействия, определить причины и последствия выявленных изменений [14].

Для разработки маршрутов исследования, оптимизации числа и расположения участков для отбора проб с целью проведения лабораторного анализа, а также для создания графической части отчета по инженерно-экологическим изысканиям была применена свободная кроссплатформенная геоинформационная система QGIS в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Рельеф на участке изысканий равнинный с углами наклона до 2°, местами пересеченный с углами наклона выше 6° (таблица В.1 СП 47.13330.2016). Общий уклон поверхности наблюдается с юго-востока на северо-запад. Абсолютные отметки в пределах участка изысканий изменяются

от 148,8 до 156,0 м. На исследуемой территории не выявлено признаков развития негативных (опасных для проведения капитального ремонта сооружения) геоморфологических процессов.

Рассматриваемая территория расположена в лесостепной зоне умеренно континентального климата с морозной зимой и теплым летом. По климатическому районированию для строительства относится к району II-B.

На территории предполагаемого капитального ремонта гидротехнического сооружения отсутствуют леса, расположенные на землях, не относящихся к землям лесного фонда, а также лесопарковые зеленые пояса, защитные участки леса и особо защитные участки леса.

В результате подготовительного этапа было выявлено, что реконструируемое гидротехническое сооружение входит в зону Юрьевского пруда – особо охраняемой природной территории (памятника природы) регионального значения. На момент изысканий, проводимых в период 2023–2024 г., не представляет научного интереса, не имеет исторического значения, редких представителей биоты. Основная функция особо охраняемой природной территории регионального значения (на момент изысканий) – рекреационная.

Вместе с тем на период 2024 г. стоит вопрос о ликвидации юридического статуса особо охраняемой природной территории ввиду отсутствия признаков такой территории, утвержденных в Федеральном законе «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 г. № 33-ФЗ (последняя редакция), а статус рекреационный данный объект носит лишь формально, так как его территория не обеспечена компонентами рекреации, обеспечивающими туристическо-рекреационную деятельность граждан (экологические тропы, оборудованные пляжи, зеленые зоны в пределах поймы и в границах зоны рекреации, маршрутные ветки туристического обследования и т.д.) [15].

Территория предполагаемого ремонта гидротехнического сооружения не является ключевой орнитологической территорией, а также не обладает признаками водно-болотного угодья.

Границы исследуемой территории расположены вне зоны охраны объектов культурного наследия, не пересекаются с санитарно-защитными зонами и зонами санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения

и иных зон с особым режимом природопользования, имеющих на территории Рузаевского муниципального района.

В период полевого этапа были проведены маршрутные наблюдения с покомпонентным описанием природной среды и ландшафтов района проведения работ, состояния наземных и водных экосистем, источников и признаков загрязнения; проведены исследования и оценка степени загрязненности атмосферного воздуха, почв, поверхностных и подземных вод, а также донных отложений в поверхностных водных объектах. Выполнены радиационные исследования и измерения уровней физических факторов неионизирующего характера.

Основным источником загрязнения атмосферного воздуха территории является автомобильная дорога IV категории, приуроченная к участку изысканий ввиду того, что является неотъемлемой частью существующего гидротехнического сооружения (плотины). Потенциальный источник загрязнения – Рузаевский завод химического машиностроения (АО «Рузхиммаш»), расположен на удалении в 430 м от участка изысканий.

На основе данных, предоставленных Центром мониторинга загрязнения окружающей среды – филиалом ФГБУ «Приволжское УГМС», получена информация о фоновых концентрациях следующих загрязняющих веществ: оксида углерода, диоксида азота, диоксида серы и оксида азота. Содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории реконструкции объекта не превышает установленные предельно допустимые концентрации.

В исследованных пробах почвы и донных отложений валовое содержание химических веществ (ртуть менее 0,1 мг/кг, цинк менее 0,1 мг/кг, медь $7,8 \pm 2,7$ мг/кг, свинец $4,5 \pm 1,6$ мг/кг, кадмий менее 0,1 мг/кг, никель менее 0,5 мг/кг, мышьяк менее 0,1 мг/кг, бенз(а)пирен = $0,0194 \pm 0,0068$ мг/кг) не превышает гигиенические нормативы, регламентированные СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». По результатам анализа степени химического загрязнения исследованные образцы классифицируются в категорию «чистая» в соответствии с индексом загрязнения почв.

Концентрация нефтепродуктов варьируется от $480,2 \pm 120,1$ до $593,9 \pm 148,5$ мг/кг.

Несмотря на отсутствие гигиенических нормативов для содержания нефтепродуктов, данные уровни загрязнения классифицируются как допустимые в соответствии с информационным письмом ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора» № 02.1-В/6 от 03.02.2015 г.

В исследованных образцах почвы и донных отложений концентрации *Escherichia coli* (грамотрицательных палочковидных патогенов), энтерококков, обобщенных колиформных бактерий и патогенных микроорганизмов, включая сальмонеллы, позволяют классифицировать степень микробиологического загрязнения как «чистая», в соответствии с требованиями МУК 4.2.3695-21 «Методы микробиологического контроля почвы».

Показатели микробиологического загрязнения патогенных энтеробактерий и паразитологического (цисты кишечных патогенных простейших, жизнеспособные яйца гельминтов,) загрязнения почва земельного участка относится к категории «чистая» согласно СанПиН 1.2.3685-21.

Оценка радиологического состояния почв – это важный процесс, направленный на определение уровня радиации и присутствие радиоактивных элементов в почве, на участке изысканий. Пробы почвы анализировались для выявления концентраций радиоактивных изотопов, таких как цезий-137 – $4,03 \pm 2,74$ Бк/кг, калий-40 – $127,3 \pm 54,9$ Бк/кг, торий-232 – $13,59 \pm 5,17$ Бк/кг, радий-226 – $7,71 \pm 4,35$ Бк/кг и др. Уровень удельной эффективной активности природных радионуклидов I класса в почве $36,8 \pm 9,4$ Бк/кг при допустимом уровне для первого класса строительных материалов не более 370 Бк/кг (I класс), что соответствует требованиям п. 5.3.4. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» НРБ-99/2009.

Полученные данные не превышают уровни, установленные государственными и международными нормативами природной радиационной безопасности. Это означает, что земля на участке может быть использована без ограничений по радиационной безопасности, в том числе для строительства жилых зданий и сооружений.

На исследуемом участке были осуществлены измерения уровней физических факторов неионизирующей природы. Эквивалентный уровень звука составил $38,7 \pm 1,4$ дБ, а максимальный уровень звука достиг $44,8 \pm 1,0$ дБ, что классифицируется как допустимые нормы. Показатели

плотности потока энергии, интенсивности и напряженности магнитного поля на данном земельном участке не превышают предельно допустимые значения. В результате поисковой гамма-съемки поверхностные радиационные аномалии на территории исследуемого участка не были выявлены.

Результаты измерений параметров электромагнитного поля продемонстрировали, что напряженность электрического поля и индукция магнитного поля находятся в пределах установленных нормативов.

По результатам поисковой гамма-съемки поверхностных радиационных аномалий на территории земельного участка не обнаружено. Территория проектируемого участка строительства является потенциально не радиационно опасной.

В целях оценки современного экологического состояния воды открытых водоемов (Юрьевский пруд) была отобрана проба воды. По результатам проведенной оценки превышение вредных веществ в исследованной пробе воды не обнаружено.

По результатам химического анализа воды из Юрьевского пруда выполнена комплексная оценка степени ее загрязненности. Коэффициент комплексности загрязненности воды K рассчитывается по результатам химического анализа пробы воды. Расчетный индекс загрязненности воды составил 0,92, что соответствует второму классу качества и характеризуется как «Чистая вода» (согласно нормативным значениям от 0,3 до 1).

Таким образом, в результате проведения исследований в рамках инженерно-экологических изысканий целесообразно сделать вывод, что территория характеризуется удовлетворительным экологическим состоянием. Сохранение данного состояния – приоритетная задача при организации работ по капитальному ремонту гидротехнического сооружения, включая предотвращение загрязнения территории строительным мусором, горюче-смазочными материалами, сброса сточных вод в водоем и т. п.

Результатирующим этапом проведения инженерно-экологических изысканий является обобщение собранных материалов и составление технического отчета с описанием современного экологического состояния территории предполагаемого строительства, возможного воздействия объекта предполагаемого строительства на окружающую среду, обоснованием мероприятий по рациональному природопользованию и охране природной среды.

Заключение

В результате проведения комплекса работ по инженерно-экологическим изысканиям на объекте «Гидротехническое сооружение пруда (плотина водоема п. Юрьевка) г.п. Рузаевка Рузаевского муниципального района Республики Мордовия», включая рекогносцировочное обследование, лабораторные исследования атмосферного воздуха, поверхностных вод, почв, донных отложений, физических факторов и др., камеральные работы, сделан вывод, что на исследуемой территории отмечается соответствие текущих и прогнозных параметров состояния природных компонентов предельным показателям, установленным нормативами.

На основании материалов полевых исследований, официальных ответов на запросы в уполномоченные органы власти, а также данных из открытых источников, включенных в технический отчет об инженерно-экологических изысканиях, следует вывод о безопасности для природных комплексов предполагаемых мероприятий по капитальному ремонту гидротехнического сооружения.

Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Республике Мордовия в 2023 году // Министерство лесного, охотничьего хозяйства и природопользования Республики Мордовия; редкол.: А.Р. Галиуллин, И.В. Новиков, А.М. Сапунов [и др.]. Саранск, 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://store.e-mordovia.ru/e-mordovia/iblock/5ea/5eae0658095bb4b7c2806ecaf3fe8fb7/GOSUDARSTVENNYY_DOKLAD_2023.pdf (дата обращения: 18.03.2025).
2. Постановление Правительства Республики Мордовия от 27 декабря 2023 г. № 777 «Об утверждении государственной программы Республики Мордовия “Развитие водохозяйственного комплекса Республики Мордовия” и признании утратившими силу отдельных постановлений Правительства Республики Мордовия» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/407018775?marker=64U0IK> (дата обращения: 18.03.2025).
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 18.03.2025).
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 января 2006 г. № 20 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства» (вместе с «Положением о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства») (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_57871/ (дата обращения: 18.03.2025).
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/ (дата обращения: 18.03.2025).

6. СП 47.13330.2016 Свод правил «СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» (с изменениями и дополнениями): утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1033/пр [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_237806/ (дата обращения: 18.03.2025).
7. СП 502.1325800.2021 Свод правил «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ»: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 июля 2021 г. № 475/пр [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_396274/ (дата обращения: 18.03.2025).
8. Инструкция по проведению инженерно-экологических изысканий [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200070818> (дата обращения: 18.03.2025).
9. Косинова И.И., Бударина В.А., Лисецкий Ф.Н., Масленников Н.А. Некоторые направления актуализации существующих подходов к проведению инженерно-экологических изысканий // Инженерные изыскания. 2024. № 2. С. 8–15. URL: <https://www.geomark.ru/articles/nekotorye-napravleniya-aktualizacii-sushhestvuyushhih-podhodov-k-provedeniyu-inzhenerno-ekologicheskikh-izyskaniy/> (дата обращения: 18.03.2025). DOI: 10.25296/1997-8650-2023-17-2-8-15.
10. Горбунова Н.А., Федосеев А.А., Абу-Хасан М.С. Экологическая оценка объектов окружающей среды при проведении инженерно-экологических изысканий // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. Вып. 2. С. 441–447. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-otsenka-obektov-okruzhayuschey-sredy-pri-provedenii-inzhenerno-ekologicheskikh-izyskaniy> (дата обращения: 18.03.2025). DOI: 10.20295/1815-5584-2023-2-441-447.
11. Новых Е.А., Волошенко И.В., Новых Л.Л. Проблемы инженерно-экологических изысканий: почвенные аспекты // Региональные геосистемы. 2021. № 2. С. 246–257. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-inzhenerno-ekologicheskikh-izyskaniy-pochvennye-aspekty> (дата обращения: 18.03.2025). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-2-246-257. EDN: GPZRHT.
12. Трофимов В.Т., Харьковина М.А. Экосистемный подход в нормативном техническом документе СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» // Инженерные изыскания. 2021. Т. 15. № 5–6. С. 42–49. URL: <https://www.geomark.ru/articles/ekosistemnyj-podhod-v-normativnom-tehnicheskom-dokumente-sp-502-1325800-2021-inzhenerno-ekologicheskikh-izyskaniya-dlya-stroitelstva-obshhie-pravila-proizvodstva-rabot/> (дата обращения: 18.03.2025). DOI: 10.25296/1997-8650-2021-15-5-6-42-49.
13. Ларина А.В., Тарасова О.Ю., Шеревкулов А.Д., Келин Е.Н., Николаева К.Ю. Инженерно-экологические изыскания как метод анализа экологических последствий строительства газопроводов // Успехи современного естествознания. 2024. № 10. С. 56–61. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38318> (дата обращения: 18.03.2025). DOI: 10.17513/use.38318.
14. Белов А.С., Гинц А.В., Никитина Н.Я., Созинов А.Д., Кузьмин С.В. Проблемы научно-технического сопровождения проектирования гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 47–59. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37641009_61370370.pdf (дата обращения: 18.03.2025).
15. Тесленок С.А., Гунин А.А., Долгачева Т.А. Возможности использования геоинформационных и смежных технологий при проектировании гидромелиоративных систем // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16. № 2. С. 84–92. DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-2-84-92.

УДК 551.51:504.3.054
DOI 10.17513/use.38400

ОЦЕНКА И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ УТЕЧКЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Вартазарова А.Э.

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

Цель работы – расчет экологических рисков в г. Воронеж при возможной аварии на химически опасном предприятии 1 класса опасности при утечке соляной кислоты. Экологический риск оценивали по соотношению количества людей в зараженных зонах к общей численности населения города. Для установления зон токсической опасности использовали программу Areal Locations of Hazardous Atmospheres; численности населения в этих зонах – базу данных Maps.ie, в которой обработка информации по неравномерности населения осуществляется при помощи искусственного интеллекта, позволяющего быстро и с высокой точностью оценить количество людей, проживающих в выделенных зонах опасности. Программа Areal Locations of Hazardous Atmospheres позволяет прогнозировать закономерности рассеивания облаков и уровни токсической опасности широкого перечня химически опасных соединений при различных сценариях утечек и залповых выбросах токсикантов. При этом учитываются физические свойства соединений и условия их хранения; объемы выбросов; метеорологические параметры; типы подстилающей поверхности; технические особенности аварии. Модель Areal Locations of Hazardous Atmospheres построена на основе классического дисперсионного уравнения непрерывных потоков загрязнения воздуха. Результаты моделирования визуализируются в виде диаграмм распространения токсикантов в течение 1 часа от начала аварии. Полученные геометрические формы облаков токсикантов совмещаются с картами местностей, подверженных потенциальной угрозе заражения. В результате исследования установлены наиболее неблагоприятные условия потенциальной аварии: летний период, инверсия атмосферы, направление ветра – юго-западное.

Ключевые слова: соляная кислота, авария, утечка, программное обеспечение Areal Locations of Hazardous Atmospheres, прогноз токсической опасности, оценка рисков, уязвимость населения, Воронеж

ASSESSMENT AND VISUALIZATION OF INDIVIDUAL ENVIRONMENTAL RISKS IN CASE OF HYDROCHLORIC ACID LEAKAGE

Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Vartazarova A.E.

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin
Air Force Academy», Voronezh, e-mail: an_vartazarova@mail.ru*

The aim of the work is to calculate environmental risks in the city of Voronezh in the event of a possible accident at a chemically hazardous enterprise of hazard class 1 due to a hydrochloric acid leak. Environmental risk was assessed based on the ratio of the number of people in contaminated areas to the total population of the city. To establish toxic hazard zones, the Area Locations of Hazardous Atmospheres program was used; to determine the population in these zones, the Maps.ie database was used, in which the processing of information on population unevenness is carried out using artificial intelligence, which allows for a quick and highly accurate assessment of the number of people living in the identified hazard zones. The Area Locations of Hazardous Atmospheres program allows predicting cloud dispersion patterns and toxic hazard levels for a wide range of chemically hazardous compounds under various leak scenarios and salvo emissions of toxicants. The physical properties of the compounds and their storage conditions; emission volumes; meteorological parameters; underlying surface types; technical features of the accident are taken into account. The Area Locations of Hazardous Atmospheres model is based on the classical dispersion equation of continuous air pollution flows. The modeling results are visualized as diagrams of toxicant distribution within 1 hour from the onset of the accident. The resulting geometric shapes of toxicant clouds are combined with maps of the area exposed to the potential threat of contamination. As a result of the study, the most unfavorable conditions for a potential accident were established: summer, atmospheric inversion, wind direction – southwest.

Keywords: hydrochloric acid, accident, leakage, Areal Locations of Hazardous Atmosphere, toxic hazard forecast, risk assessment, vulnerability of the population, Voronezh

Введение

Прогнозирование загрязнения окружающей среды в результате аварийных выбросов токсичных веществ с применением методов физико-математического моделирования – эффективный инструмент

для снижения экологических рисков при проектировании, эксплуатации предприятий в штатном режиме, а также на стадиях принятия решения о предотвращении развития чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий [1; 2]. Экологические

риски, вызванные техногенными авариями на химически опасных предприятиях, в последние годы значительно возросли, что связано с увеличением террористических актов на территории страны. Поэтому актуальна разработка надежных алгоритмов прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций, позволяющих в режиме времени, близком к реальному, оценивать риски и управлять ими.

Для моделирования сценариев утечки и распространения токсиканта выбрано программное обеспечение Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) – «Ареал расположения опасных сред», которое применяется специалистами разных стран, хорошо себя зарекомендовало благодаря возможности исследования распространения большого перечня летучих веществ с различными физико-химическими свойствами в разнообразных географических и метеорологических условиях [3; 4]. В статье рассматриваются сценарии утечек соляной кислоты, широко используемой в технологических процессах химической, металлургической, лакокрасочной, пищевой, фармацевтической, медицинской промышленности.

Водный раствор соляной кислоты (HCl) представляет собой бесцветную прозрачную жидкость со специфическим острым запахом. Техническая кислота имеет желто-зеленый оттенок, что связано с примесями хлора и солей железа [5]. Максимально возможная концентрация вещества в растворе составляет 36% масс. (плотность раствора 1,18 г/см³). Техническую концентрируемую HCl выпускают с массовой долей 27,5 или 31%. Торговую соляную кислоту называют концентрированной, если ее концентрация $\geq 24\%$. Такая кислота «дымит» на воздухе, так как газообразные молекулы HCl образуют с влагой воздуха мельчайшие капли. Соляная кислота не горюча и не взрывоопасна, поэтому в работе прогнозируются только токсические риски при распространении облака [5].

Предельно допустимые концентрации соляной кислоты в воздухе рабочей зоны и населенных пунктов соответственно равны 0,5 и 0,2 мг/м³ (2 класс опасности) [5]. При вдыхании в течение часа воздуха, содержащего 200 мг/м³ паров соляной кислоты, возможен летальный исход.

Экологические риски, связанные с утечкой соляной кислоты, возникают при превышении нормативов ее содержания в воздухе. При этом на зараженных территориях в зоне высокой токсической опасности

возможно отравление всего живого. Кислотные осадки, образующиеся в результате взаимодействия паров кислоты с влагой воздуха, могут выпадать на значительном удалении от места аварии. Они изменяют свойства почв и вод. Так, при понижении pH воды до 5 ед. погибает рыба, нарушаются трофические цепи, уменьшается число видов водных животных, водорослей и бактерий. Кислотные осадки ускоряют разрушение исторических памятников, зданий, сооружений, техники [5]. При масштабных утечках в холодный период кислота мало испаряется, и основная ее часть может просачиваться через почву, загрязняя подземные воды [6].

Цель работы – расчет экологических рисков в г. Воронеж при возможной аварии на химически опасном предприятии 1 класса опасности при утечке соляной кислоты.

Материал и методы исследования

Для прогноза распространения паров соляной кислоты в воздухе использовали общедоступную программу ALOHA, разработанную Агентством по охране окружающей среды (США). Программа базируется на гауссовой дисперсионной модели непрерывных потоков загрязнения воздуха, способной прогнозировать рассеивание более 900 химических веществ в атмосфере, подвижность которых сопоставима с подвижностью воздуха [7]. Модель описывается общим уравнением:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-y)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right],$$

где C – концентрация газа в атмосфере (мг/м³); Q – скорость выброса вещества из источника, мг/с; h – эффективная высота (относительно земли) выброса, м; y – расстояние при боковом ветре от центральной линии шлейфа, м; z – расстояние по вертикальной оси относительно земли, м; u – средняя скорость ветра, м/с; σ_y , σ_z – коэффициенты горизонтального и вертикального рассеивания, представляющие стандартные отклонения распределения концентрации загрязняющих веществ в направлении оси бокового ветра и в направлении вертикальной оси, м [8].

Кривые σ_y и σ_z отражают условия стабильности атмосферы. Классы стабильности атмосферы изменяются от очень нестабильных условий A до очень стабильных F , как показано в таблице 1 [9].

Таблица 1

Классы устойчивости атмосферы

Скорость ветра, м/с	Класс				
	Дневное время. Солнечное излучение			Ночное время. Облачность	
	Сильное	Среднее	Слабое	> 50%	< 50%
<2	A	A-B	B	E	F
2–3	A-B	B	C	E	F
3–5	B	B-C	C	D	E
>5	C	C-D	D	D	D

Источник: составлено авторами на основе [8].

При распространении химических соединений в воздухе класс вертикальной устойчивости атмосферы играет важнейшую роль как в формировании облака, так и в его перемещении и осаждении. В приземном слое температура воздуха по мере увеличения высоты повышается. Чаще всего это инверсионный процесс, вызванный тем, что летом в безветренные ночи потоки воздуха от нагретой за день земной поверхности поднимаются вверх, а охлажденный на высоте 20–40 м воздух опускается вниз. Задерживающий слой мешает развитию вертикального перемещения воздуха, поэтому под ним часто скапливаются пыль и водяные пары, формируются слои тумана или дыма. Инверсия не дает распространиться облаку токсиканта по высоте, и образуются наиболее «подходящие» условия для сохранения и перемещения его высоких концентраций [10].

Для изотермии более свойственны стабильность температуры воздуха в некотором атмосферном слое и соответственно стабильные равновесные состояния воздуха. Изотермия типична для пасмурной погоды и, как правило, возникает в утренние и вечерние часы. Она, так же как и инверсия, способствует длительному застою аэрозолей и паров токсичных соединений в промышленных зонах и населенных пунктах [10].

При неустойчивой атмосфере наблюдается конвекция – процесс вертикального перемещения теплого воздуха вверх, а холодного (более плотного) – вниз. Обычно это явление наблюдается летом в дневные часы при безветренной и ясной погоде. Поднимающиеся вверх потоки воздуха рассеивают облако токсичного вещества, разбавляют его и препятствуют горизонтальному распространению [10].

На начальном этапе в программу ALO-NA вводятся следующие параметры: название исследуемого вещества (физико-хими-

ческие параметры есть в базе данных программы, пользователям можно добавлять новые вещества); местоположение источника выброса (широта, долгота и высота над уровнем моря); климатические и географические условия (температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, класс стабильности атмосферы, тип подстилающей поверхности); технические характеристики емкости для хранения вещества (тип, размеры, давление) и условия утечки (высота, размеры источника выброса; интенсивность и объемы выброса; температура хранения вещества).

Результатом моделирования является графическое изображение шлейфа распространяющегося облака токсичного вещества в первый час после его утечки. Цветом изображаются уровни токсической опасности в рассчитанных зонах: 1) очень высокий уровень – красный цвет (концентрация паров HCl в воздухе более 153,15 мг/м³); 2) средний уровень – оранжевый цвет (концентрация более 33,7 мг/м³); 3) низкий уровень – желтый цвет (концентрация более 2,8 мг/м³). Очень высокому уровню опасности подвержены территории, где загрязнение окружающей среды может иметь серьезные последствия для здоровья населения (до мгновенного летального исхода). Районы, отмеченные оранжевым цветом, потенциально представляют высокую опасность для жизни и здоровья людей, относящихся к чувствительным категориям (дети, пожилые люди, пациенты с хроническими заболеваниями легких, беременные женщины и т.д.). Здоровье населения, находящегося в желтой зоне, вероятно, не будет подвержено серьезным угрозам.

Для оценки численности уязвимого населения и экологических рисков полученные графические изображение моделей шлейфа HCl возможно совместить с картой

местности, кадастровой картой или базой данной плотности населения. В этой работе использовали базу данных Maps.ie, позволяющую точно и быстро оценивать количество населения на выделенных участках любой геометрической формы.

Индивидуальный экологический риск оценивали по наиболее важному лимитирующему показателю – угроза жизни и здоровью человека [11; 12, с. 176]. Его можно рассчитать как соотношение уязвимого населения к общей численности населения в г. Воронеж. То есть риск отождествляется с вероятностью того, что человек в своей жизнедеятельности может испытать то или иное неблагоприятное экологическое воздействие. Индивидуальный экологический риск характеризует экологическую опасность в определенной точке пространства, где находится индивидум, то есть характеризует распределение риска в пространстве.

Объект исследования – потенциально возможные сценарии утечки HCl на химически опасном предприятии первого класса опасности АО «Воронежсинтезкаучук», расположенного в густонаселенном Левобережном районе г. Воронеж.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматривали несколько значительно различающихся по начальным условиям сценариев возможных аварий на предприятии АО «Воронежсинтезкаучук», связанных с утечкой соляной кислоты из цистерны. Метеорологические условия распространения паров кислоты приведены в таблице 2.

По предполагаемым сценариям произошла утечка из вертикального резервуара, в котором находится ~ 6 т концентрированной соляной кислоты при температуре окружающего воздуха (высота утечки от поверх-

ности земли 1 м; диаметр отверстия 50 см). В соответствии с возможностями, предоставляемыми программным обеспечением, в качестве источника загрязнения атмосферы была выбрана образовавшаяся на бетонном покрытии лужа кислоты с диаметром 20 м. Количество выброшенной кислоты за время аварии составило 2,5 т. Наиболее подходящий тип подстилающей поверхности, учитываемый в программе, «город + лес». Этот тип учитывает плотную застройку в исследуемом районе и наличие зеленых насаждений.

Время испарения загрязняющего вещества ограничено моделью и составляет 60 мин. Через это время возможно изменение метео- и технических условий, поэтому необходима корректировка вводимых параметров. Результаты моделирования распространения облака соляной кислоты представлены на рисунке 1. Пунктиром обозначены вероятные зоны заражения при возможном изменении направлении ветра в зависимости от класса устойчивости атмосферы.

Анализ результатов моделирования показывает, что в зимний период при низких температурах и испаряемости соляной кислоты красные зоны потенциального риска для жизни человека не выходят за границы предприятия. При этом температура воздуха и устойчивость атмосферы имеют большее влияние на формирование облака тяжелого газа, испаряющегося с поверхности лужи, чем скорость ветра. В условиях летнего периода, при которых испаряемость кислоты из лужи повышается на порядок, глубина заражения территории увеличивается, может при инверсии атмосферы достигать 2,7 км. Распространению концентрированного облака в значительной мере способствует инверсия атмосферы.

Таблица 2

Метеорологические условия для моделирования выброса соляной кислоты

Атмосферные параметры	Зима (ср.)*	Зима (экстр.)*	Лето (ср.)*	Лето (экстр.)*
Обозначение сценария	З _{ср}	З _{экстр}	Л _{ср}	Л _{экстр}
Время	21:00	21:00	21:00	21:00
Скорость ветра, м/с	2,9	9	2,3	9
Температура, °С	-6,3	-20,9	+20,4	+35,0
Влажность, % относит.	87	35	62	15
Класс устойчивости атмосферы	C	D	B	C

Примечание: *средние и экстремальные значения за январь и июнь 2013–2023 гг.
Источник: https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Воронеже.

