

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,831

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,333

Журнал издается с 2001 г.

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

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

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – П7816

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

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

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент Абдулвалеев Р.Р. (Уфа); д.г.-м.н., проф., Абилхасимов Х.Б. (Астатна); 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. Егорова 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 Кузьяков О.Н. (Тюмень); д.г.-м.н., проф. Кучеренко И.В. (Томск); д.б.н., проф. Ларионов М.В. (Саратов); д.г.-м.н., проф. Лебедев В.И. (Кызыл); д.ф.-м.н., проф. Лерер А.М. (Ростов-на-Дону); д.г.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., проф. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Мусаев В.К. (Москва); д.т.н., доцент Нехорошева А.В. (Ханты-Мансийск); д.с.-х.н., Никитин С.Н. (Ульяновск); д.с.-х.н., Оказова З.П. (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. Партоев К. (Душанбе); д.с.-х.н., проф. Петелько А.И. (Мценск); 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. Ширапов 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)

Журнал «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ» зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций.

Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398.

Все публикации рецензируются. Доступ к электронной версии журнала бесплатный.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,831.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,333.

Журнал зарегистрирован в Centre International de l'ISSN. ISSN 1681-7494.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

Учредитель, издательство и редакция:
ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна

+7 (499) 705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Подписано в печать – 28.02.2023

Дата выхода номера – 31.03.2023

Формат 60x90 1/8

Типография

ООО «Научно-издательский центр

Академия Естествознания»,

410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

Техническая редакция и верстка

Доронкина Е.Н.

Корректор

Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Способ печати – оперативный.

Распространение по свободной цене.

Усл. п.л. 16

Тираж – 1000 экз.

Заказ. УСЕ/2-2023

Подписной индекс П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1. Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬИ

| | |
|--|----|
| ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ ЧИНЫ ПОСЕВНОЙ <i>Зайцев С.А., Башинская О.С., Волков Д.П., Бабушкин Д.Д., Пташник О.П., Маракаева Т.В.</i> | 7 |
| ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБСТРАТОВ НА ОСНОВЕ ТОРФА И КОМПСТИРОВАННЫХ ОТХОДОВ АКТИВНОГО ИЛА АРХАНГЕЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА <i>Наквасина Е.Н., Никитина М.В., Коптев С.В., Сунгурова Н.Р., Игамбердиева А.А.</i> | 13 |
| ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ МЕЖДУРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ ПОСЕВОВ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ <i>Хамуков Ю.Х., Канокова М.А.</i> | 18 |

Сельскохозяйственные науки (4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация)

СТАТЬИ

| | |
|--|----|
| СТАНДАРТНЫЕ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ, ВИДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБОРОЧНЫХ ДАННЫХ И ТИПЫ АСИММЕТРИИ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ЧЕРЕМУХИ ОБЫКНОВЕННОЙ (<i>PRUNUS PADUS L.</i>) <i>Зыков И.Е., Баранов С.Г., Прокопенко А.Д.</i> | 24 |
| ОСОБЕННОСТИ ПРИРОСТА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ИНТРОДУЦЕНТОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БРАТСКА <i>Рунова Е.М., Аношкина Л.В.</i> | 30 |
| ЛЕСОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРИАНГАРЬЯ <i>Чжан С.А., Пузанова О.А.</i> | 36 |

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

| | |
|---|----|
| ПЕЩЕРА НЕЖНАЯ АПШЕРОНСКОГО РАЙОНА КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ КАК ОБЪЕКТ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ <i>Антипцева Ю.О., Пикалова Н.А., Волкова Т.А., Бойко Е.С., Климов Н.Н.</i> | 41 |
| КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ ТОБОЛ И КУРГАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА <i>Несговорова Н.П., Савельев В.Г.</i> | 47 |
| ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕКИ ПОДКУМОК <i>Окрут С.В., Зеленская Т.Г., Степаненко Е.Е., Коровин А.А., Халикова В.А.</i> | 58 |
| ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ <i>Топчая В.Ю., Чечко В.А.</i> | 65 |

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

| | |
|---|----|
| ПРИМЕНЕНИЕ ЭТАЛОННОГО ТЕЛА ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ <i>Васильев П.С.</i> | 76 |
| ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ «ТАТНЕФТЬ» <i>Галимуллин А.Ф., Бахтеев К.Р.</i> | 82 |
| МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РАЗМЕР И МАССА ПЫЛИ $PM_{0,1}$ ОКОЛО УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ <i>Казанцева У.Д., Яковенко О.С., Лешукова М.К., Легощин К.В., Лешуков Т.В., Ларионов А.В.</i> | 90 |

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

| | |
|--|-----|
| ВЛИЯНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ <i>Алексеев К.Н., Петров Д.Н.</i> | 96 |
| ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНОГО БЕНТОНИТА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПРОЦЕССЕ ЕГО АКТИВАЦИИ <i>Бортников С.В., Горенкова Г.А., Беспалова М.А., Ворожцов Е.П.</i> | 101 |

Физико-математические науки (1.6.22)
СТАТЬИ

| | |
|--|-----|
| ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ РАВНОТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ДОПУСКОВ НИВЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНОГО РАНГА <i>Волкова Т.Н., Волков Н.В.</i> | 107 |
| ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СПОСОБОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ НА НАЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК КОНТУРОВ СМЕЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ <i>Головкин А.Н., Скворцов В.П.</i> | 113 |
| ВАРИАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ, ВЫЗВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯМИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ОСАДКОВ И УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ <i>Морозов А.В., Баранов В.Н.</i> | 119 |

CONTENTS

Agricultural sciences (4.1.1. General farming and crop production)

ARTICLES

ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL TESTING OF THE SEED

Zaytsev S.A., Bashinskaya O.S., Volkov D.P., Babushkin D.D., Ptashnik O.P., Marakaeva T.V. 7

WATER-PHYSICAL PROPERTIES OF SUBSTRATES PREPARED ON PEAT AND COMPOSTED ACTIVE SLUDGE WASTE OF THE ARKHANGELSK PULP AND PAPER MILL

Nakvasina E.N., Nikitina M.V., Koptev S.V., Sungurova N.R., Igamberdieva A.A. 13

PROBLEMS OF ROBOTIZATION OF INTER-ROW TREATMENT OF CROPS OF ROWED CROPS. PROVISION OF GLOBAL MOVEMENTS OF WORKING BODIES

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. 18

Agricultural sciences (4.1.6. Silviculture, forestry, forest crops, agroforestry, landscaping, forest pyrology and taxation)

ARTICLES

STANDARD MEASUREMENT ERRORS, TYPES OF DISTRIBUTION OF SAMPLE DATA AND TYPES OF ASYMMETRY OF LEAF PLATES OF COMMON CHERRY (*PRUNUS PADUS* L.)

Zykov I.E., Baranov S.G., Prokopenko A.D. 24

THE PROBABILITY OF GROWTH OF SOME TYPES OF INTRODUCERS EASTERN SIBERIA ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF BRATSK

Runova E.M., Anoshkina L.V. 30

REFORESTATION POTENTIAL OF THE ANGARA REGION

Chzhan S.A., Puzanova O.A. 36

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

THE NEZHNYAYA CAVE OF THE ABSHERON DISTRICT OF KRASNODAR REGION AS AN OBJECT OF TOURIST AND RECREATIONAL USE

Antiptseva Yu.O., Pikalova N.A., Volkova T.A., Boyko E.S., Klimov N.N. 41

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE WATER QUALITY OF THE TOBOL RIVER AND THE KURGAN RESERVOIR

Nesgovorova N.P., Savelev V.G. 47

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SMALL WATER CURRENTS ON THE HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL INDICATORS OF THE PODKUMOK RIVER

Okrut S.V., Zelenskaya T.G., Stepanenko E.E., Korovin A.A., Khalikova V.A. 58

FORMATION OF FLUXES OF HETEROGENEOUS ATMOSPHERIC DEPOSITS IN THE COASTAL ZONE OF THE SOUTHEAST PART OF THE BALTIC SEA

Topchaya V.Yu., Chechko V.A. 65

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

| | |
|---|----|
| APPLICATION OF A CAUSATIVE BODY REFERENCE FOR THE INTERPRETATION OF GRAVITY AND MAGNETIC ANOMALIES <i>Vasilev P.S.</i> | 76 |
| INCREASING THE EFFICIENCY OF FOREST REGENERATION AS AN ELEMENT OF THE SUSTAINABLE LOW-CARBON DEVELOPMENT STRATEGY OF TATNEFT OIL COMPANY <i>Galimullin A.F., Bakhteev K.R.</i> | 82 |
| MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS, SIZE AND MASS OF PM _{0.1} DUST NEAR THE OPEN COAL MINES <i>Kazanceva U.D., Yakovenko O.C., Leshukova M.K., Legoshchin K.V., Leshukov T.V., Larionov A.V.</i> | 90 |

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

| | |
|---|-----|
| INFLUENCE OF POLYPROPYLENE FIBER ON THE STRENGTH PROPERTIES OF ICE-ROCK STACKING MIX <i>Alekseev K.N., Petrov D.N.</i> | 96 |
| INFLUENCE OF ACID TREATMENT OF ALKALINE EARTH BENTONITE ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE PROCESS OF ITS ACTIVATION <i>Bortnikov S.V., Gorenkova G.A., Bespalova M.A., Vorozhtsov E.P.</i> | 101 |

Physical and mathematical sciences (1.6.22)
ARTICLES

| | |
|--|-----|
| ESTIMATION OF THE VARIANCE OF THE EQUIVALENT RESULTS OF REPEATED LEVELING WITH THE IMPOSITION OF LEVELING TOLERANCES OF VARIOUS RANKS <i>Volkova T.N., Volkov N.V.</i> | 107 |
| INFLUENCE OF GEODETIC SURVEY METHODS USED AND INSTRUMENT BASE USED ON OVERLAPPING BOUNDARIES OF INDIVIDUAL POINTS OF CONTOURS OF ADJACENT REAL ESTATE OBJECTS <i>Golovko A.N., Skvortsov V.P.</i> | 113 |
| VARIATIONS OF GEODETIC HEIGHTS CAUSED BY FLUCTUATIONS IN GRAVITY, PRECIPITATION AND GROUNDWATER LEVEL AT THE CONSTRUCTION SITE OF UNIQUE BUILDINGS AND STRUCTURES <i>Morozov A.V., Baranov V.N.</i> | 119 |

СТАТЬИ

УДК 635.659:631.52

ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ ЧИНЫ ПОСЕВНОЙ

**¹Зайцев С.А., ¹Башинская О.С., ¹Волков Д.П.,
¹Бабушкин Д.Д., ²Пташник О.П., ³Маракаева Т.В.**

¹ФГБНУ Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы «Россорго», Саратов, e-mail: zea_mays@mail.ru,
oksana_bashinska@mail.ru, genomix@mail.ru, denchik241088@gmail.com;

²ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», Симферополь,
e-mail: O_ptashnik@mail.ru;

³ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», Омск,
e-mail: tv.marakaeva@omgau.org

В статье приводятся результаты эколого-географического испытания чины посевной. Эксперимент по эколого-географическому изучению сортов чины посевной заложен на опытных участках ФГБНУ РосНИИСХ «Россорго» (г. Саратов), ФГБУН «НИИСХ Крыма» (Республика Крым), Омского ГАУ им. П.А. Столыпина (г. Омск). Почвенно-климатические условия пунктов испытания значительно различались: так, за период вегетации ГТК составил 0,62 в Саратовской области, 0,58 в Омской области, 1,03 в Республике Крым. Биологические особенности чины посевной позволяют растениям успешно проходить фазы развития и полноценно созревать не только в жарких полузасушливых условиях Саратовской области и полуострова Крым, но и в более северных широтах (55°) южной лесостепи Западной Сибири. Выявлена доля влияния условий выращивания, генотипа и фактора взаимодействия на формирование урожайности семян, продуктивности растения и массы 1000 семян. Наибольшая доля влияния на формирование признаков приходится на условия выращивания. Полученные результаты позволили определить коэффициент регрессии (bi), а также коэффициент стабильности, отображающий взаимодействие между условиями выращивания за годы исследований и урожайностью семян. Параметры адаптивности позволили сгруппировать исследуемые сорта чины в следующие группы: 1 – экстенсивная форма с очень низкой фенотипической стабильностью (Жемчужина); 2 – форма с высокой фенотипической стабильностью (Мраморная); 3 – интенсивная форма с пониженной фенотипической стабильностью (Елена); 4 – интенсивная фенотипически высоко стабильная форма (Рачейка). Благодаря своим физиологическим и биологическим особенностям чина посевная способна занять в РФ агро-экологическую нишу в промежутке между границей возделывания гороха и границей агрономического ареала распространения нута.

Ключевые слова: чина, сорт, урожайность, семена, селекция, адаптивность

ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL TESTING OF THE SEED

**¹Zaytsev S.A., ¹Bashinskaya O.S., ¹Volkov D.P.,
¹Babushkin D.D., ²Ptashnik O.P., ³Marakaeva T.V.**

¹Russian Research Institute for Sorghum and Maize “Rossorgo”, Saratov, e-mail: zea_mays@mail.ru,
oksana_bashinska@mail.ru, genomix@mail.ru, denchik241088@gmail.com;

²Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, e-mail: O_ptashnik@mail.ru;

³Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, e-mail: tv.marakaeva@omgau.org

The article presents the results of ecological and geographical testing of the grasspea. An experiment on ecological and geographical study of cultivars of the grasspea was laid on the experimental plots of the FSBSI RosNIISK “Rossorgo” (Saratov), the FSBI «Research Institute of Agriculture of Crimea» (Republic of Crimea), the Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin (Omsk), located in the southern forest-steppe of Western Siberia. The soil and climatic conditions of the test points varied significantly, so during the growing season the HTC was: 0,62 in the Saratov region, 0,58 in the Omsk region, 1,03 in the Republic of Crimea. The biological features of the grasspea allow plants to successfully go through the development phases and fully mature not only in the hot semi-arid conditions of the Saratov region and the Crimean peninsula, but also in more northern latitudes (55 °) of the southern forest-steppe of Western Siberia. The proportion of the influence of growing conditions, genotype and interaction factor on the formation of seed yield, plant productivity and weight of 1000 seeds was revealed. Growing conditions account for the greatest share of influence on the formation of traits. The results obtained allowed us to determine the regression coefficient (bi), as well as the stability coefficient, which reflects the interaction between growing conditions over the years of research and seed yield. The adaptability parameters made it possible to group the studied cultivars into the following groups: 1 – extensive form with very low phenotypic stability (Zhemchuzhina); 2 – form with high phenotypic stability (Marble); 3 – intensive form with reduced phenotypic stability (Elena); 4 – intense phenotypically highly stable form (Racheika). Due to its physiological and biological characteristics, the sowing rank is able to occupy an agroecological niche in the Russian Federation in the interval between the border of pea cultivation and the border of the agronomic area of chickpea distribution.

Keywords: grasspea, variety, yield, seeds, selection, adaptability

Чина посевная (индийский горох, травяной горох) – бобовая культура, считается одной из самых устойчивых к климатическим изменениям и биотическим стрессорам. Эта разновидность сельскохозяйственных растений хорошо адаптирована ко многим типам почв, обладает устойчивостью к абиотическим (почвенная и воздушная засуха, затопление, высокие температуры воздуха) и биотическим факторам (болезни, насекомые-вредители). [1]. Она является одной из важнейших продовольственных культур, помогающей выживать населению в засушливых условиях, возделывается в некоторых регионах Индии, Пакистана, Непала и Эфиопии и, в гораздо меньшей степени, во многих странах Европы, Ближнего Востока, Северной Африки, а также в Чили и Бразилии [2, 3]. Помимо форм, произрастающих в Южной Азии, Африке и Средиземноморье, многие образцы происходят из южно-центральной (Чехия, Венгрия, Словакия) и восточно-центральной Европы (Польша, Россия, Украина) [4]. Благодаря своим физиологическим и биологическим особенностям чина посевная способна занять в РФ агроэкологическую нишу в промежутке между границей возделывания гороха и границей агрономического ареала распространения нута [5]. В полувлажных степных и лесостепных районах средней полосы России чина превосходит по урожайности семян и зеленой массы вику, горох, чечевицу [6]. Растение чины формирует высокую продуктивность благодаря значительной степени ветвления (5–7 продуктивных веточек), в связи с чем на одном растении чины закладывается в 2,5–3 раза больше бобов, чем на растениях гороха, бобов [7]. Научное внимание к виду *Lathyrus sativus* L. одновременно преследует две цели: внедрение и интродукция в агропромышленное производство культуры, традиционно возделываемой многими народами, и поддержание биологического разнообразия, являющегося основой стратегии по устойчивому развитию сельского хозяйства [8]. В качестве зерновой и кормовой культуры чина посевная имеет большой агрономический и экологический потенциал. Современные сорта сочетают высокую урожайность с оптимальным биохимическим составом и отличаются устойчивостью к действию неблагоприятных биотических и абиотических факторов окружающей среды. Однако отношение к чине посевной как к нетрадиционной культуре среди сельхозтоваропроизводителей и наличие малого количества научных исследова-

ний в целом по стране обуславливают необходимость изучения имеющихся сортов, стабильно формирующих урожай высокого качества, способных противостоять абиотическим стрессорам и эффективно использовать антропогенные и природные ресурсы в различных регионах РФ. Большим потенциалом для возделывания чины посевной в РФ обладают регионы с полувлажными климатическими условиями [9, 10].

Цель исследования – агроэкологическое изучение сортов чины посевной селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в ряде регионов РФ.

Материалы и методы исследования

Эксперимент по эколого-географическому изучению сортов чины посевной заложен на опытных участках ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» (г. Саратов), ФГБУН «НИИСХ Крыма» (Республика Крым), ФГБОУ ВО «Омский ГАУ им П.А. Столыпина» (г. Омск). Полевые опыты заложены согласно общепринятым методикам проведения исследований [11–13]. Почвенно-климатические условия пунктов испытания значительно различались: так, за период вегетации ГТК составил 0,62 в Саратовской области, 0,58 в Омской области, 1,03 в Республике Крым. Учетная площадь делянок – 25 м. Агротехника – общепринятая для регионов. Посев ранневесенний: в условиях Саратовской области – 3–5 мая, в условиях республики Крым – 24–25 марта, в условиях Омской области – 16 мая. Норма высева: в условиях Саратовской области – 0,6 млн шт. всх. семян/га, в условиях республики Крым – 1,2 млн шт. всх. семян/га, в условиях Омской области – 0,7 млн шт. всх. семян/га.

Климат Саратовской области – резко континентальный. ГТК составляет во влажные годы – 1,20–1,45; в среднеобеспеченные – 0,70–0,95 и засушливые – 0,60–0,68. Среднегодовая сумма осадков – 360–455 мм. Почвы опытного поля относятся к чернозему южному. В пахотном слое содержание гумуса составляет 3,80–4,60%, общего азота – 0,17–0,22%, валового фосфора – 0,11–0,14%, калия – 1,10–1,38%, подвижного фосфора – 18,0–22,0 мг/кг, обменного калия – 28,0–32,0 мг/100 г почвы; pH близка к нейтральной ($pH_{\text{сол}} - 6,1$; $pH_{\text{водн}} - 7,0$); сумма поглощенных оснований – 38,0–41,0 мг-экв/100 г почвы. Плотность почвы составляет 1,20–1,32 г/см³, наименьшая влагоемкость (НВ) слоя 0–30 см – 101,1 мм, слоя 0–100 см – 295,6 мм, влажность устойчивого завядания растений (ВУЗ) – 36,3; 151,4 мм соответственно.

Климат района расположения опытного участка ФГБУН «НИИСХ Крыма» – степной, умеренно холодный, полусухой, континентальный, с большими годовыми и суточными колебаниями температуры. Среднегодовая температура воздуха составляет 9,8–10,4 °С, с колебанием 9,4–11,5 °С. Годовая сумма осадков 340–418 мм, из них в вегетационное время, ограниченное температурой выше 10 °С, – 195–205 мм. Почва опытного участка ФГБУН «НИИСХ Крыма» – чернозем южный малогумусный, легко глинистый с содержанием гумуса в пахотном слое 2,26%. Мощность гумусового слоя 50 см. В пахотном слое валовое содержание азота 0,18–0,20%; фосфора 0,12–0,14%; калия 2,1–2,4%; количество гидролитического азота 3,0–4,0 мг, подвижного фосфора 4,6–6,0 мг, обменного калия 32–36 мг на 100 г абсолютно сухой почвы.

Климат расположения Омской области – континентальный, умеренно холодный, характеризующийся неустойчивостью и частой сменой метеорологических условий. Годовая сумма осадков в районе Омска – 320–340 мм, из них в вегетационное время, ограниченное температурой выше 10 °С, – 160–170 мм. Средняя годовая температура воздуха: -1,1 – +0,4 °С, продолжительность безморозного периода от 90–100 дней (на севере) до 115–120 (на юге). Почва опытного участка ФГБОУ ВО «Омский ГАУ» лугово-черноземная среднemocная малогумусовая среднесуглинистая с содержанием гумуса в пахотном слое 3,9%.

Расчет статистических параметров проведен в соответствии с принятыми форму-

лами: стрессоустойчивость сорта: значения признака $\min\text{-max}$, генетическая гибкость: значения признака $(\min+\max)/2$, размах урожайности (d): $(\max-\min)/\max*100\%$.

Результаты исследования и их обсуждение

Кормовые и пищевые направления использования чины в первую очередь подразумевают ее выращивание на семена (зерно). Структура семенной урожайности зернобобовых культур в первую очередь складывается из параметров субкомпонентов, а именно продуктивности растения и массы 1000 семян [14]. Продуктивность растения – это сложный признак, который формируется находящимися в сложной корреляции между собой урожаем зерна и условиями среды, различными элементами структуры урожая [15]. При этом продуктивность растения при густоте стояния 1,2 млн шт. всх. семян/га в условиях республики Крым составила в 2022 г. 9,2–9,5 г (табл. 1). Более высокую продуктивность растения сформировали при меньшей плотности посева в условиях Саратовской (13,1–22,7 г) и Омской областей (13,9–26,3 г). Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что величина проявления морфометрических показателей достоверно (при $P = 95$) изменяется под воздействием и условий выращивания (фактор А), генотипа (фактор В – сорт), и их взаимодействия (А х В). Наибольший вклад в показатель продуктивности растения у изучаемых сортов вносит фактор условий среды (76,4%). Доля влияния генотипа (В) составила 6,6%, а доля взаимодействия факторов – 15,2%.

Таблица 1

Семенная продуктивность растения чины, г

| Сорт | г. Саратов | | | Республика Крым | | | г. Омск |
|---------------------------|------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2022 г. |
| Мраморная | 7,0 | 10,4 | 14,8 | 3,2 | 6,2 | 6,2 | 12,6 |
| Рачейка | 7,9 | 14,4 | 13,1 | 5,5 | 6,6 | 6,4 | 21,8 |
| Елена | 7,9 | 14,5 | 18,6 | 4,4 | 7,8 | 8,6 | 13,9 |
| Жемчужина | 4,5 | 14,8 | 22,7 | 5,0 | 7,8 | 9,5 | 26,3 |
| Среднее значение | 6,8 | 13,5 | 17,3 | 4,5 | 7,1 | 7,7 | 18,7 |
| НСР _{0,05} | 1,2 | 1,3 | 1,8 | 1,1 | ns | 1,4 | 4,4 |
| Доля фактора А, % | 76,4 | | | | | | |
| Доля фактора В, % | 6,6 | | | | | | |
| Доля взаимодействия АВ, % | 15,2 | | | | | | |
| Случайное отклонение, % | 1,8 | | | | | | |

Таблица 2

Масса 1000 семян чины, г

| Сорт | г. Саратов | | | Республика Крым | | | г. Омск |
|---------------------------|------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2022 г. |
| Мраморная | 232,8 | 205,3 | 217,5 | 158,0 | 148,3 | 178,0 | 201,0 |
| Рачейка | 246,1 | 210,0 | 238,0 | 228,0 | 189,5 | 195,0 | 232,6 |
| Елена | 248,2 | 215,0 | 226,7 | 222,0 | 176,5 | 230,0 | 241,0 |
| Жемчужина | 207,2 | 216,4 | 232,8 | 200,0 | 168,3 | 220,0 | 258,2 |
| Среднее значение | 233,6 | 211,7 | 228,8 | 202,0 | 170,7 | 205,8 | 233,2 |
| НСР _{0,05} | 8,7 | 7,8 | 9,7 | 69 | 8,7 | 10,3 | 8,9 |
| Доля фактора А, % | 57,4 | | | | | | |
| Доля фактора В, % | 19,9 | | | | | | |
| Доля взаимодействия АВ, % | 21,1 | | | | | | |
| Случайное отклонение, % | 1,5 | | | | | | |

Таблица 3

Урожайность семян чины, т/га

| Сорт | г. Саратов | | | Республика Крым | | | г. Омск |
|---------------------------|------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2022 г. |
| Мраморная | 1,05 | 1,57 | 0,93 | 1,46 | 1,24 | 1,96 | 0,88 |
| Рачейка | 1,18 | 2,16 | 1,24 | 1,80 | 1,36 | 2,12 | 1,53 |
| Елена | 1,19 | 2,18 | 1,44 | 1,62 | 1,65 | 2,15 | 0,97 |
| Жемчужина | 1,67 | 2,22 | 1,59 | 1,56 | 1,60 | 2,12 | 1,84 |
| Среднее значение | 1,27 | 2,03 | 1,30 | 1,61 | 1,46 | 2,09 | 1,31 |
| НСР _{0,05} | 0,06 | 0,08 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,15 |
| Доля фактора А, % | 64,2 | | | | | | |
| Доля фактора В, % | 20,2 | | | | | | |
| Доля взаимодействия АВ, % | 14,8 | | | | | | |
| Случайное отклонение, % | 0,9 | | | | | | |

Масса 1000 семян является одним из важнейших и значимых элементов структуры урожая и надежным индикатором, показывающим влияние изменения условий опыта при селекционной работе на реакцию генотипа. Крупность семени определяет запас питательных веществ, всхожесть, пищевые и кормовые качества, однако она лимитируется сортовыми особенностями и реакцией на условия выращивания. Исследования, проводимые с сельскохозяйственными культурами, показали, что признак «масса 1000 семян» контролируется сложной генетической системой. Однако и условия выращивания значительно влияют на крупность семян (табл. 2). Нехватка доступной влаги, изменение температуры в фазы развития растений могут оказывать значительное воздействие на крупность

семени. Так, предел варьирования массы 1000 семян у сортов чины составил: в Саратовской области 205,3–248,2 г, в условиях Республики Крым – 148,3–230,0 г, в Омской области – 201,0–258,2 г. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа указывают на то, что влияние погодных условий (фактор А) на формирование массы 1000 семян составляет 57,4%, а доля генотипа (фактор В) и фактора взаимодействия (АВ) – 19,9 и 21,1% соответственно.

Важнейший и основной признак, используемый при выявлении параметров адаптивности, экологической пластичности и стабильности сорта, – семенная урожайность. Она позволяет сделать выводы об отзывчивости сорта на изменение условий выращивания (улучшение или ухудшение). Позволяет сформировать заключение

об уровне интенсивности технологии возделывания. Результаты испытания указывают на достаточно высокий потенциал почвенно-климатических условий Саратовской, Омской областей и республики Крым для выращивания чины посевной с получением высоких значений урожайности семян. При этом используемые в опыте сорта проявляют в зависимости от конкретных условий окружающей среды различную индивидуальную реакцию (табл. 3). Так, сформированная урожайность семян у сортов чины варьировала: в Саратовской области от 0,93 до 2,22 т/га, в условиях Республики Крым – от 1,24 до 2,15 т/га, в Омской области – от 0,88 до 1,84 т/га. Из результатов двухфакторного дисперсионного анализа следует, что на показатель урожайности семян наибольшее влияние оказывает фактор условий выращивания (А) – 64,2%. Доля влияния генотипа (фактор В) на значение урожайности составила 20,2%, а доля взаимодействия двух факторов (АВ) – 14,8%.

Необходимость создания и внедрения в производство сортов, различающихся приспособленностью к конкретным агроэкологическим условиям, обуславливается влиянием почвенно-климатических факторов, различиями в элементах технологии выращивания [16]. При этом использование в сельскохозяйственном производстве генетически разнообразных сортов, сочетающих высокую урожайностью с экологической пластичностью и стабильностью является непременным условием устойчивого развития семеноводства и агропромышленного комплекса. Особенности влияния среды на генотип и их взаимодействие показываются при помощи параметров адаптивности: пластичность, стабильность, которые квалифицируют динамику реакции генотипа на изменения условий среды или размах модифи-

кационной изменчивости в пределах нормы реакции генотипа [17]. Анализ полученных в опыте результатов позволил рассчитать статистические параметры: коэффициент адекватности (В), коэффициент регрессии (bi), ошибку коэффициента регрессии (Sb), критерий значимости отклонения от 1 (t), стрессоустойчивость, генетическая гибкость сортов, размах урожайности (d) [18, 19]. Среднее значение между максимальным и минимальным показателем урожайности в контрастных условиях (min-max)/2 отражает компенсационную способность (генетическую гибкость) сорта. Чем выше степень соответствия между сортом и различными факторами среды, тем выше этот показатель. Отношение разницы между максимальной и минимальной урожайностью сорта к максимальной урожайности, выраженной в процентах, отражает размах урожайности (d). Чем ниже показатель, тем стабильнее урожайность сорта в конкретных условиях выращивания. Таким образом, при обработке данных экологического сортоиспытания чины сорта были разделены на несколько групп. К экстенсивной форме с низкой фенотипической стабильностью относится сорт Жемчужина. Согласно коэффициенту регрессии (bi = 0,63) данный генотип слабо реагирует на изменения условий среды, а наименьшее значение разности между минимальной и максимальной урожайностью (-0,66) указывает на наибольшую стрессоустойчивость по сравнению с другими сортами (табл. 2). Сорт Мраморная с очень высокой фенотипической стабильностью вошел во вторую группу. Коэффициент регрессии bi = 1,05. Данная форма слабо отзывается на улучшение условий произрастания, но в то же время при ухудшении условий обладает более низкими темпами снижения продуктивности.

Таблица 4

Фенотипическая оценка сортов по интенсивности, экстенсивности и стабильности урожайности

| Сорт | Коэффициент адекватности (В) | Коэффициент регрессии (bi) | Ошибка коэффициента регрессии (Sb) | Критерий значимости отклонения от 1 (t) | Стрессоустойчивость, т/га | Генетическая гибкость, т/га | Размах урожайности, % |
|-----------|------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Мраморная | 0,86 | 1,05 | 0,17 | 0,31 | -1,08 | 1,42 | 55,1 |
| Рачейка | 0,87 | 1,10 | 0,17 | 0,62 | -0,98 | 1,67 | 45,3 |
| Елена | 0,84 | 1,21 | 0,21 | 1,01 | -1,21 | 1,58 | 55,5 |
| Жемчужина | 0,58 | 0,63 | 0,20 | 1,82 | -0,66 | 1,89 | 29,7 |

Сорт Елена, показавший себя как интенсивная форма с пониженной фенотипической стабильностью ($b_i = 1,21$), отнесен к третьей группе. Он способен сформировать высокую урожайность зерна как в благоприятных условиях возделывания, так и в неблагоприятных. Сорт Рачейка можно охарактеризовать как интенсивную фенотипически высоко стабильную форму ($b_i = 1,10$). Стабильность сорта указывает на его устойчивость к лимитирующим факторам среды и способность давать стабильный урожай в любых условиях. Ее целесообразно использовать в селекции интенсивных сортов, отзывчивых на вложения в плодородие почв и оптимизацию условий выращивания.

Заключение

Результаты исследования указывают на то, что биологические особенности чины посевной позволяют растениям успешно проходить фазы развития и полноценно созревать не только в жарких полузасушливых условиях Саратовской области и полуострова Крым, но и в более северных широтах (55°) южной лесостепи Западной Сибири. При этом изученные сорта формируют достаточно высокий урожай семян: Мраморная – 0,88–1,96 т/га, Рачейка – 1,18–2,16 т/га, Елена – 0,97–2,18 т/га, Жемчужина – 1,56–2,22 т/га. Оценка сортов по показателям адаптивности позволила распределить их по группам: 1 – экстенсивная форма с очень низкой фенотипической стабильностью (Жемчужина); 2 – форма с высокой фенотипической стабильностью (Мраморная); 3 – интенсивная форма с пониженной фенотипической стабильностью (Елена); 4 – интенсивная фенотипически высоко стабильная форма (Рачейка). Основными направлениями селекционной работы продолжают оставаться задачи повышения урожайности и качества семян, повышение сбора зеленой массы улучшение технологических параметров, а также кулинарно-эстетических свойств для использования на крупу.

Список литературы

- Sillero J.C., Cubero J.I., Fernández-Aparicio M., Rubiales D. Search for resistance to crenate broomrape (*Orobanche crenata*) in *Lathyrus*. *Lathyrus Lathyrism Newsletter*. 2005. № 4. P. 7–9.
- Campbell C.G., Mehra R.B., Agrawal S.K., Chen Y.Z., Abdel Moneim A.M., Khawaja H.L.T., Yadov C.R., Tay J.U., Araya W.A. Current status and future strategy in breeding grasspea (*Lathyrus sativus*). Expanding the Production and Use of Cool Season Food Legumes. 1994. P. 617–630.
- Fernand Lambein, Silvia Travella, Yu Haey Kuo, Marc Van Montagu, Marc Heijde, Grass pea (*Lathyrus sativus* L.): orphan crop, nutraceutical or just plain food? *Planta*. 2019. № 250 (3). P. 821–838.
- Шевцова Л.П., Шьюрова Н.А., Башинская О.С., Марухненко А.И. Чина посевная – ценная зернобобовая культура для условий степного засушливого Поволжья // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2018. № 13. С. 548–553.
- Зотиков В.И., Наумкина Т.С., Грядунова Н.В., Сидоренко В.С., Наумкин В.В. Зернобобовые культуры – важный фактор устойчивого экологически ориентированного сельского хозяйства // Зернобобовые и крупяные культуры. 2016. № 1 (17). С. 6–13.
- Вишнякова М.А., Александрова Т.Г., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Егорова Г.П., Семенова Е.В., Сеферова И.В., Суворова Г.Н. Видовое разнообразие коллекции генетических ресурсов зернобобовых ВИР и его использование в отечественной селекции (обзор) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 2. С. 109–123.
- Зайцев С.А., Волков Д.П., Матюшин П.А., Бабушкин Д.Д., Бычкова В.В., Жужукин В.И. Изучение коллекционного материала чины посевной в условиях степной зоны Нижнего Поволжья // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 19–25.
- Бурляева М.О., Соловьева А.Е., Силенко С.И. Исследование генетического разнообразия чины посевной по адаптивности биохимических показателей зеленой массы // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 7. С. 52–55.
- Донской М.М., Наумкин В.П., Донская М.В., Мазалов В.И. Практическое руководство по возделыванию чины посевной. Орел: ФГБНУ ВНИИЗБК, 2015. 32 с.
- Жужукин В.И., Горбунов В.С., Зайцев С.А., Волков Д.П. Изучение исходного материала чины посевной для селекции в условиях Нижнего Поволжья // Зерновое хозяйство России. 2017. № 6 (54). С. 48–52.
- Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры // Госагропром СССР. Государственная комиссия по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур. М., 1989. 194 с.
- Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Бульнцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: методические указания. СПб.: ВИР, 2018. 143 с.
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Книга по Требованию, 2013. 349 с.
- Зеленцов С.В., Мошненко Е.В. Пути адаптации сельского хозяйства России к глобальным изменениям климата на примере экологической селекции сои // Научный диалог. 2012. № 7. С. 40–59.
- Маракаева Т.В. Взаимосвязь урожайности и элементов продуктивности чечевицы // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2019. № 3 (52). С. 40–47.
- Поползухина Н.А., Паршуткин Ю.Ю., Поползухин П.В., Василевский В.Д., Гайдар А.А. Адаптивный потенциал сортов твердой яровой пшеницы по урожайности зерна в зависимости от предшественника в южной лесостепи Западной Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (36). С. 40–52.
- Драгавцев В.А., Драгавцева И.А., Ефимова И.Л., Моренец А.С., Савин И.Ю. Управление взаимодействием «генотип – среда» – важнейший рычаг повышения урожая сельскохозяйственных растений // Труды Кубанского ГАУ. 2016. № 59. С. 105–121.
- Пакудин В.З., Лопатина Л.М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственная биология. 1984. № 4. С. 109–113.
- Потанин В.Г., Алейников А.Ф., Степочкин П.И. Новый подход к оценке экологической пластичности сортов растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Т. 18. № 3. С. 548–552.

УДК 631.432

ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБСТРАТОВ НА ОСНОВЕ ТОРФА И КОМПСТИРОВАННЫХ ОТХОДОВ АКТИВНОГО ИЛА АРХАНГЕЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА

Наквасина Е.Н., Никитина М.В., Коптев С.В., Сунгурова Н.Р., Игамбердиева А.А.

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
Архангельск, e-mail: nakvasina@yandex.ru

В статье приводятся результаты исследований по подбору компонентного состава субстратов на основе верхового торфа и компстированных отходов активного ила (биогумус «Архангельский») с предприятий Архангельского ЦБК, сравнение их водно-физических и агрохимических свойств с производственными аналогами, применяемыми в лесных тепличных комплексах Архангельской области. Изучены композиции субстратов на основе торфа и отходов активного ила (по объему используемых фракций) по следующим вариантам: контроли (100% торф и 100% ил), 10% ил + 90% торф, 20% ил + 80% торф... 70% ил + 30% торф (всего 7 вариантов с градацией ила 10%). Определены водно-физические свойства субстратов: плотность сухого торфа; истинная плотность; пористость; водопоглощение (2 ч и 48 ч); полная влагоемкость. Установлено, что градиентные добавки активного ила к верховому торфу резко повышают истинную плотность и насыпную плотность сложения субстрата. Наиболее близки показатели к эталонным субстратам: по плотности сложения – при 20–30% ила, по истинной плотности – при 30–70% ила в композиции. Формируемые субстраты по пористости (80–91%) достаточно близки к эталонным субстратам (88–93%). Добавка даже 10% ила с низкой способностью к влагоудержанию резко снижает влагоемкость комбинированного субстрата (в 2 раза). Соотношение ила и торфа в субстрате 1:1 способствует переводу водных свойств композиционного субстрата ближе к свойствам ила, отличающегося меньшей влагоемкостью, по сравнению с торфом. Подсушивание субстрата при его использовании в теплицах может вызвать необходимость регулирования поливной нормы. В дальнейшем эксперименты по подбору композиций субстратов следует продолжить с точки зрения эколого-токсикологических свойств (содержание тяжелых металлов и патогенов).

Ключевые слова: субстраты, торф, отходы активного ила, плотность, влагоемкость, кислотность, питательные вещества

Исследования проводились при финансировании НОЦ «Русская Арктика: современные материалы, методы, технологии», Подпроект 4 «Исследования и подбор оптимального состава субстрата (грунта) для выращивания саженцев (сеянцев) хвойных пород применительно к условиям лесовосстановления на лесосырьевой базе предприятий ООО ПКП «Титан» и АО «Архангельский ЦБК».

WATER-PHYSICAL PROPERTIES OF SUBSTRATES PREPARED ON PEAT AND COMPOSTED ACTIVE SLUDGE WASTE OF THE ARKHANGELSK PULP AND PAPER MILL

Nakvasina E.N., Nikitina M.V., Koptev S.V., Sungurova N.R., Igamberdieva A.A.

Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,
e-mail: nakvasina@yandex.ru

The article deals with the results of the selection the component composition of substrates prepared on the high-moor peat and composted activated sludge waste (biohumus "Arkhangelsk") from the Arkhangelsk pulp and paper mill, a comparison of their water-physical and agrochemical properties with industrial analogues used in forest greenhouse complexes of the Arkhangelsk region. The compositions of substrates prepared on peat and sludge (according to the volume of fractions) were studied for the following options: controls (100% peat and 100% sludge), 10% sludge + 90% peat, 20% sludge + 80% peat 70% sludge + 30% peat (total 7 variants with 10% sludge grade). The water-physical properties were determined: the density of dry peat, true density, porosity, water absorption (2 hours and 48 hours), full moisture content. Gradient additives of sludge to high-moor peat sharply increase the true and bulk density of the substrate. The parameters are closest to the reference substrates: bulk density – at 20–30% sludge, true density – at 30–70% sludge. The formed substrates in porosity (80–91%) are quite close to the reference substrates (88–93%). The addition 10% of sludge with a low water retention capacity sharply reduces the moisture capacity of the combined substrate (by 2 times). The 1:1 ratio of sludge and peat contributes water properties transition of the composite substrate closer to the properties of sludge, which has a lower moisture capacity compared to peat. The substrate drying in greenhouses may necessitate the need to adjust the irrigation rate. In the future, experiments on the substrate compositions selection should be continued from the ecological and toxicological properties (the content of trace metals and pathogens).

Keywords: substrates, peat, activated sludge waste, density, moisture capacity, acidity, nutrients

Осадок сточных вод, неизбежный побочный продукт работы городских очистных сооружений, является ключевой проблемой во многих странах, в том числе в России, из-за его растущего объема и последствий,

связанных с его удалением [1–3]. Согласно отчету Европейской комиссии, опубликованному в 2010 г., 39% осадка сточных вод, производимого в Европейском союзе, перерабатывается в сельском хозяйстве. Одна-

ко в настоящее время во многих странах хранение подобных отходов на свалках запрещено, поэтому крайне важно найти альтернативные решения, экономически целесообразные и безвредные для окружающей среды [4]. В России осадки сточных вод подлежат утилизации сжиганием (приказ Роспотребнадзора № 629, 2019 г.), без организации длительного хранения осадков.