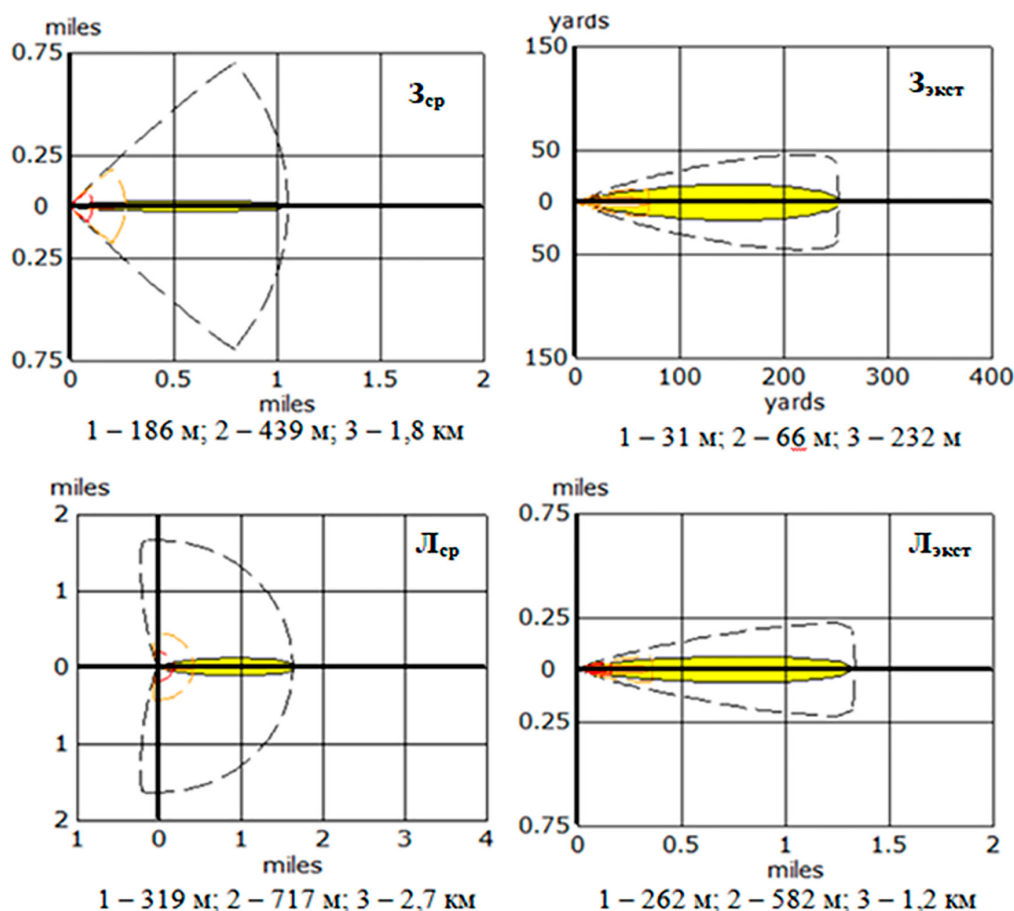


Рис. 1. Зоны опасности (1–3) при распространении облака соляной кислоты в течение 1 часа от начала аварии
Источник: составлено авторами на основе [4]

Летние погодные условия (жаркая сухая погода) способствуют тому, что соляная кислота при истечении из цистерны мгновенно закипает за счет теплоты растворения HCl и поднимается в воздух в виде тяжелого аэрозоля. При этом увеличивается давление паров соляной кислоты, и начинается интенсивное испарение воды. Последнее вызывает снижение температуры кипящей кислоты и возрастание ее концентрации. Концентрированное облако HCl в зависимости от метеорологических условий и объема выброса оседает на различном расстоянии от источника, а затем начинается вторичное испарение кислоты, которое может длиться от нескольких минут до нескольких суток.

Для оценки экологического риска исследуемую территорию делили на 4 сектора в соответствии с направлением ветра (откуда дует): северо-восточное (С-В); юго-восточное (Ю-В); юго-западное (Ю-З) и северо-западное (С-З). Далее по базе данных Maps.ie определяли количество населения

в каждом секторе в зонах риска 1–3 для наихудшего сценария развития утечки соляной кислоты (Л_{cp}). Результаты оценки численности уязвимого населения представлены в таблице 3.

Всего в зоне потенциального риска с радиусом 2,7 км проживает 86,6 тыс. человек, из них в зоне среднего уровня опасности, которым может понадобиться эвакуация или медицинская помощь, – 12,8 тыс. человек. В северо-восточном секторе по направлению ветра находится промышленная, дорожно-транспортная зоны, сквер, а также участок Воронежского водохранилища (рис. 2). Количество работников база данных Maps.ie не считает, поэтому в данном случае численность потенциально пострадавших человек в таблице 2 занижена. Надо отметить, что HCl хорошо растворяется в воде, поэтому находящееся на пути распространения облака Воронежское водохранилище будет способствовать снижению концентрации кислоты в воздухе.

Таблица 3

Количество населения в зонах риска при потенциальной утечке соляной кислоты при реализации сценария L_{cp}

Уровень риска	Концентрация HCl в воздухе, мг/м ³	Количество населения, подвергающегося риску в секторе направления ветра, тыс. чел.				Критическое воздействие HCl
		С-В	Ю-В	Ю-З	С-З	
I	$\geq 153,15$	работники предприятия ~ 0,045 (1 смена в цехе)				Возможен летальный исход
II	$\geq 33,7$	0,2	1,8	8,7	2,1	В большинстве случаев обратимое раздражение, риску подвержены уязвимые группы населения
III	$\geq 2,8$	16,6	4,4	34,1	18,7	Обратимое воздействие на организм, иногда требуется медицинская помощь

Источник: составлено авторами с использованием [13, с. 387].

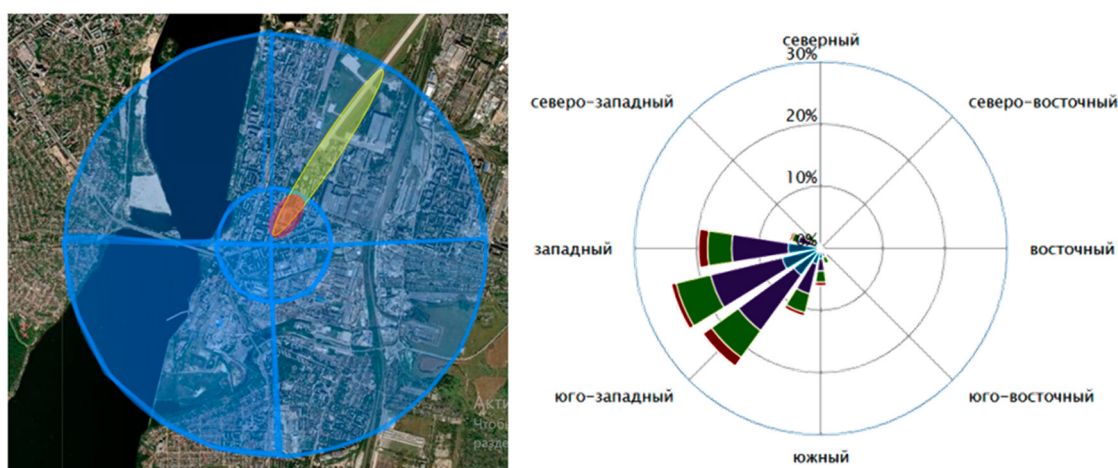


Рис. 2. Оценка уровней риска при утечке соляной кислоты
Источник: составлено авторами на основе [4]

Наибольшее количество пострадавших может ожидаться при юго-западном направлении ветра. Здесь расположены микрорайоны города с многоэтажной застройкой, учебные учреждения, детские сады, больницы, крупные промышленные предприятия и испытательный аэродром. Именно это направление ветра по статистике является наиболее вероятным в летний период в г. Воронеж. На рисунке 2 показано применение программного обеспечения АЛОНА и базы данных численности населения при моделировании сценария L_{cp} и юго-западном направлении ветра.

Первая степень присваивается химической техногенной катастрофе, если в зону возможного заражения попадает свыше 75 тыс. человек; вторая – 40–75 тыс.; третья – менее 40 тыс. Четвертая степень при-

сваивается катастрофе, когда зона возможного химического заражения находится в пределах санитарно-защитной зоны объекта (ГОСТ Р 22.0.05-2020). В соответствии с этой градацией и с учетом розы ветров при утечке соляной кислоты на химически опасном предприятии в черте г. Воронеж может развиваться катастрофа второй степени опасности при юго-западном направлении ветра; третьей степени – во всех остальных случаях.

По данным Федеральной службы государственной статистики, на 10 февраля 2025 г. в Воронеже проживает 1 041 668 человек. Расчет индивидуальных экологических рисков (отношение числа уязвимого населения к общему) показал, что экологический риск в I зоне токсической опасности в первый час после аварии составляет

$4 \cdot 10^{-5}$; во II и III зонах соответственно риски равны $1 \cdot 10^{-2}$ и $7 \cdot 10^{-2}$. Индивидуальный экологический риск считается приемлемым для химически опасного предприятия, если он составляет $\sim 10^{-5}$. Во второй и третьей зонах токсической опасности экологический риск находится на высоком уровне, что требует принятия дополнительных защитных мер как на самом предприятии, так и на территории города.

Заключение

Проведена оценка экологических рисков в г. Воронеж при утечке 2,5 т соляной кислоты из вертикального резервуара на территории химически опасного объекта в г. Воронеж. При исследовании разных метеорологических условий утечки кислоты установлено, что наиболее опасна авария в летний период, вечерние часы. Основное влияние на глубину распространения и концентрацию облака при прочих сопоставимых условиях оказывает устойчивость атмосферы. Скорость ветра и влажность воздуха влияют в меньшей степени. Оценка экологических рисков показала, что при аварийном выбросе HCl в первой зоне токсической опасности могут находиться только работники цеха (риск $4 \cdot 10^{-5}$). Такой риск считается приемлемым для химически опасных объектов I класса опасности. Общий радиус заражения территории при реализации наихудшего метеорологического сценария может составлять 2,7 км. В этом случае экологические риски во второй и третьей зонах находятся на высоком уровне, они составляют $1 \cdot 10^{-2}$ и $7 \cdot 10^{-2}$.

Интеграция общедоступных программ расчета зон токсической опасности ALOHA и базы данных численности населения показали возможность широкого использования этих инструментов для прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций в режиме времени, близком к реальному, а также на стадиях проектирования химически опасных объектов и управления экологическими рисками. Приведенный в работе алгоритм оценки уязвимости населения и оценки экологических рисков может стать готовым электронным пособием для специалистов в области охраны окружающей среды, безопасности жизнедеятельности.

Список литературы

1. Айдовос А.А., Айдовос Г.А., Данаев Н.Т., Ажиева Г.И., Нарбаева С.М. Математические модели прогнозирования состояния окружающей среды при аварийных техногенных загрязнениях ограниченной части региона // Успехи современного естествознания. 2014. № 5-1. С. 179–181. URL:

<https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33873> (дата обращения: 18.05.2025).

2. Ударцева О.В., Гальцев С.А. Методика анализа и оценки рисков аварийных ситуаций на химически опасных объектах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 1 (36). С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-analiza-i-otsenki-riskov-avariynyh-situatsiy-na-himicheskii-opasnyh-obektah> (дата обращения: 18.05.2025).

3. Chehraz D., Davami A.H., Kazemi R., Yengejeh R.J. Comparison of numerical calculations and ALOHA modeling in consequence assessment of chlorine gas emissions from ethylene dichloride reactors // Environ Monit Assess. 2024. May 17. Is. 196 (6). P. 553. DOI: 10.1007/s10661-024-12694-z.

4. Кочетова Ж.Ю., Шишкин А.В., Внукова С.В., Трошин А.Л. Программное обеспечение для моделирования распространения облака аммиака при разгерметизации трубопровода // Физические основы наукоемких технологий: материалы Всероссийской научно-методической конференции (г. Воронеж, 17 апреля 2024 г.). Воронеж: издательство Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 56–62. DOI: 10.58168/PBST_56-62.

5. Прохоров С.А., Потапова С.О. Токсическая опасность соляной кислоты // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 758–761. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/toksicheskaya-opasnost-solyanoy-kisloty.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).

6. Кочетова Ж.Ю., Терентьев В.В. Особенности трансформации некоторых отравляющих веществ в почве // Перспективные научные исследования: теория, методология и практика применения: сборник статей международной научной конференции (Санкт-Петербург, 07 февраля 2023 г.). СПб.: ООО «Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова», 2023. С. 14–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50352981> (дата обращения: 18.05.2025).

7. Лисанов М.В., Пчельников А.В., Сумской С.И. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере // Российский химический журнал. 2005. № 49 (4). С. 18–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasseyaniya-vybrosov-opasnyh-veschestv-v-atmosfere> (дата обращения: 18.05.2025).

8. Humayun M.T. Ubiquitous Low-Cost Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube Sensors for Distributed Methane Leak Detection // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16. Is. 24. P. 8692-8699. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2581832.

9. Блашинская О.Н., Патрушев К.Ю. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ с учетом влияния адсорбции на изменение концентрации в атмосфере населенных мест // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2023. № 1. С. 252–257. URL: <https://angtu.editorum.ru/ru/nauka/article/66023/view> (дата обращения: 18.05.2025).

10. Хисматуллина А.Ф., Гасилов В.С., Чижова М.А., Хайруллина Л.И. Влияние метеорологических условий на распространение токсичных веществ в окружающем пространстве // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 12. С. 152-157. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-meteorologicheskikh-usloviy-na-masshtabny-i-posledstviya-avariy-na-himicheskii-opasnyh-obektah> (дата обращения: 18.05.2025).

11. Медведева С.А. Экологический риск. Общие понятия, методы оценки. XXI век // Техносферная безопасность. 2016. Т. 1. № 1. С. 67–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskii-risk-obschie-ponyatiya-metody-otsenki> (дата обращения: 18.05.2025).

12. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Пантелеев Д.А. Экология почв военных полигонов. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с. ISBN: 978-5-4446-1791-5.

13. Могош Г. Острые отравления. Диагноз, лечение. Бухарест: Медицинское изд-во, 1984. 579 с.

СТАТЬЯ

УДК 502.5:631.8:631.45

DOI 10.17513/use.38401

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УДОБРЕНИЙ, УСИЛИТЕЛЕЙ РОСТА И БИОДЕСТРУКТОРОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ**Тавадзе Б.Д., Михай В.С., Масленников Д.А.***ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Нижневартровский филиал, Нижневартовск, e-mail: babo.tavadze@yandex.ru*

Загрязнение почвы нефтью в совокупности с природными катаклизмами может стать долгосрочным риском для окружающей природной среды. Особенность нефти как загрязнителя заключается в следующем: нефть – высокомолекулярное соединение, в ней присутствуют фракции разной температуры кипения, что усложняет прохождение естественных самовозобновительных процессов и снижает самоочищающиеся способности почвы. Цель данного исследования заключалась в выявлении комплексного и индивидуального влияния удобрений, усилителей роста и биодеструкторов на рост и развитие растений в нефтезагрязненных почвах. Для исследования авторы использовали почву, нефть, биодеструктор Экойл, сидерат овес (*Avéna*), микоризные грибы Profi, суспензию хлореллы (биостимулятор), комплексное удобрение и специальные контейнеры. Для определения процентного содержания нефти использовали «Концентратомер КН-3». Наблюдения проводили в лабораторных условиях. Для исследования авторы искусственно загрязнили почву и выселили семена овса в следующей последовательности: нефть + биодеструктор, нефть + биодеструктор + грибы, нефть + удобрение, нефть + грибы + удобрение и т.д. Исследования доказали преимущество в сочетании нефть + биодеструктор. Хотя нефть + биодеструктор + удобрение, нефть + биодеструктор + хлорелла, нефть + биодеструктор + грибы тоже имеют неплохие результаты. Показатели проб без применения биодеструкторов выше, чем проба почва + нефть. Поэтому авторы считают, что в случае небольших разливов нефти можно будет применять только удобрения и усилители роста растений, что будет экономически выгодно для предприятий. Результаты исследования могут быть применены нефтяными компаниями на время проведения рекультивационных мероприятий на территориях, загрязненных нефтью.

Ключевые слова: биодеструкторы, удобрения, биостимуляторы, почва, нефть, биоремедиация, фитомелиорация**ASSESSMENT OF THE EFFECT OF FERTILIZERS, GROWTH ENHANCERS AND BIODESTRUCTORS ON PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT IN OIL-CONTAMINATED SOILS****Tavadze B.D., Mikhay V.S., Maslennikov D.A.***Industrial University of Tyumen, Nizhnevartovsk branch, Nizhnevartovsk, e-mail: babo.tavadze@yandex.ru*

Oil pollution of the soil combined with natural disasters can become a long-term risk to the environment. The peculiarity of oil as a pollutant is as follows: oil is a high-molecular compound, it contains fractions of different boiling points, which complicates the passage of natural self-renewing processes and reduces the self-cleaning abilities of the soil. The purpose of this study was to identify the complex and individual effects of fertilizers, growth enhancers, and biodestructors on plant growth and development in oil-contaminated soils. For the study, the authors used soil, oil, biodestructor oil, oat siderate (*Avéna*), growth enhancer – mycorrhizal fungi “Profi”, chlorella suspension (biostimulator), complex fertilizer and special containers. A “KH-3 concentrator” was used to determine the percentage of oil. The observations were carried out in laboratory conditions. For the study, the authors artificially polluted the soil and sowed. Studies have proven the advantage of combining oil + biodestructor. Although oil + biodestructor + fertilizer, oil + biodestructor + chlorella, oil + biodestructor + mushrooms also have good results. The values of samples without the use of biodestructors are also higher than the soil + oil sample. Therefore, the authors believe that in the case of small oil spills, it will be possible to use only fertilizers and plant growth enhancers, which will be economically beneficial for manufacturers. The results of the study can be applied by oil companies during reclamation activities in oil-contaminated areas.

Keywords: biodestructors, fertilizers, biostimulants, soil, oil, bioremediation, phytomelioration**Введение**

Нефть, как и все загрязнители, негативно влияет на почвенную среду. Во-первых, нефть – высокомолекулярное соединение, в состав которого входят смолисто-асфальтеновые вещества, которые очень долго

не поддаются разложению [1]. Во-вторых, при разливе нефти, из-за присутствия в ней фракций разной температуры кипения, она может достигнуть грунтовых вод, тогда происходит двойное загрязнение и почвенного профиля, и подземных вод. В-третьих,

нефть как токсичное вещество уничтожает все живое при попадании в верхние слои литосферы, что препятствует самовозобновительным процессам, то есть снижает самоочищающуюся способность почвы [1–3]. В-четвертых, при разливе нефти почва затапливается, при этом нарушаются обменные процессы, газообмен, тепловой обмен, нарушается структура почвы и т.д. Поэтому с самого начала добычи, эксплуатации, реализации данного ресурса применяются разные методы рекультивации загрязняющих нефтью земель [3]. Одним из методов рекультивации загрязненных земель является биоремедиация. Биоремедиация – лечение жизнью (*bios* – жизнь, *remediatio* – лечение) [3].

Биодеструкторы или, можно сказать, редуценты – сообщества микроорганизмов, которые разрушают мертвое органическое вещество. Такие микроорганизмы и грибы чаще присутствуют в почвенной среде естественным путем. Но в настоящее время их культивируют искусственно. Выведенные таким путем микроорганизмы (биодеструкторы) обычно используют по целевому назначению. Одних используют для рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, других для быстрого разложения мертвой растительной ткани, для разложения отходов бытового и промышленного происхождения и т.д. Биодеструкторы не только перерабатывают органические вещества, присутствующие в загрязнителях, но и обогащают почву собственными продуктами диссимилиации (жизнедеятельности) [3–5]. Нефтеокисляющие микроорганизмы (биодеструкторы) распространены в природе очень широко и могут усваивать разнообразные органические соединения: углеводы, белки, жиры и т.д. [6].

В настоящее время существует множество микроорганизмов, которые культивируются искусственным путем и применяются не только для почвенной среды, но и для водной среды.

Удобрения чаще всего применяют в сельском хозяйстве, а также при рекультивации земель. С помощью удобрений происходит увеличение количества макро- (N, P, K) и микроэлементов (Fe, Mn, Zn, Cu) в почве, что необходимо для роста и развития растений. Удобрения обычно делят на три группы: органические, минеральные и бактериальные [7; 8, с. 69–77; 9]. Органические удобрения имеют живое происхождение (навоз, гуано, перегной, торф и т.д.).

Минеральные удобрения имеют химическое происхождение и бывают двух типов: 1) простые, которые содержат только один макроэлемент (азот, фосфор, калий) и важные микроэлементы (медь, бор, марганец и др.) [9–11]; 2) комплексные удобрения – это двойные по составу, например азотно-фосфорные, азотно-калийные или тройные азотно-фосфорно-калийные.

Биостимуляторы, или стимуляторы роста растений, тоже имеют органическое происхождение. Их можно условно разделить на две группы: биостимуляторы, в состав которых входят природные соединения (гуминовые и фульвовые кислоты, аминокислоты, экстракты морских водорослей, пептиды) и микроорганизмы (бактерии, грибки), которые взаимодействуют с растениями [12–14]. Основная функция биодеструкторов – это активизация их внутренних механизмов и ускорение процесса метаболизма.

В связи с тем, что после загрязнения нефтью, из-за увеличения количества аборигенных микроорганизмов, участвующих в самоочищающем процессе почвенной среды, уменьшается количество присутствующих в ней макро- и микроэлементов [4]. Поэтому необходимо при рекультивации обязательно вносить минеральные удобрения и усилители роста растений, чтобы восстановительные процессы шли быстро и растения, применяемые для дальнейшего этапа рекультивации, этапа фитомелиорации развивались в комфортных условиях.

Научная новизна работы заключается в том, что авторы определили роль удобрений, усилителей роста и микроорганизмов, совместно и по отдельности, на рост и развитие растений на загрязненных нефтью почвах в лабораторных условиях.

Цель исследования – выявление комплексного и индивидуального влияния удобрений, усилителей роста и биодеструкторов на рост, развитие растений в нефтезагрязненных почвах.

Задачи:

1. Изучение теоретического материала и научной литературы. Определение методов исследования.
2. Изучить токсическое воздействие нефтезагрязненной почвы на рост и развитие растений.
3. Оценить антистрессовый эффект биопрепаратов, удобрений и усилителей роста для растений на нефтезагрязненных почвах в лабораторных условиях.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования авторы использовали почву, биодеструктор Экойл, сидерат овес (*Аvéна*), усилители роста – микоризные грибы Profi, суспензию хлореллы (биостимулятор), удобрение смесовое комплексное для травянистых растений, нефть и пластмассовые контейнеры. Исследования проводили в лаборатории химии и экологии филиала Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске, где были созданы условия для проведения опыта. Температура среды варьировалась в пределах 19–22°C, влажность 40–60%, что соответствует стандарту микроклимата производственной среды в зимний период. Для определения кислотности почвенной вытяжки авторы использовали SmartSensorPH 818.

Процентное содержание нефти в анализируемых пробах определяли методом ИК-спектроскопии на анализаторе «Концентраметр КН-3». Результат определения содержания нефтепродуктов в почве $X_{изм}$ (мг/кг) рассчитывали по формуле

$$X_{изм} = \frac{C_{изм} \cdot V \cdot V_2 \cdot V_{элюат}}{M \cdot V_1 \cdot V_{ал}},$$

где $C_{изм}$ – показания прибора, мг/дм³;

M – масса навески образца для анализа, мг;

V – суммарный объем экстракта, см³;

V_1 – объем экстракта, взятый для разбавления, см³;

V_2 – объем экстракта, полученный после разбавления, см³;

$V_{ал}$ – объем аликвоты экстракта, введенной в хроматографическую колонку, см³;

$V_{элюат}$ – объем элюата, полученного после пропускания экстракта через колонку, см³.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования авторы проводили в несколько этапов. На первом этапе, по истечении двух дней, почву искусственно насытили нефтью. Через три дня в искусственно загрязненную нефтью почву внесли удобрения, микроорганизмы и стимуляторы роста. Через две недели авторы выселили сидерат (овес) и дальше вели наблюдения. В первую очередь определили химизм почвы, результаты в табл. 1. Всходы появились через три дня (рис. 1). Количество всходов разнилось, например, самое большое количество всходов наблюдали в пробах, где присутствовали нефть

+ биодеструктор, самое меньшее в пробе нефть + почва, результаты представлены в табл. 3.

До наступления фазы третьего листа авторы брали по 5 растений и, используя метод морфометрии [15], измеряли вегетативные органы (корень, листья, стебель) растений (рис. 2).

После наступления фазы кушения опять повторили данные исследования, результаты представлены в табл. 2.

В начальных этапах растения развивались хорошо до фазы третьего листа (рис. 3).

После фазы третьего листа растения уже развивались по-разному. Почти каждый день в пробах растения погибали и до фазы кушения их количество в некоторых пробах сократилось почти на половину (табл. 3). Единственная проба, где почти не пострадали растения, – проба нефть + биодеструктор (табл. 3).



Рис. 1. Первые всходы растений (фото авторов)



Рис. 2. Вегетативные органы овса в фазе третьего листа (фото авторов)



Рис. 3. Растения в фазе третьего листа
(фото авторов)

Таблица 1

Показатели кислотности исследуемой почвы

№ пробы	Содержание pH в загрязненной пробе до высевания растений	Содержание pH после роста и развития растений
1. Нефть + биодеструктор	6,2	6,66
2. Нефть + удобрение	6,0	6,65
3. Нефть + хлорелла	6,0	6,71
4. Нефть + грибы	6,0	6,70
5. Нефть + биодеструктор + грибы	6,0	6,66
6. Нефть + биодеструктор + хлорелла	6,0	6,46
7. Нефть + биодеструктор + удобрение	6,0	6,8
8. Нефть + грибы + удобрение	6,0	6,7
9. Нефть + хлорелла + удобрение	6,0	6,46
10. Нефть + биодеструктор + грибы + удобрение	6,0	6,45
11. Нефть + биодеструктор + хлорелла + удобрение	6,0	6,8
12. Нефть + почва	6,0	5,8

Источник: составлено авторами на основе полученных в ходе исследования данных.

Таблица 2

Средние показатели размера вегетативных органов при росте и развитии растений

№ пробы	Средние показатели вегетативных органов овса до появления третьего листа			Средние показатели вегетативных органов овса в фазе кушения		
	Корень (см)	Стебель (см)	Лист (см)	Корень (см)	Стебель (см)	Лист (см)
1. Нефть + биодеструктор	8,3	18,4	5,5	14,4	19,5	8,7
2. Нефть + удобрение	5,4	16,3	4,5	12,3	16,7	6,3
3. Нефть + хлорелла	4,3	15,9	3,5	12,1	16,5	6,6
4. Нефть + грибы	5,5	16,5	3,4	12,0	16,9	6,7
5. Нефть + биодеструктор + грибы	7,4	17,6	5,9	12,8	17,8	8,8
6. Нефть + биодеструктор + хлорелла	6,3	16,6	5,7	12,6	17,2	7,9
7. Нефть + биодеструктор + удобрение	7,6	17,2	5,3	12,8	17,7	7,8
8. Нефть + грибы + удобрение	7,9	18,2	5,6	13,5	19,0	6,5
9. Нефть + хлорелла + удобрение	7,7	18,4	5,4	12,9	18,6	6,9
10. Нефть + биодеструктор + грибы + удобрение	3,9	16,2	3,2	12,3	16,7	6,0
11. Нефть + биодеструктор + хлорелла + удобрение	3,8	15,9	3,3	12,2	16,4	6,2
12. Нефть + почва	3,2	5,6	2,5	-	-	-

Источник: составлено авторами на основе полученных в ходе исследования данных.

Таблица 3

Количество всходов и оставшихся в живых растений
после роста и развития

№ пробы	Количество первых всходов растений	Количество растений в фазе третьего листа	Количество растений в фазе кущения	Количество оставшихся в живых растений
1. Нефть + биодеструктор	39	38	32	28
2. Нефть + удобрение	30	18	18	12
3. Нефть + хлорелла	30	28	23	12
4. Нефть + грибы	36	28	22	13
5. Нефть + биодеструктор + грибы	36	33	20	14
6. Нефть + биодеструктор + хлорелла	32	30	18	14
7. Нефть + биодеструктор + удобрение	33	30	18	12
8. Нефть + грибы + удобрение	36	23	15	5
9. Нефть + хлорелла + удобрение	33	25	17	7
10. Нефть + биодеструктор + грибы + удобрение	36	16	12	10
11. Нефть + биодеструктор + хлорелла + удобрение	35	23	18	10
12. Нефть + почва	23	10	-	-

Источник: составлено авторами на основе полученных в ходе исследования данных.