Проблема использования отходов сточных вод очистных сооружений (ЦБК, городских и др.) поднималась неоднократно, принимая во внимание, что в них содержатся полезные вещества для роста растений [3–5]. Во всех случаях речь шла о повышении плодородия почв и компостировании. Разработан Национальный стандарт РФ «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования», в котором даны общие требования к осадкам, применяемым в качестве органических или органо-минеральных удобрений, для рекультивации земель и при размещении на полигонах [6]. Считается, что использование осадка сточных вод не только помогает устранить проблемы, создаваемые накоплением все большего количества осадка, но также приводит к уменьшению количества химических удобрений, которые должны были использоваться для обеспечения роста растений, в определенной мере может заменить органические удобрения [4].

При этом существуют различные возможности получения и применения органических удобрений на основе отработанного активного ила. Активный ил смешивают с другими удобрениями, компостируют, что впоследствии оказывает положительное влияние на рост растений. Несомненно, что при использовании активного ила в качестве удобрений необходимо соблюдать требования санитарно-гигиенических норм, так как главный недостаток применения и удобрений, и компостов на основе отходов активного ила – необходимость контролировать содержание тяжелых металлов (ТМ) и токсикантов, которые могут накапливаться в почве и переходить в ткани растений, вызывая торможение роста, хлороз и нарушение водного обмена. В то же время считается, что опасность попадания ТМ в грунтовые воды невелика ввиду низкой растворимости их соединений [1], особенно это имеет отношение к тепличным грунтам и при использовании доли отработанного ила при приготовлении субстратов. Для обеззараживания важна выдержка отходов активного ила, применяемых для удобрения

и компостирования, на иловых картах [7, 8]. Полученный химическим и механическим способом ил можно применять в сельском хозяйстве при смешивании с почвой, торфом и др. [9].

В зоне действия предприятий целлюлозно-бумажной промышленности интерес привлекает использование отходов активного ила для выращивания посадочного материала хвойных пород в тепличных комплексах. Это относится и к Архангельскому ЦБК, который инициировал создание нового Селекционного центра с тепличным комплексом в районе г. Новодвинск Архангельской области. Ранее под эгидой комбината «Биолаборатория», (Архангельск, Г.А. Иванов) проведены экологические исследования и подготовлен регламент (срок действия 2014–2024 гг.) на производство и использование биогумуса «Архангельский», в основе которого использованы осадки сточных вод АЦБК. Отходы активного ила АЦБК относятся к веществам 5 класса опасности (Протокол 10-БО от 23.04. 2018 г.), яйца гельминтов отсутствуют (Протокол лабораторных испытаний от 2021 г.).

Для подготовки собственных субстратов для тепличного комплекса был выбран вариант смешивания биогумуса «Архангельский» с верховым торфом, заготавливаемым с месторождений региона. В Архангельской области сосредоточена четверть промышленных запасов торфа европейской части России [10], что позволяет вести промышленную разработку запасов торфа для различных направлений использования, одним из которых является лесное хозяйство. Преобладают болота верхового типа (более 80%), торф которых пригоден для приготовления компостов и питательных грунтов согласно требованиям соответствующих стандартов [11], что подтверждено исследованиями по структуре, свойствам и гумифицирующим веществам [12].

При использовании малообъемных технологий выращивания требования, предъявляемые к среде выращивания, значительно более жесткие, чем в открытом грунте, где имеются возможности для роста корней в неограниченном объеме почвы [13]. Это связано с необходимостью развития корневых систем сеянцев в малом объеме грунта. Поэтому следует учитывать весь комплекс физико-химических свойств, не только таких, как наличие компонентов минерального питания (NPK и микроэлементы), но и таких, как влагоемкость, плотность субстрата, что обеспечит водно-воздушный

режим и устойчивость комка, в том числе при посадке на лесокультурную площадь.

Цель исследований состояла в подборе компонентного состава субстратов на основе торфа и компостированных отходов активного ила (биогумус «Архангельский») с предприятий АЦБК, сравнение их водно-физических свойств с производственными аналогами, применяемыми в лесных тепличных комплексах Архангельской области.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований по изучению водно-физических свойств комбинаций субстратов на основе торфа и биогумуса из отходов активного ила АЦБК был использован торф, заготовленный с глубины торфяной залежи 40–80 см на торфяном болоте верхового типа в Приморском районе Архангельской области; степень разложения торфа 15 %. Торф был высушен и размолот с применением дробилки ТермМикс до фракций не более 0,5 см, достаточной для корректного применения при постановке вегетационных опытов с комбинированными субстратами. Мелкие фракции торфа позволяют провести равномерное смешение фракций (торф, ил и др.).

Одновременно были проведены сушка и размол действующего биогенного компонента субстрата (биогумус «Архангельский», далее для краткости обозначенный как «ил») на основе отходов активного ила с очистных сооружений АЦБК. Составлены композиции субстратов на основе торфа и отходов активного ила (по объему используемых фракций) по следующим вариантам: контроль (100 % торф и 100 % ил), 10 % ил + 90 % торф, 20 % ил + 80 % торф ... 70 % ил + 30 % торф (всего 7 вариантов с градацией ила 10 %). Для сравнения были подобраны пять образцов промышленных субстратов фирм Велторф, Pindstrup, Kekkila, используемых в лесных тепличных комплексах региона.

Водно-физические свойства субстратов изучали в лаборатории почвоведения САФУ по общепринятым методам с определением показателей, характерных для оценки торфов и торфяных субстратов [14]: плотность сухого торфа; плотность сухого вещества торфа (истинная плотность); пористость; водопоглощение (на 2 ч и 48 ч); полная влагоемкость.

В анализах (2–7 повторностей каждого показателя) использовали субстрат с частями менее 2 мм.

Плотность субстрата – масса единицы объема в абс. сухом состоянии ($\text{г}/\text{см}^3$) опре-

деляли насыпным способом, с использованием металлического кольца с известным объемом. Расчет плотности проводили общепринятыми способами.

Истинную плотность (плотность частиц) определяли пикнометрическим методом, используя соотношение торфа/ субстрата и воды в пикнометре из расчета не более $5 \text{ г} : 100 \text{ см}^3$. Для удаления воздуха проводили кипячение. Одновременно определяли содержание гигроскопической влаги в субстрате, что необходимо для расчетов истинной плотности. Использовали стеклянные бюксы с навеской субстрата 1–3 г.

По показателям плотность и истинная плотность рассчитали пористость субстрата общепринятыми в почвоведении способами и коэффициент пористости (истинная плотность минус плотность сложения в естественном абс. сухом состоянии, деленная на плотность сложения в естественном абс. сухом состоянии).

Используя цилиндры с сетчатым дном, определили водопоглощаемость (водопоглощение) – способность торфа поглощать и удерживать воду, через 2 ч и 48 ч, что соответствует максимальной водопоглощаемости торфа. После пребывания торфа в воде (48 ч) ей давали свободно стечь в течение 3–5 ч и взвешиванием определяли количество впитанной воды после оттока/фильтрации, что соответствовало полной влагоемкости.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные показатели водно-физических свойств композиций субстратов на основе верхового (белого) торфа и компостированных отходов активного ила представлены в таблице.

Композиционные материалы значительно (в 2 раза) отличаются по физическим свойствам (насыпной плотности, истинной плотности). Различия по водным свойствам (влагонакопление и влагоудержание) проявляются еще резче (6–8 раз). Оба компонента отличаются высокой пористостью: торф – 94 %, биогумус – 74 %.

Это сказывается не только на водных свойствах (удержание влаги, в том числе при поливе), но и при смешивании сухих субстратов с разной долей участия компонентов: происходит расслаивание компонентов, что нарушает композиционное строение формируемого субстрата. Необходимо проверять подобные вариации при смешивании субстратов в «сыром» состоянии в производственных условиях.

Физические свойства субстратов (композиций)
на основе торфа и отходов активного ила

| Вариант | Плотность сложения, г/см ³ | Истинная плотность, г/см ³ | Влагоемкость, % | | | Пористость, % | Коэффициент пористости |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------|-------------------------------|---------------|------------------------|
| | | | 2 ч | 48 ч | После оттока (полная полевая) | | |
| Контроль (торф) | 0,046±0,003 | 0,768 | 1349,1 | 1795,0 | 1778,6 | 94,0 | 15,70 |
| 10% ила | 0,076±0,001 | 0,875 | 715,2 | 939,7 | 931,5 | 91,3 | 10,51 |
| 20% ила | 0,137±0,003 | 0,938 | 627,8 | 721,5 | 714,5 | 85,4 | 5,85 |
| 30% ила | 0,188±0,004 | 1,157 | 413,5 | 484,8 | 480,5 | 83,8 | 5,15 |
| 40% ила | 0,213±0,002 | 1,245 | 351,9 | 389,2 | 386,4 | 81,5 | 4,85 |
| 50% ила | 0,230±0,006 | 1,371 | 348,0 | 374,8 | 372,0 | 83,2 | 4,96 |
| 60% ила | 0,282±0,003 | 1,487 | 311,0 | 326,1 | 323,1 | 81,0 | 4,27 |
| 70% ила | 0,297±0,007 | 1,550 | 285,7 | 296,9 | 294,4 | 80,8 | 4,22 |
| 100% ила | 0,381±0,001 | 1,440 | 190,02 | 228,9 | 227,0 | 73,5 | 2,78 |
| Промышленные субстраты (n = 5) | 0,119–0,176 | 1,30–1,57 | 405–536 | 510–751 | 503–725 | 88–93 | 7,1–13,6 |

При добавке активного ила в торф с градицией 10% наблюдается закономерное клинальное изменение физических свойств формируемых субстратов. Пористость изменяется незначительно, так как показатели пористости исходных компонентов близки. Коэффициент пористости относительно стабилизируется с доли ила в субстрате, близкой к 30%.

Поглощенная влага хорошо удерживается в субстратах, отток влаги после водонасыщения в течение 3–5 ч происходил слабо, что, скорее всего, связано с низкой степенью разложения и ботаническим составом торфа (сфагнум). Фрагменты сфагнума, благодаря строению клеток, способны поглощать воду, масса которой превышает массу листа в 30–40 раз [15]. Этим и обусловлена высокая влагоемкость сфагнового торфа (максимальная влагоемкость достигает почти 1800%). Все комбинации субстратов набирают влагу в первые два часа после постановки эксперимента: более 70% от максимальной влагоемкости (48 ч) и хорошо ее удерживают при оттоке (таблица).

По водным свойствам (влагоемкости) заметно, что добавка даже 10% ила с низкой способностью к влагоудержанию резко снижает влагоемкость комбинированного субстрата (в 2 раза). Увеличение доли ила в смеси торф/ил не дает резких изменений влагоемкости смесей, по мере увеличения доли ила влагоемкость субстрата клинально приближается к влагоемкости илового ком-

понента (биогумуса). Добавка ила в пределах 10–40% способствует снижению полной влагоемкости на 20–30% на каждые 10% внесения ила в торф, при больших дозах внесения ила (50–70%) темпы снижения запасов воды в субстрате снижаются до 4–13% на каждые 10% внесения ила. Соотношение ила и торфа в субстрате 1:1 способствует переводу водных свойств композиционного субстрата ближе к свойствам ила, отличающегося меньшей влагоемкостью, по сравнению с торфом. Это может быть опасно при использовании таких субстратов в теплицах, вызывая его быстрое пересыхание в кассетах.

То есть увеличение доли ила в субстрате может привести к плохому удерживанию воды в кассетах, пересыханию субстрата и гибели посадочного материала. В дальнейшем необходимо провести комплексную оценку композиционного субстрата на основе торфа и активного ила как по водно-физическим, так и агрохимическим показателям и свойствам, по крайней мере в вегетационных опытах на тест-объектах.

Провели сравнение композиционных субстратов на основе верхового торфа и отходов активного ила АЦБК/биогумуса «Архангельский» с промышленными субстратами.

Градиентные добавки активного ила к верховому торфу резко повышают истинную плотность и насыпную плотность сложения субстрата. Наиболее близки показатели к эталонным субстратам: по плотности

сложения – при 20–30% ила, по истинной плотности – при 30–70% ила в композиции. Формируемые субстраты по пористости (80–91%) достаточно близки к эталонным субстратам (88–93%). Однако все же предпочтение стоит отдать комбинациям с дозами ила до 50%. Большие дозы ила снижают коэффициент пористости до значительных (в 2 и более раза) расхождений с эталонами.

По водным свойствам наиболее близки к эталонным производственным субстратам варианты комбинационных субстратов на основе торфа и активного ила АЦБК с добавкой 20–30%. Увеличение доли ила в субстрате приводит к снижению влагонасыщения и влагоемкости субстратов и может быть опасно при использовании в теплицах, потребовать дополнительных изменений в обеспечении поливной нормы или применении специальных водоудерживающих добавок.

Заключение

Таким образом, добавка биогумуса к верховому торфу даже в 10% по объему значительно меняет ряд водно-физических свойств. При добавке к торфу биогумуса на основе отходов активного ила повышается плотность субстрата, но снижается пористость, влагоемкость. Подсушивание субстрата при его использовании в теплицах может вызвать необходимость регулирования поливной нормы.

По комплексу показателей и сравнения с производственными аналогами наиболее выгодным является композиция с добавкой 20–30% биогумуса на основе отходов активного ила АЦБК, которая наиболее соответствует промышленным субстратам. Этой добавке биогумуса «Архангельский» к верховому торфу вполне достаточно, чтобы обеспечить необходимые водно-физические свойства субстрата в малообъемных кассетах в типовых теплицах лесного комплекса.

В дальнейшем эксперименты по подбору композиций субстратов для использования в тепличных комплексах и выращивания посадочного материала лесных пород следует продолжить в производственном направлении – обеспечении макро- и микроэлементами для регламентации их добавок, а также с точки зрения эколого-токсикологических свойств (содержание ТМ и патогенов). Необходима также проверка субстратов на тест-объектах и в реальных условиях при выращивании семян древесных пород.

Авторы благодарят Е.М. Романова и студентов САФУ А.А. Горелову, Е.С. Моисееву, П.А. Сеулину за помощь в подготовке композиций субстратов.

Список литературы

1. Чеботарев Н.Т., Найденов Н.Д., Юдин А.А. Агро-экологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур // Наука. Мысль. 2016. № 1–2. С. 33–42.
2. Lamastra L., Suci N., Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2018. Vol. 5. P. 5–10. DOI: 10.1186/s40538-018-0122-3.
3. Fijalkowski K., Rorat A., Grobelak A., Kacprzak M. The presence of contaminations in sewage sludge – the current situation. *Journal of Environmental Management*. 2017. № 203 (Pt 3). P. 1126–36. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.068.
4. Iticescu C., Georgescu L., Murariu G., Circiumaru A. The Characteristics of Sewage Sludge Used on Agricultural Lands. *AIP Conference Proceedings*. 2022. 020001. 2018. P. 1–8. DOI: 10.1063/1.5060681.
5. Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования об утилизации активного ила // Ползуновский вестник. 2015. № 4. Т. 1. С. 114–118.
6. Национальный стандарт РФ «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования». М.: Российский институт стандартизации, 2021. [Электронный ресурс]. URL: Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки. (дата обращения: 07.02.2023).
7. Перова А.Е., Чистикин И.И., Матвеев М.К. Утилизация биомассы активного ила: учебник для техн. спец. вузов. М.: Высшая школа, 2015. Т. 16. Т. X. С. 1520–1536.
8. Акимова И.А., Ткач П.Д., Сыч О.О. Утилизация биомассы активного ила: учебник для техн. спец. вузов. М.: Высшая школа. 2015. Т. 16. Т. X. С. 50–156.
9. Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Экологическая биотехнология: учебное пособие для студентов специальности «Биоэкология». Минск: БГТУ, 2006. 312 с.
10. Соколов О.М., Ивко В.Р. Торфяные ресурсы Архангельской области и их использование. Архангельск: Издательство АГТУ, 2000. 37 с.
11. Скрипниченко В.А., Селянина С.Б., Татаринцева В.Г., Пономарева Т.И., Дайбова Е.Б., Кириллова М.Е. Торф как источник для производства удобрений (на примере месторождения Овечье) // Проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России: материалы Всероссийской научно-практической конференции (17–18 декабря 2020 г.). / Отв. ред. проф. М.Г. Губайдуллин и доц. О.В. Крайнева; Северный (Арктический) федеральный университет. Архангельск: САФУ, 2020. Вып. 3. С. 117–121.
12. Селянина С.Б., Пономарева Т.И., Ярыгина О.Н., Труфанова М.В., Зубов И.Н. Биологическая активность компонентов верхового торфа Арктической зоны Российской Федерации // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 293–301.
13. Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу. *Resources and Technology*. 2015. № 12 (1). С. 47–76. DOI: 10.15393/j2.art.2015. 3081.
14. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. 168 с.
15. Крамаренко В.В. Влияние ботанического состава на физические свойства торфа // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2009. Вып. 2. С. 272–280.

УДК 631.1:338.28:007.52

**ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ МЕЖДУРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОСЕВОВ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

Хамуков Ю.Х., Канокова М.А.

ФГБУН «Федеральный научный центр

«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»,

Нальчик, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru

В работе рассмотрены условия перемещения по междурядью агрегата для обработки посевов пропашных культур. Актуальность работы обусловлена обостряющимся противоречием между ростом количества обработок междурядий посевов и деградацией почв из-за их машинной и химической деградации. Развитие технологий междурядной обработки посевов происходит главным образом в виде совершенствования конструкции рабочих органов/эффекторов агрегатов и усложнения выполняемых ими кинематических и динамических действий региональными и локальными перемещениями в междурядном пространстве. При этом региональные и локальные перемещения рабочих органов/эффекторов выполнимы только после высокоточного выполнения глобальных перемещений транспортной платформы агрегата с минимальным деструктивным воздействием на почву, без нанесения вреда посевам и с высокой энергоэффективностью. Для этого агрегат должен обладать специфическими свойствами в виде особенностей геометрических параметров конструкции транспортной платформы, типа и габаритов движителей, соответствовать жестким массогабаритным ограничениям и обладать высокой управляемостью. Потребность в высокой маневренности транспортной платформы агрегата в условиях движения в междурядье по малосвязному и одновременно липкому грунту с твердотельными препятствиями обуславливает высокие требования к управляемости и наблюдаемости управления. Выполнение всех указанных требований к техническим характеристикам транспортной платформы робототехнического агрегата для междурядной обработки посевов представляет собой самостоятельную сложную задачу, неразрешимую традиционными инженерно-конструкторскими приемами.

Ключевые слова: междурядная обработка, роботизация, глобальные перемещения, транспортная платформа, подвижность, энергоэффективность, управляемость

**PROBLEMS OF ROBOTIZATION OF INTER-ROW
TREATMENT OF CROPS OF ROWED CROPS.
PROVISION OF GLOBAL MOVEMENTS OF WORKING BODIES**

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A.

Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences",

Nalchik, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru

The paper considers the conditions for moving along the row spacing of the unit for processing plantings of tilled crops. The relevance of the work is due to the growing contradiction between the increase in the number of treatments between rows of plantings and soil degradation due to their mechanical and chemical degradation. The development of technologies for inter-row processing of plantings occurs mainly in the form of improving the design of the working bodies / effectors of the units and complicating the kinematic and dynamic actions performed by them by regional and local movements in the inter-row space. At the same time, regional and local movements of the working bodies / effectors are feasible only after high-precision global movements of the transport platform of the unit with a minimum destructive effect on the soil, without harming plantings and with high energy efficiency. To do this, the unit must have specific properties in the form of features of the geometric parameters of the design of the transport platform, the type and dimensions of the propellers, comply with strict weight and size restrictions and have high controllability. The need for high maneuverability of the transport platform of the unit in the conditions of movement in the aisle on loosely connected and, at the same time, sticky soil with solid obstacles determines the high requirements for controllability and observability of control. Fulfillment of all the specified requirements for the technical characteristics of the transport platform of the robotic unit for inter-row processing of landings is an independent complex task that cannot be solved by traditional engineering and design techniques.

Keywords: inter-row processing, robotization, global movements, transport platform, mobility, energy efficiency, controllability

Последствия интенсивного земледелия, ставшего с 1960-х гг. ведущим и основным способом обеспечения человечества продуктами питания, становятся угрозой устойчивого существования экосистем и земной биосферы в целом. По мере осознания угроз возрастают усилия по поиску

альтернатив интенсивному применению химических удобрений, пестицидов и тяжелой техники в агроценозах [1, 2]. Выраженным глобальным трендом в эволюционировании современного растениеводства становится замещение сплошной неизбирательной обработки растений и почвы

на адресные точные воздействия бесхимическими и не разрушающими структуру почвы агротехнологическими приемами. Такой переход сопровождается кратным ростом количества двигательных действий воздействующих на почву и растения рабочих органов и, соответственно, таким же кратным – точнее, многократным – ростом требований к кинематическим и динамическим характеристикам этих действий. Традиционные подходы механизации производственных процессов в агропроизводстве не располагают приемами и способами решения алгоритмических и кинематических задач точного земледелия. Прежде всего, требуется интеллектуализация выполнения производственных операций. Но здесь определяющими становятся ограничения человека в способности управления выполнением многочисленных производственных процессов в динамической среде. Выходом из эволюционного тупика становится роботизация – полное замещение человека в производственных процессах. Поскольку наибольшее количество воздействий на почву и растения осуществляется при возделывании посевов пропашных, особенно зерновых, культур [3], наибольший экономический и экологический смысл видится в роботизации именно этого вида агротехнических работ.