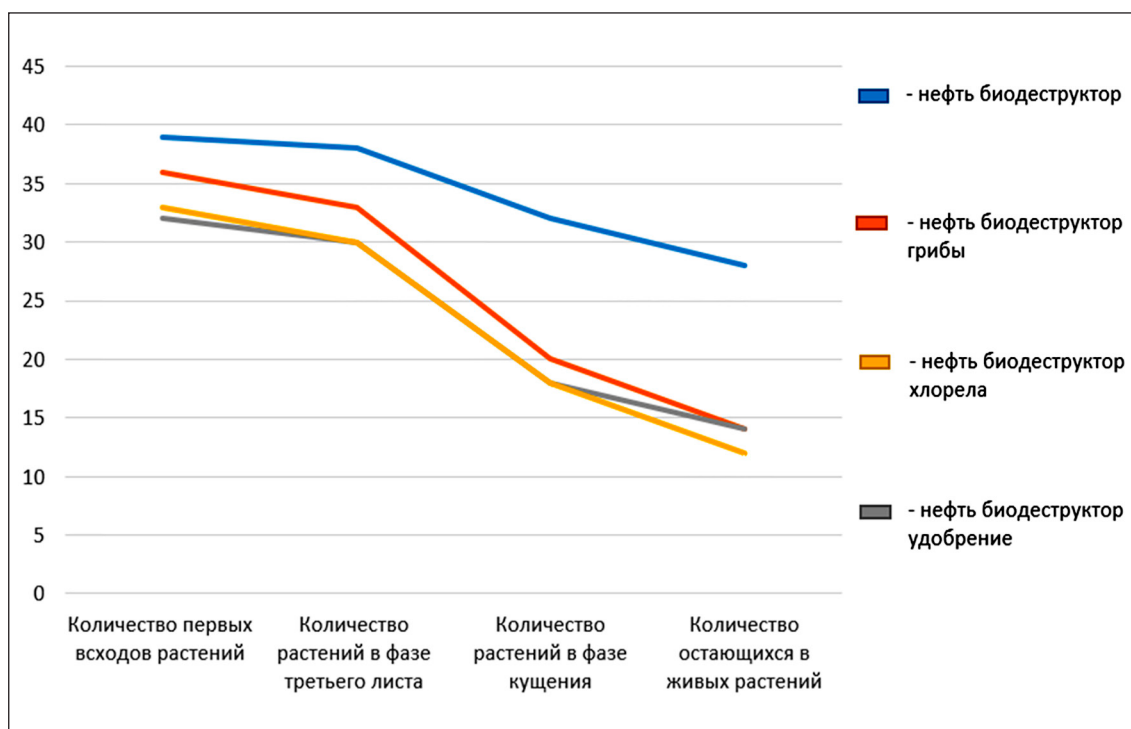


Рис. 4. Сравнительный анализ проб: нефть + биодеструктор, нефть + биодеструктор + грибы, нефть + биодеструкторы + хлорелла, нефть + биодеструктор + удобрение
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

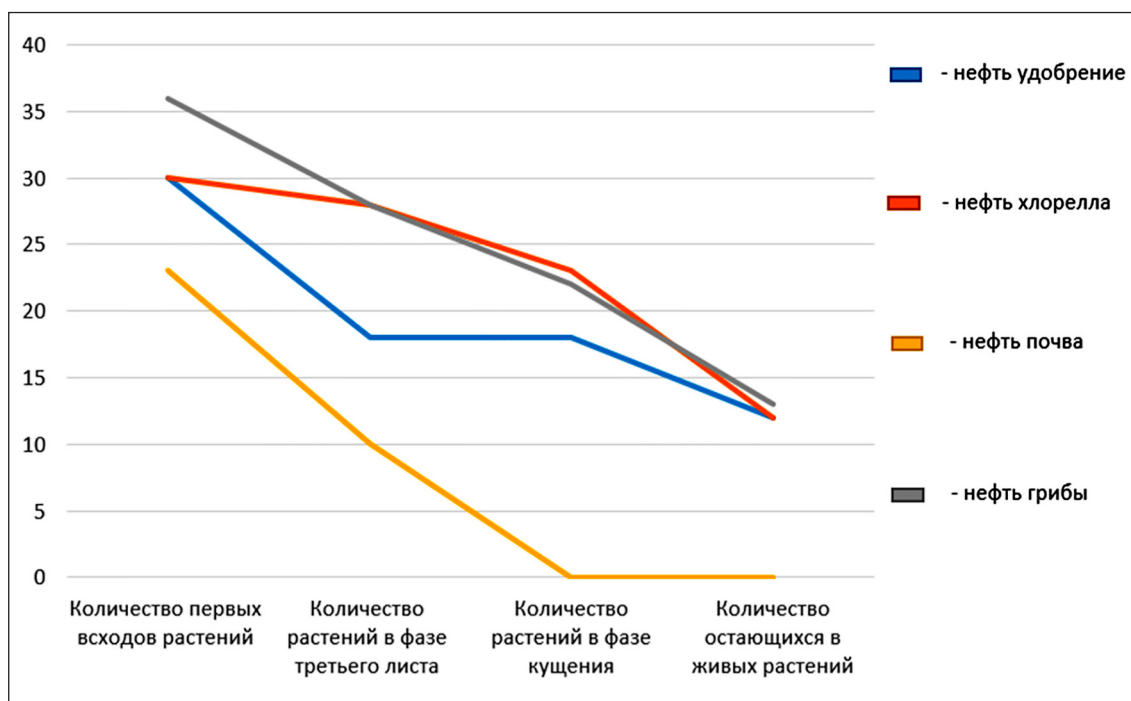


Рис. 5. Сравнительный анализ проб:
нефть + почва, нефть + грибы, нефть + хлорелла, нефть + удобрение
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Заключение

Как показали исследования, для рекультивации земель, загрязненных нефтью, самый лучший показатель имеет проба нефть + биодеструктор. По результатам исследования также получены неплохие показатели по пробам, где вместе с биодеструкторами одновременно участвовали усилители роста растений и удобрение. В пробах без присутствия биодеструктора: нефть + грибы, нефть + хлорелла, нефть + удобрение, по сравнению с пробой нефть + почва, результаты также оказались выше, лучше и требуют внимания для дальнейшего исследования (рис. 4, 5). Последний показатель имеет особое значение в связи большими затратами в приобретении и в применении биодеструкторов. Авторы считают, что в случае небольших разливов нефти можно будет применять только удобрения и усилители роста растений, что будет экономически выгодно для предприятий. Поэтому в этом направлении необходимо проводить более серьезные исследования, но уже в полевых условиях. Результаты исследования могут быть применены нефтяными компаниями на время проведения рекультивационных мероприятий на территориях загрязненных нефтью.

Список литературы

1. Колесникова Д.С., Петухова В.С. Воздействие нефти и нефтепродуктов на свойства почв и растений // Вестник науки. 2024. № 12 (81). Т. 3. С. 2112–2116. URL: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/19999> (дата обращения: 05.05.2025).
2. Трофимов С.Я., Ковалева Е.И., Аветов Н.А., Толпешта И.И. Исследования нефтезагрязненных почв и перспективные подходы к их ремедиации // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-neftezagryaznennyh-pochv-i-perspektivnye-podhody-k-ih-remediatsii> (дата обращения: 05.05.2025).
3. Руденко Е.Ю. Исследование влияния нефти на биологическую активность черноземной почвы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. № 10 (4). С. 719–727. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-719-727 (дата обращения: 04.05.2025).
4. Тавадзе Б.Д. Влияние биодеструкторов в процессе детоксикации поллютантов на загрязненных почвах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 4. С. 29–35. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=13527> (дата обращения: 05.05.2025).
5. Тавадзе Б.Д., Белокурова Е.В. Применение биоремедиации в лабораторных условиях для очистки почв, загрязненных нефтепродуктами, и ее экономическая эффективность // Успехи современного естествознания. 2024. № 5. С. 84–89. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38270> (дата обращения: 03.05.2025).
6. Tavadze B.D., Valieva A.F. Comparative analysis of biodestructors used in bioremediation at land reclamation contaminated with. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1010 (1). № 012008. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/360053041_Comparative_analysis_of_biodestructors_used_in_bioremediation_at_land_reclamation_contaminated_with (дата обращения: 03.05.2025). DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012008.

7. Быкова М.В., Пашкевич М.А. Оценка нефтезагрязненности почв производственных объектов различных почвенно-климатических зон Российской Федерации // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 46–59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-neftezagryaznennosti-pochv-proizvodstvennyh-obektov-razlichnyh-pochvenno-klimaticheskikh-zon-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 05.05.2025).
8. Самсонова Н.Е. Основы минерального питания растений и технологий применения удобрений: учебное пособие. Смоленск: ФГБОУ ВО «Смоленская ГСХА», 2021. 256 с.
9. Осипов А.И., Якушев В.П., Якушев В.В. История научных исследований в агрохимии и перспективы применения удобрений // Агрохимический вестник. 2020. № 2. С. 73–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-nauchnyh-issledovaniy-v-agrohimii-i-perspektivy-primeneniya-udobreniy-v-rossii> (дата обращения: 03.05.2025).
10. Долгополова Н.В., Малышева Е.В., Нагорных А.В., Воронина А.А., Ковынев Б.М. Об агрофизических свойствах почвенного слоя // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 7. С. 18–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-agrofizicheskikh-svoystvah-pochvennogo-sloya> (дата обращения: 05.05.2025).
11. Носова М.В., Середина В.П., Стовбунник С.А. Изменения почв под влиянием загрязнения сырой нефтью и минерализованными жидкостями в условиях Среднего Приобья Западной Сибири // Трансформация экосистем. 2023. № 2 (20). С. 64–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeneniya-pochv-pod-vliyaniem-zagryazneniya-syroy-neftyu-i-mineralizovannymi-zhidkostyami-v-usloviyah-srednego-priobya-zapadnoy> (дата обращения: 03.05.2025).
12. Макаров М.Р., Макаров В.М. Влияние минеральных удобрений на содержание азота, фосфора и калия в растениях подсолнечника // Современные научные исследования и инновации. 2025. № 2. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2025/02/103071> (дата обращения: 03.05.2025).
13. Дмитриева И.Г., Сидак П.В., Нитименко Д.О., Нитименко А.А. Изучение влияния новых регуляторов роста на продуктивность озимой пшеницы в условиях Краснодарского края // Земледелие. 2025. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vliyaniya-novyh-regulyatorov-rosta-na-produktivnost-ozimoy-pshenitsy-v-usloviyah-krasnodarskogo-kraya> (дата обращения: 03.05.2025).
14. Закирова Р.П., Рахимова Ш.Х., Халикова М.Б., Маматкулова Н.М., Калацкая Ж.Н., Ламан Н.А., Мусаев Х.А., Кутлиева У.Г. Влияние регуляторов роста на основе полипреолов на биохимические показатели проростков пшеницы (*triticum aestivum* L.) // Universum: химия и биология: электронный научный журнал. 2024. № 1 (115). URL: <https://universum.com/ru/nature/archive/item/16417> (дата обращения: 04.05.2025).
15. Баранов С.Г. Апробация метода геометрической морфометрии на примере листовых пластин пшеницы // Успехи современного естествознания. 2023. № 6. С. 14–20. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38047> (дата обращения: 03.05.2025).

СТАТЬИ

УДК 622.4:551

DOI 10.17513/use.38402

АНАЛИЗ МЕТЕОДААННЫХ НА КРАЮ КАРЬЕРА КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ «МИР»

Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышева А.А.,
Невзорова И.В., Одинцов С.Л.

*ФГБУН Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, e-mail: nevzorova@iao.ru*

В статье представлены результаты анализа экспериментальных данных по скорости и направлению ветра, а также по некоторым характеристикам турбулентности, полученным в сложных орографических условиях – на краю карьера кимберлитовой трубки «Мир» (г. Мирный, Республика Саха (Якутия)). Измерения проводились с использованием ультразвуковой метеостанции «Метео-2» на высоте 10 м от уровня подстилающей поверхности. Рассмотрено два периода измерений – с июня по август 2023 г. и с ноября 2023 г. по февраль 2024 г. Приведена статистика скорости и направления ветра для этих периодов. Рассмотрена взаимосвязь кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла со скоростью и направлением ветра. Обсуждаются особенности этих взаимосвязей. В частности, как в летний, так и в зимний период при ветре с «материка» на карьер вертикальный турбулентный поток тепла в целом имеет положительные значения и увеличивается с увеличением «фоновой» скорости ветра. При ветре с карьера на точку наблюдения в летнее время наблюдается противоположная закономерность – при увеличении «фоновой» ветра поток тепла стремится к отрицательным значениям. Для зимних условий при данном направлении ветра какая-либо взаимосвязь между потоком тепла и скоростью «фоновой» ветра практически отсутствует. Полученные результаты могут быть полезны при изучении процессов перераспределения аэрозольных и газовых загрязнений в глубоких карьерах.

Ключевые слова: атмосфера, аэротермодинамические процессы, глубокий карьер, метеорологические параметры, турбулентность

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DATA AT THE EDGE OF THE MIR KIMBERLITE PIPE QUARRY

Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamysheva A.A.,
Nevzorova I.V., Odintsov S.L.

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: nevzorova@iao.ru*

Experimental data on the wind speed and direction, as well as some turbulence characteristics, obtained under complex orographic conditions, namely, at the edge of the Mir kimberlite pipe quarry (city of Mirny, Republic of Sakha Yakutia, Russia) are analyzed. The measurements were conducted with the Meteo-2 ultrasonic weather station at a height of 10 m above the underlying surface. Two measurement periods (June-August of 2023 and November 2023 – February 2024) are examined. The statistics of the wind speed and direction for these periods is presented. The correlations of the wind speed and direction with the turbulence kinetic energy and vertical turbulent heat flux are considered, and features of these correlations are discussed. In particular, in the summer and in the winter, in the wind from the “mainland” to the quarry, the vertical turbulent heat flow as a whole has positive values and increases with an increase in the “background” wind speed. In the wind from the quarry to the observation point in the summer, the opposite pattern is observed – with an increase in the “background” wind, the flow of heat strives for negative values. For winter conditions under this direction of wind, any relationship between the heat flow and the speed of the “background” wind is practically absent. The results obtained can be useful when studying the processes of redistribution of aerosol and gas pollution in deep quarries.

Keywords: atmosphere, aerothermodynamic processes, deep quarry, meteorological parameters, turbulence

Введение

Одной из важных экологических проблем является загрязнение воздуха аэрозолем и вредными газами глубоких карьеров. Об актуальности данной проблемы можно судить по оценкам времени, когда в таких условиях загрязняющие воздух примеси превышают предельно допустимые концентрации [1, 2]. Ее решению посвящен ряд публикаций, связанных как с модели-

рованием аэротермодинамических процессов, так и с обсуждением возможных методов принудительной вентиляции карьеров для уменьшения степени загрязненности воздуха. В частности, в публикациях [3–5] представлены результаты моделирования циркуляции воздуха в глубоких карьерах с учетом характеристик «фоновой» ветрового поля. В материалах [6–8] оценивается в том числе эффективность естественного

проветривания карьеров. Особую важность при этом имеет влияние температурной стратификации на концентрацию загрязняющих примесей, что специально обсуждается, например, в [9, 10] и в ряде предыдущих ссылок. При разработке методов принудительной вентиляции карьеров также приходится учитывать текущие метеорологические условия. Это касается как чисто «механических» способов проветривания [11, 12], так и более сложных (комплексных) методик удаления из карьеров примесей, загрязняющих воздух [13, 14]. Для моделирования (прогноза) аэротермодинамических процессов в условиях глубоких карьеров и при реализации методов уменьшения загрязненности воздуха необходимы базы данных по основным метеорологическим параметрам в различные сезоны года и время суток. Такие базы использовались, например, в работах [15, 16] и в некоторых из отмеченных ранее публикаций. Понятно, что для более эффективного анализа особенностей циркуляции воздуха в карьерах желательно иметь как можно больше экспериментальных данных по скорости ветра и температуре воздуха, включая характеристики турбулентности.

В представленном далее материале рассматриваются некоторые характеристики турбулентности, полученные на верхней границе (на первом рабочем уступе) карьера кимберлитовой трубки «Мир» в г. Мирный, Республика Саха (Якутия) за период с 3 мая 2023 г. по 3 мая 2024 г. В данном пункте работал комплекс оборудования в составе акустического метеорологического лоатора (сонара) «Волна-4М» и ультразвуковых метеостанций (УЗМ) «Метео-2». Оба вида приборов – разработка Института оптики атмосферы СО РАН. Сонар обеспечивал измерение скорости и направления ветра в диапазоне высот 30–300 м от уровня размещения (с шагом по высоте 10 м), а две УЗМ – измерение трех ортогональных компонентов вектора ветра, температуры и влажности воздуха, а также атмосферного давления на высотах 5 и 10 м.

Поскольку наименее изученной в условиях глубоких карьеров является турбулентность, то были рассмотрены две ее характеристики – кинетическая энергия (КЭТ), как индикатор возмущенности потока ветра, и вертикальный турбулентный поток тепла, как индикатор потоков консервативных примесей (аэрозоля, газов). Эти характеристики входят практически во все уравнения для моделирования про-

цессов в рассматриваемых условиях (см., например, [6]). Далее для анализа используются результаты измерений с помощью УЗМ на высоте 10 м (от уровня площадки). Понятно, что результаты в единственной точке вблизи верхней границы карьера не могут служить основой для полномасштабного моделирования аэротермодинамических процессов по всему карьере. Но как «контрольную» точку эти результаты использовать можно.

Цель исследования – с использованием экспериментальных данных провести анализ зависимости кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла от скорости и направления среднего ветра в разные сезоны года на краю глубокого карьера.

Материалы и методы исследования

Общий вид карьера приведен на рис. 1, а. Его диаметр составляет примерно 1200 м, глубина карьера около 500 м (карьер частично залит водой). На этом же рисунке показан пункт размещения измерительного комплекса с северо-западной (рис. 1, б) и юго-западной (рис. 1, в) сторон. Метеорологические величины, измеряемые с помощью УЗМ, непрерывно регистрировались с частотой 10 Гц. Для их обработки использовалось специализированное программное обеспечение. Выделение турбулентных составляющих проводилось путем вычитания из исходных выборок скользящих средних метеорологических величин с «временным окном» 120 с. Рассматривались продольные, поперечные и вертикальные составляющие вектора ветра. Скорость продольного ветра определялась вдоль среднего направления ветра, которое, в свою очередь, вычислялось по осредненным горизонтальным компонентам вектора ветра «север – юг / запад – восток». Более подробно с методикой обработки можно ознакомиться, например, в публикации [17].

Далее используются следующие обозначения. По ветру: U , W – средние значения скорости продольного и вертикального ветра (м/с), u' , v' , w' – турбулентные составляющие продольного, поперечного и вертикального ветра (м/с) и соответствующие им дисперсии $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ (м²/с²), V_h – среднее значение модуля скорости горизонтального ветра (м/с), φ – направление среднего ветра (градусы; азимут, откуда дует ветер). По температуре: T – среднее значение температуры, T' – турбулентная составляющая температуры.



Рис. 1. Вид на карьер: (а) сверху, (б) с северо-запада, (в) с юго-запада (фото авторов)

Величина кинетической энергии турбулентности определялась по формуле

$$E = 0,5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2),$$

а вертикальный турбулентный поток тепла – по формуле $Q = c_p \rho w' T'$ (Вт/м²), где $c_p = 1006$ (Дж/(кг·К)), ρ – плотность воздуха (кг/м³), черта над произведением – знак осреднения по интервалу времени Δt . Основные результаты, представленные далее, получены при $\Delta t = 10$ мин.

Для анализа были выбраны следующие интервалы времени: летний – с июня по ав-

густ 2023 г. (1981 ч наблюдений), и зимний – с ноября 2023 г. по февраль 2024 г. (2565 ч наблюдений).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа метеорологических параметров в пункте наблюдения представлены далее в основном в графическом виде. Такой формат авторы считают наиболее оптимальным для иллюстрации сделанных в итоге выводов.

На рис. 2 представлена общая метеорологическая ситуация в выбранных эпизодах.

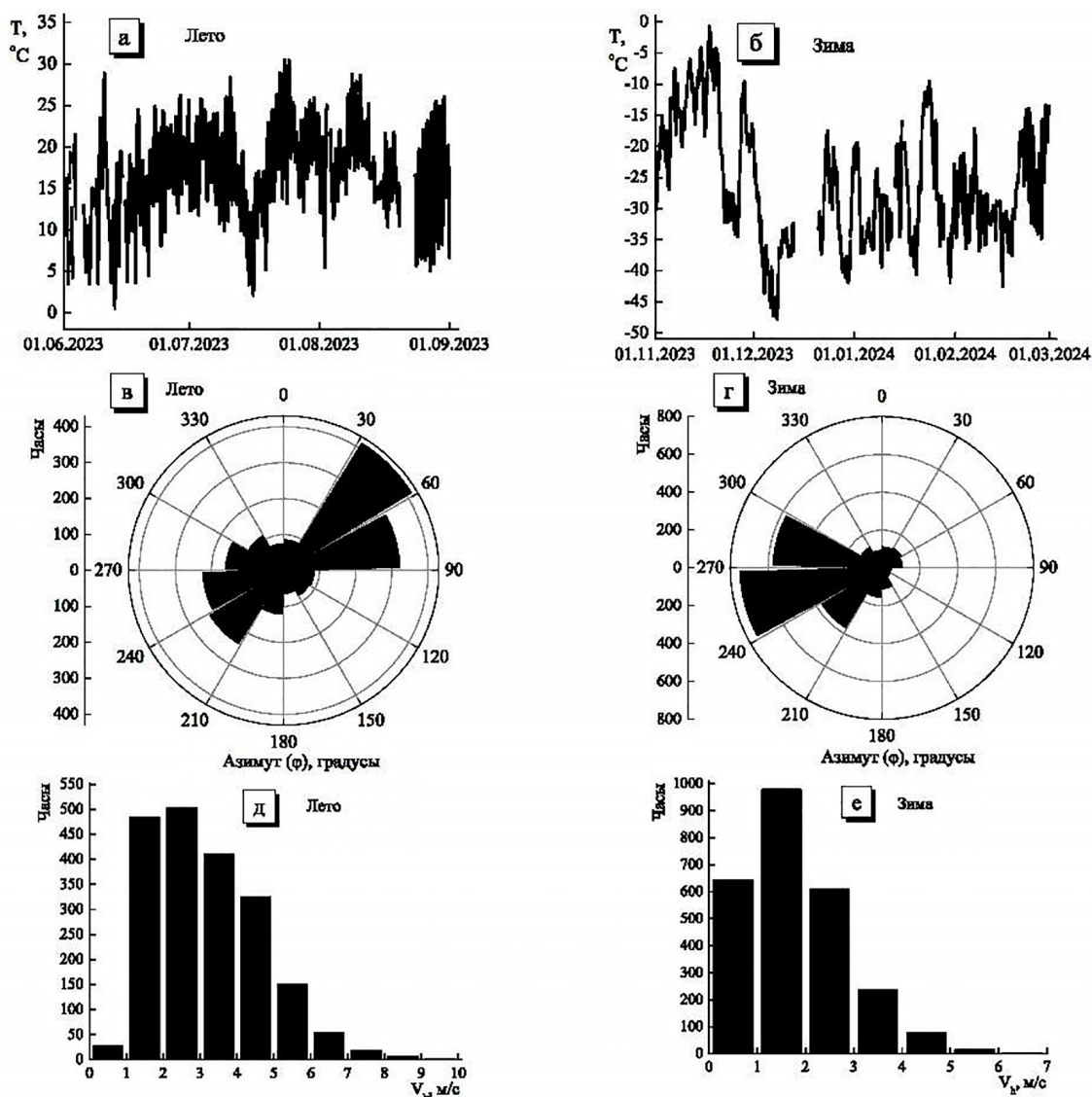


Рис. 2. Температура воздуха (а, б), гистограммы направления (в, г) и скорости (д, е) ветра на высоте 10 м в летний (а, в, д) и зимний (б, г, е) периоды
 Источник: составлено авторами

В левой колонке рисунка 2 показаны данные по летнему эпизоду, а в правой – по зимнему. Графики температуры воздуха приведены на рис. 2, а, б. Суммарная продолжительность ветра с тех или иных направлений (в секторах по 30°) демонстрируется на рис. 2, в, г. Отмечено, что в летнем эпизоде (рис. 2, в) направление ветра из диапазона $0-180^\circ$ по длительности примерно совпадало с направлением из диапазона $180-360^\circ$ (хотя и с разной продолжительностью в отдельных секторах). А в зимнее время (рис. 2, г) примерно в 65 % времени направление ветра соответствовало диапазону $210-300^\circ$ и в 80 % – диапазону $180-360^\circ$.

Скорость ветра на высоте 10 м в летний сезон в целом была больше, чем в зимнее время. Это продемонстрировано на гистограммах (рис. 2, д, е). Отмечено, что в зимнее время довольно часто (примерно 25 % времени) реализовались ситуации, близкие к штилю (диапазон скорости $0-1 \text{ м/с}$). Летом штиль практически отсутствовал.

На рис. 3, а–г, приведена взаимосвязь скорости и направления ветра. Левая колонка графиков – летний эпизод, правая – зимний. Эта взаимосвязь представлена в двух форматах. Первый формат – «облако» точек, соответствующих 10-минутным интервалам измерения (рис. 3, а, б).

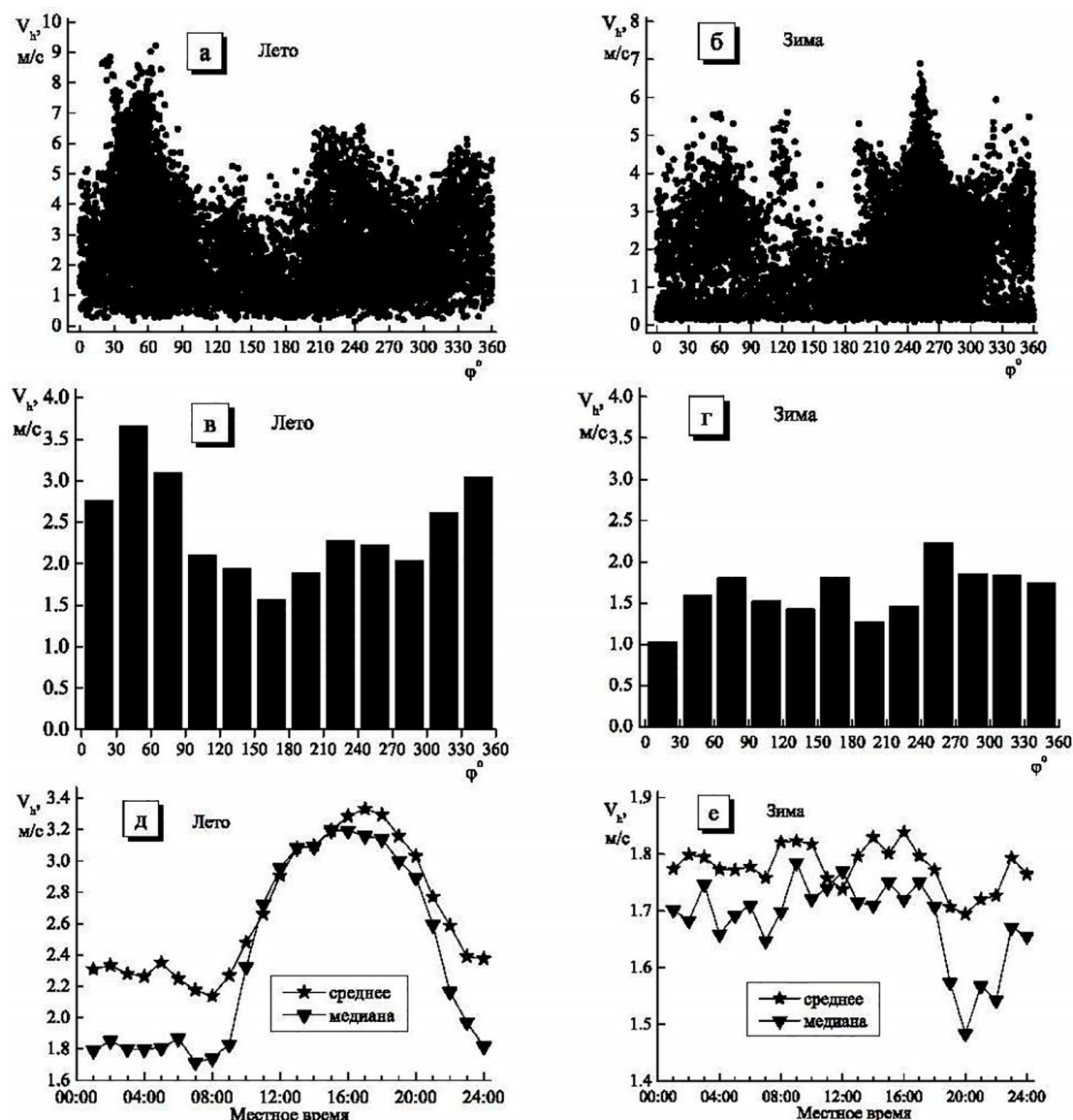


Рис. 3. Значения скорости ветра за 10-минутные интервалы на высоте 10 м при разных направлениях ветра (а, б), средние значения скорости ветра в отдельных секторах направления ветра (в, г), средний суточный ход скорости ветра (д, е).

Левая колонка графиков – летний период, правая колонка – зимний период

Источник: составлено авторами

Второй формат – средние значения скорости ветра за сезон в том или ином диапазоне направления ветра (рис. 3, в, г). Статистическая обеспеченность оценок средних значений скорости ветра в разных диапазонах направлений существенно различается и может быть оценена по результатам на рис. 2, в, г. Особенно слабая она в зимний период вне диапазона направлений 210–300°. Полезной может быть информация о среднем суточном ходе скорости ветра. На рис. 3, д, е, приведены такие оценки для летнего и зимнего периодов на часовых интервалах.

Причем приведены не только выборочные средние скорости за час, но и ее медианные значения. Различие этих величин свидетельствует о несимметричности плотности распределения скорости ветра. В частности, если медианное значение на каком-либо часовом интервале существенно меньше среднего, то в обработанной выборке имели место большие по скорости, но непродолжительные ветра. Согласно рис. 3, д, е, средний суточный ход был хорошо выражен лишь в летнее время. Зимой только к концу суток наступало определенное затишье,

но при этом были и сильные кратковременные ветра, вносившие существенный вклад в оценку средних значений. Для направле-

ния ветра, как в летнее, так и в зимнее время средний суточный ход отсутствовал. Этот вывод оставлен без иллюстраций.