Цель данного исследования сформировалась в ходе проводившихся с участием авторов статьи разработок сельскохозяйственной робототехники в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. На протяжении полутора десятилетий сотрудниками центра формировались концептуальные подходы к роботизации растениеводческой деятельности, создавались и патентовались новые конструкции робототехнических агрегатов сельскохозяйственного назначения. Опыт этой инновационной деятельности позволил сформулировать цели исследования – определение задач, стоящих перед разработчиками мобильной автономной полеводческой робототехники. Первоочередной такой задачей является создание специализированной транспортной платформы для агрегатирования агротехнического оборудования и соответствующее предварительное определение технических требований к ней.

В оценке перспектив разработки робототехнических агрегатов для междурядной обработки почвы и растений мы исходим из аксиоматического, на наш взгляд, поло-

жения о решающем значении экономической эффективности применения робототехники. Соответственно, для определения степени своевременности и целесообразности осуществления таких разработок следует начать с анализа механизмов возникновения экономической эффективности применения подобных роботов. Исходными параметрами для предварительного анализа мы выбрали относительную и абсолютную энергоемкость производственных операций по возделыванию пропашных культур [4–6] исходя из коэффициента полезного действия энергетических машин, движителей шасси полевой агротехники и коэффициента полезного действия культиваторов [7–9]. Отдельного внимания заслуживает задача определения глобальных ограничивающих факторов, связанных с воздействием агротехнологий на экосистемные процессы [10–12] и действующих на протяжении десятилетий и столетий [13–15]. Также интерес представляет течение «альтернативное земледелие», заключающееся в попытке полной «биологизации» земледелия с отказом от синтетических удобрений, пестицидов, регуляторов роста и кормовых добавок [16, 17].

Анализ сведений из указанных источников приводит, во-первых, к выводу о том, что экономически оправданная роботизация земледелия требует создания и внедрения принципиально новых, энтропийно консервативных агротехнологий с безлюдным выполнением производственных операций автономными робототехническими системами.

Другой принципиальный вывод заключается в том, что экономически оправданная роботизация земледелия возможна только при создании неантропоморфичной агротехнологии, так как антропоморфичность рабочих органов и производственных операций неизбежно обуславливает интенсивное производство энтропии и, соответственно, деградацию агроэкосистемы и прогрессирующий рост расходов на поддержание плодородия земельных угодий. Реализация этих выводов потребует разработки новых способов воздействия на почву и растения с использованием иных физических и химических явлений взамен или в добавление к тем, которые используются сейчас. Слабовыраженный тренд на развитие этого направления наблюдается, например, в тематике конкурсов Российского научного фонда на проведение фундаментальных и прикладных разработок. К насто-

ящему времени отставание отечественных разработок принципиально новых методов и способов возделывания сельхозкультур в условиях открытого и защищенного земледелия не преодолено. Вследствие этого российские аграрии вынуждены внедрять заимствованные агротехнологии. Прежде всего, это современные системы точного земледелия и растениеводства защищенного грунта, а также многофункциональные высокопроизводительные широкозахватные агрегаты для высокоточной обработки посевов. Такая техника позволяет обрабатывать посевы на больших площадях в заданные агротехнические сроки. Применение новой агротехники актуализировало потребность в методах и в технических средствах дистанционного мониторинга и диагностики состояния посевов, почв, приземного слоя атмосферного воздуха, режима азотного питания растений и т.п. агротехнических факторов.

Следует отметить, что обеспечение своевременного оперативного контроля состояния посевов и определения актуальных агротехнических факторов также сопряжено с управляемым высокоточным перемещением диагностической и измерительной техники по посевам.

В-третьих, для обеспечения энергетически эффективных и экологически безопасных глобальных перемещений рабочих органов/эффекторов робота для междурядной обработки посевов необходимо создание специальной междурядной транспортной платформы.

Организация глобальных перемещений по междурядью

Ключевые свойства транспортной платформы для передвижения по междурядьям обуславливают особое внимание к условиям взаимодействия ее движителей с грунтом. Глобальные перемещения эффекторов робототехнического агрегата осуществляются однонаправленным передвижением его транспортной платформы по слабосвязным грунтам междурядья вдоль одной координаты – протяженности междурядья. Соответственно, приемлемое соотношение повреждаемости культурных растений и эффективности уничтожения сорняков, в особенности на первых стадиях прорастания культурных растений, достигается, во-первых, точностью перемещения агрегата относительно междурядья, правильным подбором рабочих органов и их сочетаний

и правильной их установкой. Это определяет требования общего характера к конструкции платформы, ее кинематическим и динамическим характеристикам и свойствам движителей. Также важным обстоятельством является то, что на транспортной платформе необходимо смонтировать десятки узлов и деталей рабочих органов различных видов [18].

Условия перемещения транспортной платформы по междурядьям посевов

1. Междурядная транспортная платформа отличается от прочих безрельсовых транспортных средств тем, что эксплуатируется в условиях жестких ограничений маневрирования. Междурядное пространство является для транспортной платформы связью, ограничивающей подвижность платформы одной степенью свободы – перемещением вдоль геометрической оси междурядья, и ограничивающей подвижности вращения (крена) в продольной и поперечной плоскостях. Способность управляемого перемещения платформы по междурядью определяется характером взаимодействия движителей платформы с грунтом, или, конкретнее – конструкцией движителя и состоянием почвы в междурядье – типом грунта, его структурой и влажностью.

2. Статические и динамические характеристики платформы определяются геометрическими параметрами ее конструкции, которые, в свою очередь, определяются шириной междурядья посевов и особенностями возделываемой культурой. Исходя из размеров ширины междурядья посевов 0,4–0,7 м и максимального уклона поля 8°, оценки условий остойчивого движения платформы можно провести для плоской местности с известной спектральной плотностью неровностей и известными вязкостью и липкостью грунта. Качественный вид спектра неровностей подготовленного к посевам поля по [19–21] может быть представлен экспоненциальной кривой вида

$$S_g(\Omega) = k_v \Omega^{-n_v}, \quad (1)$$

где k_v – параметр, выражающий дорожные неровности и изменяющийся в пределах 0,1–100, где 0,1 относится к гладким твердым поверхностям, а 100 – к очень грубым поверхностям; k_v и n_v – константы, а Ω – пространственная частота неровностей в циклах на единицу длины пути. В частности, для слежавшейся пахоты $k_v = 1 \times 10^{1,37}$, $n_v = 1.15$.

Для условий движения платформы по поворотным полосам и подъездным полевым дорогам к участкам посевов примем обобщенное выражение спектра неровностей [21] в форме

$$S_g(\Omega) = k_v \Omega^{-2,3}. \quad (2)$$

Размеры препятствий в междурядьях могут быть от 0,1 до 0,20 м.

Грунт в междурядьях на большей части площади пахотных земель чаще всего образован глубоким черноземом, или темно-серыми суглинками, или удобренной супесчаной почвой. В частности, кукуруза растет на всех почвах при pH не ниже 5,6. Исходя из этого, примем, что грунт в междурядье имеет механические характеристики с характерными $n = 1,1-1,25$.

Глубина увлажнения почвы в междурядьях на орошаемых посевах часто превышает глубину осадки движителя сельскохозяйственной техники. В таких условиях основное сопротивление движителям создают усилие отрыва движителя платформы от грунта – липкость грунта, и податливость грунта – пластичность. Липкость глинистых грунтов может меняться в пределах 50–200 г/см². Пластичность I_p меняется в зависимости от количества удерживаемой грунтом воды (до перехода грунта в текучее состояние). По ГОСТ 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» связные грунты подразделяют на следующие виды по пластичности: 1) супесь – $0,01 < I_p < 0,07$; 2) суглинок – $0,07 < I_p < 0,17$; 3) глина – $I_p < 0,17$; 4) песок – $I_p < 0,01$. Пластичность связных грунтов очень сильно зависит от дисперсности глинистой фракции и возрастает пропорционально увеличению содержания органических коллоидов. При определенных комбинациях водности, глинистости и типа минерализации проявляется тиксотропность грунтов – способность грунта разжижаться под влиянием механического воздействия и переходить в прежнее гелеобразное состояние после прекращения воздействия. В результате под движителем платформы происходит разупрочнение таких грунтов и потеря несущей способности с соответственным увеличением сопротивления движению из-за углубления колеи и, одновременно – увеличением сопротивления движению из-за возникновения растущих сил липкости вследствие последующего тиксотропного упрочнения [21]. В этой ситуации становится актуаль-

ным время застудневания – время, необходимое для обратного перехода системы из золеобразного состояния в гелеобразное. Это время определяет оптимальную скорость движения платформы с определенным типом движителей. Чем меньше длительность времени застывания, тем более тиксотропна система и тем больше минимальная экономичная скорость движения. Это обстоятельство порождает явление тиксотропного предела, когда разжиженный грунт под опорной площадкой движителя свободно перемещается, приводя к пробуксовке ведущих движителей, и блокируется в колее после непродолжительного покоя. Очевидно, что тиксотропный предел наиболее актуален для платформы на гусеничных движителях, а для колесных движителей актуальность его растет с увеличением радиуса колес вместе с увеличением времени сцепления обода колеса с грунтом. Это время определяется скоростью движения платформы, величиной радиуса колеса и величиной осадки движителя в грунт. Для платформы с колесными движителями общее время контакта обода колеса с липким грунтом составит

$$t = 2 \frac{R}{V} \arccos \frac{R-h}{R}, \quad (3)$$

где t – время контакта участка обода колеса с грунтом; R – радиус обода; V – скорость движения платформы; h – глубина осадки обода колеса в грунт.

При минимальном времени контакта обода с грунтом до застудневания, равно t_{\min} , имеем минимальную скорость оптимального режима передвижения по междурядью не менее величины отношения длины хорды C погруженного в грунт сегмента обода колеса к t_{\min} :

$$V_{\min} = \frac{C}{t_{\min}} = \frac{2}{t_{\min}} \sqrt{h(2R-h)}, \quad (4)$$

Например, при $R = 0,6$ м, $h = 0,03$ м, $t_{\min} = 2$ с минимальная скорость движения по междурядью составит примерно 665 м/ч. При движении платформы в междурядье с грунтом, тиксотропный эффект для которой проявляется течение 2 с, при скоростях движения, меньших V_{\min} , прогрессивно возрастает энергопотребление движителей, снижается управляемость и возникают неконтролируемые изменения сопротивления движению на разных движителях и раскачивания платформы.

При качении колеса без буксования режим установившегося движения можно описать уравнением

$$\tau_n = c + P \operatorname{tg} \varphi - \frac{P \frac{n+1}{n}}{\lambda b(n+1) \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right)^{\frac{1}{n}}}, \quad (5)$$

где τ_n соответствует удельному тяговому усилию при условии равномерного распределения давления P по площади пятна контакта колеса с грунтом; λ – отношение длины пятна контакта к ее ширине, а большая дробная часть отображает сопротивление качению; b – ширина пятна контакта; n – коэффициент сжимаемости грунта; k_c и k_φ – коэффициенты сцепления и трения; C и φ – силы сцепления и трения.

Из (5) следует, что характер зависимости удельного тягового усилия от условий в междурядье предполагает расход части мощности двигателя на преодоление сопротивления движению, возникающего из-за смятия грунта.

Из (5) можно получить выражение для определения максимального значения удельного тягового усилия:

$$\tau_n = c + \frac{P_0 \operatorname{tg} \varphi}{n+1}. \quad (6)$$

Из (6) следует явный вид зависимости эффективности движителей от сминаемости грунта при заданном сцеплении с грунтом и силах трения.

Также выявляется неочевидный фактор – независимость величины удельного тягового усилия от формы пятна контакта движителя с грунтом. Это обстоятельство позволяет конструктору избавиться от ограничений на форму и диаметр обода колеса при решении задачи обеспечения максимального тягового усилия при заданных массогабаритных и энергетических характеристиках платформы. Остается только ограничение нагрузки на колесо и на обеспечение максимально высоких значений сил сцепления за счет грунтозацепов на ободу и связанной с силой сцепления силы трения. Причем тангенциальная зависимость силы трения от коэффициента трения позволяет использовать гидродинамические и тиксотропные эффекты для достижения максимального удельного тягового усилия на движителе за счет варьирования скорости движения, диаметра колеса движителя и нагрузки на колесо. Скорость движения платформы лимитирована временем выполнения локальных и региональных пере-

мещений рабочих органов, нагрузка на колеса определяется их количеством, которое у платформы для движения по междурядьям тоже жестко ограничено. Соответственно, на первый план выходит диаметр колес движителя. Выбирать диаметр колес следует с учетом преимущественного предназначения робототехники в отношении вида посевов полевых культур, определяющих физико-механические и химические особенности грунтов в междурядьях.

Выводы о требованиях к транспортным платформам для роботизированной обработки междурядий посевов сельскохозяйственных культур

Для обеспечения экономического эффекта роботизации полеводства необходимы, прежде всего, полностью управляемые транспортные платформы для перемещения агротехнического оборудования по междурядьям с высокой точностью. Для этого транспортная платформа должна быть высокопроходимой и высокоуправляемой в условиях перемещения по рыхлым, часто увлажненным и с наличием твердотельных препятствий грунтам междурядий. При разработке полеводческой робототехники необходимо исходить из требования снижения производства энтропии при выполнении производственных операций и согласовывать время выполнения региональных и локальных перемещений рабочих органов с ограничениями на скорость перемещения платформы из-за тиксотропных и экскавационных эффектов на движителях платформы. Наиболее критичными факторами при конструировании высокопроходимой и высокоуправляемой колесной платформы являются диаметр колес и их количество.

Список литературы

1. Белоусов А.А. Свойства почв. Понятие о деградации и ее виды. Факторы и причины деградации. Почвоведение: электронный учебно-методический комплекс. Красноярск: ФГОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2016. 225 с.
2. Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Курс лекций для аспирантов по дисциплине «Эксплуатация машинно-тракторных агрегатов (МТА) в растениеводстве», Краснодар: КубГАУ, 2016. 92 с.
3. Обзор рынка зерновых // Международный совет зерновых. 2019. 8 с.
4. Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 83 с.
5. Селиванов Н.И., Макеева Ю.Н. Адаптация колесных тракторов к технологиям почвообработки // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19086> (дата обращения: 07.02.2023).

6. Поддубко С.Н., Амельченко П.А., Стасилевич А.Г., Витязь П.А., Дубовик Д.А., Ващула А.В., Жуковский И.Н., Ключников А.В. Тракторы XXI века. Состояние и перспективы. Минск: Беларуская навука, 2019. 208 с.
7. Капов С.Н., Орлянский А.В., Кожухов А.А., Бобрышов А.В., Лиханос В.А., Мирошникова В.В. Энергетическая оценка обработки почвы // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 3. С. 8–15.
8. Карабаницкий А.П., Левшукова О.А. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов. Краснодар: КубГАУ, 2014. 104 с.
9. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 264 с.
10. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 261 с.
11. Абакумов Е.В. Теория эволюции и экология почв // Роль почв в биосфере и жизни человека: материалы докладов Международной научной конференции к 100-летию со дня рождения академика Г.В. Добровольского, к Международному году почв (Москва, 5–7 октября 2015 г.). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. С. 13.
12. Здоровые почвы для здоровой планеты и здорового населения: FAO призывает обратить вспять процесс деградации почв // Всемирный форум по продовольствию и сельскому хозяйству (Берлин, 31 октября 2022 г.). Берлин, 2022. 3 с.
13. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство) // Национальный доклад. М.: ООО «Издательство МБА». 2019. Т. 2. 476 с.
14. Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю. Синергетика: нелинейные процессы в экологии: монография. Сумы: Сумский государственный университет, 2016. 229 с.
15. Когякова В.В., Мамонтова С.А. Альтернативные системы земледелия // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научной конференции (Красноярск, 15 октября 2019 г.). Красноярск, 2019. С. 34–39.
16. Филиппов А.И., Заяц Э.В., Стуканов С.В., Чеботарев В.П., Пузевич К.Л. Обзор рабочих органов пропашных культиваторов и разработка новых в концепции экологического земледелия // Механизация и сельскохозяйственное машиностроение. 2020. № 4. С. 121–126.
17. Поздняков А.В., Шуркина К.А. Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Науки о Земле. 2008. С. 206–212.
18. Профстандарт: 13.006. Тракторист-машинист сельскохозяйственного производства. 2014.
19. Wenderborn J.O. Lie Unebenheiten landwirtschaftlicher Fahrbahnen (Roughness of field Roads). Grundle. Der Landtechn. 1965. Vol. 15. No. 2. P. 33–64.
20. Bekker M. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. The Univ. Of Michigan Press, Mich. 1956. 530 P. DOI: 10.3998/mpub.9690401.
21. Bekker M. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. The Univ. Of Michigan Press, Hardcover. 1969. 846 с.

УДК 63:674.031.795.2

СТАНДАРТНЫЕ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ, ВИДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБОРОЧНЫХ ДАННЫХ И ТИПЫ АСИММЕТРИИ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ЧЕРЕМУХИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PRUNUS PADUS* L.)

¹Зыков И.Е., ²Баранов С.Г., ¹Прокопенко А.Д.

¹Государственный гуманитарно-технологический университет, Орехово-Зуево,
e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, e-mail: bar.serg58@gmail.com

Для тестирования уровня стабильности развития растений часто используют степень асимметрии их листовых пластин. Возникающие при этом систематические аддитивные и мультипликативные ошибки зависят от характера распределения выборочных данных. Статистические анализы выполнены в среде STATISTICA 10 (Stat.Ink). На примере листовых пластин черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.) продемонстрированы два вида распределения выборочных данных – нормальное и экспоненциальное. Экспоненциальный вид распределения, близкий к логнормальному, не позволяет получить среднее значение выборки. Нормализующее преобразование выборки способствует получению среднего значения и нахождению относительного уровня стабильности развития популяции. В мурманской популяции (Апатиты) выявлена изменчивость листовых пластин, но, несмотря на значительную степень асимметричности, полученную в формуле нормирующей разности, она не обладает статистически значимой флуктуирующей асимметрией (ФА). Для выборки из владимирской популяции (Владимир) с наибольшим уровнем ФА характерны высокие значения эксцесса, скоса распределения и дисперсии ($0,018 \pm 0,004$), что подтверждает двухфакторный дисперсионный анализ ($p < 0,05$). Максимальная изменчивость формы листовых пластин в мурманской популяции сопряжена с малой асимметричностью, в московской (Электросталь) и владимирской популяциях выявлен высокий уровень асимметричности. Авторы рекомендуют обращать внимание на характер распределения разности между левой и правой величинами признака и использовать двухфакторный дисперсионный анализ для окончательного определения величины ФА.

Ключевые слова: черемуха обыкновенная, метод нормирующей разности, частотное распределение, стандартная ошибка, флуктуирующая асимметрия

STANDARD MEASUREMENT ERRORS, TYPES OF DISTRIBUTION OF SAMPLE DATA AND TYPES OF ASYMMETRY OF LEAF PLATES OF COMMON CHERRY (*PRUNUS PADUS* L.)

¹Zykov I.E., ²Baranov S.G., ¹Prokopenko A.D.

¹State University of Humanities and Technology, Orekhovo-Zuyevo, e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²FGBOU TO Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir,
e-mail: bar.serg58@gmail.com

To test the level of stability of plant development, the degree of asymmetry of their leaf plates is often used. The resulting systematic additive and multiplicative errors depend on the nature of the distribution of sample data. Statistical analyses performed in the STATISTICA 10 (Stat. Ink) environment. Two types of distribution of sample data – normal and exponential – demonstrated using the example of leaf plates of common cherry (*Prunus padus* L.). The exponential type of distribution, close to the lognormal, does not allow to obtain the average value of the sample. The normalizing transformation of the sample contributes to obtaining an average value and finding a relative level of stability in the development of the population. In the Murmansk population (Apatites) the variability of leaf plates is revealed, but despite the significant degree of asymmetry obtained in the normalizing difference formula, it does not have a statistically significant fluctuating asymmetry (FA). The sample from the Vladimir population (Vladimir) with the highest FA level is characterized by high values of kurtosis, distribution bias and variance ($0,018 \pm 0,004$), which is confirmed by two-factor analysis of variance ($p < 0,05$). The maximum variability of the shape of leaf plates in the Murmansk population is associated with low asymmetry, in the Moscow (Elektrostal) and Vladimir populations a high level of asymmetry was revealed. The authors recommend paying attention to the nature of the distribution of the difference between the left and right values of the trait, and using a two-factor analysis of variance to finally determine the value of FA.