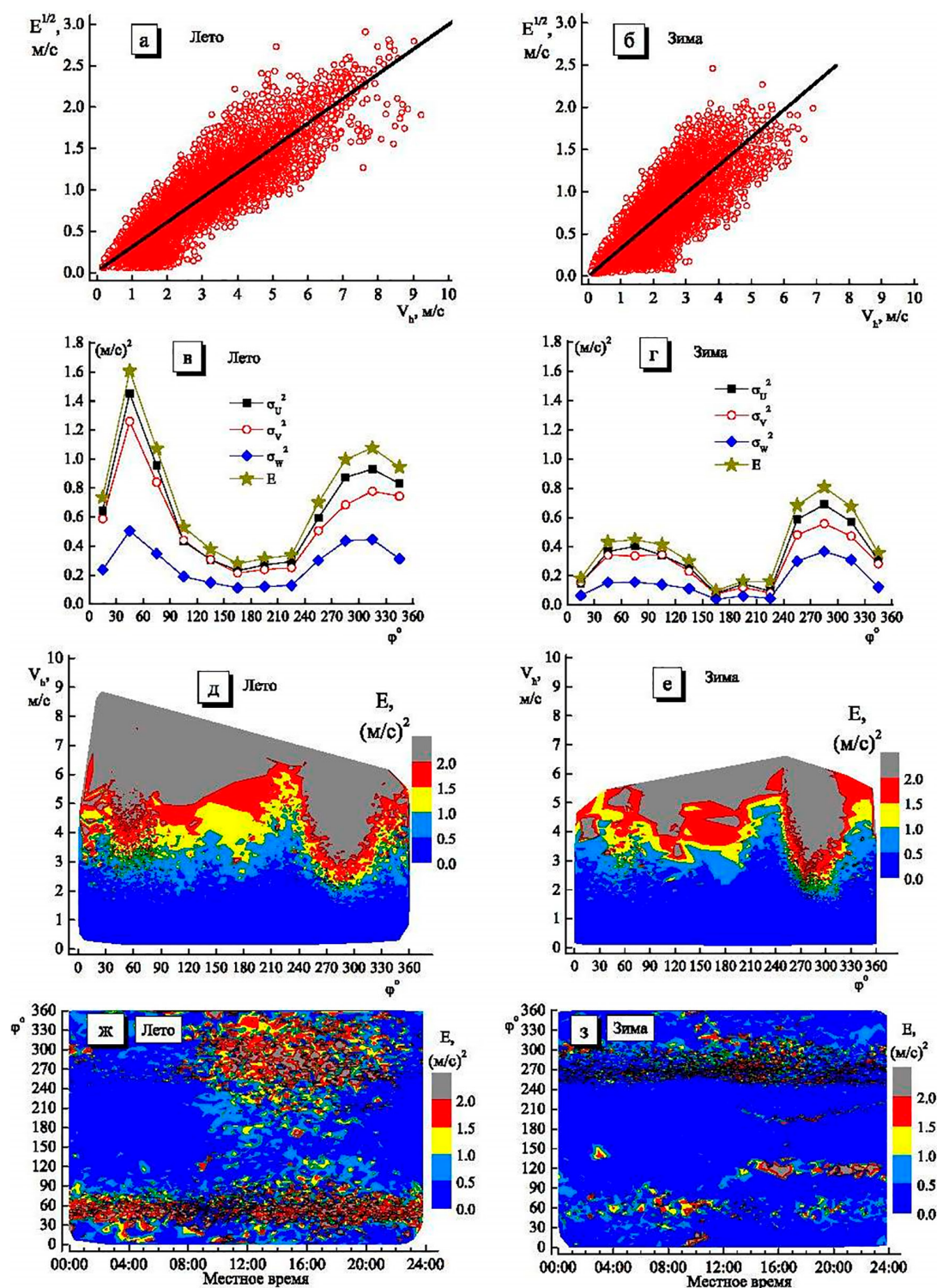


Рис. 4. Зависимость КЭТ от скорости ветра (а, б), зависимость КЭТ и дисперсий компонент вектора ветра от направления ветра (в, г), взаимосвязь КЭТ со скоростью и направлением ветра (д, е), суточный ход КЭТ при разных направлениях ветра (ж, з).

Левая колонка графиков – летний период, правая – зимний

Источник: составлено авторами

*Кинетическая энергия
турбулентности*

Далее рассмотрены результаты по кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и в первую очередь ее взаимосвязь со скоростью и направлением ветра. На рис. 4, а, б, приведены «облака» экспериментальных значений $\sqrt{E}(V_h)$, где каждая точка соответствует 10-минутному интервалу осреднения (левая колонка графиков – лето, правая – зима). Здесь же прямыми линиями обозначены результаты линейной аппроксимации этой зависимости, то есть $E^{1/2} \approx a + b \cdot V_h$. В летнем эпизоде $a \approx 0,017$, $b \approx 0,3$, а в зимнем – $a \approx 0,0014$, $b \approx 0,33$. Коэффициенты детерминации этих аппроксимаций не очень высокие (летом 0,797, зимой 0,702). Для обоих сезонов года взаимосвязь КЭТ со скоростью ветра в целом однотипна.

Связь КЭТ с направлением ветра продемонстрирована на рис. 4, в, г (КЭТ – звездочки на графиках). В данном случае было проведено осреднение КЭТ в каждом из 30-градусных секторов направления. Здесь же для справки приведены и осредненные значения дисперсий ортогональных компонентов вектора ветра, формирующие величину КЭТ. Сразу обращает на себя внимание «бимодальность» зависимости $E(\varphi)$ как в летнее, так и в зимнее время. Причем в летнее время поток ветра со стороны карьера на точку наблюдения (грубо – из диапазона $30^\circ < \varphi < 90^\circ$) приводит к существенно большим значениям КЭТ, чем в летнее время. Однако и средняя скорость ветра в этом диапазоне направлений летом больше, чем зимой (рис. 3, а–г).

Отмечена также существенная анизотропия турбулентности (различие дисперсий компонентов вектора ветра), особенно при направлении ветра с западных румбов. Взаимосвязь КЭТ одновременно со скоростью и направлением ветра $E(V_h, \varphi)$ демонстрируется на рис. 4, д, е. Градация КЭТ по величине приведена справа от графиков. Эти графики построены фактически по координатам точек на рис. 3, а, б, то есть по результатам с 10-минутным осреднением. Каждой точке на графиках рис. 3, а, б, соответствует свое значение КЭТ. При построении графиков на рис. 4, д, е, области с отсутствием точек (рис. 3, а, б) заполнены вероятными значениями КЭТ из-за использования процедуры сглаживания. Сразу же обращает на себя внимание область направлений (грубо $270\text{--}300^\circ$), где даже при небольших скоростях ветра величина КЭТ

в пункте наблюдения принимает большие значения, как в летнее, так и в зимнее время. Статистическая обеспеченность оценок в этой области как по скорости, так и по направлению ветра достаточно высокая (см. «облака» точек на рис. 3, а, б).

В заключение изложения результатов, связанных с КЭТ, на рис. 4, ж, з, приводится средний суточный ход КЭТ одновременно и как функция направления ветра. Градация КЭТ по величине указана справа от графиков. При построении данного рисунка вновь использованы 10-минутные оценки КЭТ. Поэтому имеет место такая высокая степень «пятнистости» графиков, несмотря на использование процедуры сглаживания. Очевидно, что суточный ход величины КЭТ в какой-то мере выражен только в летнее время, он определяется, видимо, суточным ходом скорости ветра (рис. 3, д, е). При этом в летнее время в диапазоне направлений (грубо) $30\text{--}60^\circ$ величина КЭТ может иметь большие значения вне зависимости от времени суток.

*Вертикальный турбулентный
поток тепла*

Так же был рассмотрен вертикальный турбулентный поток тепла, который может служить индикатором турбулентного переноса и других консервативных примесей (аэрозоля, газов). Понятно, что результаты в значительной степени связаны с конкретной орографией в пункте наблюдения. Тем не менее материал может быть полезен для понимания процессов турбулентного теплообмена и в других подобных условиях.

На рис. 5, а, б, представлена взаимосвязь потока тепла Q с направлением ветра для заданных периодов (сезонов) года. «Облака» мелких точек на графиках соответствуют 10-минутным интервалам осреднения. Здесь же крупными символами указаны их осредненные значения по 30-градусным секторам направления ветра. Вертикальными отрезками показаны оценки среднеквадратических отклонений. Графики приведены в едином формате для более удобного сопоставления результатов в разные сезоны года. В зимнее время (рис. 5, б) диапазон вариаций Q заметно меньше, чем в летнее (рис. 5, а).

Необходимо отметить, что при ветре с западных румбов (с «материка» в сторону карьера через пункт наблюдения) как летом, так и зимой положительные потоки тепла могут быть существенно больше (как

в среднем, так и по 10-минутным интервалам) по сравнению с другими направлениями ветра. В то же время для этих румбов наблюдается «противофаза» в поведении средней скорости вертикального ветра W (рис. 5, в, г): как в среднем (по секторам), так и по 10-минутным интервалам она имеет в целом отрицательные значения. При сравнении рис. 5, а, и рис. 5, в, обращает на себя внимание проявление «противофазы» знаков Q и W в летнее время для северо-восточных румбов. Величина и знак вертикального ветра W при его направлении с юго-западных и северо-восточных румбов связаны с процессами «стока» в первом случае и «натекания на препятствие» во втором. Слабо выраженная область положительных значений W с северо-восточных румбов в зимнее время объясняется, видимо, слабой статистической обеспеченностью оценок (рис. 2, г) и небольшими скоростями горизонтального ветра (рис. 3, г).

На некоторых конкретных примерах были рассмотрены вариации Q и W в наиболее интересных диапазонах направления ветра. На рис. 6 приведены графики направления (φ) и скорости (V_h) среднего ветра, а также Q и W в период 18–22.07.2023. Этот эпизод характерен направлением ветра в основном с западных румбов (рис. 6, а; поток ветра с «материка» на карьер через точку наблюдения). На рис. 6–8 по оси абсцисс указаны только даты и месяц 2023 г.

Отмечен хорошо выраженный суточный ход скорости ветра V_h (рис. 6, в) и потока тепла Q (рис. 6, б). Поведение Q типично для летнего времени над равнинной местностью: днем существенные положительные значения, а ночью – отрицательные или близкие к нулю. При этом интенсивный турбулентный теплообмен происходит в основном при отрицательных (средних за 10 мин) значениях вертикального ветра W (ср. рис. 6, б, и рис. 6, г).

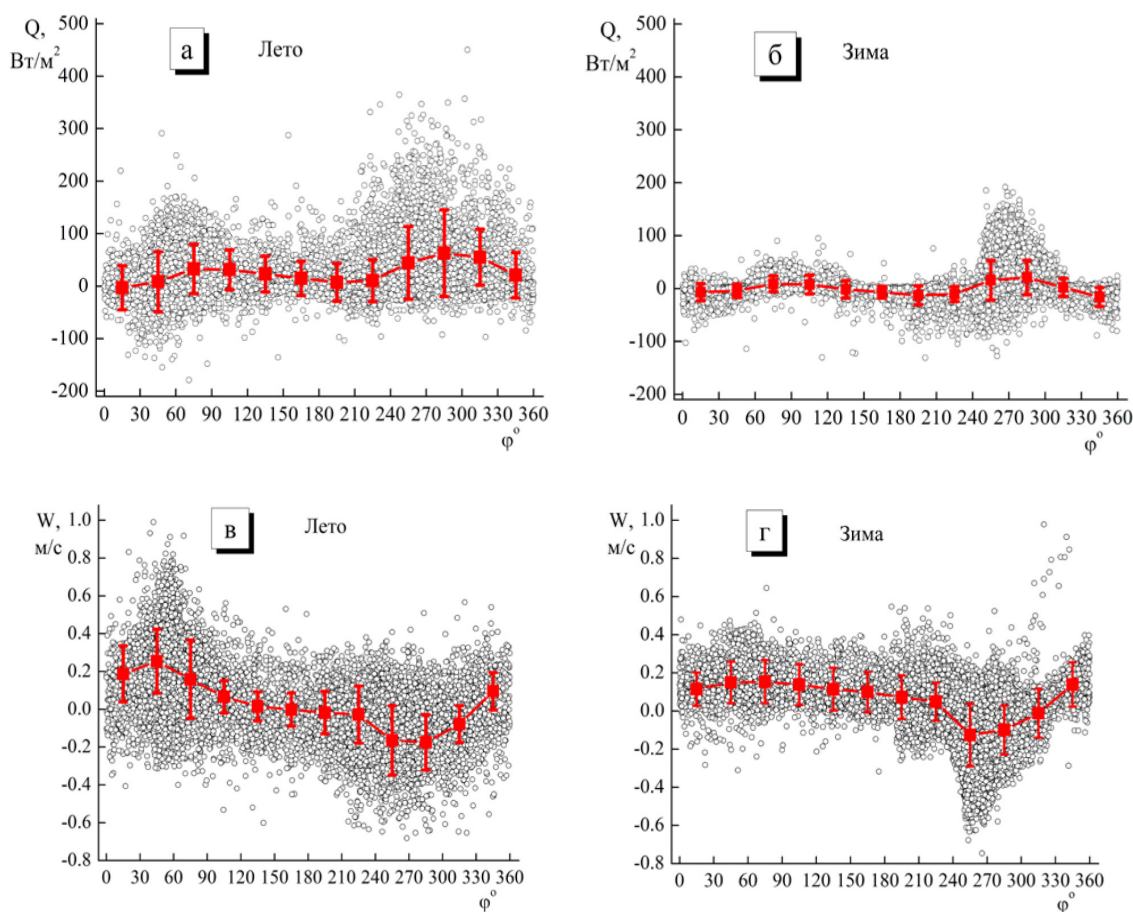


Рис. 5. Зависимость вертикального турбулентного потока тепла (а, б) и скорости вертикального ветра (в, г) от направления ветра: левая колонка графиков – летний период, правая – зимний
Источник: составлено авторами

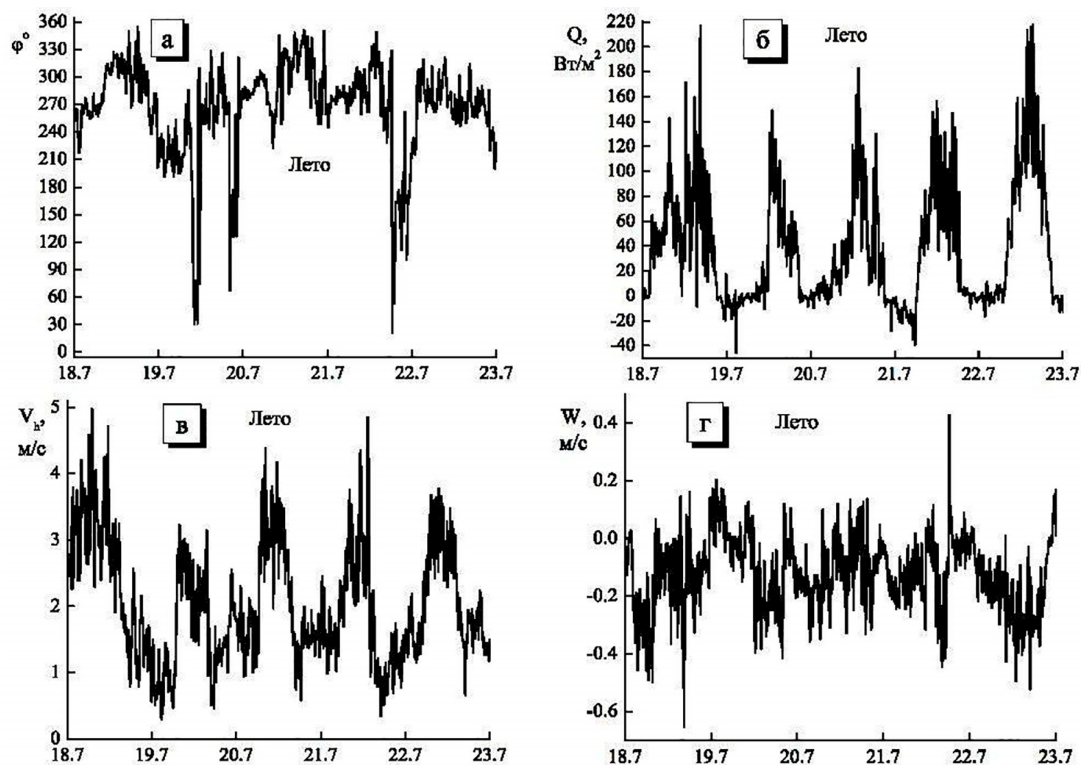


Рис. 6. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)
Источник: составлено авторами

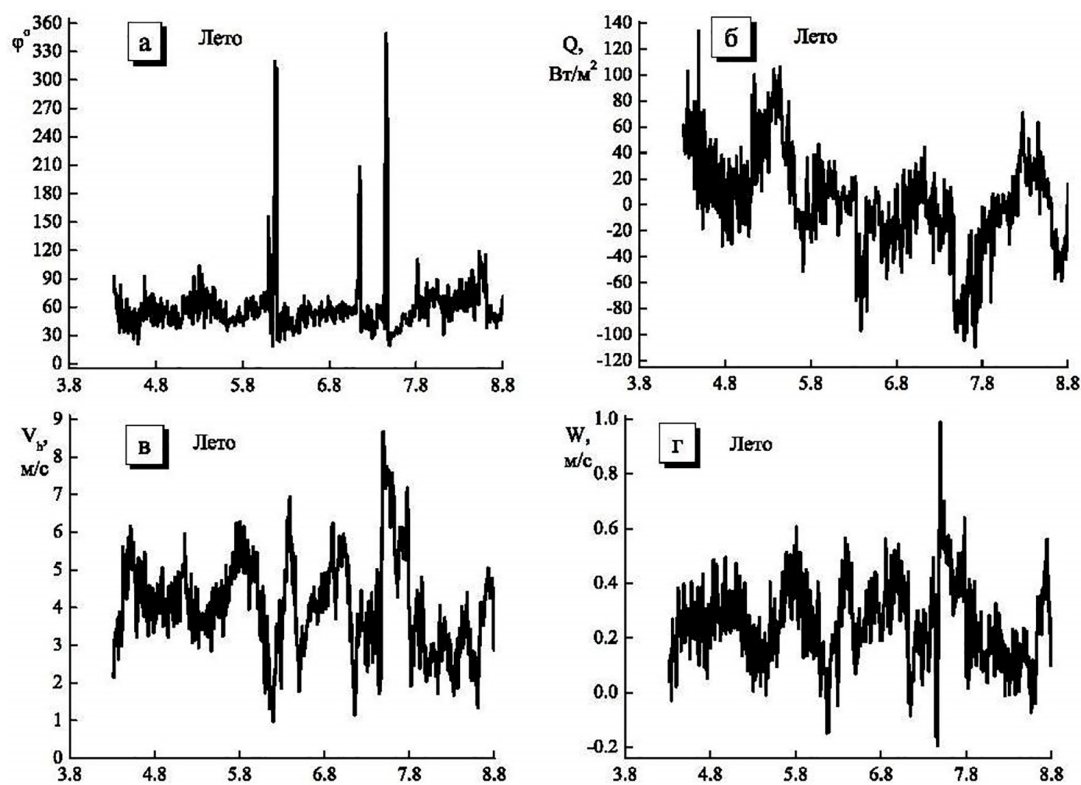


Рис. 7. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)
Источник: составлено авторами

На рис. 7 приведен пример для летнего сезона (3–7.08.2023), но при потоке ветра со стороны карьера на точку наблюдения, то есть с восточных – северо-восточных румбов (рис. 7, а). В этом случае вертикальная составляющая ветра W практически всегда была больше нуля (рис. 7, г). При этом суточный ход Q (рис. 7, б) и V_h (рис. 7, в) выражен не очень явно, существенно отличаясь от результатов, приведенных для рассмотренного выше летнего эпизода (рис. 6). Тут нет четкого пояснения, обусловлено ли это влиянием карьера или особенностями «фонов» потока, натекающего на карьер с восточных – северо-восточных румбов. Тем не менее некоторая взаимосвязь потока тепла Q со скоростями ветра V_h и W все же имеется.

Далее, на рис. 8 представлен пример результатов для зимнего сезона (9–15.11.2023), характерных при направлении ветра с западных румбов, когда имеется специфическая взаимосвязь между Q и W (рис. 5, б, г).

В этом эпизоде есть интервал времени (13 и 14 ноября) с существенным отклонением направления ветра от западных румбов (рис. 8, а). Этот интервал включен для демонстрации изменения взаимосвязи величин Q и W . Здесь отмечено отсут-

ствие выраженного суточного хода для всех представленных на рис. 8 параметров, в отличие от летнего эпизода 18–22.07.2023 (рис. 6). И это характерно для всего зимнего периода, а не только для показанного на рис. 8 примера. Как и в случае летнего эпизода, в зимнее время при ветре с запада скорость его вертикальной составляющей в целом отрицательна, а турбулентные потоки тепла – положительны.

Далее приведено некоторое обобщение взаимосвязей величин Q с V_h и W . На рис. 9 показаны 2D-графики функции $Q(V_h, W)$ для двух диапазонов направлений ветра. В частности, на рис. 9, а, приведен график $Q(V_h, W)$ для летнего периода (01.06–31.08.2023) при направлении ветра из диапазона $210–300^\circ$ (с «материка» на карьер через точку наблюдения). Поток ветра из этого диапазона суммарно охватывал примерно треть (627 ч) от всего летнего периода (рис. 2, в). При этом примерно в 61 % времени поток тепла был положительным. Результаты на рис. 9, а, позволяют сделать вывод, что с увеличением средней скорости ветра V_h увеличивается скорость вертикального ветра W (со знаком минус) и существенно увеличивается вертикальный турбулентный поток тепла Q (со знаком плюс).

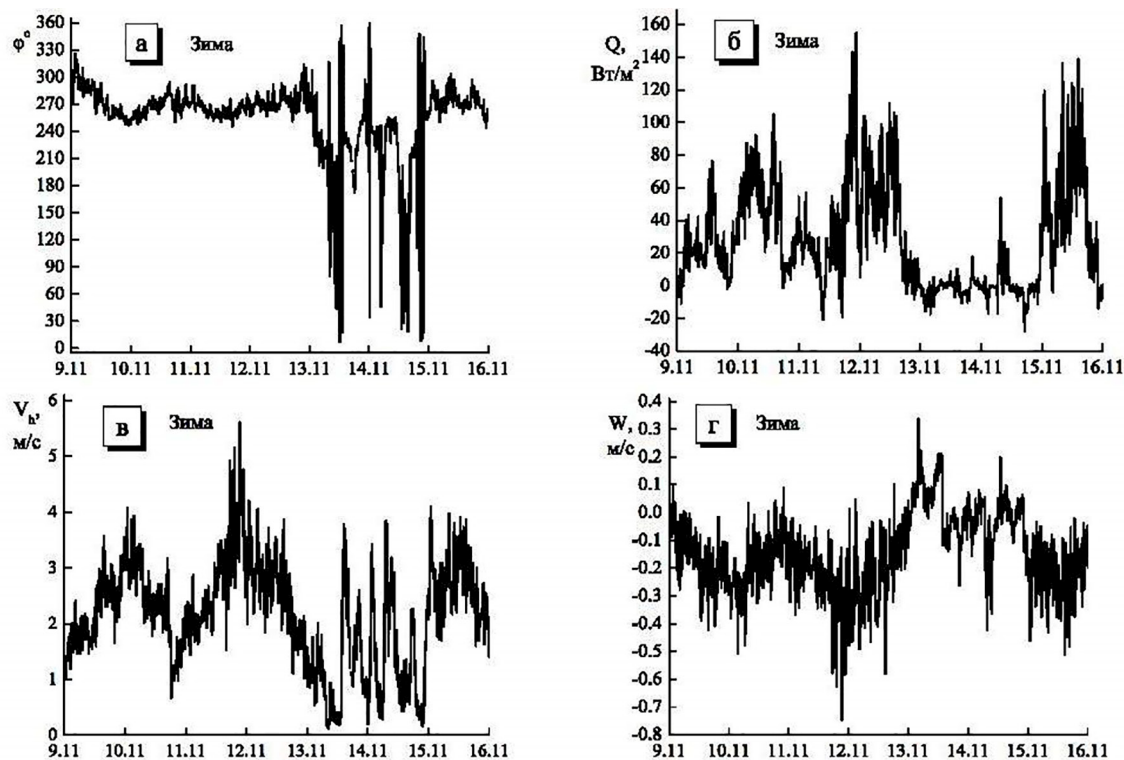


Рис. 8. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)

Источник: составлено авторами

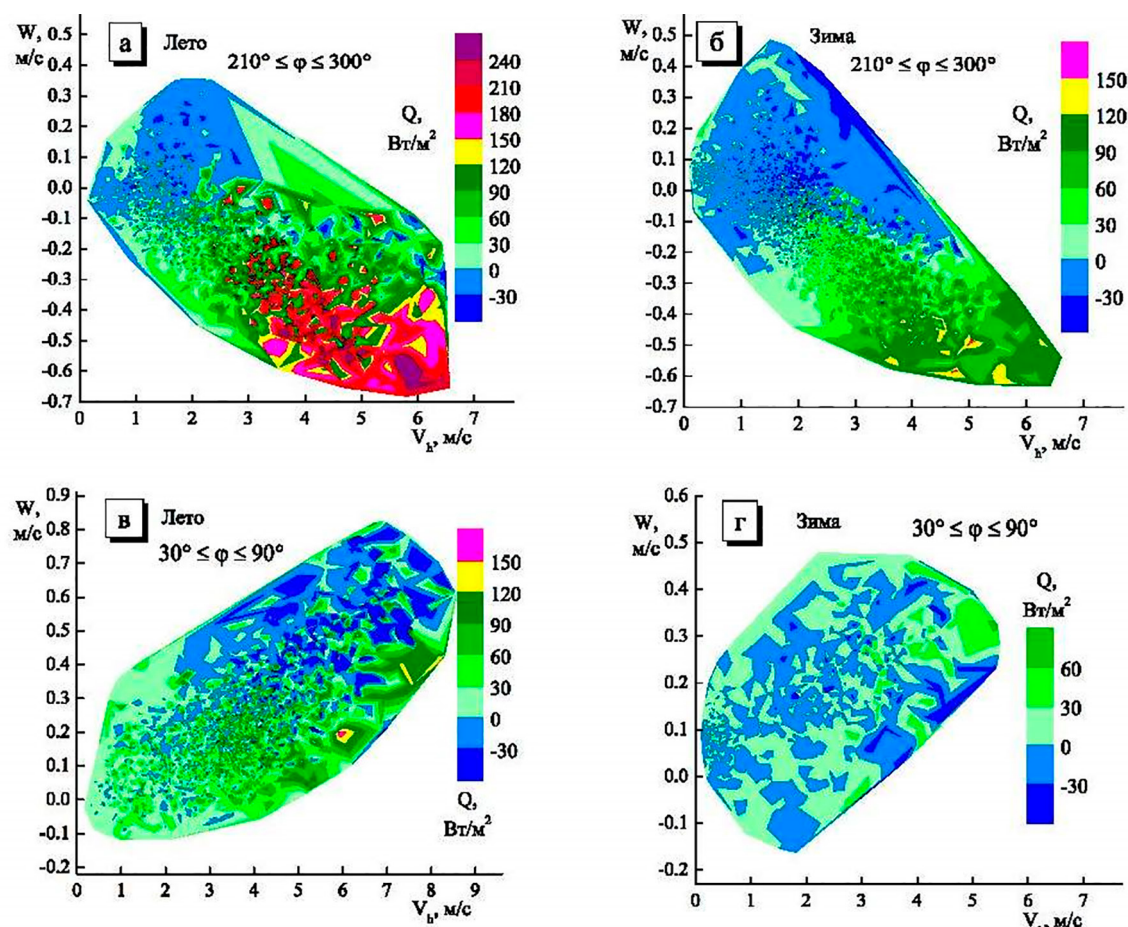


Рис. 9. Взаимосвязь вертикального турбулентного потока тепла со скоростью горизонтального и вертикального ветра при направлении ветра из двух различных секторов (указаны на рисунках) в летний (а, в) и зимний (б, г) периоды
Источник: составлено авторами

Такой же вывод имеет место для зимнего периода (01.11.2023–29.02.2024) при потоке ветра из диапазона направлений $210\text{--}300^\circ$ (рис. 9, б). Только значения (положительные) потока тепла Q при больших скоростях ветра меньше, чем для летнего периода. Статистическая обеспеченность этих результатов в целом высокая и составляет 1645 ч наблюдений (64% от общей длительности измерений в зимнем эпизоде). Положительные значения потока тепла зарегистрированы примерно в 53% времени.

Противоположные закономерности наблюдаются (рис. 9, в) в летнее время при направлении ветра из диапазона $30\text{--}90^\circ$ (от карьера на точку наблюдений; суммарно 737 ч; из них 70% времени с положительным потоком тепла): с ростом средней скорости ветра возрастает вертикальный ветер (со знаком плюс), а потоки тепла стремятся к отрицательным значениям. При ветре из этого же

диапазона направлений, но в зимнее время выраженное влияние вертикального и горизонтального ветра на турбулентный поток тепла отсутствует (рис. 9, г). Правда, этот вывод следует только из 230 ч наблюдений, когда в зимнее время ветер дул из сектора $30\text{--}90^\circ$. Положительный поток тепла присутствовал в 57% времени.

Следует принять во внимание, что представленные на рис. 9 графики на своих границах имеют не очень высокую статистическую обеспеченность, а также то, что графики построены с некоторым сглаживанием. Но это не меняет общую картину поведения функции $Q(V_h, W)$.

Есть еще одно замечание, связанное с разложением полей ветра и температуры воздуха только на две составляющие – детерминированную и турбулентную. Сложная орографическая структура может привести к появлению существенных мезомасштаб-

ных (мезогамма) вариаций этих полей. Это означает, что для более корректного моделирования аэротермодинамических процессов в глубоких карьерах следует включать в используемые для расчетов уравнения помимо детерминированных и турбулентных компонентов еще и вариации масштаба мезогамма. Предварительные результаты с оценками таких вариаций в случае карьера «Мир» опубликованы в [18]. Необходимость учета мезомасштабных вариаций полей ветра и температуры воздуха даже в «простых» (равнинных) условиях указана авторами в [19–21].