Keywords: bird cherry, normalizing difference method, frequency distribution, standard error, fluctuating asymmetry

Флуктуирующая асимметрия (ФА) – это ненаправленное отклонение от нуля величин билатеральных признаков при нормальном распределении их разности. Флуктуационная изменчивость встречается не только среди симметричных признаков, она может характеризовать количе-

ственную изменчивость биомассы, окраски и других параметров генотипической и фенотипической нормы реакции. По величине индекса ФА судят о стабильности развития как отклонении от гомеостаза развития популяции. Стандартная ошибка выборочных данных – обычная характеристика описа-

тельной статистики выборки индекса ФА, зависящая от ее величины и одновременно от ошибки измерения, допускаемой исследователем. Большая ошибка искажает величину с понижением статистической значимости ФА, что часто обусловлено присутствием направленной асимметрии (НА).

Отбор наиболее симметричных листьев позволяет провести измерение и сравнение такого признака, как ширина их половин. Проверка на направленную асимметрию часто показывает ее отсутствие даже при достаточно большом объеме выборки, например 50–100 листьев. При этом высокие показатели эксцесса и асимметричности свидетельствуют о примеси других видов асимметрии, включая антисимметрию [1]. Численно индекс ФА определяют по абсолютному значению отношения разности величин признаков к их сумме. Часто присутствие флуктуирующей асимметрии без примеси НА определяется только по одному признаку.

Метод геометрической морфометрии из-за большого количества меток и случайного увеличения числа выборок повышает число степеней свободы в дисперсионном анализе в несколько сотен раз и нормализует выборку. В итоге исследователь получает направленную асимметрию, часто превышающую флуктуирующую, например по показателям среднего квадрата MS [2]. Такое обескураживающее проявление НА затрудняет поиск уровня стабильности развития, подтверждая множественность проявления асимметричности в выборке.

Увеличение числа промеров, фотографирований и образцов в выборке снижает ошибку измерения. Преимущество Прокрустового (морфогеометрического) анализа с повторными измерениями бесспорно. Остается, тем не менее, нерешенным вопрос, как исключить направленную асимметрию при сравнении двух и более выборок. Исследования видов рода *Padus* Mill. показали чувствительность листовых пластин к автомобильным выбросам [3]. Поиск дополнительных индикаторных признаков [4] для детального анализа экологического состояния окружающей среды продолжается [5].

Сочетание обоих видов асимметрии отмечено в сообществах многих растений, включая популяции липы мелколистной и березы повислой [6, 7]. Ручное или электронное измерение признаков лишь иногда позволяет выделить направленную асимметрию в *t*-тесте. При нормальном распределении разности (L–R) величину НА экстрагируют из разности по формуле $|L-R| - (L-R)_{av}$,

где L и R – величины левого и правого гомологичных признаков, а $(L-R)_{av}$ – среднее значение выборки $|L-R|$ по абсолютному значению [8].

Таким образом, для исследователя, не ставящего задачей тестирование особенностей формы листа видов с примесью направленной асимметрии, вполне приемлемо измерение линейных (угловых) признаков и определение «чистой» ФА.

Нам представляется наиболее сложной задачей определение формы распределения выборки. Даже при аккуратном сборе листовых пластин каждая популяция обладает особенностью частотного распределения значений (L–R). Что делать, если из двух выборок одна распределена по гауссовскому нормальному закону, а другая имеет логнормальное, или экспоненциальное распределение?

Исходя из представленной выше проблемы, нами сформулирована цель исследования – определение «чистой» ФА мерных признаков в выборках с отклонением от нормального распределения. Задачей работы является сравнение величин ФА между выборками с частотным распределением разности (L–R), отличающимся от нормального распределения, и составление соответствующих рекомендаций.

Материалы и методы исследования

Исследованы две популяции черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.) урбанизированных территорий площадью около 2–3 км² в Московской области (город Электросталь, 55°48' с. ш., 38°27' в. д.) и городе Владимир (56°08'00" с. ш., 40°25'00" в. д.). Для сравнения использована северная популяция с Кольского полуострова (Мурманская область, город Апатиты, экспериментальный участок ПАБСИ, 67°34' 48" с. ш., 33°18' 10" в. д.).

Листья черемухи, близкие по величине, собраны в августе 2022 года с нижних частей крон деревьев. Методика сбора, сушки листьев и их фотографирования описана в предыдущей работе [9]. Проведено трехкратное измерение в сантиметрах только одного признака – ширины половины листа (экранный дигитайзер Dig2.31; пакет TPS, Rholf, 2017). Результаты перенесены в таблицы Excel, где выполнены первичные статистические анализы, из которых наиболее важными мы считаем характеристику частотного распределения (L–R) и нормированной разности (индекса ФА), определяемой по формуле $|L-R|/(L+R)$.

Двухфакторный анализ проведен в программе STATISTICA 10 (Stat. Ink). Использован раздел ANOVA – факторный анализ. В этой же программе проведена подгонка (distribution fitting) с определением типа распределения выборок. Непараметрический анализ Колмогорова–Смирнова (K-S test) служил для определения нормальности распределения, а корреляционный анализ Спирмена – для определения зависимости индекса ФА от величины признака $(L+R)/2$. Везде принимался статистический уровень значимости 95%.

Результаты исследования и их обсуждение

Описательная статистика

Стандартная ошибка измерений левого и правого признаков в электростальской популяции была больше, чем во владимирской, и зависела от величины дисперсии и самого размера признака (больше признак – больше дисперсия – больше стандартная ошибка).

Распределения $(L-R)$ и $FA=|L-R|/(L+R)$ отличались от нормального (K-S test: $p<0,05$), но в электростальской популяции эти отличия более выражены. Значения эксцесса и асимметричности распределения частот представлены в таблице 1.

Деревья в популяциях не различались по значению ФА ($F=1,2$; $p>>0,05$), а величина признака различалась только в электростальской популяции ($df=5$; $F=15,5$; $p<<0,01$).

Корреляционная статистически значимая зависимость между размером признака и величиной ФА не установлена, за исключением слабо выраженной отрицательной связи между $(L+R)/2$ и ФА. Это позволило сравнить две популяции с разными по величине листовыми пластинами. Направленная асимметрия не была выявлена (t -тест нулевой гипотезы $L=R$; $p>0,05$), следовательно, такой мерный признак, как ширина половины листовой пластины, может быть использован для определения ФА (рис. 1).

Таблица 1

Основные показатели описательной статистики листовых пластин

| Популяция | n | признак, см | ФА | | | | |
|--------------|----|-------------|-------------|-----------|-----------------|------------|--------------------|
| | | | среднее | дисперсия | асимметричность | эксцесс | K-S тест, $p<0,05$ |
| Владимир | 69 | 1,81±0,02 | 0,018±0,004 | 0,001 | 4,79±0,29 | 27,90±0,57 | 0,33 |
| Электросталь | 65 | 2,10±0,04 | 0,012±0,002 | 0,0002 | 1,92±0,30 | 3,80±0,59 | 0,19 |

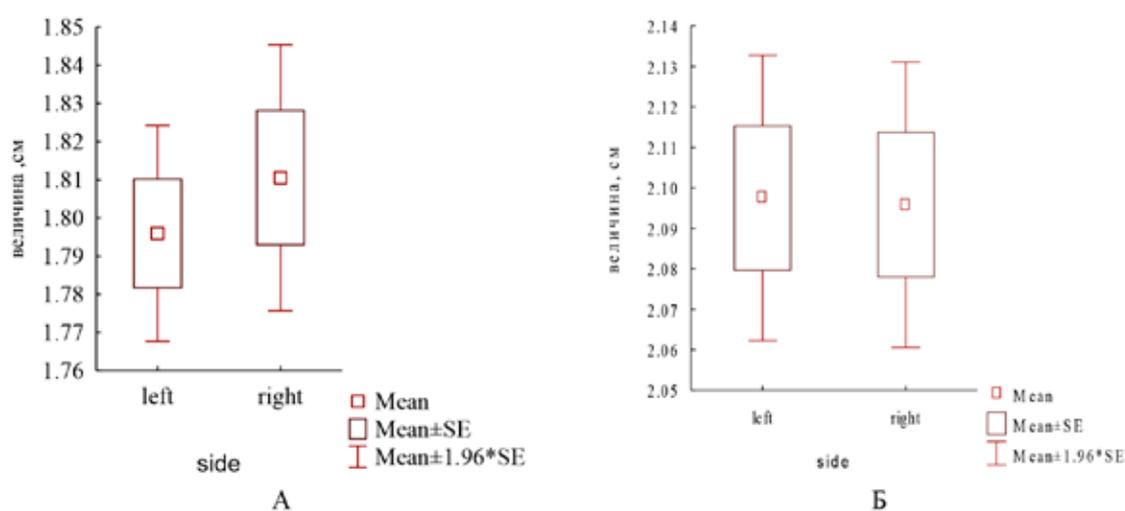


Рис. 1. Средние значения (Mean) и стандартная ошибка (SE) величины левого и правого признаков (А – Владимир, Б – Электросталь) и доверительный интервал среднего значения ($mean \pm 1,96 * SE$)

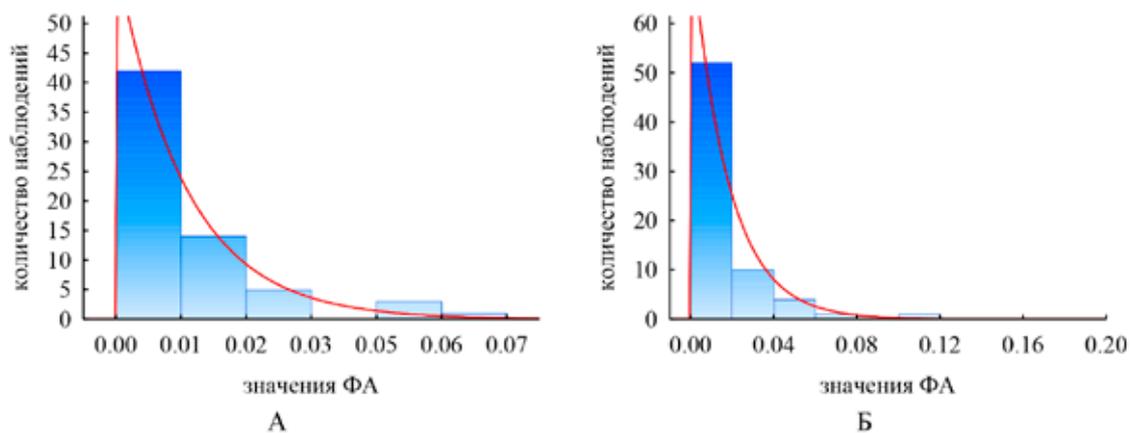


Рис. 2. Экспоненциальная форма распределения значений ФА (А – электростальская и Б – владимирская популяции)

Антисимметрия (как очень редкий тип асимметрии) не обнаружена. Мы считаем наиболее подходящим методом определения антисимметрии нахождение корреляционной связи между выборками L и R. При непараметрическом распределении обычно используют корреляцию Спирмена. Отсутствие значимой отрицательной корреляционной связи указывает на отсутствие антисимметрии. В нашем случае коэффициент r Спирмена оказался статистически незначимым ($r=0,03$; $p=0,5$).

Проверка распределения и нормализация выборок

В современных статистических программных средствах насчитывается более 30 видов (типов) распределения частот в исследуемых выборках. В программе STATISTICA предусмотрено семь основных типов распределения. Нами протестированы выборки $FA = |L - R| / (L + R)$, обладавшие непараметрическим распределением, тестом Колмогорова–Смирнова установлено отклонение от нормальности ($p < 0,01 - 0,02$). Протестирована нулевая гипотеза о том, что исследуемая выборка не отличается по частотному распределению от предсказанной. Выявлен экспоненциальный характер распределения частот ФА с вероятностью не менее 5% ($p = 0,55$ – Электросталь и $p = 0,13$ – Владимир) (рис. 2).

Результаты других видов распределения были статистически незначимы. Логарифмированием с трансформацией по Боксу [10] получено нормальное распределение. При этом использована формула $d = (|Lg L - Lg R| + 0,00005)^{0,33}$, где d – ве-

личина преобразованной флуктуирующей асимметрии. Это преобразование предусматривает логарифмирование разности L–R и возведение в степень.

Трансформированные выборки были проверены на нормальность распределения и подтвердили справедливость гипотезы о его соответствии более чем на 80%. Проверка на логнормальное распределение соответствует гипотезе на 57%. T -тестом не установлены различия средних значений между трансформированными выборками ($d = 0,32$ – Владимир и $d = 0,33$ – Электросталь). Таким образом, распределение ФА после трансформации наиболее близко к логнормальному и нормальному, что свидетельствует о присутствии мультипликативной ошибки, связанной с ростом листовых пластин [8].

Сравнительный анализ

Для сравнения ФА использована мурманская популяция. Для нее характерны гетерогенность в размерах листьев ($F = 9,2$; $p < 0,001$) и асимметричность на индивидуальном уровне (по отдельным деревьям; $F = 12,9$, $p < 0,001$). Распределение ФА характеризовалось как экспоненциальное (33%), и логнормальное (27%), направленная асимметрия отсутствовала. Величина $FA = |L - R| / (L + R)$, превышала ФА популяций средней полосы и была равна $0,024 \pm 0,002$ (Владимир – $0,018 \pm 0,004$; Электросталь – $0,012 \pm 0,002$; $p < 0,05$). Непараметрическим тестом Вилкоксона установлено различие на уровне $p = 0,001$. Характерным также является присутствие отрицательного эксцесса выборки ФА ($\gamma = 0,85 \pm 0,6$),

что может указывать на примесь антисимметрии. Гетерогенность в длине листовых пластин и их индивидуальная изменчивость в условиях севера, на первый взгляд, повышают асимметричность. Как показывают предыдущие исследования методом геометрической морфометрии, форма листовых пластин черемухи мурманской популяции очень изменчива, а их размеры меньше, чем в популяциях средней полосы России [2, 9].

Значительная стандартная ошибка измерения левой и правой половин листовых пластин черемухи (особенно электростальской популяции) объясняется их выраженным компенсаторным ростом. С этим связана высокая вероятность экспоненциального распределения, которое нормализуется даже после простого нахождения разности логарифмов по основанию 10: $LgL - LgR$. Такой метод нормализации применим, но не для всех выборок. Если у выборки высокий показатель эксцесса, то применяют нормализацию по Боксу, также не являющуюся панацеей от непараметрического распределения. В таких случаях важно избегать выбросов, дающих «хвост» в распределении значений ФА. Так, владимирская популяция с высокими значениями асимметричности и эксцесса обладает примесью других видов распределения, возможно, дискретных, т.е. прерывистых – Пуассона или Бернулли. При предварительной инспекции данных гербарных материалов важна картина распределения выборочных величин L и R . Высокие показатели дисперсии, асимметричности (скоса) и эксцесса значений ФА часто свидетельствуют об отклонении от нормального распределения, когда становится невозможным сравнение по средним арифметическим данным.

В сравнительном аспекте мерный способ определения ФА прост и достаточно надежен. Для окончательного результата мы рекомендуем использовать двухфактор-

ный анализ (особь \times сторона). Его достоинство состоит в высокой степени свободы при определении ошибки, т.е. доли необъясненной дисперсии. Результаты двухфакторного анализа приведены в таблице 2.

Наибольшая ошибка (ФА10; $p > 0,05$) была получена для мурманской популяции из-за высокой гетерогенности линейных параметров листовых пластин. В электростальской популяции большая стандартная ошибка выборки и экспоненциальность распределения также привели к росту ошибки взаимодействия особь \times сторона. И только одна владимирская популяция обладала статистически значимой флуктуирующей асимметрией (индекс ФА10).

Чистую ФА можно получить даже при повышенных значениях эксцесса ($\gamma = 2-3$), но не настолько высоких, чтобы вызвать большую ошибку необъясненной дисперсии. Отклонение от нормальности, которую постоянно необходимо проверять, – это следствие высокого эксцесса, т.е. выбросов отдельных значений (варианс) за пределы доверительного интервала.

Метод геометрической морфометрии подтвердил отсутствие ФА в мурманской популяции, высокая изменчивость формы здесь сопряжена с низким проявлением асимметрии. По нашему мнению, этот факт не говорит о стабильном развитии данной популяции, а лишь характеризует ее гетерогенность в условиях северного региона.

Рекомендации для мерного определения ФА:

- 1) максимально приближать размеры листьев, собираемых в различных локалитетах;
- 2) проверять выборки на нормальность распределения разности ($L-R$);
- 3) делать трехкратные измерения для определения стандартной ошибки;
- 4) проверять нормализующий метод оценки ФА в двухфакторном дисперсионном анализе.

Таблица 2

Результаты двухфакторного анализа особь \times сторона (ФА10)

| | SS | Degr. of | MS | F | p |
|--------------|-------|----------|-------|-----|-------|
| Владимир | 2,093 | 68 | 0,031 | 3,0 | 0,000 |
| ошибка | 2,811 | 276 | 0,010 | | |
| Электросталь | 0,186 | 59 | 0,003 | 1,1 | 0,306 |
| ошибка | 0,688 | 240 | 0,003 | | |

Примечание: SS – сумма квадратов; df – степень свободы; MS – средний квадрат; F – критерий Фишера

Список литературы

1. Palmer R.A., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: a measurement, analysis, patterns. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 1986. V. 17. P. 391-421.
2. Klingenberg C.P. Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: concepts, methods, and applications. *Symmetry*. 2015. T. 7. № 2. P. 843-934.
3. Чернакова О.В., Чудновская Г.В. Влияние автомобильного транспорта на флуктуирующую асимметрию листьев представителей рода *Padus* // *Вестник ИрГСХА*. 2019. № 91. С. 92-100.
4. Лебединский И.А., Мочалова К.Ю. Увеличение эффективности применения показателей флуктуирующей асимметрии листьев при проведении измерений по методике Захарова // *Разработка и перспективы применения инновационных технологий в контексте мирового и регионально-развития*, 2020. С. 14-19.
5. Суслина М.А., Кравченко О.С., Сунцова Л.Н. Черемуха обыкновенная и черемуха Маака как индикаторы экологического состояния окружающей среды г. Красноярска // *Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства*, 2021. С. 156-158.
6. Зыков И.Е., Баранов С.Г., Липпонен И.Н., Полоскова Е.Ю., Кузнецова Д.Д. Адаптивная изменчивость листовых пластин липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // *Успехи современного естествознания*, 2022. № 7. С. 7-13. DOI: 10.1753/use.37849.
7. Баранов С.Г., Бибик Т.С., Ильин Л.И. Точность измерения и направленная асимметрия листовых пластин // *Вестник Казанского ГАУ*. 2017. № 2 (44). С. 14-20.
8. Cowart N.M., Graham J.H. Within-and among-individual variation in fluctuating asymmetry of leaves in the fig (*Ficus carica* L.) *International Journal of Plant Sciences*, 1999. V. 160. № 1. P. 116-121.
9. Зыков И.Е., Баранов С.Г., Полоскова Е.Ю., Липпонен И.Н., Гончарова О.А., Прокопенко А.Д. Популяционная изменчивость листовых пластин *Prunus padus* L. // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 4. С. 29-34.
10. Swaddle J.P., Witter M.S., Cuthill I.C. The analysis of fluctuating asymmetry. *Animal Behaviour*. 1994. V. 48. № 4. P. 986-989.

УДК 630*907.1

ОСОБЕННОСТИ ПРИРОСТА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ИНТРОДУЦЕНТОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БРАТСКА

Рунова Е.М., Аношкина Л.В.

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Братск, e-mail: runova0710@mail.ru

В статье представлены результаты многолетних исследований прироста некоторых видов интродуцентов на территории дендрария Братского государственного университета. Целью исследований являлось изучение прироста растений в условиях сурового резко континентального климата Восточной Сибири. Объектом исследования являлись древесные растения, высаженные на территории дендрария Братского университета. Исследования проводились ежегодно в процессе инвентаризации растений дендрария в конце вегетационного периода с 2016 по 2022 г. У саженцев измерялись биометрические показатели – высота, диаметр кроны, а также ежегодный прирост верхушечных и боковых побегов. Полученные данные обрабатывались методом математической статистики – определен коэффициент вариации для значений прироста следующих растений: груша уссурийская (*Pyrus ussuriensis* Maxim), дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. Ex Ledeb), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schlecht), клен Гиннала (*Acer ginnala* Maxim), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* L.), миндаль трехлопастной (*Prunus triloba* L.), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.), форзиция промежуточная (*Forsythia x intermedia* Zabel.), черемуха Маака (*Padus maackii* Rupr). В результате исследований установлено, что верхушечный и боковой приросты интродуцентов подвержены значительным колебаниям, что можно связать с изменениями суммарного количества осадков по годам и среднегодовой температуры воздуха, для чего были проанализированы данные метеостанции Братска за 2015–2022 гг. по количеству осадков и температуры воздуха. При этом среднемесячные колебания температуры и количества осадков не влияют существенно на динамику прироста в отличие от среднегодовых показателей.

Ключевые слова: Восточная Сибирь, интродуценты, прирост, динамика, климат, среднегодовая температура, среднегодовое количество осадков

THE PROBABILITY OF GROWTH OF SOME TYPES OF INTRODUCERS EASTERN SIBERIA ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF BRATSK

Runova E.M., Anoshkina L.V.

Bratsk State University, Bratsk, e-mail: runova0710@mail.ru

The article presents the results of long-term studies of the growth of some species of introduced plants on the territory of the arboretum of Bratsk State University. The aim of the research was to study the growth of plants in the harsh sharply continental climate of Eastern Siberia. The object of the study was woody plants planted on the territory of the arboretum of Bratsk University. The research was conducted annually during the inventory of the arboretum plants at the end of the growing season from 2016 to 2022. Biometric indicators were measured in seedlings – height, crown diameter, as well as annual growth of apical and lateral shoots. The obtained data were processed by the method of mathematical statistics – the coefficient of variation for the values of the growth of the following plants was determined: Ussuri pear (*Pyrus ussuriensis* Maxim), Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. Ex Ledeb), petiolate oak (*Quercus robur* L.), brilliant dogwood (*Cotoneaster lucidus* Schlecht), Ginnala maple (*Acer ginnala* Maxim), holly maple (*Acer platanoides* L.), small-leaved linden (*Tilia cordata* L.), three-leaved almond (*Prunus triloba* L.), Cossack juniper (*Juniperus sabina* L.), Forsythia intermediate (*Forsythia x intermedia* Zabel.), Maak's bird cherry (*Padus maackii* Rupr). As a result of the research, it was found that the apical and lateral increments of introducers are subject to significant fluctuations, which can be attributed to changes in the total amount of precipitation by year and the average annual air temperature, for which the data of the Bratsk weather station for 2015–2022 on precipitation and air temperature were analyzed. At the same time, the average monthly fluctuations in temperature and precipitation do not significantly affect the dynamics of nature, unlike the annual average.

Keywords: Eastern Siberia, introducers, growth, dynamics, climate, average annual temperature, average annual precipitation

Качество и количество городских зеленых насаждений – один из основополагающих факторов формирования комфортной городской среды [1]. Современный город – это сложная, открытая, динамичная искусственно-естественная система, особенностью которой является то, что она становится ощутимым фактором воздействия как на природные системы, так и на человека [2]. Сибирские города, как правило,

представляют собой хорошо развитые промышленные центры, имеющие множество проблем экологического характера, что в комплексе с суровыми климатическими условиями ограничивает ассортимент древесных растений, используемых в озеленении территорий, снижая санитарно-гигиенические и декоративные качества зеленых насаждений. В озеленении сибирских городов чаще всего используются предста-

вители небогатой местной дендрофлоры, а также инорайонные виды, хорошо себя зарекомендовавшие за многие годы, такие, например, как тополь бальзамический и карагана древовидная. Одним из способов обогащения ассортимента городских насаждений является интродукция – введение в культуру растений из других регионов.

Работы по интродукции растений в азиатской части России в большей части касаются Западной Сибири – Барнаул, Томск, Новосибирск, южной части Восточной Сибири – Иркутск, а также Средней Сибири – Красноярск. Наибольшее число видов древесных растений на территории Сибири введено в культуру из районов российского Дальнего Востока, северных континентальных областей Северной Америки и в меньшей степени из Средней Азии и Европы [3–5].

Целью настоящих исследований является изучение прироста некоторых видов древесных интродуцентов Восточной Сибири на примере г. Братска.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в конце вегетационных периодов 2016–2022 гг. Объектами являлись древесные растения, преимущественно интродуценты, произрастающие на территории дендрария Братского государственного университета (БрГУ), такие как груша уссурийская (*Pyrus ussuriensis* Maxim), дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. Ex Ledeb), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schlecht), клен Гиннала (*Acer ginnala* Maxim), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* L.), миндаль трехлопастной (*Prunus triloba* L.), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.), форзиция промежуточная (*Forsythia x intermedia* Zabel.), черемуха Маака (*Padus maackii* Rupr.). У саженцев измерялись биометрические показатели – высота, диаметр кроны, а также ежегодный прирост верхушечных и боковых побегов. Полученные данные обрабатывались методом математической статистики – вычислен коэффициент вариации для значений прироста [6–8].

Результаты исследования и их обсуждение

Опыт интродукции древесных растений в Братске невелик. В частных садах довольно успешно культивируются многие виды интродуцентов, но систематические

наблюдения проводятся начиная с 2015 г., когда на территории дендрария БрГУ были высажены первые саженцы, привезенные преимущественно из Иркутского ботанического сада. При выборе ассортимента учитывались рекомендации, разработанные красноярскими учеными [9–11], так как природно-климатические характеристики Братска и Красноярска во многом схожи: резко континентальный климат, короткий вегетационный период, поздние весенние и ранние осенние заморозки.

В настоящее время дендрарий насчитывает более 430 деревьев и кустарников 23 семейств, 45 родов, 73 видов, сортов и форм. Большинство интродуцентов европейского происхождения – 44%, выходцев с Дальнего Востока насчитывается 26%, по 4% приходится на деревья и кустарники, родиной которых являются Северная Америка и Юго-Восточная Азия, остальные 22% – аборигенные виды [4, 5].

Для наблюдений выбраны 11 видов растений, высаженных в 2015–2016 гг., которые успешно перезимовали первые зимы, адаптировались к новым условиям произрастания. Приживаемость их составляет 70–100%. Значения прироста однолетних побегов представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, показатели прироста имеют большой коэффициент вариации, что связано с относительно небольшим количеством исследуемых растений, а также с существенным различием прироста по годам.

Наибольший верхушечный прирост однолетних побегов наблюдается у клена остролистного – 24,27 см (рис. 1). Саженцы *Acer platanoides* L. были высажены в 2016 г. В первый после посадки год прирост составлял 22 см. Побеги частично обмерзли, и в течение двух последующих лет прирост их составлял 3–7 см. В 2020 г. отмечен хороший прирост в высоту – 36 см, а в 2022 г. – 62 см. В 2017 г. средняя высота саженцев составляла 89 см, в 2022 г. – 124 см, таким образом, прирост за шесть лет составил 35 см. Наименьший прирост в высоту у дуба черешчатого – 7,34 см.

Следует отметить, что рост побегов по годам крайне неравномерный. Так, например, коэффициент вариации прироста клена остролистного составляет 90,27%, липы мелколистной – 94,99%. На рис. 2 представлена динамика прироста верхушечных побегов наиболее быстрорастущих видов древесных растений. Среднее значение коэффициента вариации составляет 64%.

Таблица 1

Прирост однолетних побегов

| Вид растения | Верхушечный прирост, см | Коэффициент вариации, % | Боковой прирост, см | Коэффициент вариации, % |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Груша уссурийская | 18,07 | 60,61 | 14,36 | 74,65 |
| Дуб монгольский | 8,34 | 77,21 | 6,74 | 33,41 |
| Дуб черешчатый | 7,34 | 55,80 | 9,55 | 33,37 |
| Кизильник блестящий | 12,93 | 55,65 | 11,11 | 40,89 |
| Клен Гиннала | 7,79 | 36,49 | 19,57 | 79,78 |
| Клен остролистный | 24,27 | 90,27 | 11,75 | 78,22 |
| Липа мелколистная | 18,98 | 94,99 | 14,64 | 49,96 |
| Миндаль трехлопастной | 8,08 | 82,53 | 15,38 | 37,02 |
| Можжевельник казацкий | 11,19 | 68,29 | 37,33 | 56,59 |
| Форзиция промежуточная | 15,95 | 56,47 | 25,08 | 25,78 |
| Черемуха Маака | 19,90 | 26,25 | 23,09 | 99,71 |

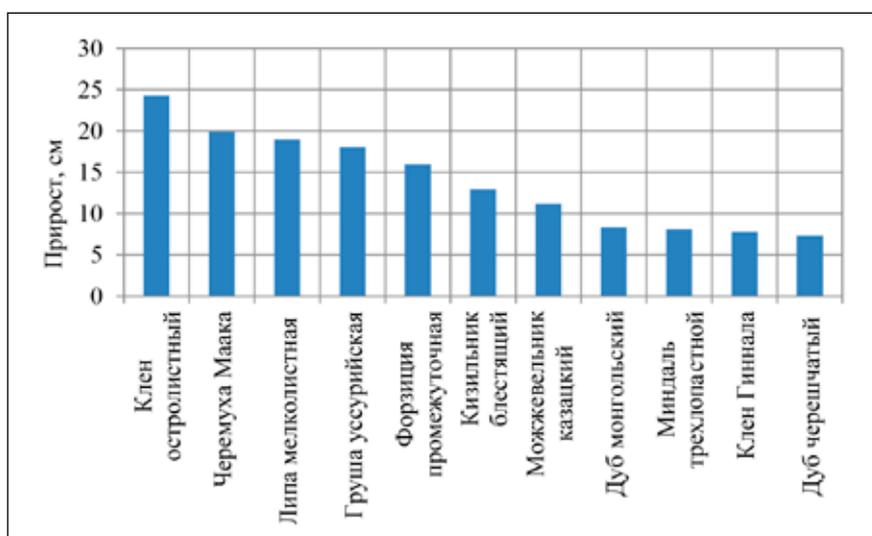


Рис. 1. Верхушечный прирост однолетних побегов

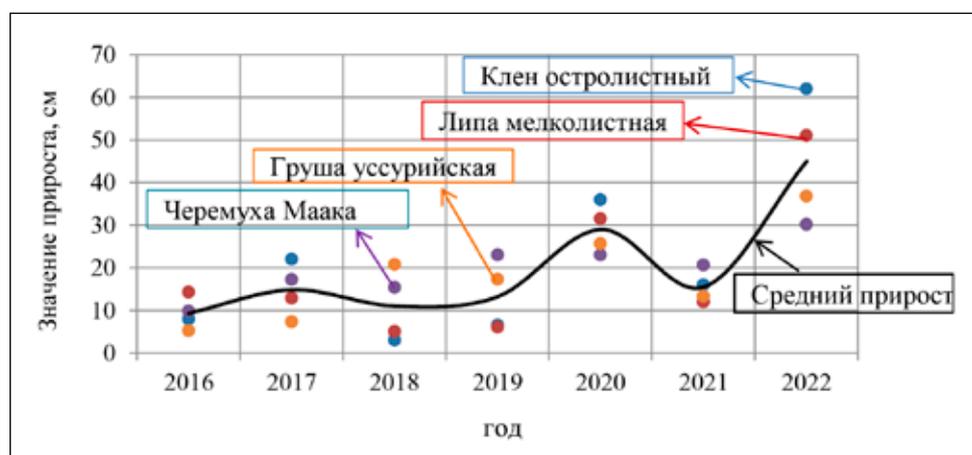


Рис. 2. Динамика прироста верхушечных побегов по годам

У всех саженцев можно отметить незначительное увеличение прироста в 2017 г., затем уменьшение в течение двух лет, и далее наблюдается увеличение темпов роста в 2020 и 2022 гг. Такую динамику можно объяснить погодными особенностями. В 2020 г. вегетационный период начался раньше обычного. Среднесуточная температура апреля составила 5,8 °С, по сравнению со среднестатистической по многолетним наблюдениям – 1,45 °С, май также был теплее обычного на 1,3 °С. В июле 2022 г. выпало рекордное количество осадков – 149 мм, что превысило среднестатистическое значение в 2 раза, в августе превышение нормы осадков составило 62%. Для сравнения: в июле 2021 г. выпало 38 мм осадков, в августе – 13 мм. Возможно, этот фактор вызвал достаточно быстрый рост побегов.

Что касается бокового прироста однолетних побегов, здесь лидером является *Juniperus sabina* L. (рис. 3). Средний прирост составляет 33,61 см, меньше других видов боковой прирост у *Quercus robur* L. – 9,55 см и *Quercus mongolica* Fisch. Ex Ledeb – 6,74 см.

Динамика бокового прироста в течение всего периода развития растений практически такая же, как и верхушечного. Хороший прирост наблюдается в 2018, 2020 и 2022 гг. (рис. 4). Прирост боковых побегов более равномерный, среднее значение коэффициента вариации составляет 55,4%.

Для оценки влияния климатических факторов на прирост интродуцентов проведен анализ максимального количества осадков по месяцам с 2015 по 2022 г. по метеостанции Братска, хода среднемесячных температур за этот же период (рис. 5 и 6).

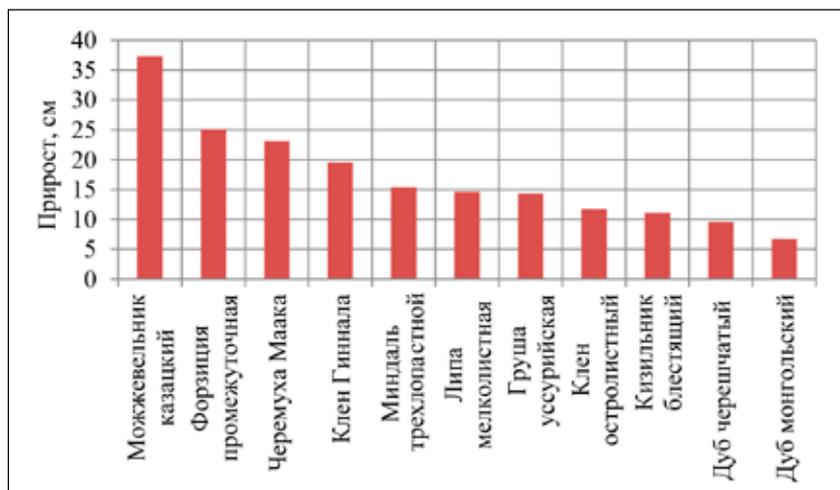


Рис. 3. Боковой прирост однолетних побегов



Рис. 4. Динамика прироста боковых побегов по годам

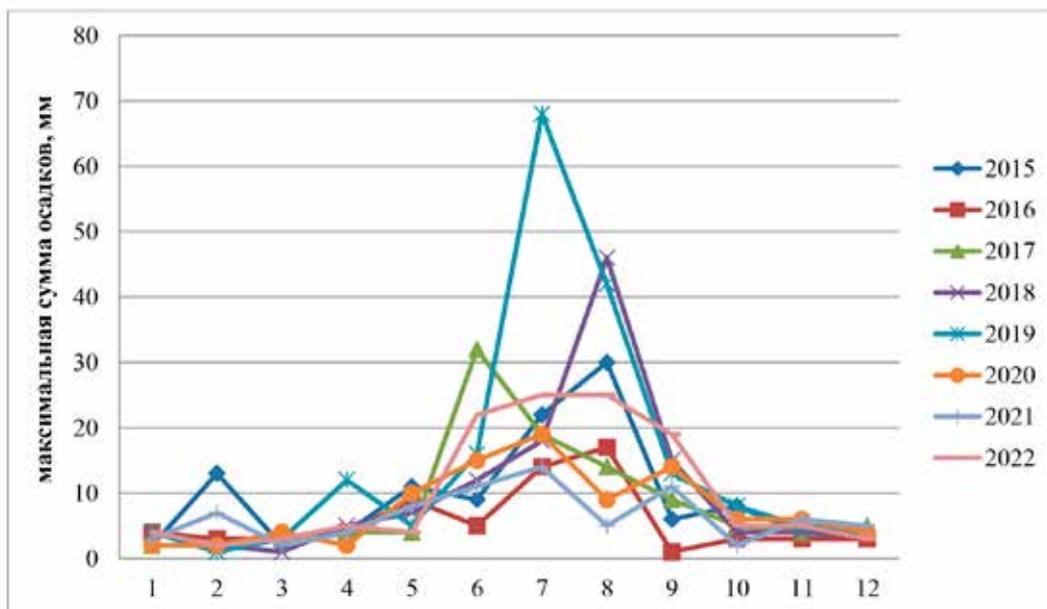


Рис. 5. Максимальная среднемесячная сумма осадков за исследуемый период

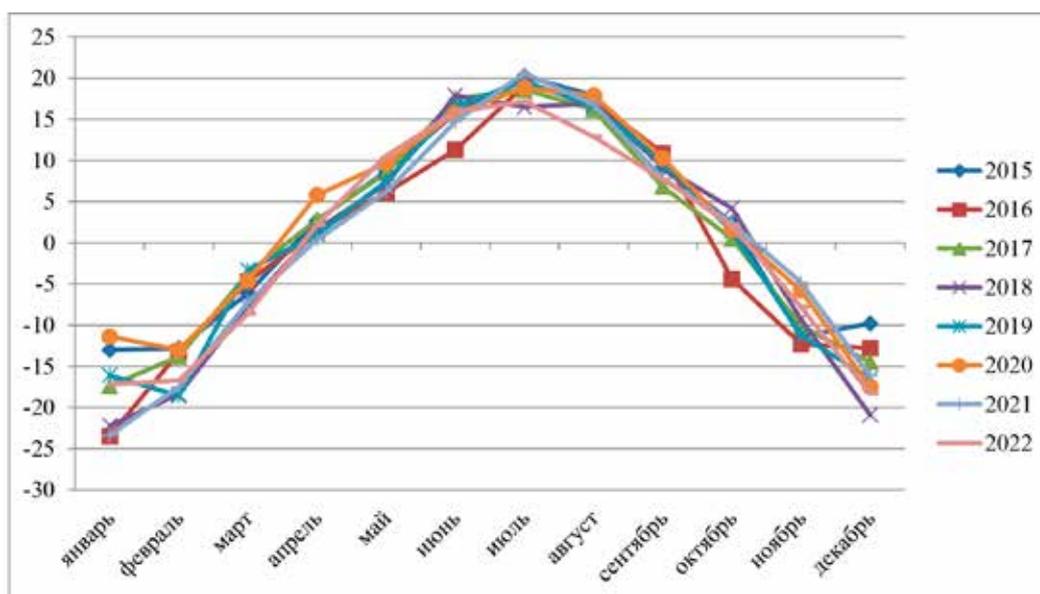


Рис. 6. Среднемесячная температура за исследуемый период

Данные по среднемесячным суммам осадков с 2015 по 2022 г. показывают характер распределения осадков для Братска.

Как видно из рис. 5, максимальное количество осадков в городе выпадает с июня по август, осенью и зимой количество осадков минимальное и в среднем составляет не более 10 мм в месяц.

На рис. 6 представлена картина распределения среднемесячных температур по метеостанции Братск за исследуемый период.

На рис. 6 отчетливо видно, что существенных изменений в среднемесячном ходе температур не наблюдается, особенно в течение вегетационного периода, в котором формируется прирост насаждений. Наиболее информативными оказались данные суммарного годового количества осадков и среднегодовой температуры по годам с 2015 по 2022 г.

Данные этой таблицы тесно коррелируют с динамикой верхушечного и боко-

вого приростов. Так, снижение прироста в 2019 и 2021 гг. связано с понижением среднегодовой температуры и суммарного количества осадков, а резкое увеличение приростов в 2022 г. связано с обильными дождями в летний период и довольно высокой среднегодовой температурой.

Таблица 2

Среднегодовые характеристики температуры и количества осадков за исследуемый период по метеостанции Братска

| Годы исследования | Годовое количество осадков, мм | Среднегодовая температура, °С |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 2015 | 386 | 2,0 |
| 2016 | 275 | 0,1 |
| 2017 | 402 | 1,0 |
| 2018 | 401 | -0,4 |
| 2019 | 420 | 0,6 |
| 2020 | 410 | 2,0 |
| 2021 | 282 | -0,1 |
| 2022 | 512 | 1,4 |

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- регулярное исследование прироста позволяет определить влияние внешних факторов на рост и развитие интродуцентов в условиях дендрария;
- как правило, на следующий год после посадки отмечается снижение прироста как по высоте, так и бокового прироста, что связано с акклиматизацией саженцев, завезенных из более благоприятных климатических и почвенных условий. Это период продолжается, как правило, 2–3 года;
- в условиях климата Восточной Сибири можно выделить наиболее успешно произрастающие деревья лесного типа, которые отличаются наибольшим верхушечным приростом: клен остролистный, липа мелколистная, черемуха Маака. Эти растения успешно произрастают в Западной и Восточной Сибири и даже в условиях Братска цветут и плодоносят;
- наиболее успешно произрастают можжевельник казацкий и другие виды можжевельников, форзиция промежуточная, кизильник блестящий, груша уссурийская.