Заключение

Подводя итоги анализа влияния скорости и направления ветра на кинетическую энергию турбулентности и вертикальный турбулентный поток тепла на краю глубокого карьера, можно выделить следующее:

– Даже при небольших скоростях ветра величина КЭТ при направлении ветра с «материка» на карьер (на первый рабочий уступ) может принимать достаточно большие значения в любой сезон года. Средний суточный ход величины КЭТ хорошо выражен только в теплое время года и при ветре с западных румбов.

– Как в летний, так и в зимний период при ветре с «материка» на карьер вертикальный турбулентный поток тепла в целом имеет положительные значения и увеличивается с увеличением «фоновой» скорости ветра. При ветре с карьера на точку наблюдения в летнее время наблюдается противоположная закономерность: при увеличении «фоновой» ветра поток тепла стремится к отрицательным значениям. Для зимних условий при данном направлении ветра какая-либо взаимосвязь между потоком тепла и скоростью «фоновой» ветра практически отсутствует (возможно, из-за слабой статистической обеспеченности оценок).

Результаты предварительного сравнения измеренных на высотах 10 и 30 м (с помощью содара) значений скорости и направления ветра демонстрируют в ряде случаев заметное различие. В частности, примерно в 20 % времени скорость ветра на высоте 10 м была несколько больше, чем на высоте 30 м (в 3 % времени более чем на 1 м/с), вне зависимости от направления ветра (но в основном в летнее время). Полноценный совместный анализ результатов работы УЗМ и содара является отдельной задачей, которую планируется решить при дальнейших исследованиях

Список литературы

1. Месяц С.П., Петров А.А., Новожилова М.Ю., Аврина О.В. Оценка состояния атмосферы внутрикарьерного пространства на основе мониторинга метеоусловий, приводящих к скоплению загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 510–523. EDN: VGHOZL.
2. Козырев С.А., Амосов П.В. Моделирование выноса вредных примесей при проветривании глубоких карьеров с помощью вентиляционных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 390–398. EDN: VGHOPV.
3. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Учет вариативности метеорологических параметров атмосферного воздуха при выборе способа проветривания глубоких карьеров Арктической зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 8. С. 38–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_38.
4. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 178–182. EDN: TZKHEJ.
5. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. 3D компьютерное моделирование характера распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 399–403. EDN: VGHOSD.
6. Амосов П.В. Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 90–101. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101.
7. Амосов П.В., Бакланов А.А. Численное моделирование процессов естественного проветривания карьера при вариации его глубины в условиях инверсионного состояния атмосферы // Горная промышленность. 2023. № S5. С. 65–71. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S5-65-71.
8. Бублик С.А., Семин М.А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1 (86). С. 126–133. DOI: 10.7242/echo.2022.1.20.
9. Амосов П.В., Новожилова Н.В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 528–534. EDN: VGHAPR.
10. Драгунский О.Н. О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 5. С. 13–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.
11. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9–1. С. 149–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_149.
12. Ковлеков И.И. Интенсификация проветривания глубоких алмазных карьеров смерчеобразными вихрями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5–2. С. 124–135. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-52-0-124.
13. Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долкан А.А., Попов Е.В. Способы проветривания карьеров // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 6. С. 58. URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
14. Шахрай С.Г., Курчин Г.С., Сорокин А.Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 654–659. DOI: 10.31897/PML.2019.6.654.

15. Месяц С.П., Петров А.А. Методология оценки состояния атмосферы внутрикарьерного пространства глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 499–509. EDN: VGHOZB.
16. Федотова Ю.В., Зорин А.В. Анализ метеоданных системы мониторинга состояния атмосферы внутрикарьерного пространства и сейсмической активности массива для оценки устойчивости уступов рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 294–309. EDN: VGHOFB.
17. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 03. С. 212–220. DOI: 10.15372/AOO20190307.
18. Мамышева А.А., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Экспериментальная оценка мезомасштабной составляющей ветра над карьером кимберлитовой трубки МИР // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXX Международного симпозиума (Санкт-Петербург, 01–05 июля 2024 г.). Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. С. D209–D214. ISBN 978-5-94458-200-3.
19. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Оценка и сравнение смешанных моментов компонентов вектора ветра турбулентного и мезометеорологического масштабов в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 09. С. 735–747. DOI: 10.15372/AOO20220907.
20. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Ч. 1: Уравнение для температурного поля // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11. С. 923–931. DOI: 10.15372/AOO20221108.
21. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Ч. 2. Уравнения для поля ветра // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12. С. 1015–1020. DOI: 10.15372/AOO20221208.

УДК 622(470.631)
DOI 10.17513/use.38403

ПРИРОДА ОБРАТНО НАМАГНИЧЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИИ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)

Урусова Б.И., Хатуаев Я.У., Чочуев Дж.Б.

ФГБОУ ВО «Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева»,
Карачаевск, e-mail: urusova50@mail.ru.

В настоящей работе рассмотрены экспериментальные исследования: природа обратно намагниченных горных андезитобазальтовых пород, чтобы объяснить происхождение геомагнитного поля Земли и для решения проблемных вопросов в области тектоники и стратиграфии. Для этого были применены следующие методы: термомангнитный, минералогический и локальный спектральный анализы. В горных породах имеются магнитные материалы с неодинаковыми магнитными свойствами и направлениями. В качестве необходимого условия для того, чтобы была первичная термоостаточная намагниченность, надо иметь постоянное магнитное поле. Наблюдаются постоянства – J_n образца андезитобазальта, которые не играют роль для восстановления геомагнетизма. Исследуемые образцы горных пород сильно изменены от первоначального состава, причём прямо намагниченные горные породы имеют на порядок меньше, чем обратно намагниченные образцы. В исследованных образцах магнитная руда составляла ~ 8% от общей массы. Получено, что за начальную намагниченность андезитобазальта отвечает магнетит и гематит, а в противоположном направлении намагниченности – титаномагнетит. Горные андезитобазальтовые породы содержат вторичный магнит и обратную намагниченность, которая со временем не меняется. Из этих условий следует, что природа образования обратной намагниченности является основой геомагнетизма.

Ключевые слова: горные породы, андезитобазальт, намагниченность, температура Кюри, геомагнетизм, обратная намагниченность.

THE NATURE OF REVERSELY MAGNETIZED MOUNTAIN ORES OF KARACHAY-CHERKESSIA (NORTH CAUCASUS)

Urusova B.I., Khatuaev Ya.U., Chochuev J.B.

Karachay-Cherkess State University named after U.D. Aliyev, Karachayevsk,
e-mail: urusova50@mail.ru

In this paper, experimental studies are considered: the nature of reversely magnetized rocks andesite -basalt, to explain the origin of the Earth's geomagnetic field and to solve problematic issues in the field of tectonics and stratigraphy. For this, the following methods were used: thermomagnetic, mineralogical and local spectral analysis. Magnetic minerals in the studied rocks have different magnetic properties and are constant to the magnetic field in different directions. Magnetic constancy is one of the necessary conditions for the existence of primary thermoremanent magnetization. Also, there is a constancy of J_n the andesite -basalt sample, which does not play a role in the restoration of the original geomagnetic field. Andesite-basalt rock is strongly altered from the original composition, and directly magnetized rocks contain an order of magnitude less magnetic minerals than reversely magnetized samples. In the studied samples, magnetic ore constituted ~ 8% of the total mass. It was found that magnetite and hematite are initially responsible for the direct magnetization of andesite -basalt, and titanomagnetite is responsible for the reverse magnetization. Andesite-basalt rocks contain a secondary magnet and have a stable reverse magnetization.

Keywords: Rocks, magnetic magnetization, Curie temperature, geomagnetism, reverse magnetization.

Введение

Обратная магнитная намагниченность горных пород является основой для объяснения геомагнетизма и отвечает за его образование [1].

Если рассматривать палеомагнитные свойства, то они основаны на дипольной природе магнитного поля Земли и физике обратного намагничивания горных пород [2]. Происхождение основного магнитного поля Земли остается нерешенной проблемой, хотя она и рассматривалась в форме магнитогидродинамической гипотезы магнитного поля Земли [3].

Свойства магнитной памяти частиц магнитных минералов позволяют изучать величину направления магнитного поля Земли.

На сегодняшний день не могут найти ответ на вопрос о едином механизме изменения намагниченности горных пород на обратную, подобно магнитному полю Земли [4; 5].

Вторичные магнитные минералы могут образоваться в горных породах при выполнении следующих условий:

- 1) есть магнитный минерал;
- 2) есть степень сохранности;
- 3) от структуры поведения горной породы [6].

Целью данной работы является: объяснить природу обратно намагниченных горных андезитобазальтовых пород, магнитного поля Земли, решение задач в области тектоники и стратиграфии путем экспериментального изучения свойств андезитобазальта.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи авторами в период с 2020 по 2024 г. проводились исследования в лаборатории спектроскопии физико-математического факультета КЧГУ имени У.Д. Алиева.

Методом спектрального анализа определяли элементный состав горных андези-

тобазальтовых пород, для этого была собрана экспериментальная установка на основе спектрометра ДФС-24 с возбуждением от лазера ЛГ-75. Оптическая схема приведена на рисунке 1.

Полученный элементный состав в анализируемой пробе дается авторами (рис. 2).

А при изучении свойств обратно намагниченных образцов андезитобазальта авторы использовали следующие методы: 1) терромагнитный; 2) локальный спектральный анализ; 3) J_n – измеряли при малых магнитных полях разного направления [7].

Результаты исследования величин: J_n , I° , D° , $T^\circ C$ и обсуждения приведены в таблице.

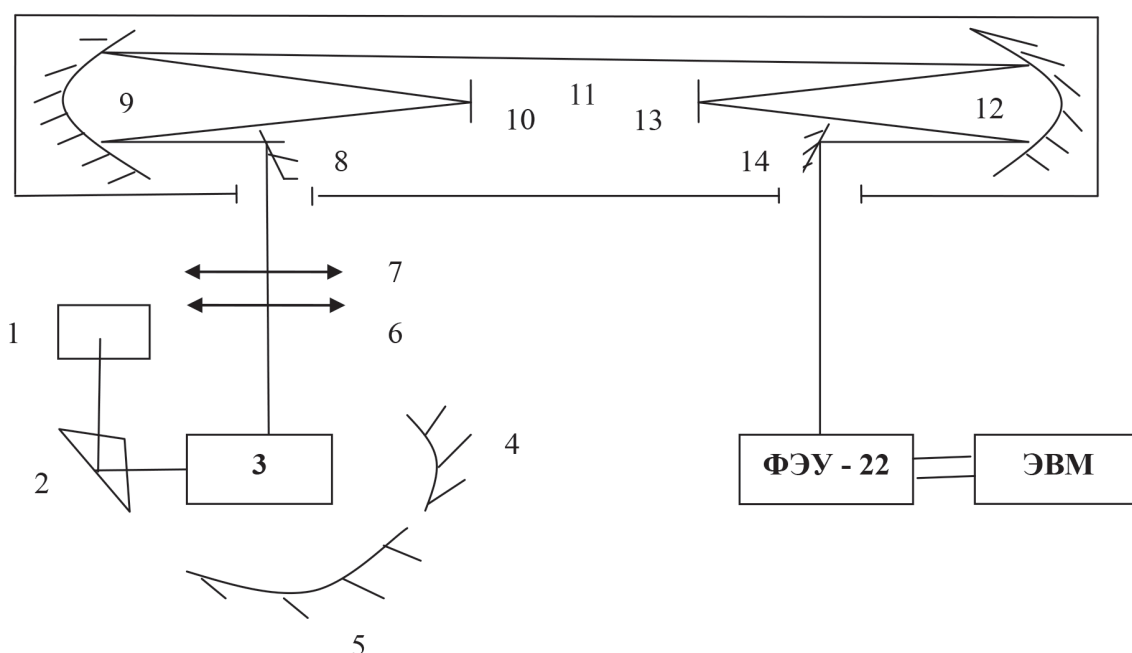


Рис. 1. Оптическая схема установки:
1 – излучаемый лазер, 2 – поворотная призма, 3 – кювета,
4, 5, 9, 12 – параболические зеркала, 6, 7 – линзы, 8 – поворотное зеркало,
10, 13 – дифракционные решетки, 11 – промежуточная щель,
14 – поворотное зеркало, 15 – фотоумножитель, 16 – ЭВМ

Магнитные свойства стабильно намагниченных горных пород андезитобазальта

п/п	Название породы	$J_n \cdot 10^{-6}$	I°	D°	$T^\circ C$	Стабильность J_n по H_n
1	андезитобазальт (нижний поток)	800	-38	110	550	
2	-	550	-38	110	550	стабилен
3	-	580	-39	105	540	
4	андезитобазальт (наверху)	1760	-29	150	560	стабилен

Источник: составлено авторами.

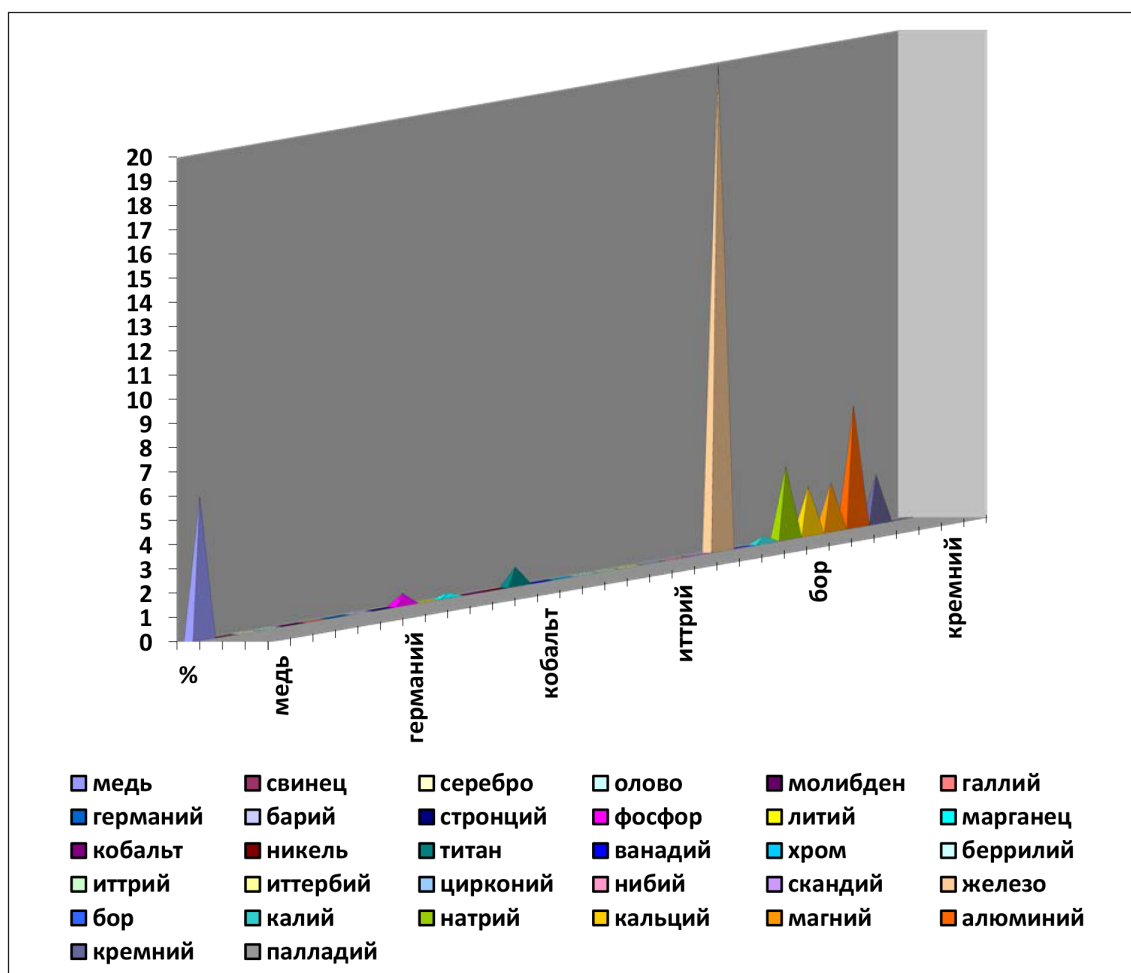


Рис. 2. Элементный состав горных андезитобазальтовых пород

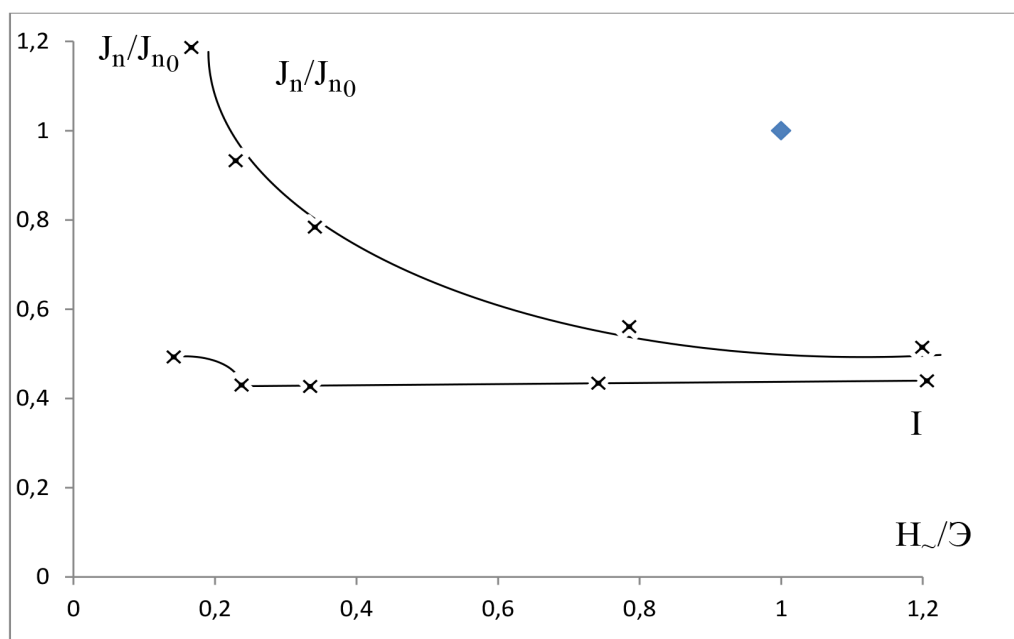


Рис. 3. Размагничивание под действием H_z , образца (1) (табл.)
Источник: составлено авторами

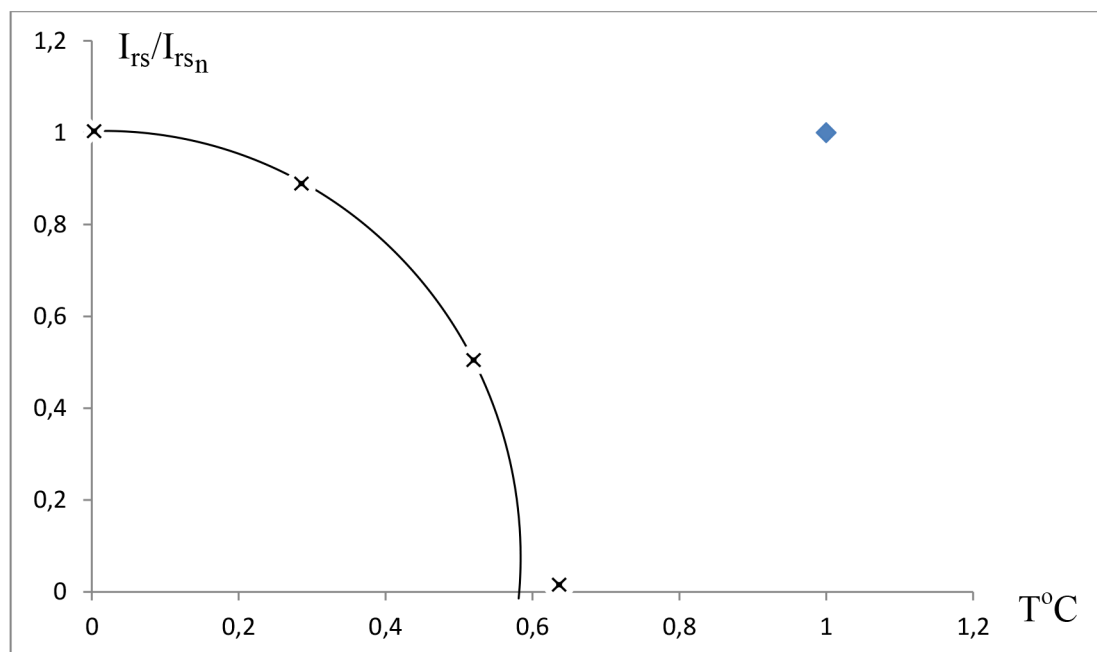


Рис. 4. Кривая $J_{rs}(T)$ образца (2) (табл.)
Источник: составлено авторами

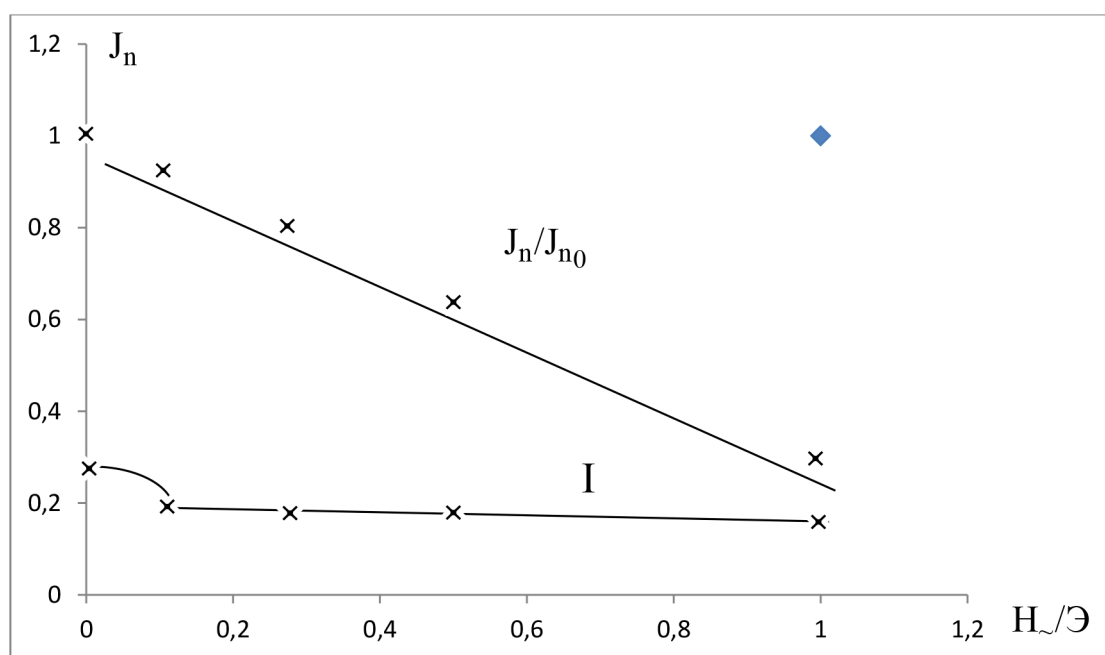


Рис. 5. Размагничивание под действием H образца (3) (табл.)
Источник: составлено авторами

Из рисунка 3 следует, что размагничивания в магнитном поле H , для обратно намагниченного образца андезитобазальт – образец (1), (рис. 2):

а) мощность обратной намагниченной распространяется до ~ 60 м;

б) величина I° находилась в районе от -38° до -29° , при этом температура Кюри находилась в интервале от 540° до 560° С.

На рисунке 4 авторами приведены кривые обратно намагниченного образца – (2) андезитобазальт: а) магнитно стабильна;

б) величина $-I^\circ$ меняется от -38° до -29° .

На рисунке 5 представлены кривые размагничивания по $H_\sim$, где температура Кюри находится в интервале $540^\circ - 560^\circ$.

Далее на рисунках 6 и 7 представлены кривые $-J_{rs}(T)$ размагничивание под действием $H_\sim$.

Горные андезитобазальтовые породы в своем составе имеют вторичный магнит с постоянной обратной намагниченностью и с различными магнитными свойствами.

Магнитная стабильность является одним из необходимых условий для первичной термоостаточной намагниченности.

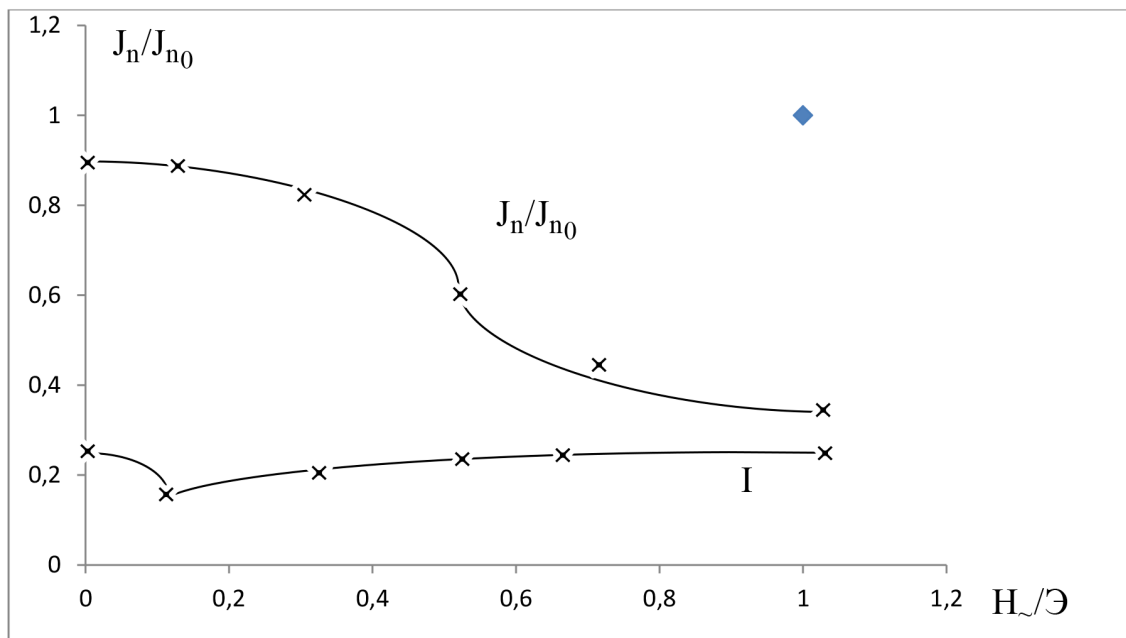


Рис. 6. Размагничивание под действием $-H_\sim$ образца (4) – андезитобазальт
Источник: составлено авторами

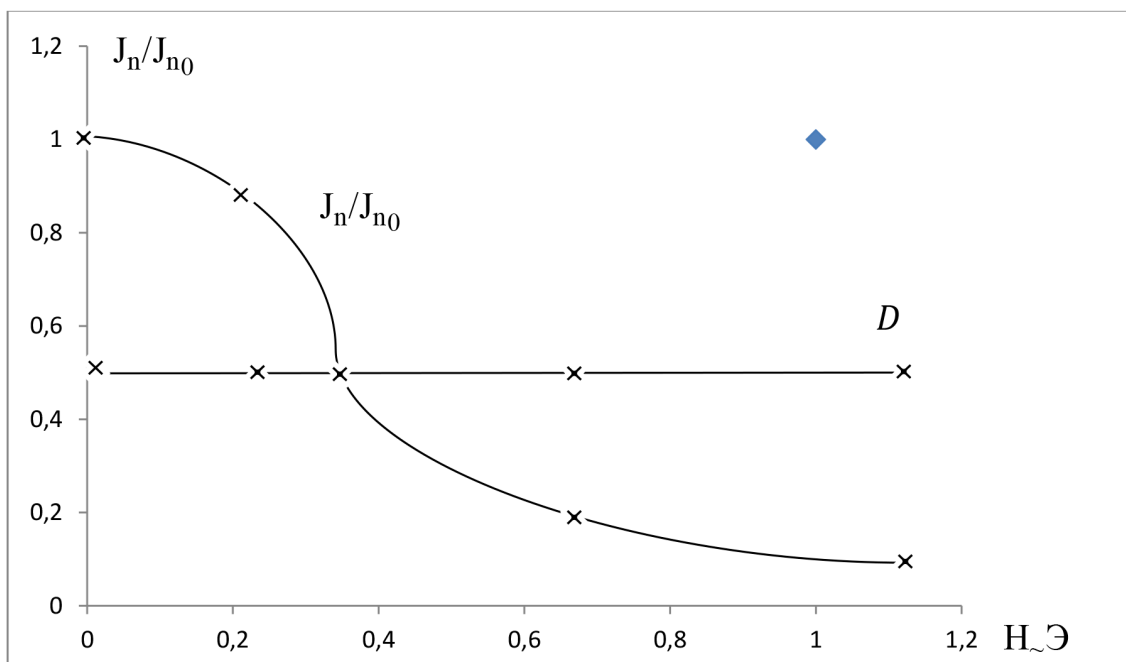


Рис. 7. Размагничивание под действием $-H_\sim$
Источник: составлено авторами

Хотя стабильность J_n образца андезитобазальта можно не учитывать для восстановления первоначального геомагнитного поля.

Из минералогических экспериментов следует, что горная порода сильно изменена от первоначального состава, причём прямо намагниченные горные породы содержат магнитных минералов меньше, чем обратно намагниченные образцы. В исследованных образцах магнитная руда ~ 8% от общей массы и состоит из мелкозернистого первичного магнетита. Определив направление намагниченности, можно определить геомагнитное поле и возраст горной породы.

На рисунке 7 представлены результаты размагничивания под действием переменного магнитного поля. Видно, что в начале под действием магнитного поля идет частичное размагничивание начальной величины — J_n .

Примененные методы дали возможность установить, что за прямую намагниченность андезитобазальта изначально отвечают магнетит и гематит, а для обратной намагниченности — титаномагнетит.

Необходимое условие для образования обратной намагниченности в горных породах — чтобы были магнитные минералы с различными магнитными свойствами.

Заключение

Экспериментальные исследования позволяют нам сделать выводы о природе обратно намагниченных образцов андезитобазальта в горных породах.

Андезитобазальт в основном представляет собой гранулированные магниты и обладает постоянной прямой и обратной намагниченностью.

Андезитобазальтовые породы со временем меняются от исходного положения.

Если сравнить породы прямой и обратной намагниченности, то у последнего больше содержание магнитных минералов. Обратная намагниченность андезитобазальта стабильна в области температур до 550 °С.

В состав исследуемых образцов входят титановые магнетиты в виде боксита, которые обладают постоянной обратной намагниченностью.

Прямая намагниченность горных пород в рассматриваемом районе обусловлена основной намагниченностью и гематитом, в то время как обратная намагниченность обусловлена температурой Кюри от 540° до 560 °С.

Поскольку величина магнитного поля увеличивается, и оно взаимодействует со вторичным магнитным материалом, противоположное магнитное направление остается постоянным. Установлена дипольная природа магнитного поля Земли и полярная зависимость намагниченности андезитобазальта и других горных пород от состава магнитных минералов.

Андезитобазальт с различными магнитными свойствами обладает обратной намагниченностью, что является основной проблемой геомагнетизма.

На основании полученных результатов можно решить определенные проблемы, связанные с географическим районом Земли, его структурой, а также задачи в области тектоники.

Список литературы

1. Урусова Б.И., Лайпанов У.М., Узденов Ш. Х. Комплексное изучение стабильно прямо и обратно намагниченных горных пород Карачаево-Черкесии (Северный Кавказ) // Успехи современного естествознания. 2024. № 1. С. 58-63. DOI: 10.17513/use.38208.
2. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. СПб.: Горное дело, 2014. 368 с.
3. Carrasco J.P., Osete M.L., Torta J.M., Santis A. De. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeological and lava flow data // Earth and Planetary Science Letters. 2014. P. 98-109.
4. Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., Титов Р.С. Методика геометризации качественных характеристик Гусевгорского месторождения титаномагнетитовых руд // Проблемы недропользования. 2014. № 2. С. 174-184. URL: <https://trud.igdur.ru/edition/2/28> (дата обращения: 15.02.2025).
5. Serbin E.D., Perov V.N., Kostin V.N. Non-Contact Measurement of the Dynamic Magnetostriction Parameters of Ferromagnets // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2023. Is. 6. P. 1211-12 31. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.121-131.
6. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. Prediction of the Mechanical Properties of P91 Steel by Means of Magneto-acoustic Emission and Acoustic Birefringence // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. Vol. 3. № 43. P. 1-10. DOI: 10.1007/s109210 – 170421 – 9.
7. Проценко И.Г., Брусенцов Ю.А., Филатов И.С. Определение структурных факторов, влияющих на параметры постоянных магнитов, с помощью магнитоакустической эмиссии // Вестник ТГТУ. 2015. Т. 21. № 3. С. 519-525. DOI: 10.17277/ vestnik. 2015.03.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 553.9:543.429.2
DOI 10.17513/use.38404

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ
ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ
ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ
УГЛЯ ПРИ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Шилова Т.В., Шажко Я.В., Рыбалкин Л.А.

*ФГБНУ Институт физики горных процессов, Донецк,
e-mail: shilovatanya@yandex.ru*

Изучение водородсодержащих соединений ископаемых углей является актуальной задачей при разработке газоносных пластов, определении качественных характеристик пород. Использование методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса в сочетании с термическим воздействием на образцы перспективно для решения этих задач. Целью работы является оценка эффективности методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса для исследования изменения водородсодержащих компонентов углей при тепловом воздействии. Методы исследования включают изучение найденных в литературных источниках результатов спектроскопии ядерного магнитного резонанса, которые были получены при тепловом воздействии на угольные образцы, обобщение результатов и определение закономерностей изменения водородсодержащих соединений в процессе теплового воздействия. Установлено, что применение спектрометров ядерного магнитного резонанса низкого разрешения в сочетании с непрерывным изменением температуры в процессе эксперимента дает возможность определять температурные интервалы фазовых переходов флюида в углях, подвижность водорода, динамику выхода летучих при термическом разрушении пород. Использование методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса как средства мониторинга углей при тепловом воздействии эффективно и позволяет оценивать изменение водородсодержащих соединений. Вместе с тем в современных источниках приведено мало результатов изучения углей методами спектроскопии ядерного магнитного резонанса при внешних физических воздействиях. Необходимо развивать это направление, уделить особое внимание работе с насыщенными метаном образцами, что позволит прогнозировать результаты полевых работ при разработке газоносных пластов.

Ключевые слова: уголь, водородсодержащие компоненты, спектроскопия ядерного магнитного резонанса, температура, малоподвижный и подвижный водород

Работа выполнена в рамках деятельности Молодежной лаборатории исследования электромагнитных свойств угля и горных пород Института физики горных процессов.

**USE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY
TO STUDY CHANGES OF HYDROGEN-CONTAINING
COMPONENTS OF COAL UNDER THERMAL INFLUENCE**

Shilova T.V., Shazhko Ya.V., Rybalkin L.A.

Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

The study of hydrogen-containing compounds of fossil coals is actual problem in the development of gas-bearing seams, in the determining the qualitative characteristics of rocks. The use of nuclear magnetic resonance spectroscopy methods in combination with thermal action to samples is promising to solve these problems. The aim of the work is to evaluate the effectiveness of nuclear magnetic resonance spectroscopy to study changes in hydrogen-containing components of coals under thermal action. The research methods include studying the results of nuclear magnetic resonance spectroscopy found in literature sources, which were obtained during thermal action on coal samples, generalization of the results and determination of the patterns of change in hydrogen-containing compounds during thermal action. It was established that the use of low-resolution nuclear magnetic resonance spectrometers in combination with continuous temperature change during the experiment allows to determine the temperature ranges of fluid phase transitions in coals, hydrogen mobility, and the dynamics of the release of volatile matter during rock thermal destruction. The use of nuclear magnetic resonance spectroscopy methods as a means of monitoring coals under thermal influence is effective and allows to assess the change in hydrogen-containing compounds. However, modern sources provide few results of studying coals using nuclear magnetic resonance spectroscopy methods under external physical influences. It is necessary to develop this direction, pay special attention to working with methane-saturated samples, which will allow to predict the results of field work in the development of gas-bearing seams.

Keywords: coal, hydrogen-containing components, nuclear magnetic resonance spectroscopy, temperature, low-mobility and mobile hydrogen

The work was carried out within the framework of the activities of the Youth Laboratory for the Study of Electromagnetic Properties of Coal and Rocks of the Institute of Physics of Mining Processes.

Введение

Ископаемый уголь – это многокомпонентная система со сложным химическим составом и широким спектром физических характеристик. Свойства углей значительно отличаются не только при переходе от одной марки к другой, но и в породах одной марки, извлеченных из разных пластов. В настоящее время существующие модели структуры углей полностью не описывают все наблюдаемые различия в их свойствах. В связи с этим большое внимание уделяется изучению распределения основных химических элементов (углерод, водород, кислород с примесями азота, сера) в угольном веществе [1–3]. Информация о водородсодержащих соединениях, прежде всего о газообразных углеводородах, необходима как для повышения безопасности работ при подземной разработке месторождений на больших глубинах, добычи метана в виде самостоятельного энергетического ресурса, так и для определения качественных характеристик извлеченного сырья [4–6]. Существует большое число инструментальных методов, позволяющих качественно и количественно оценить свойства исследуемых пород. Вопросы о вхождении, фазовом состоянии водорода в угольном веществе, процессах миграции газа при изменении внешних условий рассматриваются в работах [7, с. 35–37; 8; 9]. Отдельные химические компоненты, структурные характеристики, фильтрационные свойства определяют спектроскопическими, химическими и физическими способами, среди которых спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР ^1H спектроскопия) широко используется с конца 1970-х гг. [10–12]. На практике для исследования угля как газового резервуара чаще используют ЯМР-релаксometriю. Такой метод позволяет оценить фильтрационные свойства пласта: открытую, закрытую пористость и по различным эмпирическим моделям – проницаемость породы. Однако он не дает возможности точно определять формы нахождения, фазовые переходы, количество разного флюида в угле [13–15]. ЯМР ^1H – спектроскопия является более точным методом неразрушающего контроля, который позволяет определить структуру и функциональную принадлежность различных водородсодержащих соединений в угольном веществе [1; 16; 17]. Данный метод также применяют с целью определения качественных показателей извлеченных углей, например выхода летучих

веществ, к которым относятся водород, метан и другие водородсодержащие соединения. Результаты таких экспериментов приведены в работах [18; 19]. Изучение свойств угольного вещества можно проводить при изменении лабораторных условий, например, тепловое и/или барическое воздействие на образцы. В случае исследования форм нахождения метана в породе на стадии освоения пластов это позволяет моделировать условия, близкие к реальной разработке месторождений [20; 21]. В случае оценки качественных показателей извлеченного сырья, изучение методом ЯМР ^1H спектроскопии можно проводить *in situ* в процессе непрерывного повышения температуры и термического разложения минеральных, органических компонентов угля с образованием летучих водородсодержащих соединений [22]. В настоящей работе приведен обзор современного состояния исследований углей методами ЯМР ^1H -спектроскопии после теплового воздействия на экспериментальные образцы.

Цель работы – оценить эффективность методов ЯМР ^1H спектроскопии для исследования изменения водородсодержащих компонентов в углях при тепловом воздействии на образцы.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования был проведен анализ научно-технической литературы по теме использования ЯМР ^1H спектроскопии в горном деле за последние 30 лет. Производился поиск публикаций с использованием зарубежных и российских научных баз: информационно-аналитические порталы Elibrary, Cyberleninka, Google Scholar, библиографические базы данных Web of Science, Scopus, электронный каталог Государственной публичной научно-технической библиотеки России. Было проанализировано более 70 источников, из которых более сорока стали основой для формирования выводов и были включены в список литературы. Обзор подготовлен в соответствии с рекомендациями стандарта PRISMA (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) [23; 24]. Методическая часть исследования включала: изучение и анализ найденных в литературных источниках результатов ЯМР ^1H – спектроскопии, которые были получены при тепловом воздействии на угольные образцы; обобщение результатов и установление закономерностей изменения водородсодержа-

щих соединений углей в процессе теплового воздействия. Объектом исследований являются данные ЯМР ^1H спектроскопии насыщенных и не насыщенных флюидами углей различной степени метаморфизма, которые были получены при термическом воздействии на образцы.

Результаты исследования и их обсуждение

По современным представлениям, водород в угольном веществе входит как в твердофазные соединения органики – связанный или малоподвижный водород, так и во флюиды (вода, газ), которые насыщают угольное вещество, находятся в свободном и сорбированном виде в породе, а также внедряются в структуру по типу твердого раствора, но химически не связанные с ней – несвязанный или подвижный водород [25–27]. Выполненный аналитический обзор литературных источников показал, что, в зависимости от поставленных задач, исследования методами ЯМР проводят с угольными образцами разных типов. С целью изучения локализации, процесса десорбции метана, определения фазовых переходов, изменения динамических параметров воды в объеме породы, экспериментальные образцы предварительно насыщают флюидом. Стандартная методика подготовки проб включает несколько этапов: предварительное просушивание для удаления остаточного флюида из пор и трещин, вакуумирование и обработку жидкостью/газом (метан, вода и др.) в насытительной камере под давлением. По разным данным, уголь просушивают при температуре до 120 °C и насыщают флюидом при давлениях до 15 МПа [25; 28; 29]. С целью изучения выхода летучих веществ методом вакуумирования из образцов предварительно удаляют остаточную влагу. В процессе экспериментов уголь нагревают без доступа воздуха.

Определение параметров, устанавливающих соотношение между содержанием водородсодержащего соединения и формируемым им спектром, является актуальной задачей ЯМР ^1H исследований [30; 31, с. 84–86]. Регистрация отдельных спектральных линий водорода в различных формах его существования в угле возможна спектрометрами высокого разрешения. В то же время на практике в основном используют оборудование более низкого разрешения (автодинные спектрометры) и регистрируются спектральные линии ЯМР большой ширины, которые представляют

собой суперпозицию вкладов от отдельных водородсодержащих групп (рис. 1). Ширины линии протонного резонанса колеблются от тысячных долей эрстеда (Э) в свободных газах и жидкостях до единиц и десятков эрстед в твердых телах. В угле резонансные частоты отдельных водородсодержащих компонент различаются на величину менее 200 Гц (менее $5 \cdot 10^{-2}$ Э) и располагаются по всей ширине этого диапазона [32–34]. В таком случае зафиксировать расщепление спектрометрами низкого разрешения затруднительно. Как правило, регистрируют спектр ЯМР ^1H большой ширины (несколько эрстед) с некоей резонансной частотой, который представляет собой суперпозицию вкладов от отдельных водородсодержащих компонент. При дальнейших расчетах предполагают, что все спектральные линии имеют одну и ту же резонансную частоту и отличаются друг от друга шириной и амплитудой, что связано с количеством резонирующих ядер данного типа и их подвижностью в структуре. В случае угля полный разрешаемый спектр состоит из двух главных компонент – широкой ($\Delta H_2 \sim 6\text{Э}$) и узкой ($\Delta H_1 \sim 1\text{Э}$). В широкую компоненту вносит вклад связанный малоподвижный водород, сосредоточенный в органике угля, в узкую – более подвижный, химически не связанный (рис. 1) [25, 32]. Стандартные методы обработки и разделения спектров на широкие, узкие компоненты описаны в работах [35–37]. Разделение вкладов в узкую полосу от флюидов разных типов (вода, метан) затруднительно без использования специальных методов обработки образцов, поэтому большое значение имеет пробоподготовка образцов, включающая насыщение образцов определенным типом флюида.

Использование ЯМР-исследований при тепловом воздействии на образцы является полезным инструментом для определения изменения подвижности водорода, фазовых переходов флюидов в угле. Выполнен анализ результатов ЯМР ^1H спектроскопии коксующихся углей бассейнов Witbank, Goonyella, полученных в процессе непрерывного теплового воздействия на породу и представленных в работе [38]. Эксперименты проводили с ненасыщенными углями, остаточная влага была предварительно удалена из образцов методом вакуумирования. В процессе экспериментов уголь непрерывно нагревали от 25 до 325 °C со скоростью 3 °C в минуту и фиксировали изменения в образцах через 50 °C (регистрировали спектры ЯМР H^1).

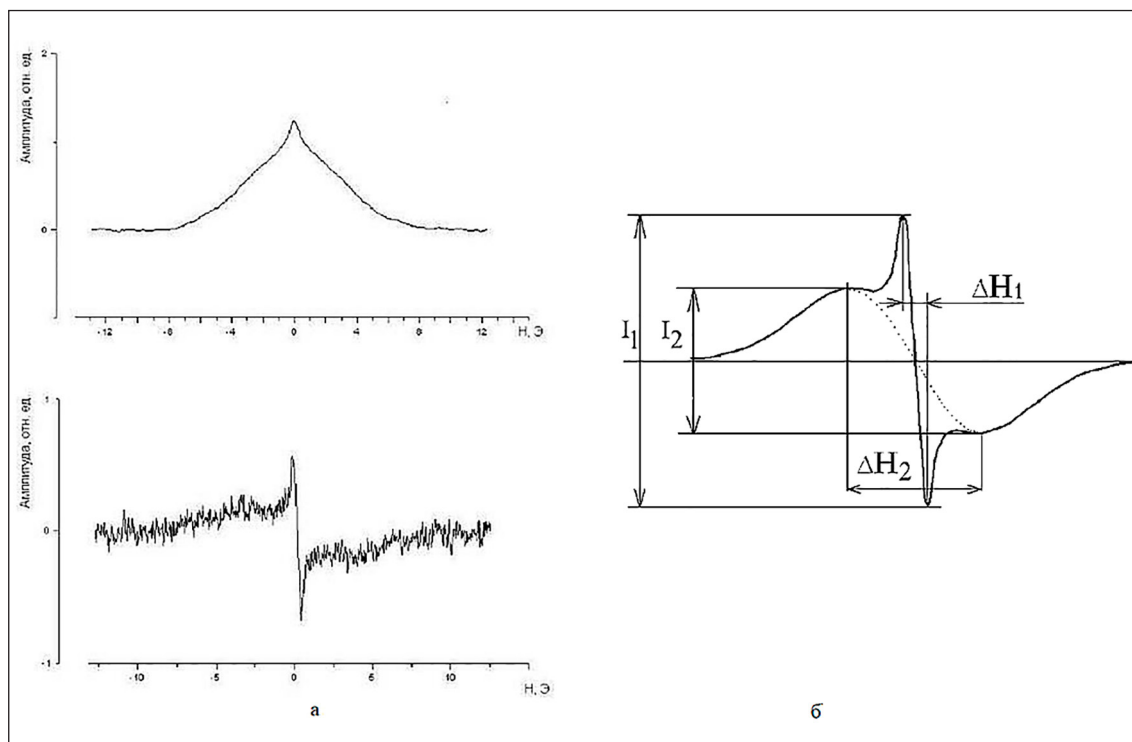


Рис. 1. а – Пример линии поглощения ЯМР ^1H в угле (сверху) и ее производная (снизу); б – стилизованное изображение спектра ЯМР ^1H в системе «уголь – флюид», ΔH_1 – ширина спектральной линии, соответствующей несвязанному водороду, ΔH_2 – ширина спектральной линии, соответствующей связанному водороду угольной структуры, I_1 – интенсивность узкой линии ЯМР-спектра от протонов несвязанного водорода, I_2 – интенсивность широкой линии ЯМР-спектра от протонов связанного водорода угольной структуры [25, 32]

Анализ полученных данных был выполнен с целью изучения подвижности водорода по мере повышения температуры угля. На полученных ЯМР ^1H спектрах наблюдаются вклады от малоподвижного и подвижного водорода. Спектры были разложены на компоненты наблюдаемых типов водорода [38]. Установлено, что в процессе теплового воздействия доля подвижного водорода в угольном веществе значительно увеличивается, выделяются летучие соединения, к которым относятся метан, его гомологи, водород и др. Это подтверждается более четкими пиками на спектрах, полученных при высоких температурах (рис. 2). Резкий рост подвижности водорода в исследованных образцах отмечается при температуре выше 225°C . Для углей бассейна Goonyella доля подвижного водорода увеличивается примерно на 2–3 % и на 9–10 % в температурных диапазонах $25\text{--}225^\circ\text{C}$ и $225\text{--}325^\circ\text{C}$ соответственно. В случае углей бассейнов Witbank эти значения составляют примерно 1–2 % и 5–6 % для аналогичных диапазонов (участки I

и II на рисунке). Температуры начала интенсивного выхода летучих углей, установленные по ЯМР ^1H исследованиям, близки, но ниже типовых значений, полученных при лабораторных исследованиях термического разрушения углей [39; 40]. Значительные отличия между образцами бассейнов Goonyella, Witbank связаны с разным содержанием, составом летучих, входящих в угольное вещество, которые изменяются в процессе теплового воздействия.

Результаты ЯМР ^1H спектроскопии насыщенных флюидом углей, полученные при тепловом воздействии на образцы в процессе экспериментов, приведены в работах [25, 41]. Исследования были выполнены для пород разной степени метаморфизма, от антрацитов до длиннопламенных углей Донецкого бассейна. Предварительно насыщенные парами воды и охлажденные до температуры 115 К образцы постепенно нагревали до 308 К, фиксируя спектры ЯМР ^1H . Измерения проводили на стационарном ЯМР-спектрометре на резонансной частоте 20 MHz.

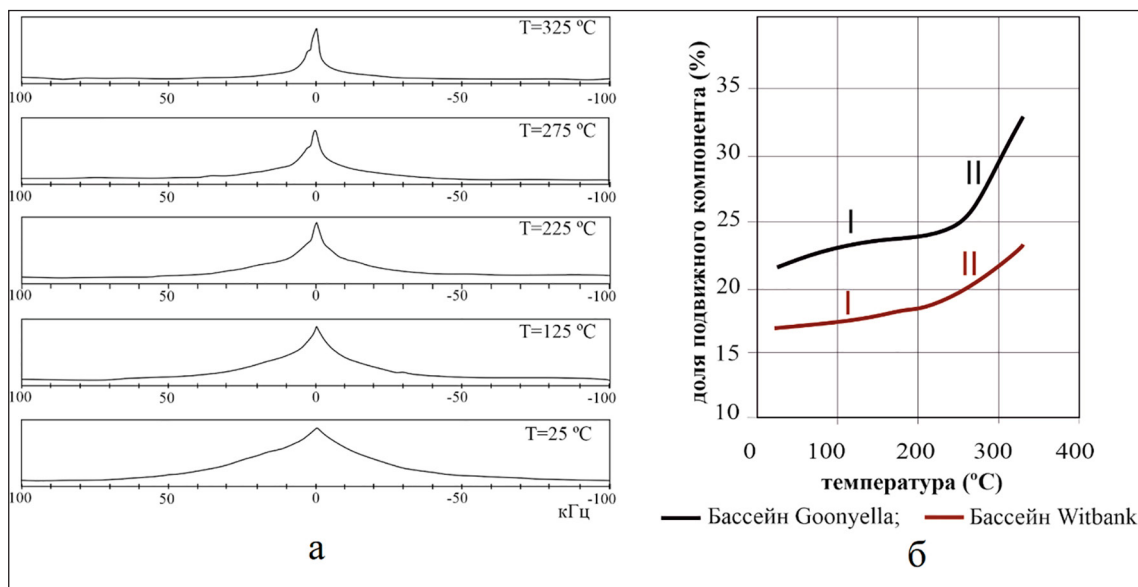


Рис. 2. а – ЯМР ^1H спектры, полученные для углей бассейна Witbank при температурах 25–325 °С; б – изменение доли подвижного водорода в углях в зависимости от температуры.

I – постепенный рост доли подвижного водорода в угольном веществе;

II – начало выхода водородсодержащих компонентов

Источник: составлено авторами на основе [38]

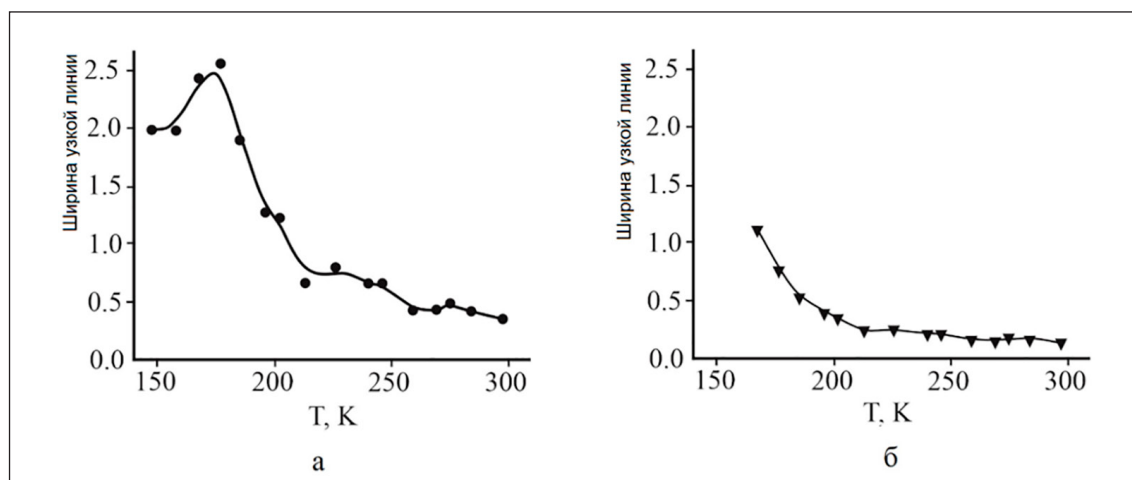


Рис. 3. Зависимость ширины узкой линии ЯМР-спектра двух компонент воды антрацита от температуры: а – сорбированная; б – свободная вода

Источник: составлено авторами на основе [41]

Для обработки данных был использован метод ЯМР широких линий (см. описание методов), с помощью которого при фиксированной ширине линии, соответствующей спинам ^1H водородсодержащей химически связанной воде, выделяли узкую линию, относящуюся к насыщенному образцу флюиду, и ее, в свою очередь, разделяли на две компоненты: более широкую – соответствующую сорбированной воде; более уз-

кую – соответствующую свободному флюиду, сосредоточенному в открытых порах и трещинах породы [41]. При повышении/снижении температуры, когда происходит переход сорбата в другое фазовое состояние, изменяется подвижность его молекул, что может отражаться в вариации ширины линии, измеряемой с помощью стационарного ЯМР-спектрометра. Такие результаты представлены в работе [41]. Приведены за-

висимости ширины линий различных типов несвязанного водорода углей от температуры. Резкое уширение линий водорода в несколько раз соответствует изменению фазового состояния флюида в процессе теплового воздействия на образцы. Для сорбированной воды углей наиболее высокой степени метаморфизма, антрацитов, фазовый переход наблюдается в температурном интервале 213–177 К, чему соответствует уширение линии до величины 2,55 Gs (рис. 3). Значительное уширение линий водорода отмечается и для углей низких степеней метаморфизма. В случае длиннопламенных углей установленный интервал температур фазовых переходов от жидкого к твердому состоянию сорбированной воды составил 203–243 К. Близкие значения получены для жирных углей, среднее значение температуры фазового перехода в насыщенных углях марки Ж составило 230 К [41].

Заключение

Использование методов ЯМР ^1H спектроскопии как средства мониторинга ископаемых углей при тепловом воздействии эффективно и позволяет определять динамику изменения водородсодержащих соединений в них. Анализ современного состояния исследований показал, что применение ЯМР-спектрометров низкого разрешения в сочетании с непрерывным изменением температуры в процессе эксперимента дает возможность достаточно точно определять температурные интервалы фазовых переходов флюида в насыщенных углях разной степени метаморфизма, подвижность водорода, динамику выхода летучих при термическом разрушении пород. В то же время выполненные исследования показали, что в современных литературных источниках приведено мало результатов изучения ископаемых углей методами ЯМР ^1H спектроскопии при внешних физических воздействиях. Необходимо развивать это направление, проводить лабораторные исследования в условиях непрерывного изменения давления и температур, особый акцент сделать на работу с насыщенными метаном углями, что позволит прогнозировать результаты полевых работ при разработке газоносных угольных пластов.