Эти растения можно отнести к быстрорастущим интродуцентам;

- к относительно медленно растущим деревьям в наших исследованиях следует отнести дуб черешчатый и дуб монгольский. Однако следует отметить, что для успешного роста дуба совершенно необходимо боковое затенение, которое в первые годы жизни растений не было обеспечено. Дуб черешчатый в условиях Братска довольно часто обмерзает, что также сказывается на среднем приросте;

- установлена зависимость верхушечного и бокового прироста от среднегодовых показателей количества осадков и температуры воздуха;

- с целью определения перспективных видов для озеленения в условиях Восточной Сибири необходимо проведение дальнейших исследований роста и развития интродуцентов.

Список литературы

1. Климова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирования развития. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020, 324 с.
2. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект: монография. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 206 с.
3. Коропочинский И.Ю., Встовская Т.Н., Томашевич М.А. Очередные задачи интродукции древесных растений в Азиатской России // Сибирский экологический журнал. 2011. № 2. С. 147–170.
4. Коропачинский И.Ю., Лоскутов Р.И. Древесные растения для озеленения Красноярска. Новосибирск: Гео, 2014. 320 с.
5. Встовская Т.Н., Коропачинский И.Ю. Определитель местных и экзотических древесных растений Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2003. 702 с.
6. Ковязин В.Ф., Нгуен Т.Л., Фан Ч.Х. К методике исследования городских насаждений. // Лесной журнал. 2015. № 6. С. 57–65.
7. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Козик Е.В. Оценка жизненного состояния насаждений общего пользования г. Красноярск // Вестник КрасГАУ. 2010. № 4. С. 69–73.
8. Чиндяева Л.Н., Томошевич М.А., Беланова А.П., Банаев Е.В. Древесные растения в озеленении сибирских городов: монография. Новосибирск: Российская академия наук, Сибирское отделение, Центральный сибирский ботанический сад, 2018. 457 с.
9. Рунова Е.М., Аношкина Л.В., Золотухина Г.И. Исследование видового состава насаждений дендрария Братского государственного университета // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 2. С. 103–107.
10. Буторова О.Ф., Матвеева Р.Н. Опыт интродукции древесных растений европейской флоры в зеленой зоне г. Красноярск // International Scientific Journal. 2015. № 9. С. 38–42.
11. Рунова Е.М., Гнаткович П.С. Перспективы внедрения интродуцентов частных садов в ассортимент зеленых насаждений города Братска // Лесотехнический журнал. 2014. № 2 (14). Т. 4. С. 68–78.

УДК 630*230:630*231

ЛЕСОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРИАНГАРЬЯ**Чжан С.А., Пузанова О.А.***ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Братск, e-mail: schzan@rambler.ru*

Структура и динамика лесного фонда позволяют вывести некоторые закономерности в процессе восстановления лесов. За последние десятилетия наблюдаются тенденции и разные подходы к технологиям лесовосстановления. В таежной зоне наиболее полная картина представлена и уделена естественному лесовосстановительному потенциалу. В последнее время идет увеличение объемов работ по созданию лесных культур. Эффективность мер по лесовосстановлению, а также устойчивость и продуктивность насаждений в значительной степени зависят от промышленного освоения лесов. В связи с вышесказанным были проведены исследования по выявлению характера возобновления под пологом и на вырубках в разных типах леса в условиях Приангарья. Авторами было установлено, что в результате сильного техногенеза сильнее испытывают стресс сосновые древостои 1 и 2 классов бонитета, произрастающие в зеленомошных и разнотравных группах леса. На долю этих групп леса приходится более 75% сосновых лесов Приангарья. Цель исследования – оценка состояния лесовосстановительного потенциала на примере лесов Братского района Иркутской области. В результате исследований был проведен анализ состояния лесного фонда, из которого следует, что общая площадь лесных пространств уменьшилась на 2% за счет перевода земель лесного фонда в иные виды пользования. Общие объемы древесины сократились на 3,8%. Больше всего снижение запаса древесины наблюдается в спелых и перестойных лесах. Их площади сократились на 20,6%, в том числе по хвойным формациям – на 28%. А в лиственных лесах наблюдается рост древесных запасов в два раза, и это объясняется недостаточной их эксплуатацией.

Ключевые слова: восстановление леса, подрост, жизнеспособность, типы леса, вырубки, потенциал, лесовосстановительный

REFORESTATION POTENTIAL OF THE ANGARA REGION**Chzhan S.A., Puzanova O.A.***Bratsk State University, Bratsk, e-mail: schzan@rambler.ru*

The structure and dynamics of the forest fund allow us to make and obtain some patterns in the process of forest restoration. Over the past decades, there have been trends and different approaches to reforestation technologies. In the taiga zone of forests, the most complete picture is presented and given to the natural reforestation potential. But recently there has been an increase in the volume of the use of forest crops. The effectiveness of reforestation measures, as well as the sustainability and productivity of plantings, largely depend on the industrial development of forests. In connection with the above, studies were carried out to identify the nature of renewal under the canopy and on cuttings in different types of forests in the conditions of the Angara region. The authors found that as a result of strong technogenesis, pine stands of the 1st and 2nd classes of bonitet, growing in green-mossy and mixed-grass forest groups, are more stressed. The share of which accounts for more than 75% of the pine forests of the Angara region. The purpose of the study is to assess the state of the reforestation potential on the example of the forests of the Bratsky district of the Irkutsk region. As a result of the research, an analysis of the state of the forest fund was carried out, from which it follows that the total area of forest spaces decreased by 2% due to the transfer of forest fund lands to other types of use. The total volume of wood decreased by 3.8%. Most of all, the decrease in the stock of wood is observed in ripe and overgrown forests decreased by 20.6%, including coniferous formations – by 28%; due to insufficient exploitation of deciduous forests, there is a 2-fold increase in wood stocks.

Keywords: forest restoration, undergrowth, viability, forest types, reforestation potential, deforestation

Современный подход к вопросу о восстановлении лесов является первоочередной задачей после их освоения. Воспроизводство лесов на вырубках должно быть обеспечено за счет проведения таких мероприятий, как создание благоприятных условий для роста и развития древесных пород, а также сохранение генетического потенциала лесов, с применением интенсивных и перспективных технологий и методов восстановления и выращивания древостоев.

На современном научном этапе многие авторы уделяют большое внимание такому вопросу, как лесовосстановление. Изучение и подход к формированию лесных экосистем в пространстве и во времени является всегда актуальным. Этот процесс

может быть ускорен или интенсифицирован. В представленных исследованиях были затронуты такие категории лесообразовательного процесса, как демутиация леса после рубок лесных насаждений, после пожаров и естественная возрастная динамика без воздействия разрушающих факторов [1, 2].

Цель исследования – установление количества подроста ценной породы и определение степени его жизнеспособности. Достижение поставленной цели осуществлялось решением следующих задач:

- проведение анализа литературных источников по рассматриваемой проблеме;
- оценка и анализ качества и количества встречаемого подроста в различных условиях местопроизрастания.

Материалы и методы исследования

При изучении естественного возобновления использовали методику А.В. Побединского [3], а также методики А.И. Бузыкина, Н.В. Ковылина [4, 5]. Размер учетных площадок устанавливался по шкале С.В. Белова [6]. На площадках был произведен подсчет подроста по породам, возрастным и высотным категориям. Было оценено состояние подроста, а также отмечался характер размещения по площади.

Объект исследования – лесной фонд Братского района Иркутской области. Исходя из характеристики климата, почв, рельефа, видовой состав лесообразующих пород отвечает всем требованиям по использованию древесины. Лес – основной природный ресурс Братского района. Братский район расположен в северо-западной части Иркутской области. На территории района представлены древостои с преобладанием в составе сосны (52%), на втором месте находятся березняки (24%). На долю лиственничников приходится 9% покрытой лесом площади, остальные древесные породы распространены незначительно. Лесистость территории (без учета акваторий водохранилищ) – 76,8%.

Экспериментальные данные обработаны статистически, с использованием методов математического моделирования с использованием компьютерных программ.

Результаты исследования и их обсуждение

Лесорастительные условия объекта исследования, обусловленные климатическими, орографическими, эдафическими условиями, соответствуют произрастанию таких пород, как сосна, лиственница, ель,

пихта, осина и береза. Большая часть лесопокрытой площади представлена хвойными насаждениями.

Лесной фонд отличается достаточно высокой производительностью. Средний запас стволовой древесины составляет 152 м³/га, причем в спелых лесах – 240 м³/га. Прирост древесины также высок (2 м³/га). Покрытые лесом площади представлены насаждениями естественного происхождения, и большая их часть относится к эксплуатационным лесам, рубки леса в которых не ограничиваются средним приростом.

Главной лесообразующей породой является сосна обыкновенная, на долю которой приходится около 78%. Сосна обыкновенная в данном регионе обладает высокими физико-механическими свойствами, такими как полндревесность и прямослойность древесины.

В табл. 1 приведена общая характеристика сосновых древостоев на исследуемой территории.

В основном преобладают чистые сосновые или насаждения с примесью лиственницы (1–3 единицы), III классом бонитета с запасом древесины 200–250 м³/га. Анализируя состояние и условия лесного фонда, можно сделать вывод, что именно вырубки сосновых насаждений подвергаются интенсивной эксплуатации. Под пологом древостоя возобновление проходит успешно, в составе подроста преобладают хвойные породы сосны и лиственницы (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что именно наличие густоты подлесочных пород и сомкнутость травянистого и кустарничного ярусов оказывает влияние на количество подроста. Средний возраст подроста составляет 8–10 лет.

Таблица 1

Таксационная характеристика сосновых древостоев на пробных площадях

| № п/п | Тип леса | Состав | Возраст, лет | Высота, м | Диаметр, см | Запас, м ³ /га | Полнота | Бонитет |
|-------|----------|--------|--------------|-----------|-------------|---------------------------|---------|---------|
| 1 | С.бр | 9С1Л | 120 | 22,4 | 27 | 282 | 0,8 | III |
| 2 | С.бр | 10С | 128 | 23,6 | 28,4 | 112 | 0,6 | III |
| 3 | С.бр. | 8С2Л | 201 | 26,2 | 32,4 | 318 | 0,6 | III |
| 4 | С.рт | 7С3Л | 130 | 23,2 | 26,2 | 247 | 0,8 | III |
| 5 | С.рт | 10С | 170 | 22,4 | 28,7 | 184 | 0,9 | III |
| 6 | С.рт | 8С2Л | 140 | 25,7 | 32 | 312 | 0,9 | II |
| 7 | С.рт | 10С | 110 | 23,1 | 28,2 | 290 | 0,7 | III |
| 8 | С.рт | 6С2Л2Е | 120 | 22,6 | 28,6 | 258 | 0,8 | III |
| 9 | С.рт | 7С3Л | 140 | 24,1 | 32,6 | 245 | 0,7 | III |
| 10 | С.рт | 9С1Л | 120 | 24,9 | 30,4 | 204 | 0,8 | III |



Рис. 1. Подрост сосны сопутствующей генерации

Таблица 2

Характеристика подроста сосны на 10 пробных площадях

| № п/п | Лесорастительные условия | Состав подроста | Кол-во благонадежного, тыс. шт/га | Кол-во неблагонадежного, тыс. шт/га | Коэффициент встречаемости |
|-------|--------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 | В2 | 9С1Б | 6,9 | 4,4 | 0,82 |
| 2 | В2 | 8С2Ос | 8,6 | 4,8 | 0,77 |
| 3 | В3 | 6С2Б2Ос | 4,4 | 0,6 | 0,80 |
| 4 | В3 | 7С3Б | 7,3 | 0,3 | 0,78 |
| 5 | С2 | 5С3Б2Ос | 2,0 | 0,5 | 0,82 |
| 6 | С2 | 6С4Б | 1,1 | 1,0 | 0,73 |
| 7 | С2–3 | 4С3Б3Ос | 1,4 | 1,2 | 0,92 |
| 8 | С3 | 5С3Ос2Б | 2,4 | 0,6 | 0,74 |
| 9 | С3 | 7С3Б | 1,8 | 0,2 | 0,77 |
| 10 | С3 | 4С4Б2Ос | 2,2 | 0,4 | 0,83 |

В табл. 2 приведена характеристика естественного возобновления на вырубках различных типов условий произрастания.

Из табл. 2 видно, что на долю благонадежного подроста сосны приходится 62%, а на сомнительный и неблагонадежный подрост – 38%. На пяти пробных площадях (1, 3, 5, 7, 10) можно говорить о том, что количество подроста и его равномерное размещение является достаточным.

И это позволяет предположить, что на этих площадях не требуется проведение дополнительных лесохозяйственных мероприятий. А те пробные площади, где коэффициент встречаемости менее 0,8, нуждаются в проведении искусственного лесовосстановления, а именно создания лесных культур [7].

Предварительное и последующее возобновление в большей степени приходится на свежие и влажные субори [7].

На рис. 2 представлено распределение подроста в зависимости от высотных кате-

горий в различных типах лесорастительных условий.

На рис. 3 показан коэффициент встречаемости подроста в различных типах лесорастительных условий.

В результате исследований был проведен анализ состояния лесного фонда и получены следующие данные:

- лесистость претерпела несущественные изменения, что подтверждено данными исследования (уменьшение на 2%);

- в целом незначительно сократились запасы древесины примерно на 3,8%;

- запасы древесины в спелых и перестойных лесах сократились на 20,6%, в том числе по хвойным [8] формациям – на 28% [8]. Наиболее существенно сократились запасы древесины в спелых и перестойных сосняках – на 42%, что связано с их интенсивной вырубкой. Из-за недостаточной эксплуатации лиственных лесов здесь наблюдается рост древесных запасов в 2 раза [9].

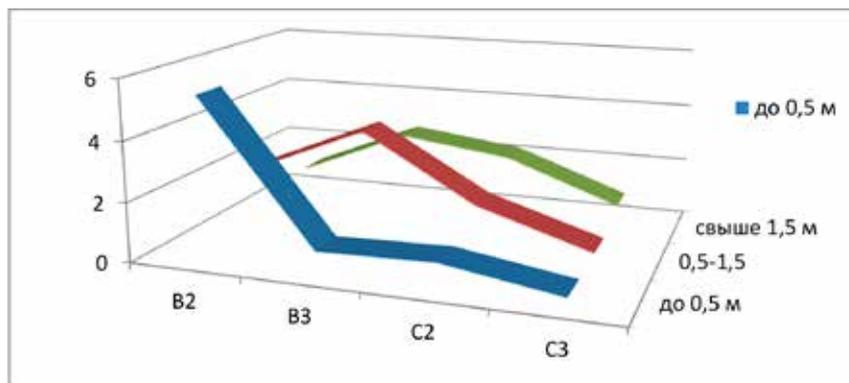


Рис. 2. Количество благонадежного подроста в зависимости от высоты

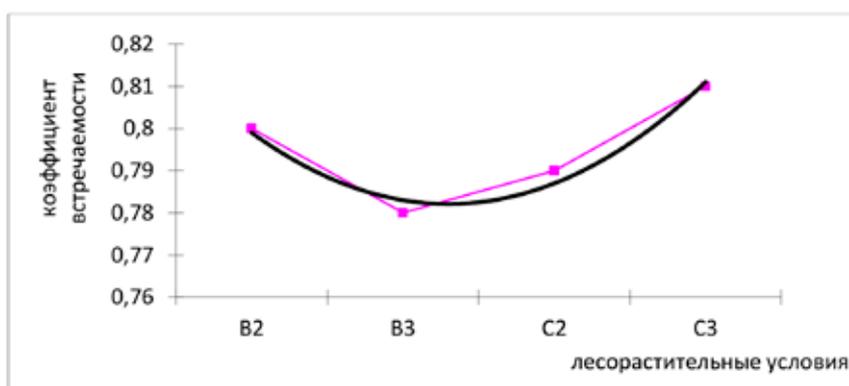


Рис. 3. Коэффициент встречаемости подроста



Рис. 4. Естественное возобновление в междурядьях лесных культур. Ряды культур показаны белыми стрелками

На рис. 4 представлено естественное возобновление в междурядьях лесных культур.

В табл. 3 приведена характеристика естественного возобновления на вырубках в зависимости от их давности. Из нее видно,

что возобновительный процесс идет равномерно по хвойным и лиственным формациям. В среднем процент лесовозобновления на вырубках составляет 54% по хвойным породам и 25% по лиственным породам.

Таблица 3

Характеристика естественного возобновления на вырубках

| Преобладающая порода насаждения | Давность вырубки, лет | Ход возобновления в % хвойными | | Ход возобновления в % лиственными | | Ход возобновления в % |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|------------------------|
| | | удовлетворительное | недостаточное | удовлетворительное | недостаточное | Плохое или отсутствует |
| Сосна | 1–2 | 46/38 | 15/10 | 29/26 | – | 10/26 |
| | 3–5 | 61/60 | 7/8 | 20/18 | 1/1 | 11/11 |
| | 6–10 | 59/55 | 7/14 | 25/22 | – | 9/9 |
| | Итого | 59/55 | 8/13 | 23/21 | – | 10/11 |
| Лиственница | 1–2 | 44 | 18 | 20 | 1 | 17 |
| | 3–5 | 0 | 15 | 23 | 1 | 11 |
| | 6–10 | 52 | 9 | 35 | – | 4 |
| | Итого | 48 | 14 | 26 | 1 | 11 |
| Ель, пихта | 1–2 | 49 | 19 | 16 | 16 | – |
| | 3–5 | 54 | 7 | 29 | 10 | – |
| | 6–10 | 60 | 7 | 29 | 4 | – |
| | Итого | 55 | 10 | 26 | 9 | – |

Выводы

Были выделены следующие особенности лесовозобновления:

1. В сосняках зеленомошной группы возобновление протекает удовлетворительно, в основном хвойными породами до 5 тыс. шт/га.

2. Количество подроста хвойных пород в разнотравных группах снижается до 1,5–2,5 тыс. шт/га.

3. По оценке состояния жизнеспособного подроста сосны доля благонадежного составляет 62%, остальные 38% приходятся на долю сомнительного и неблагонадежного подроста.

4. Лесовозобновительный потенциал основных хвойных пород, таких как сосна и лиственница, равномерен в зеленомошной и разнотравной группах типов леса.

5. Для повышения возобновительной способности необходимо усилить мероприятия по содействию естественного возобновления и увеличить долю искусственного восстановления на вырубках.

Список литературы

1. Сидоренков В.М., Дебков Н.М., Жафаров А.В., Надильшина И.Ю. Потенциал естественного восстановления леса в южной тайге Западной Сибири // Лесотехнический журнал. 2016. № 2. С. 46–56.
2. Дебков Н.М. Количественные и качественные параметры возобновления под пологом древостоев, сформировавшихся из предварительных генераций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 1 (343). С. 35–44.
3. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
4. Бузыкин А.И. К методике учета подроста // Возобновление и формирование лесов Сибири. Красноярск: Издательство Института леса и древесины СО АН РАН СССР, 1969. С. 165–168.
5. Ковылин Н.В., Ковылина О.П. Формирование вырубок и гарей из-под сосновой группы типов леса в Сибири // Вестник КрасГАУ. 2013. № 3. С. 138–141.
6. Белов С.В. Применение методов математической статистики при учете естественного возобновления // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. 1973. Вып. 2. ЛТА. С. 3–11.
7. Ковылин Н.В., Ковылина О.П. Возобновление в сосновых насаждениях Восточной Сибири // Хвойные борельной зоны. 2016. № 3. Т. 23. С. 96–101.
8. Чжан С.А., Пузанова О.А., Евдокимов Р.Н., Гребенюк А.Л. Организация использования лесов при динамических изменениях // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 169–174.
9. Чжан С.А., Пузанова О.А. Пространственно-временная структура лесов Приангарья // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 95–99.

СТАТЬИ

УДК 91:551.435.84 (470.620)

**ПЕЩЕРА НЕЖНАЯ АПШЕРОНСКОГО РАЙОНА
КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ КАК ОБЪЕКТ
ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Антипцева Ю.О., Пикалова Н.А., Волкова Т.А., Бойко Е.С., Климов Н.Н.

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Краснодар,
e-mail: geomorpho@rambler.ru, mist-next4@inbox.ru*

Туристские объекты подвергаются серьезному антропогенному воздействию. По этой причине у множества объектов возрастает риск частичного или полного разрушения, не говоря уже о потере привлекательности среди туристов. Представляется необходимым тщательный анализ и разработка рекомендаций по обслуживанию туристских объектов. В данной статье рассматривается современное состояние пещеры Нежная, которая, хоть и лишилась статуса особо охраняемой природной территории в силу ряда причин, несколько десятилетий назад могла по праву считаться уникальным природным объектом. Свидетельством тому является уникальная морфология, в частности интересно, что пещера развивается в чрезвычайно закарстованном комплексе пород юрской системы. Активное рекреационное использование объекта на протяжении последних десятилетий XX в. во многом привело к утрате уникальных свойств. Однако, как видно из популярности этого объекта, он остается невероятно востребованным. В рамках статьи коллективом авторов были проведены инструментальные замеры морфометрических характеристик пространства. Также было установлено, что пещера Нежная является популярным объектом спелеотуризма. Расположение пещеры в границах заказника «Камышанова поляна» накладывает некоторые ограничения на ее эксплуатацию, но при этом пещера расположена в пределах рекреационной зоны ООПТ, что также влияет на интенсивность ее использования. Именно поэтому интенсивность использования является основанием для проведения регулярных обследований и обостряет необходимость разработки научно обоснованных рекомендаций по использованию и соответствующего соблюдения этих рекомендаций. Указанные меры будут способствовать снижению риска ухудшения сегодняшнего состояния пещеры. Результаты исследований могут иметь практическую значимость для сферы туризма и рекреации территории и сохранения объекта. При проведении исследования использовался ряд общенаучных методов исследования: методы анализа, описания и сравнения, обобщения.