Список литературы

1. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2017. Vol. 4. P. 129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6.
2. Журавлева Н.В., Хабибулина Е.Р., Исмагилов З.Р., Поткина Р.Р., Созинов С.А. Изучение взаимосвязи строения ископаемых углей и содержания в них полициклических ароматических углеводородов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. Vol. 24. № 3. P. 355–361. DOI: 10.15372/KhUR20160310.
3. Yan H., Nie B., Peng C., Liu P., Wang X., Yin F., Lin S. Molecular model construction of low-quality coal and molecular simulation of chemical bond energy combined with materials studio // *Energy & Fuels*. 2021. Vol. 35. № 21. P. 17602–17616. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02658.
4. Lin B., Song H., Zhao Y., Liu T., Kong J., Huang Z. Significance of gas flow in anisotropic coal seams to underground gas drainage // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 180. P. 808–819. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.06.023.
5. Mohamed T., Mehana M. Coalbed methane characterization and modeling: review and outlook // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020. P. 1–23. DOI: 10.1080/15567036.2020.1845877.
6. Мусин Р.А., Асанова Ж.М., Халикова Э.Р., Джусупов Н.Д., Голик А.В. Разработка технологических критериев оценки для выбора перспективных участков добычи угольного метана // *Уголь*. 2024. Т. 1179. № 4. С. 102–108. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-102-108.
7. Speight J.G. Handbook of coal analysis. John Wiley & Sons: 2015. 368 p. URL: https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=E4EZBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA163&dq=Handbook+of+coal+analysis&ots=6QL4bPITYW&sig=MpJVugi-Oqx-IQOd_xSieSKYSYRM&redir_esc=y#v=onepage&q=Handbook%20of%20coal%20analysis&f=false (дата обращения: 12.03.2025).
8. Zhao Y., Liu T., Lin B., Sun Y. Evaluation of compressibility of multiscale pore–fractures in fractured low-rank coals by low-field nuclear magnetic resonance // *Energy & Fuels*. 2021. Vol. 35. № 16. P. 13133–13143. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02232.
9. Рыбалкин Л.А., Понамарева Е.А., Шилова Т.В., Сердюк И.М. Использование методов ядерного магнитного резонанса для исследования метана в углепородном массиве // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2024. Т. 11. № 3. С. 42–49. DOI: 10.15372/FPVGN2024110307.
10. Guo J.C., Zhou H.Y., Zeng J., Wang K.J., Lai J., Liu Y.X. Advances in low-field nuclear magnetic resonance (NMR) technologies applied for characterization of pore space inside rocks: a critical review // *Petroleum science*. 2020. Vol. 17. P. 1281–1297. DOI: 10.1007/s12182-020-00488-0.
11. Maciel G.E., Bartuska V.J., Miknis F.P. Characterization of organic matter in coal by proton-decoupled ^{13}C nuclear magnetic resonance with magic angle spinning // *Fuel*. 1979. Vol. 58. P. 391–394. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90159-5.
12. Федорова Н.И. Анализ технологических и физико-химических свойств каменных углей технологической марки ГЖ // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024. Т. 164. № 4. С. 79–85. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-79-85.
13. Liu Z., Liu D., Cai Y., Yao Y., Pan Z., Zhou Y. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) in coalbed methane and shale reservoirs: A review // *International Journal of Coal Geology*. 2020. Vol. 218. P. 103261. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103261.
14. Pan J., Du X., Wang X., Hou Q., Wang Z., Yi J., Li M. Pore and permeability changes in coal induced by true triaxial supercritical carbon dioxide fracturing based on low-field nuclear magnetic resonance // *Energy*. 2024. Vol. 286. P. 129492. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129492.
15. Ji X., Song D., Zhao H., Li Y., He K. Experimental analysis of pore and permeability characteristics of coal by low-field NMR // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. № 8. P. 1374. DOI: 10.3390/app8081374.
16. Smirnov V.G., Lyrshchikov S.Y., Manakov A.Y., Rodionova T.V., Ismagilov Z.R. High-resolution ^1H MAS NMR spectra of water sorbed by various types of coals // *International*

- al Journal of Coal Preparation and Utilization. 2024. P. 1–22. DOI: 10.1080/19392699.2024.2441841.
17. Li H., Xu C., Ni G., Lu J., Lu Y., Shi S., Ye Q. Spectroscopic (FTIR, ¹H NMR) and SEM investigation of physico-chemical structure changes of coal subjected to microwave-assisted oxidant stimulation // *Fuel*. 2022. Vol. 317. P. 123473. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123473.
18. Lv T., Fang M., Zeng X., Yan J., Huang Y., Cen J., Wang Q. Carbon Structure of Coal from the CP/MAS ¹³C NMR Spectra: Effect of Contact Time and Potential Quantitative Modification // *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38. № 5. P. 3740–3754. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c04714.
19. Krivdin L.B. Recent advances in liquid-phase NMR of the coal-derived products // *Magnetic Resonance in Chemistry*. 2024. Vol. 62. № 11. P. 775–802. DOI: 10.1002/mrc.5476.
20. Yu Y., Meng Z., Gao C., Lu Y., Li J. Experimental investigation of pore pressure effect on coal sample permeability under different temperatures // *Natural Resources Research*. 2022. Vol. 31. № 3. P. 1585–1599. DOI: 10.1007/s11053-022-10033-y.
21. Тайлаков О.В., Макеев М.П., Уткаев Е.А. Определение коллекторских свойств угля на основе численного моделирования и в лабораторных исследованиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 9. С. 99–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_99.
22. Zhang Y., Zhang Y., Li Y., Shi X., Che B. Determination of ignition temperature and kinetics and thermodynamics analysis of high-volatile coal based on differential derivative thermogravimetry // *Energy*. 2022. Vol. 240. P. 122493. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122493.
23. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D.G., Prisma Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement // *International journal of surgery*. 2010. Vol. 8. № 5. P. 336–341. DOI: 10.1016/j.ijsu.2010.02.007.
24. Parums D.V. Review articles, systematic reviews, meta-analysis, and the updated preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) 2020 guidelines // *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research*. 2021. Vol. 27. P. e934475-1. DOI: 10.12659/MSM.934475.
25. Алексеев А.Д., Калугина Н.А., Молчанов А.Н. Формы нахождения метана в ископаемом угле // *Форум горняков – 2009: материалы I международной конференции «Подземные катастрофы: модели, прогноз, предотвращение»* (Днепропетровск, НГУ, 30 сентября – 03 октября 2009 г.). 2009. С. 7–17.
26. Keshavarz A., Abid H., Ali M., Iglauer S. Hydrogen diffusion in coal: Implications for hydrogen geo-storage // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 608. P. 1457–1462. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.10.050.
27. Liu A., Liu S. Hydrogen sorption and diffusion in coals: Implications for hydrogen geo-storage // *Applied Energy*. 2023. Vol. 334. P. 120746. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120746.
28. Li H., Liu W., Lu J., Lu Y., Shi S., Wang Z., Jia Z. Effect of microwave-assisted acidification on the microstructure of coal: XRD, ¹H-NMR, and SEM studies // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023. Vol. 33. № 7. P. 919–926. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.03.009.
29. He J., Li H., Lu J., Yang W., Lin B., Liu M., Ye Q. Variations in the pore structure and fluid mobility under anionic surfactant assisted matrix acidification of coal based on nuclear magnetic resonance T1–T2 spectra // *Fuel*. 2024. Vol. 355. P. 129488. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129488.
30. Шаждо Я.В. Экспресс-метод определения давления и количества метана в угольных пластах // *Физико-технические проблемы горного производства*. 2011. № 14. С. 60–67.
31. Ульянова Е.В., Алексеев А.Д., Зайденварг В.Е., Синолицкий В.В. Радиофизика в угольной промышленности. М.: Недра, 1992. 184 с.
32. Алексеев А.Д., Ульянова Е.В., Васильковский В.В., Дегтярь С.Е. Влияние нарушения угольного пласта на кинетику выхода метана // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 13. С. 54–65.
33. Шаждо Я.В., Вишняк А.И. Концепция портативного спектрометра ядерного магнитного резонанса // *Труды РАНИ-МИ*. 2024. Т. 1. № 3 (41). С. 277–287.
34. Wang N., Du Y., Fu C., Ma X., Zhang X., Wang J., Wang N. Experimental study on spontaneous imbibition of coal samples of different ranks based on the NMR relaxation spectrum // *ACS omega*. 2023. Т. 8. № 37. С. 33526–33542. DOI: 10.1021/acsomega.3c03534.
35. Ye S., Aboutanios E., Thomas D.S., Hook J.M. Localised high resolution spectral estimator for resolving superimposed peaks in NMR signals // *Signal Processing*. 2017. Vol. 130. P. 343–354. DOI: 10.1016/j.sigpro.2016.07.024.
36. MacDonald R., Sokolenko S. Detection of highly overlapping peaks via adaptive apodization // *Journal of Magnetic Resonance*. 2021. Vol. 333. P. 107104. DOI: 10.1016/j.jmr.2021.107104.
37. Азаров А.В., Ефремов Р.А., Борисенко Э.В. Использование метода ядерного магнитного резонанса в горном деле и проблема обработки сигналов // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2024. Т. 11. № 3. С. 9–15. DOI: 10.15372/FPVGN2024110302.
38. Saito K., Kanehashi K., Komaki I. Applications of NMR techniques to coal science // *Annual reports on NMR Spectroscopy*. 2001. Vol. 44. P. 23–74. DOI: 10.1016/S0066-4103(01)44003-8.
39. Mullagaliyeva L.F., Baimukhametov S.K., Portnov V.S., Yurov V.M. On the issue of thermal destruction of coal matter // *Engineering Journal of Satbayev University*. 2022. Vol. 144. № 1. P. 57–61. DOI: 10.51301/ejsu.2022.i1.09.
40. Chen C., Yang Q., Zhang R., Liu D. Assessment on combustion chemistry of coal volatiles for various pyrolysis temperatures // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 104. P. 22–34. DOI: 10.1016/j.joei.2022.07.001.
41. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Кириллов А.К., Молчанов А.Н., Троицкий Г.А., Дончук А.В. Изменение динамических параметров воды в объеме пор ископаемых углей в зависимости от температуры // *Физика и техника высоких давлений*. 2010. Т. 20. № 2. С. 143–151.

СТАТЬЯ

УДК 528.02:528.7:528.2/.5
DOI 10.17513/use.38405

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБЩЕДОСТУПНОЙ
ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ
В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ BLENDER**

Насередин Х.Х., Алексашина Е.В., Акель М.А.

¹*Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва,
e-mail: eo-gis25@mail.ru;*

²*Дамасский университет, Дамаск*

Цифровые двух и трёхмерных документы можно использовать в бесчисленном количестве областей нашей жизни, как в военной, так и в гражданской, и в экономической области. Свойство документов и способ получения различаются в зависимости цели дальнейшего использования, требуемой точности и области применения. Виды цифровых документов местности: цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, цифровые модели высоты, цифровые топографические карты, ортофотопланы местности и т.д. Целью данного исследования является использование компьютерного моделирования для имитации аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата для повышения точности создания цифровой модели, полученной из одного из открытых источников в сети Интернет, путем изучения эффекта увеличения количества опорных точек, полученных в результате полевой геодезической съемки предполагаемой территории, что помогает дать наилучшие результаты реальной цифровой карты, с оптимальными финансовыми и временными затратами. Была проведена работа по моделированию многих территорий, по которым имеются полевые геодезические съемки, но из-за ограниченной возможности статьи автор выбрал лишь два варианта, на которых представлены открытая местность без сооружений и местность с плотной застройкой, различные климат и условия съемки на обоих участках. Результаты исследований и практических экспериментов показали снижение ошибок аэрофотосъемки исходной модели по контрольным точкам с известными координатами за счет увеличения количества опорных точек, которые используются для масштабирования моделей, полученных в результате обработки снимков компьютерного моделирования аэрофотосъемки исходной модели и в результате снижения среднеквадратических ошибок до четверти значения в большинстве случаев.

Ключевые слова: аэрофототопографическая съемка, имитационное моделирование, программное обеспечение BLENDER, фотографирование, цифровая модель местности, цифровая модель рельефа

**IMPROVING THE ACCURACY OF PUBLICLY AVAILABLE DIGITAL
TERRAIN MODELS USING SIMULATION MODELING OF AERIAL
PHOTOGRAMMETRIC SURVEYS IN BLENDER SOFTWARE**

Nasereddin K.K., Aleksashina E.V., Akel M.A.

¹*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, e-mail: eo-gis25@mail.ru;*

²*Damascus University, Damascus*

Two-dimensional and three-dimensional digital documents can be utilized in countless areas of scientific research, as well as in civil, military, and economic applications. The properties of the documents and the method of obtaining them differ depending on the required accuracy, the purpose of further use and the area of application. Types of digital terrain documents: digital terrain models, digital elevation models, digital topographic maps, orthophoto plans, etc. The purpose of this study is to use computer modeling to simulate aerial photography using Drones, to improve the accuracy of creating a digital model obtained from open sources on the Internet, by studying the effect of increasing the number of control points obtained as a result of field geodetic survey of the proposed territory, which give the best results of a real digital map, with optimal financial and time. Work was carried out on modeling many territories for which field geodetic surveys are available, due to the limited the article, were chosen only two options, which with and without structures and terrain, different climates and survey conditions in both areas. The results of experiments showed a decrease error of aerial photography of the original model increasing control points with known coordinates, and as a result, reducing the mean square errors more than 50% in most cases.

Keywords: digital terrain model, digital terrain elevation, aerial survey simulation, aerial photography, photography, blender software abstract

Введение

Цифровая модель рельефа (ЦМР) и цифровая модель местности (ЦММ) являются важными инструментами для создания

трехмерного представления местности и используются в различных областях науки и производства, таких как география, геология, экология, городское планирова-

ние и многие другие. Эти модели позволяют глубже понять характер местности, ее направления, склоны, а также методы трехмерного отображения рельефа поверхности Земли. ЦМР широко применяется в геоинформационных системах для решения различных задач – от простого анализа данных до сложного моделирования, направленного на определение оптимальных мест для строительства инженерных сооружений. Кроме того, цифровые модели рельефа находят многочисленные применения в гражданском строительстве, в частности при проектировании канализационных сетей, выделении контурных линий, анализе склонов и естественных направлений изучаемого участка. Они также полезны при проведении работ по гражданскому планированию и в оценке объемов земляных работ и обратной засыпки в строительных проектах [1-3].

Существует несколько типов цифровых моделей рельефа. Цифровая модель рельефа (ЦМР) отображает рельеф местности на основе высот, отображая его в целом. Цифровая модель рельефа на основе поверхности (digital surface models DSM) учитывает все объекты, находящиеся над землей, такие как деревья, здания и другие сооружения. Наземная цифровая модель рельефа (DTM) представляет поверхность Земли с учетом удаления различных объектов, чтобы показать только естественный рельеф [4-6].

Целью исследования является использование компьютерного моделирования для имитации аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата для повышения точности создания цифровой модели территории.

Материалы и методы исследования

Для достижения этой цели проводится исследование влияния увеличения количе-

ства контрольных точек, полученных в результате геодезической съемки предполагаемой территории. Данный подход позволяет достичь наилучших результатов при создании реальной цифровой карты с учетом оптимальных финансовых и временных затрат, что способствует повышению эффективности процесса картографирования и геодезических изысканий.

Существует несколько общедоступных универсальных цифровых моделей рельефа, которые отличаются друг от друга по точности (5, 10, 12,5, 30 и 90 м), таких как SRTM, ALOS AW3D30, ASTER GDEM, TANDEM, ALOS PALSAR, EMG2008 [7]. В качестве исходных данных для исследований использована цифровая модель рельефа SRTM, полученная из общедоступных интернет-источников, таких как OpenStreetMap. Для визуализации, редактирования и моделирования аэрофотосъемки на базе модели SRTM применялось программное обеспечение Blender 3D. Для этого необходимо настроить программное обеспечение и установить специальное приложение под названием GSI, которое позволяет соединяться с различными источниками общедоступной цифровой модели рельефа SRTM [8; 9]. На рисунке 1 показано, как использовать приложение GSI, а также как выбирать подходящую цифровую модель местности.

Также использовалось программное обеспечение Metashape для получения ортофотопланов и цифровой модели местности на основании данных аэрофотосъемки. В программном продукте Civil 3D построены поверхности на основе топографической съемки для каждого района исследования, а результаты экспортированы в формате LandXML [10].

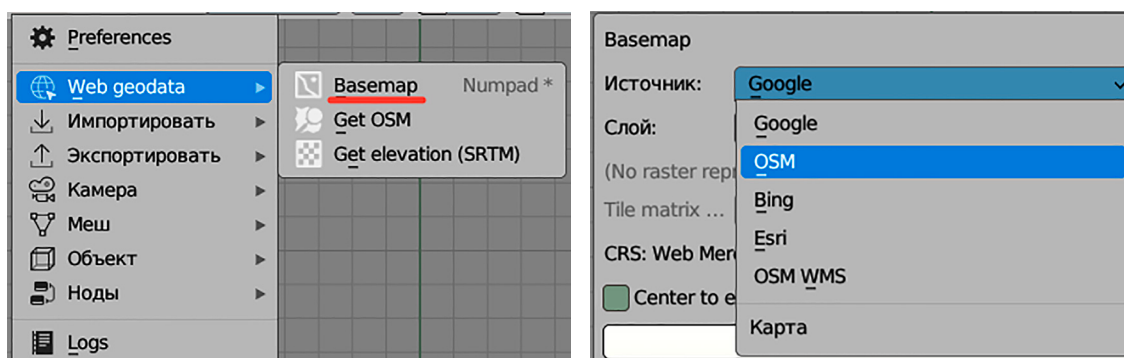


Рис. 1. Функции GSI (слева), OSM (справа) в программе Blender 3D
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

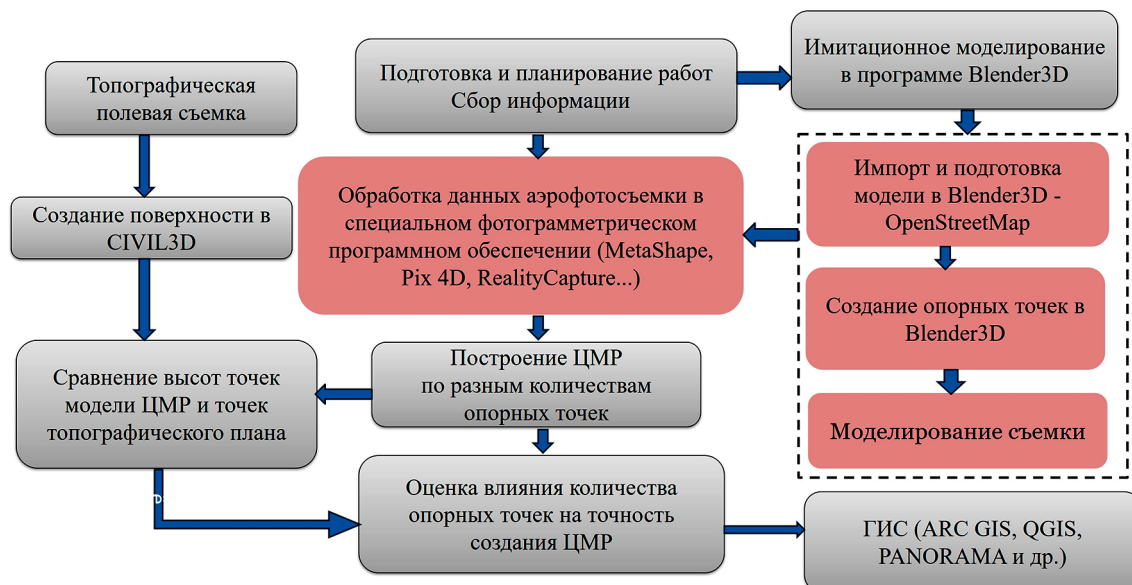


Рис. 2. Порядок исследования
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

В статье представлен анализ точности общедоступной цифровой модели рельефа SRTM, а также оценка ее точности. Для этого использовались геодезические данные в виде следующих топографических планов:

1. Топографический план в масштабе 1:500 для строительства инженерных проектов жилого комплекса «I Love» (г. Москва, СВАО).

2. Топографический план в масштабе 1:500 для строительства инженерных проектов жилого комплекса «Бирюлево» (г. Москва, ЮАО).

3. Модель SRTM была применена для каждого исследуемого района и получена с использованием программного обеспечения для 3D-моделирования, такого как Blender.

Порядок исследования, представленный на рисунке 2, начинается с подготовки и планирования работы, а также сбора информации. На первом этапе осуществляется сбор топографической съемки для каждого исследуемого района.

На втором этапе проводится имитационное моделирование в программе Blender 3D, которое проходит несколько шагов. В первый шаг входят импорт и подготовка модели в Blender 3D. В рамках данного исследования авторы импортировали модель из известных источников общедоступной цифровой модели местности, таких как Get OSM и Get Elevation (SRTM). После выбора источников выбираем участок, нажимаем на клавиатуре букву *E*, чтобы импортировать

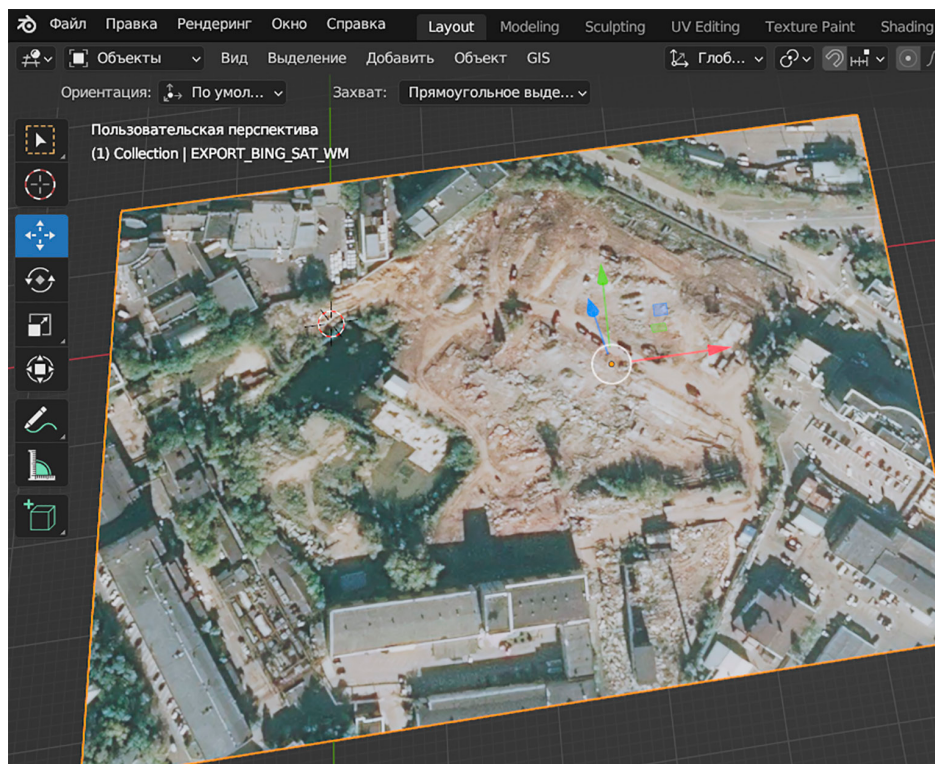
выбранную область в программу Blender. Таким образом, получим цифровую модель местности для районов жилого комплекса «I Love» и жилого комплекса «Бирюлево» в среду программного продукта Blender 3D, что показано на рисунках 3а и 3б.

Второй шаг в имитационном моделировании в программных продуктах Blender 3D – это создание опорных геодезических точек для преобразования импортируемых моделей в местные системы координат. Для этого необходимо смоделировать опорные точки. Используем одну из фигур, которую можно добавить в программу (например, куб), разделяем её на две части и раскрашиваем в разные цвета, чтобы четко обозначить центр куба, который будет служить координатой опорной точки. Повторяем действия для других опорных точек, и в структуре проекта появятся все опорные точки. Перемещаем эти точки на высотную модель SRTM и определяем местонахождение каждой точки, которая соответствует топографическому плану района исследования [11–13], что показано на рисунках 4а и 4б.

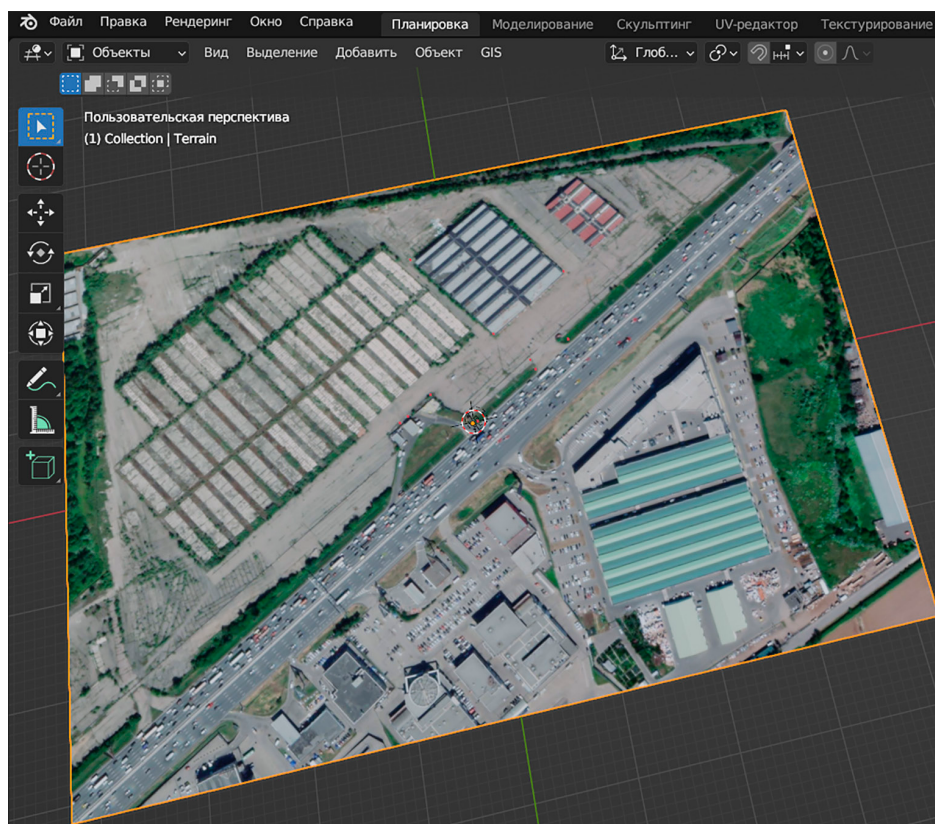
Третий шаг – это моделирование съемки. На основании длины и ширины участка, а также максимальной и минимальной высоты модуля можно определить размер пикселей по формуле:

$$PxI = Xn / Xu, \quad (1)$$

где Xn – физический размер матрицы и Xu – размер изображения.



*Рис. 3а. Модель ЦММ района ЖК «I Love»
Источник: составлено автором на основе результатов исследования*



*Рис. 3б. Модель ЦММ района ЖК «Бирюлево»
Источник: составлено автором на основе результатов исследования*

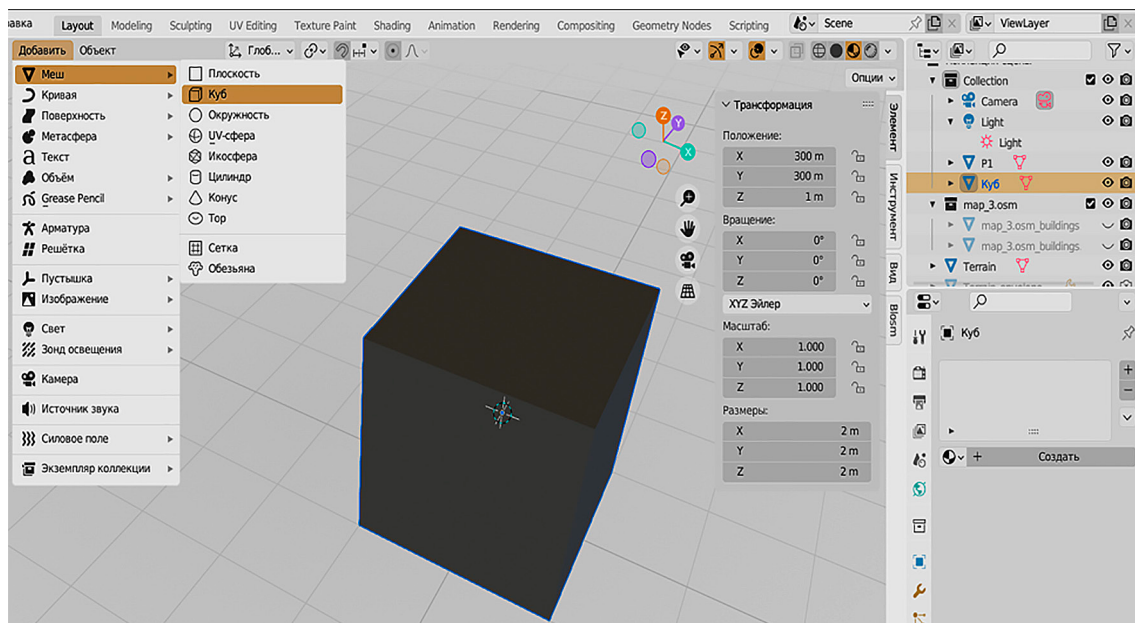


Рис. 4а. Пример маркеров в качестве опорных точек
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

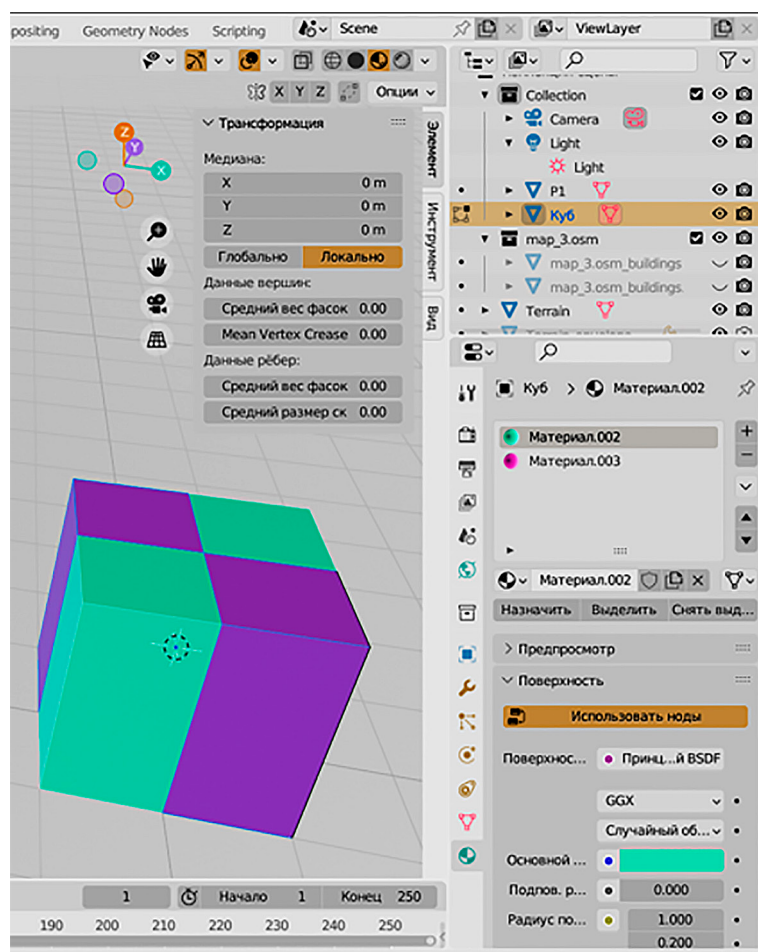


Рис. 4б. Пример маркеров опорных точек
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

Также определяем параметры камеры аэрофотосъемки, её калибровку, расчет маршрутов и значений продольного и поперечного перекрытия между снимками, а также рассчитываем высоту моделируемой съемки с учетом разрешения, необходимого для получения требуемой модели [14].

Расчетная высота фотографирования H_ϕ [15]

$$H_\phi = 2R \cdot GSD \cdot (f_k / \delta), \quad (2)$$

где H_ϕ – высота фотографирования относительно заданной поверхности (м);

f_k – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрице (цикл./пиксель)

δ – размер пикселя матрицы (м).

Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, p_x % [15]

$$p_x = p_{x0} + \Delta ph + \Delta pn, \quad (3)$$

где p_{x0} – минимальное продольное перекрытие = 60%,

Δph – поправка за рельеф,

$$\Delta ph = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_\phi}. \quad (4)$$

где Δh – разность между самой высокой точкой и самой низкой точкой участка,

Δpn – навигационная поправка за ошибку самолетоуправления.

Расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков, p_y % [15].

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40\% + \left(50 \times \frac{\Delta h}{100 \times H_\phi} \right). \quad (5)$$

Продольный базис фотографирования, B_x (м)

$$B_x = \frac{(X_\Pi M_\phi)(100 - p_x)}{100}, \quad (6)$$

где $M_\phi = H_\phi / f$: знаменатель масштаба фотографирования

Поперечный базис фотографирования, B_y (м) [15]

$$B_y = \frac{(Y_\Pi M_\phi)(100 - p_y)}{100}, \quad (7)$$

где X_Π, Y_Π : физический размер матрицы (м)

Интервал фотографирования τ (сек.):

$$\tau = \frac{X_\Pi H_\phi}{f \cdot w} \cdot \frac{100 - p_x}{100}, \quad (8)$$

где X_Π – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м),

W – путевая скорость БВС (м/с).

Количество аэроснимков в одном маршруте, N_x [15]:

$$N_x = (L_x / B_x) + N_3; \quad N_3 = 4, \quad (9)$$

где L_x – длина участка съёмки (м)

Количество маршрутов, N_y [15]:

$$N_y = (L_y / B_y) + 0.5j; \quad j = 2, \quad (10)$$

где L_y – ширина участка (м)

Таблица 1

Расчетные данные аэрофотосъемки для двух районов: «I Love» и «Бирюлево»

Название элементов	Усл. обозначение	ЖК «I Love»	ЖК «Бирюлево»
Длина участка, км	Lx	0.38	0,7
Ширина участка, км	Ly	0.4	0,58
Максимальная высота участка, м	h max.y.	183.00	178
Минимальная высота участка, м	h min.y.	170.00	160
Высота среднего уровня участка, м	h ср.y.	176.50	169
Физический размер матрицы	X _п (lx)	0.0086	0.0086
	Y _п (ly)	0.0129	0.0129
Размер изображения	X _и	3648	3648
	Y _и	5472	5472
Фокусное расстояние (м)	f	0.0088	0.0088
Размер пикселя (м)	pxl	0,00000236	0,00000236
Количество маршрутов		5	5
Количество снимков		52	72
Высота съемки, м		186	186

Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Все результаты расчетов и параметры аэрофотосъемки для двух районов исследования представлены в таблице 1.

В результате моделирования съемки с использованием программных продуктов Blender 3D были получены данные аэрофотосъемки для двух районов исследования. Эти данные можно обрабатывать в специализированном программном обеспечении Metashape для построения цифровой модели местности и ортофотоплана. Следует отметить, что программа используется для решения задач построения трехмерных моделей на основе фотографий и является универсальной, позволяя создавать высоко детализированные 3D-модели только по фотографиям.

При работе в программе Metashape после указания параметров камеры, добавления и выравнивания снимков строится плотное облако точек и модель привязывается по четырем опорным геодезическим точкам, далее создаются 3D-модель, ЦММ и ортофотоплан [16].

После этого возвращаемся к облаку точек и увеличиваем количество опорных точек до восьми, продолжая построение цифровой модели местности и ортофотоплана. На последнем этапе увеличиваем количе-

ство опорных точек до двадцати и вновь формируем цифровую модель местности и ортофотоплан.

Повторяем эту работу для второго района исследования. В итоге авторы получали три цифровые модели местности и три ортофотоплана для каждого района.

Первая модель привязана по четырем опорным точкам, вторая – по восьми точкам, а третья, финальная модель – по максимальному количеству 20 геодезических точек (рис. 5).

На рисунках 6а, 6б представлено, как был получен ортофотоплан для каждого района работы, который был максимально привязан к опорным геодезическим точкам. В данном примере использовано 20 точек.

Экспортируем цифровую модель местности для каждого примера в формате LandXML.

На последнем этапе исследований можно провести сравнение двух поверхностей – существующей, полученной с помощью CIVIL3D, и поверхности, созданной на основе общедоступной цифровой модели местности с использованием методики имитационного моделирования в программном продукте BLENDER.

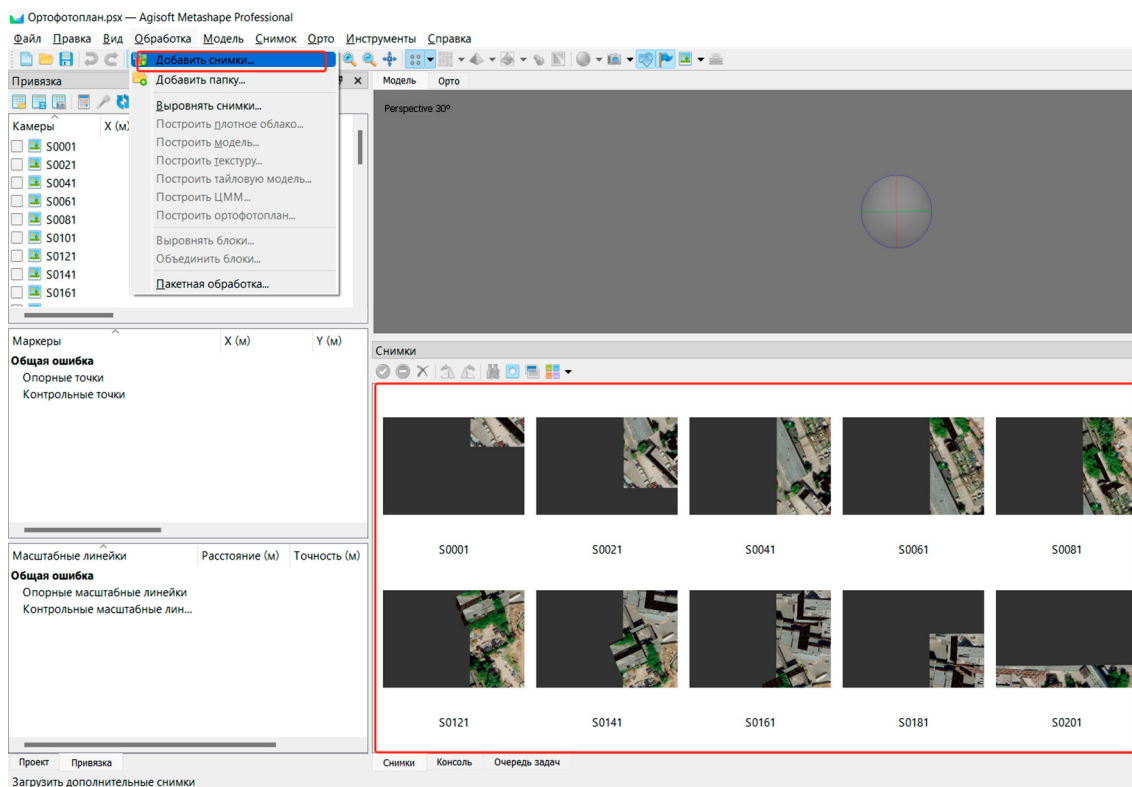


Рис. 5. Порядок построения цифровой модели местности в программе MetaShape
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

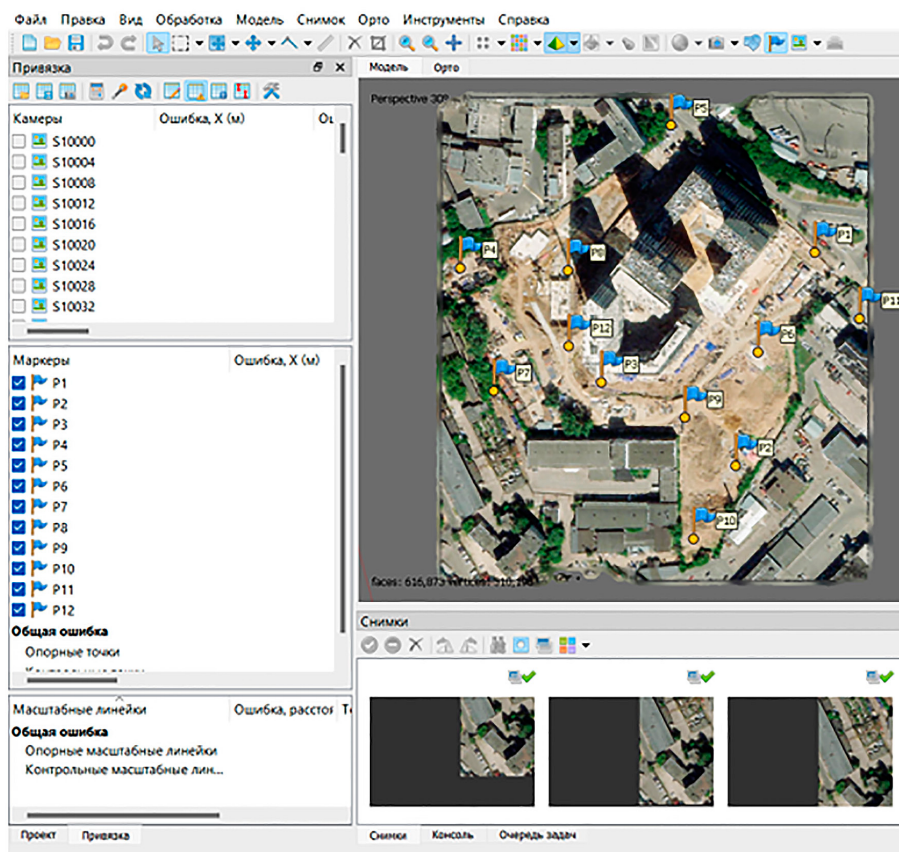


Рис. 6а. Ортофотоплан, ЖК «I Love»

Источник: составлено автором на основе результатов исследования

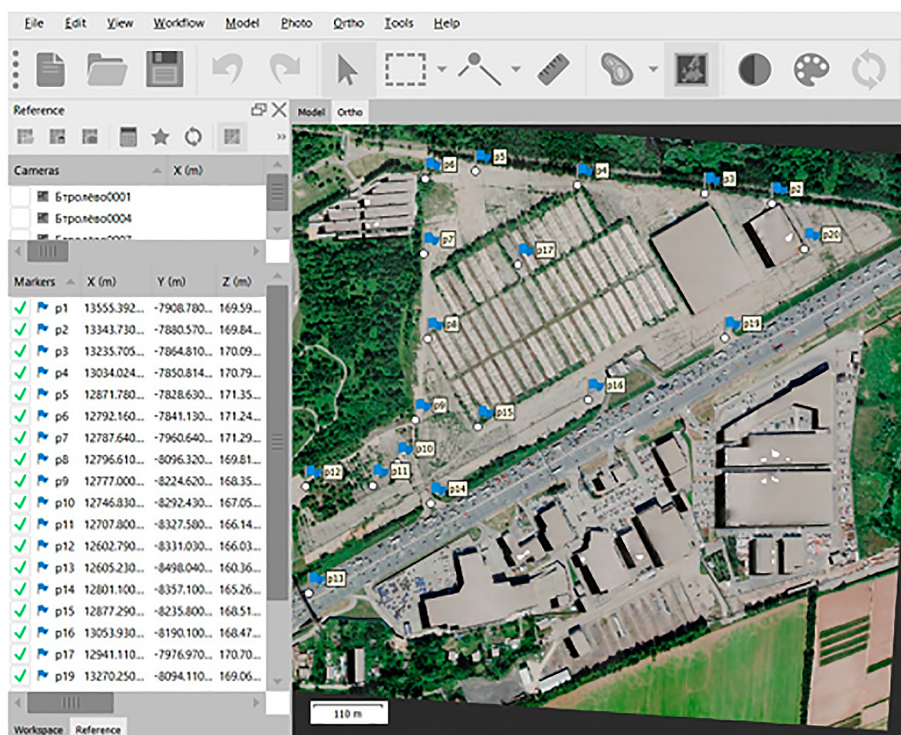


Рис. 6б. Ортофотоплан, ЖК «Бирюлево»

Источник: составлено автором на основе результатов исследования

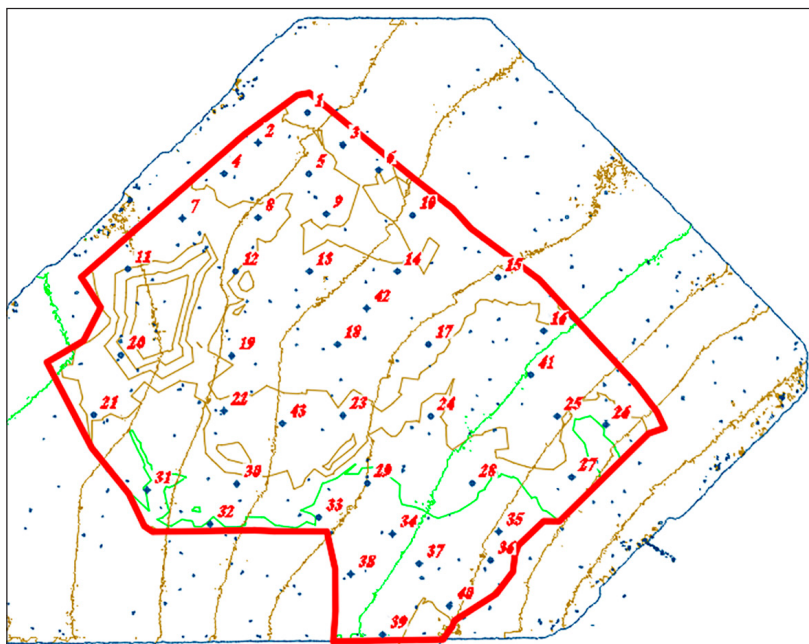


Рис. 7а. Сравнение двух поверхностей по высоте
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

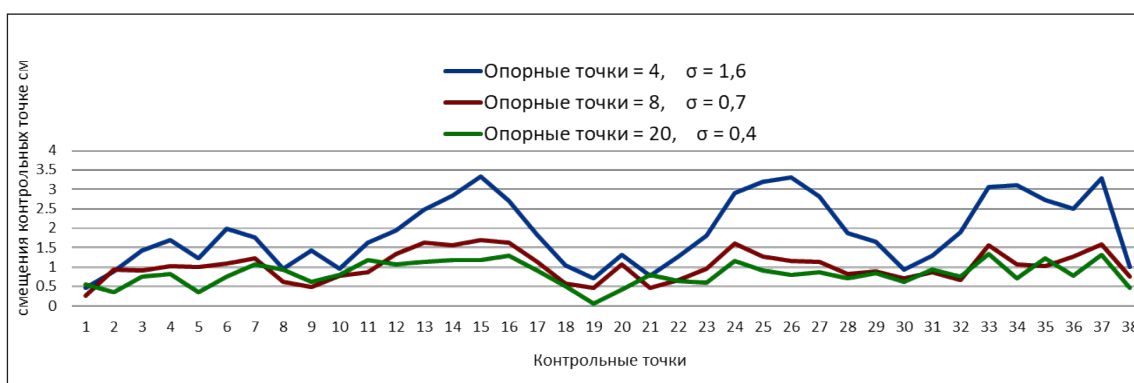


Рис. 7б. Точность модуля при увеличении количества геодезических опорных точек (ЖК «I Love»)
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

В результате сравнения среднее квадратическое отклонение между существующей поверхностью и поверхностью, созданной на основе общедоступной цифровой модели местности, привязанной к четырем опорным точкам, составляет 1,6 метра. При увеличении количества опорных точек до восьми среднее квадратическое отклонение уменьшилось до 0,7 метра. Для поверхности общедоступной цифровой модели местности, привязанной к 20 опорным геодезическим точкам, средняя квадратическая ошибка составила 0,4 метра. Это вся информация по жилому комплексу «I Love». Все результаты сравнения представлены на рисунках 7а, 7б и в таблице 2.

При повторении такого сравнения для второго района исследования – жилого комплекса «Бирюлево» средняя квадратическая ошибка при сравнении между существующей поверхностью и поверхностью общедоступной цифровой модели местности, привязанной к четырем опорным точкам, составила 4,6 метра. При увеличении количества опорных точек до восьми среднее квадратическое отклонение уменьшилось до 1,6 метра. При привязке к 20 опорным геодезическим точкам оно снизилось до 1,3 метра. Результаты сравнения представлены на рисунках 8а, 8б и в таблице 3.

Таблица 2

Сравнение высот точек модели SRTM и точек топографического плана (ЖК «I Love»)

Номер точки	ЖК «I Love»			4 опорные точки			8 опорных точек			20 опорных точек		
	Восточное положение	Северное положение	Отметка	Отметка	ΔH		Отметка	ΔH		Отметка	ΔH	
1	7988,050	16048,269	154,280	154,750	-0,470	1,487	154,530	-0,250	0,206	154,830	-0,550	0,033
2	7970,611	16040,365	155,360	154,470	0,890	2,541	154,420	0,940	2,703	155,000	0,360	1,191
3	8010,270	16041,162	154,000	155,430	-1,430	0,527	154,900	-0,900	0,038	154,750	-0,750	0,000
4	8014,127	16030,577	153,930	155,620	-1,690	0,972	154,960	-1,030	0,106	154,750	-0,820	0,008
5	7962,349	16027,380	155,450	154,220	1,230	3,740	154,460	0,990	2,870	155,110	0,340	1,148
6	8033,319	16018,391	154,060	156,040	-1,980	1,628	155,140	-1,080	0,141	154,810	-0,750	0,000
7	8003,732	16016,393	153,670	155,430	-1,760	1,115	154,890	-1,220	0,266	154,740	-1,070	0,115
8	7980,941	16015,794	154,070	155,030	-0,960	0,066	154,700	-0,630	0,005	155,010	-0,940	0,043
9	7954,352	16014,196	155,040	153,610	1,430	4,554	154,550	0,490	1,426	155,650	-0,610	0,015
10	7942,558	16001,184	155,380	154,420	0,960	2,769	154,610	0,770	2,173	156,180	-0,800	0,005
11	7975,062	16001,786	153,970	155,590	-1,620	0,839	154,830	-0,860	0,024	155,140	-1,170	0,192
12	8005,359	16002,187	153,780	155,720	-1,940	1,528	155,110	-1,330	0,392	154,840	-1,060	0,108
13	8032,445	16003,189	153,760	156,230	-2,470	3,119	155,390	-1,630	0,857	154,900	-1,140	0,167
14	8055,519	16003,390	153,930	156,760	-2,830	4,520	155,490	-1,560	0,733	155,120	-1,190	0,210
15	8072,625	15982,483	154,270	157,610	-3,340	6,948	155,960	-1,690	0,972	155,450	-1,180	0,201

Примечание: $\delta = 1,6$ $\delta = 0,7$ $\delta = 0,4$.

Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Таблица 3
Сравнение высот точек модели SRTM и точек топографического плана (ЖК «Бирюлево»)

Номер точки	ЖК «Бирюлево»			4 опорные точки			8 опорных точек			13 опорных точек		
	Восточное положение	Северное положение	Отметка	Отметка	ΔН		Отметка	ΔН	Отметка	Отметка	ΔН	
1	-245689,23	-120709,838	697,72	696,33	1,39	17,25	700,11	-2,39	697,58	697,58	0,14	0,26
2	-244923,8	-120745,455	700	693,86	6,14	79,26	697,71	2,29	698,57	698,57	1,43	3,25
3	-245328,37	-120810,163	696,54	693,97	2,57	28,44	697,71	-1,17	695,54	695,54	1	1,88
4	-245691,25	-120805,006	700	697,65	2,35	26,14	700,55	-0,55	699,93	699,93	0,07	0,19
5	-245686,25	-120895,947	703,43	706,45	-3,02	0,07	704,45	-1,02	703,84	703,84	-0,41	0,00
6	-245325,39	-120927,733	695,89	697,21	-1,32	2,08	696,57	-0,68	694,73	694,73	1,16	2,35
7	-245331,69	-121017,699	696,88	700	-3,12	0,13	697,53	-0,65	697,05	697,05	-0,17	0,04
8	-245329,38	-121137,62	698,37	706,38	-8,01	27,53	701,72	-3,35	700,41	700,41	-2,04	2,78
9	-244895,95	-121171,393	696,19	699,38	-3,19	0,18	695,98	0,21	696,94	696,94	-0,75	0,14
10	-245327,24	-121271,315	700	707,46	-7,46	22,06	701,75	-1,75	700,99	700,99	-0,99	0,38
11	-244882,03	-121268,739	697,48	702,18	-4,7	3,75	696,22	1,26	698,44	698,44	-0,96	0,35
12	-244881,29	-121368,043	698,89	707,28	-8,39	31,66	700,05	-1,16	698,55	698,55	0,34	0,51
13	-245317,29	-121356,055	699,21	708,37	-9,16	40,92	702,53	-3,32	702,86	702,86	-3,65	10,75

Примечание: $\delta = 4,6$ $1,6$ $\delta = 1,3$.
Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

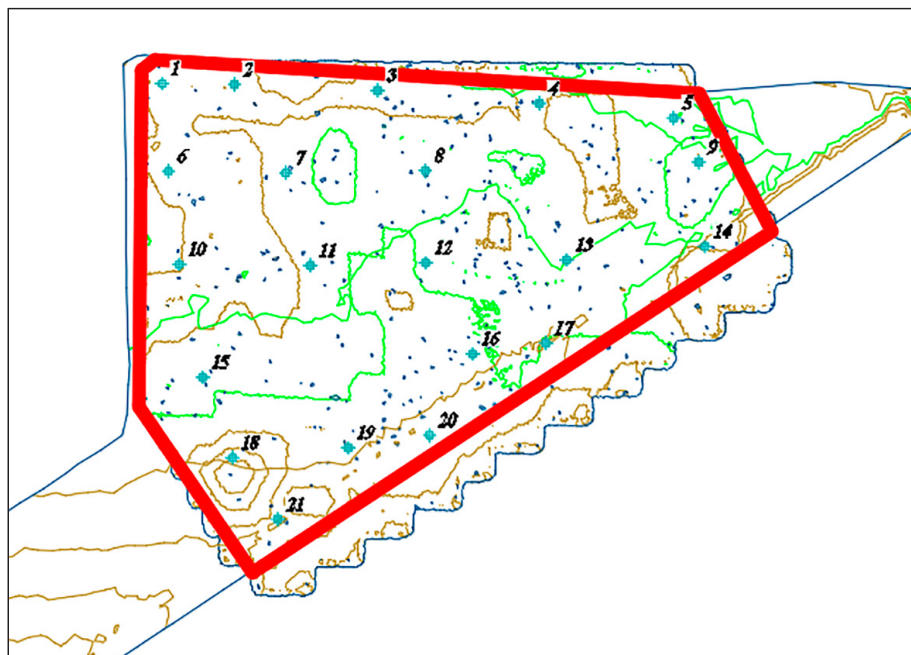


Рис. 8а. Сравнение двух поверхностей по высоте
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

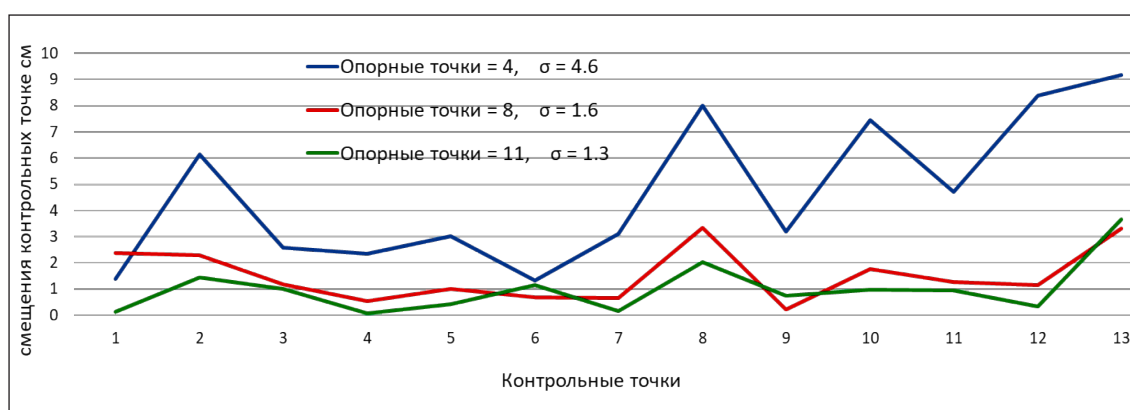


Рис. 8б. Точность модуля при увеличении количества геодезических опорных точек (ЖК «Бирюлево»)
Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Выводы

1. В исследовании выполнена оценка точности цифровой модели рельефа, которая демонстрирует, что средняя квадратическая погрешность высот понижается за счет добавления опорных точек.

2. Из исследования видно, что цифровая модель местности лучше зарекомендовала себя на «открытых» равнинных участках, чем на «закрытых» участках или на участках с уклоном.

3. Рекомендуется использовать цифровую модель местности для проектирования только после добавления минимально

12 и более опорных точек в зависимости от уровня и свойства сложности рельефа.

4. Цифровая модель рельефа SRTM является важным бесплатным исходным материалом для многих исследований, но она по-прежнему содержит значительные высотные погрешности.

Список литературы

1. Костин А.В. Цифровая модель рельефа (методы создания и направления использования) // Наука и техника в Якутии. 2011. № 1 (20). С. 23-28. EDN: VZWGUW.
2. Gospodinov S.G. Geoinformatics as a science of space // European Journal of Technology and Design. 2022. № 10-1. P. 3-8. DOI: 10.13187/ejtd.2022.1.3. EDN: UZKTCC.

3. Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: 5-я Всероссийская научно-техническая интернет-конференция, Тула, 23–27 декабря 2015 года / Под редакцией И.А. Басовой. Тула: Тульский государственный университет, 2015. 392 с. ISBN 978-5-7679-3156. EDN: UBWVLT.
4. Васин А.О., Круглов Б.В. Построение трехмерных цифровых моделей рельефа по данным дистанционного зондирования земли // Контенант. 2019. Т. 18. № 1-1. С. 11-15. EDN: ZAMZSX.
5. Белова Е.А. Создание цифровой модели местности по результатам топографической съемки // Вестник магистратуры. 2016. № 11-2 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozдание-tsifrovoy-modeli-mestnosti-po-rezultatam-topograficheskoy-semki> (дата обращения: 15.06.2025).
6. Черных Е.Г., Букреев Д.А. Цифровые модели местности: классификация и методика // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2023. № 6. EDN: KYNPTH.
7. Павлова А.И., Павлов А.В. Анализ методов коррекции цифровых моделей рельефа, построенных по спутниковым данным // Автометрия. 2018. Т. 54. № 5. С. 25-32. DOI: 10.15372/AUT20180503. EDN: YLEOST.
8. Mukul M., Srivastava V., Mukul M. Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network // Journal of Earth System Science. 2015. Vol. 124. P. 1343-1357. DOI: 10.1007/s12040-015-0597-2.
9. Nwacholundu U.V., Izuchukwu I.J., Ebele E.J., Onyedika E.J., Chinagorom I.E. Generating and analyzing terrain characteristics from shuttle radar topographic mission (SRTM), DEM. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2021. Vol. 10 (3). P. 198-206. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d741/bb6205691d206f35664322a13ba6d579aeca.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
10. Agisoft Metashape. Руководство пользователя // Agisoft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agisoft.com> (дата обращения: 15.06.2025).
11. Акель Мохаммад Амин, Акл Магер Нассер, Алтынов А.Е. Использование методов имитационного моделирования для поиска наилучших решений получения трехмерных моделей местности по данным с беспилотных авиационных систем // Успехи современного естествознания. 2022. № 8. С. 150-159. DOI: 10.17513/use.37882. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37882> (дата обращения: 15.06.2025).
12. Акель Мохаммад Амин, Алтынов А.Е. Исследование влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы (аэрофотосъемки, лазерного сканера) на точность создания ЦММ с помощью имитационного моделирования // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 110-120. DOI: 10.17513/use.37833. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37833> (дата обращения: 15.06.2025).
13. Акель М.А. Выбор соответствующих параметров аэрофотосъемки с БВС для получения ЦММ с необходимой точностью // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. С. 391-396. EDN: CPNNOV.
14. Рихтер А.А., Чуклин С.И. Алгоритм калибровки фотограмметрических параметров для расчёта трёхмерных координат точек изображения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2024. Т. 20. № 3. С. 259-275. EDN: PLMRMV.
15. Курков В.М., Киселева А.С., Чибуничев А.Г. Исследование точности цифровой модели рельефа, построенной по материалам беспилотной аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : материалы международной научно-практической конференции (Кемерово, 13–14 апреля 2022 года) / Под редакцией Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 309.1–309.9. EDN: HDLUVС.
16. Торопов И.С. Оценка точности создания модели местности на основе аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата с помощью Agisoft Metashape // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 1. С. 195-199. EDN: UPZGTD.