Ключевые слова: Краснодарский край, туризм, пещера Нежная, спелеология, рекреация, рекреационная нагрузка

**THE NEZHNYAYA CAVE OF THE ABSHERON DISTRICT
OF KRASNODAR REGION AS AN OBJECT
OF TOURIST AND RECREATIONAL USE**

Antiptseva Yu.O., Pikalova N.A., Volkova T.A., Boyko E.S., Klimov N.N.

Kuban State University, Krasnodar, e-mail: geomorpho@rambler.ru, mist-next4@inbox.ru

Tourist objects are exposed to serious anthropogenic impact. For this reason, many objects have an increased risk of partial or complete destruction, not to mention the loss of attractiveness among tourists. For this reason, it seems necessary to carefully analyze and develop recommendations for the maintenance of tourist facilities. This article discusses the current state of the Nezhnyaya cave, which, although it lost the status of a separate specially protected natural area for a number of reasons, but several decades ago could rightfully be considered a unique natural object. Evidence of this is the unique morphology, in particular, it is interesting that the cave is evolving in extremely karst rocks of the Jurassic system. The active recreational use of the site over the last decades of the 20th century largely led to the loss of its unique properties. However, as can be seen from the popularity of this object, it remains incredibly in demand. As part of the article, a team of authors carried out instrumental measurements of the morphometric characteristics of space. It was also found that Nezhnyaya cave is a popular speleotourism site. The location of the cave within the boundaries of the Kamyschanova polyana reserve imposes some restrictions on its operation, but at the same time the cave is located within the recreational zone of the protected area, which also affects the intensity of its use. That is why the intensity of use is the basis for regular surveys and exacerbates the need for the development of evidence-based recommendations for use and their appropriate implementation. Because, thanks to this, the risk of aggravating the current state of the cave is reduced. The results of the research may be of practical importance for the tourism and recreation of the territory and the preservation of the object. During the study, a number of general scientific research methods were used: methods of analysis, description and comparison, generalization.

Keywords: Krasnodar region, tourism, Nezhnyaya cave, speleology, recreation, recreational load

В настоящее время не теряют актуальности проблемы, связанные с рекреационным использованием особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Ввиду особого статуса этих природных комплексов антропогенная деятельность в их границах лимитируется. Лагонакское нагорье является популярнейшим туристским ре-

гионом с разнообразными и в то же время уникальными чертами природы, достаточно развитой туристско-рекреационной инфраструктурой. По причине большой рекреационной привлекательности региона существует необходимость постоянного контроля и нормирования рекреационной нагрузки [1, 2].

Пещеры – уникальные памятники природы. Оборудование легкодоступных пещер в экскурсионных целях является одним из способов охраны, предотвращающих их разрушение. В то же время эксплуатация пещер приводит к существенным изменениям подземной экосистемы. Общие проблемы – это нарушение микроклимата пещер, загрязнение водных потоков и подземных полостей, эвтрофикация и изменение видового состава организмов. Оборудование экскурсионных пещер обычно включает организацию искусственного освещения, которое способствует росту фотосинтезирующих организмов. Они являются основной

причиной накопления органического вещества и могут стимулировать разрушение минеральных образований пещер [2].

Пещера Нежная расположена в пределах Западного сегмента Большого Кавказа, в северо-восточной части Лагонакского нагорья, на вершинной поверхности плато Азиш-Тау между истоком р. Мезмай и западным склоном плато (рис. 1). Согласно административно-территориальному делению находится в Апшеронском районе Краснодарского края. Место расположения пещеры и окрестные территории характеризуются высокой рекреационной освоенностью.

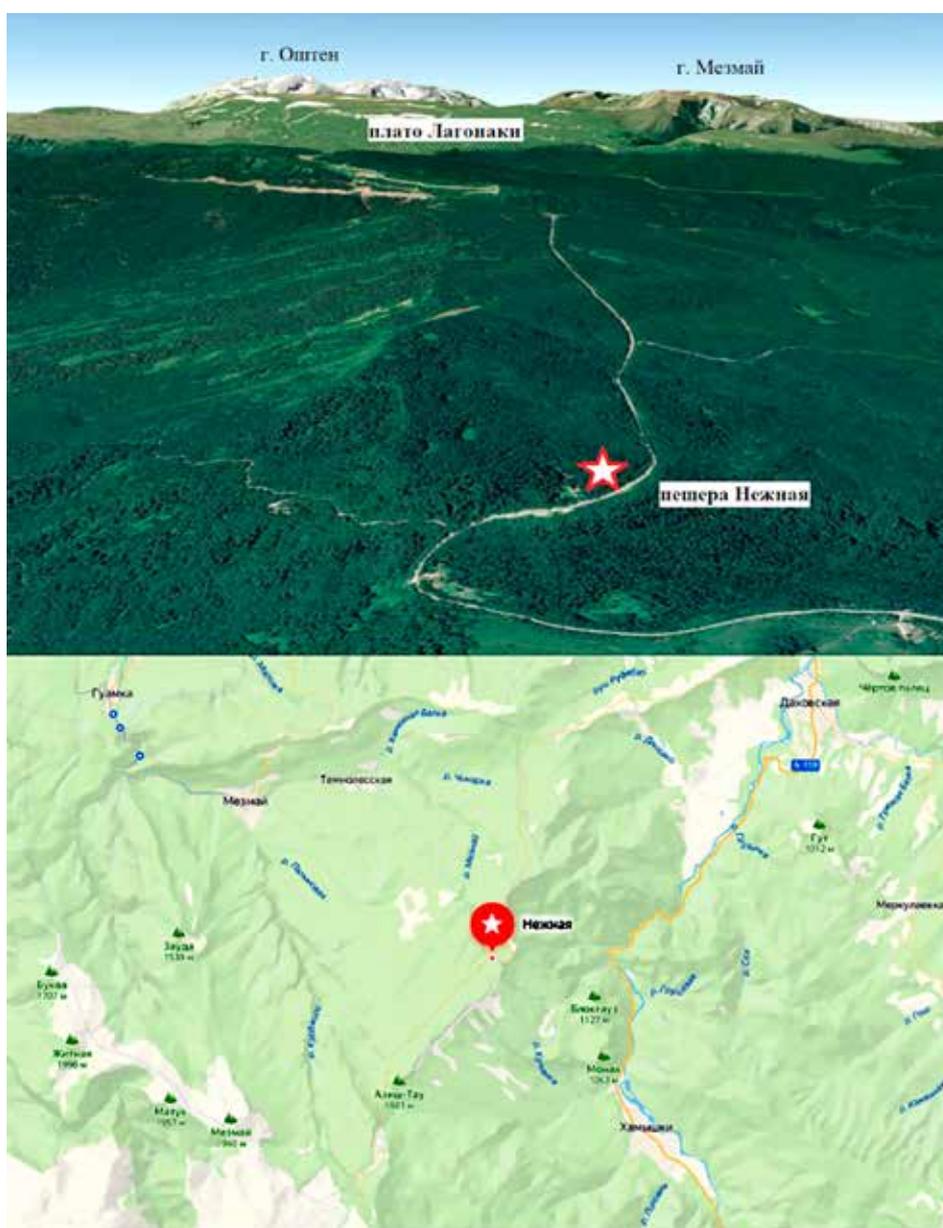


Рис. 1. Место расположения пещеры Нежная (составлено авторами).

Пещера была открыта в 1970-х гг., активно используется в рекреационной деятельности с 1998 г. В 2000 г. объект объявлен памятником природы геолого-геоморфологического профиля решением сессии Апшеронского совета народных депутатов от 25.02.2000 г. № 160 и решением главы администрации Краснодарского края от 24.05.2001 г. № 546/г «Об объявлении природных объектов памятниками природы краевого значения». Охранная зона на момент создания не выделялась, однако предполагалось отвести под нее участок радиусом 400 м. С 28.04.2018 г. на основании Постановления главы администрации (губернатора) Краснодарского края № 222 полость лишилась статуса ООПТ в связи с включением данной территории в границы комплексного заказника «Камышанова поляна». В настоящее время пещера активно используется в рекреационной деятельности.

Целью исследования являлось определение состояния полости, особенностей ее микроклиматического и гидрогеологического режима, а также изменений, связанных с рекреационным использованием объекта.

Материалы и методы исследования

Основой исследования в данном случае выступает метод полевых наблюдений. Изучение полости происходило в начале зимы. В ходе исследований осуществлялась первичная визуальная оценка состояния пещеры, ее сводов, натечных образований, (натечные образования, натечи – хемогенные отложения в пещерах) установленного оборудования, на основании чего делался общий вывод об эволюции процесса карстования. Также производились инструментальные замеры морфометрических характеристик пространства (длины экскурсионного хода, высоты потолков) и натечных образований (длина, высота, диаметр). Для более детального изучения состояния объекта оценивался термический режим. Наблюдения заключались в организации трех стационарных точек и установке на них метеорологических термометров (спиртовых). Первая точка наблюдений располагалась в конце маршрута в пределах непосещаемой части и была самой последней с точки зрения доступности и удобства наблюдений. Вторая точка размещалась в середине маршрута в Кораллитовом зале. Последняя точка размещалась у входа в пещеру. Оценка результатов показаний термометров производилась от наиболее уда-

ленной точки к привходовой. Термометры закреплялись на высоте 10 см от основания хода. Замеры брались на глаз с попыткой максимально исключить влияние факторов, способных внести погрешность (антропогенного, временного и т.д.). Оценивалась также температура водной среды путем погружения термометра в скопления воды на полу в непосещаемой части. Результаты записывались в журнал наблюдений. Стоит отметить, что для получения полной картины динамики изменений необходимо производить повторные замеры в прочие сезоны года. Кроме метода полевых наблюдений использовался картографический метод, а также такие общенаучные методы, как описательный, сравнительный, аналитический.

Мезоклиматические особенности исследуемой территории можно охарактеризовать по стационарным наблюдениям, проводимым в близлежащем населенном пункте – станции Даховской [3]. Самые низкие среднемесячные температуры характерны для января. Так, среднемесячная температура в январе в станции Даховской -2°C , в июле $+19,5^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков по наблюдениям в Даховской – 804 мм/год, с минимумом в январе – феврале, в период наиболее массовой рекреации (июнь – сентябрь) в районе Даховской выпадает 300–400 мм осадков. Относительная влажность воздуха по среднегодовым показателям с высотой не изменяется. Максимум среднемесячной относительной влажности приходится на холодный период года, составляя около 80% с выраженным максимумом в ноябре – декабре. Появление снежного покрова в высотном диапазоне 1500–2000 м (высшая точка плато Азиш-Тау – 1601 м) происходит в третьей декаде октября, но устойчивым снежный покров становится обычно через 3–5 недель после даты появления.

В структурном плане территория входит в крупную Пшехско-Адлерскую поперечную зону разломов и соответствует Северной Фиштской ступени, более локально – ее восточному опущенному крылу, Мезмайской ступени. На западе она ограничена Навагинско-Черногорской грядой горстов, на востоке – Цербелевским сбросом [4].

В геологическом строении территории принимают участие разновозрастные отложения. Основу составляют породы юрской системы. Это, в частности, терригенный глинисто-песчаный комплекс нижней и средней юры из темных аргиллитов с незначительной долей песчаников,

перекрываемый моноклинально залегающей карбонатной толщей верхнеюрских образований, представленных известняками, доломитами, глинами, песчаниками и конгломератами. Именно в отложениях верхней юры развивается большинство карстовых форм. Отложения кайнозойской группы представлены повсеместно, но незначительны по мощности. Генетически это элювиальные, элювиально-делювиальные, коллювиальные и аллювиальные осадки, а также хемогенные отложения (образующиеся непосредственно в подземном карсте) четвертичного возраста. По составу они в основном представляют собой рыхлые и сцементированные обломки перечисленных выше пород с примесью суглинков.

В связи с широким распространением карстующихся толщ процесс карстования развивается повсеместно и достаточно интенсивно. Известняки и доломиты разбиты трещинами. Большинство трещин имеют почти отвесный угол падения ($80-90^\circ$) [5]. Немаловажную роль играет здесь фактор расчлененности рельефа, действующий в совокупности с другими компонентами геологических и географических условий для развития карста [6]

Орографически район исследования лежит в верховьях долины р. Курджипс, относясь, как уже отмечалось, к весьма закарстованным территориям [7] и входит согласно актуальной схеме геоморфологического районирования Лагонакского нагорья в Курджипский геоморфологический участок [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Вход в пещеру ($44^\circ 09' 05''$ с.ш., $40^\circ 03' 55''$ в.д.) находится на отметке 1370 м над уровнем моря. Представляет собой капитальное сооружение с арочным входом и лестницей, ведущей в полость. Пещера два с лишним десятилетия назад была оборудована для экскурсий: в залах установлена подсветка и деревянные настилы, а также некое подобие музыкального инструмента для демонстрации акустики (подвешенные к своду полые металлические трубки).

На сегодняшний день объект является достаточно популярным: в докоронавирусный период посещаемость составляла более 3 тыс. чел. в год и достигала 600 чел. в отдельные месяцы (по данным хозяйствующего субъекта). По естественным причинам объемы нагрузки снизились в 2020–2021 гг., но в условиях активного роста турпотока,

принимаемого Краснодарским краем в целом, посещаемость объекта имеет тенденцию к устойчивому росту.

Посещаемая часть пещеры включает четыре зала: Атаманский, Безымянный, Кораллитовый, Колокольный. Атаманский и Безымянный залы сочленяются узким коридором, представляющим собой расчищенный глиняный завал. Экскурсионный маршрут – это ломаный ход длиной около 60 м. Высота сводов в зале Атаманский – 3 м 16 см, в коридоре – 1 м 66 см, в Безымянном зале – 2 м 30 см, в Кораллитовом – 3 м 50 см, в Колокольном – 6 м. Камера последнего доступно для посещения зала, Колокольного, оборудована группой натечностей, после которой потолок понижается до узкого лаза, на этом экскурсионная часть маршрута заканчивается. Высота свода здесь 90 см (рис. 2). Пещера обитаема: на момент наблюдений визируются две особи летучих мышей (рис. 3).



Рис. 2. Непосещаемая часть пещеры, конечная точка наблюдений (фото Ю.О. Антипцевой, декабрь 2022 г.)

Пещера обводнена – на полу следы водотока в виде обособленных луж. В весенне-летний период он явно усиливается в связи с возрастающим количеством осадков. В полости фиксируется вертикальная циркуляция воды за счет инфильтрации с поверхности: с потолка и сталактитов капает вода. Стенки местами влажные (в том числе за счет конденсации).

Микроклиматические показатели на момент наблюдений (9 декабря 2022 г., около 11.00) характеризуются однородными значениями. Так, температура воздуха в привходовой части $+4^\circ\text{C}$, в середине экскурсионного маршрута (зал Кораллитовый) $+4^\circ\text{C}$, в непосещаемой части $+4,1^\circ\text{C}$. Температура воды в понижениях на полу $+3,5^\circ\text{C}$.



*Рис. 3. Местная фауна
(фото Ю.О. Антицевой, декабрь 2022 г.)*



*Рис. 4. Отколотые сталактиты
(фото Ю.О. Антицевой, декабрь 2022 г.)*

Натечные образования в полости разнообразны: здесь есть сталагмиты, сталактиты и сталагнаты. Сталагмиты высотой около 1 м, диаметр наиболее крупных образцов 20–30 см, сталактиты не более 30 см в длину. Кораллиты наиболее развиты в одноименном зале. В Колокольном зале отмечаются множественные натёки «макаронины». На экскурсионном маршруте демонстрируется в качестве экспоната пещерный жемчуг. В первом зале заметен процесс образования свежих кальцитовых корочек.

Состояние натечностей и всей полости нельзя назвать удовлетворительным, часть натёков сбита (рис. 4). Это является результатом природного эндогенного фактора (предположительно землетрясения), а также антропогенного воздействия. В местах установки осветительных приборов микроклимат нарушен, что подтверждается произрастанием мха вблизи ламп. В первом и последнем залах на потолке заметны следы копоты. Использование подвешенных к своду металлических трубок для извлечения звуков, играющих роль музыкального инструмента, также не способствует благополучию пещеры и ее обитателей.

В целом можно отметить, что внутреннее состояние полости и ее натечных образований за последнее десятилетие визуальное не изменилось.

Ученые и исследователи отмечают, что проблемы, связанные с экологией пещер и рациональностью природопользования в Краснодарском крае, все еще достаточно острые [9]. Пещеры подвержены частичному разрушению и деградации в первую очередь из-за недостаточной просвещенности туристов.

Работа по просвещению туристов в области осознанного поведения в природной среде, в частности в условиях пещер, должна осуществляться на местах, в первую очередь организацией, оказывающей экскурсионные услуги на их базе. Таким образом, именно деятельность эксплуатирующих организаций может выступать и в качестве основного разрушающего фактора, с одной стороны, и как основной природоохранный фактор – с другой, в зависимости от уровня экологической ответственности хозяйствующего субъекта. При этом нельзя не отметить острую необходимость разработки методических рекомендаций по организации обслуживания на базе геологических объектов. Подобные рекомендации должны быть выработаны на основе научного подхода с привлечением специалистов-геоморфологов и профессионалов сферы туризма и должны быть приняты на уровне региона. Именно такой научно обоснованный подход к организации экскурсионного обслуживания

ния на базе пещер может стать основным инструментом сохранения уникальных геологических объектов на территории Краснодарского края.

Заключение

Пещера Нежная является популярным объектом спелеотуризма. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что рекреационная нагрузка (которая на сегодняшний день уже может быть названа значительной) может увеличиваться, и тогда крайне остро встанет вопрос о создании комплексной системы мер, направленных на сохранение устойчивости природного объекта. Расположение пещеры в границах заказника «Камышанова поляна» накладывает ограничения на ее эксплуатацию, с одной стороны, но с другой стороны, расположение в пределах рекреационной зоны и недалеко от популярного 30-го туристского пешеходного маршрута способствует ее экскурсионной привлекательности. Поэтому состояние полости подлежит регулярному обследованию и оценке. Для этого рекомендуется:

- осуществлять мониторинг состояния полости: производить микроклиматические наблюдения, оценивать степень сохранности натечных образований и сводов, наблюдать за местной флорой и фауной;
- не допускать среди посетителей съемки со вспышкой;
- производить периодический и эпизодический подсчеты посещаемости (в будние и выходные дни, в каникулярное время, в разные сезоны года);

– на основании сводных цифр посещаемости актуализировать расчеты рекреационной нагрузки на объект.

Список литературы

1. Антипцева Ю.О., Волкова Т.А. Природные и антропогенные аспекты развития экологического туризма в пределах горных территорий (на примере восточной части Лагонакского нагорья) // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 4. С. 54–61.
2. Мазина С.Е., Северин А.В., Божевольнов В.Е. Повышение эффективности экологически безопасных методов удаления фотосинтезирующих организмов в экскурсионных пещерах // *Проблемы региональной экологии*. 2009. № 4. С. 70–75.
3. Антипцева Ю.О. Эколого-геоморфологические аспекты рекреационного использования особо охраняемых природных территорий Северо-Западного Кавказа (на примере Лагонакского нагорья): дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2007. 161 с.
4. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. М.: Недра, 1992. 254 с.
5. Лозовой С.П., Комнатный М.Н. Карбонатно-карстовый комплекс наклонного плато Азиш-Тау // *Региональные географические исследования*. Краснодар, 2017. С. 3–11.
6. Лозовой С.П. Роль энергии рельефа в интенсивности закарстования нагорного плато (на примере наклонного плато Азиш-Тау) // *Географические исследования Краснодарского края*. Краснодар, 2015. С. 3–6.
7. Лозовой С.П., Комнатный М.Н. Карст и природоохранные ограничения строительных или иных промышленных работ в верховьях долины реки Курджипс (Западный Кавказ) // *Вестник Краснодарского регионального отделения Русского географического общества*. Краснодар, 2021. С. 196–200.
8. Лозовой С.П., Погорелов А.В. Геоморфологические участки Лагонакского геоморфологического района // *Региональные географические исследования*. Краснодар, 2020. С. 10–15.
9. Трубилин А.Г., Мещерякова Е.В. Спелеотуризм как одно из перспективных направлений развития внутреннего туризма в Краснодарском крае / *Интегрированные коммуникации в спорте и туризме: образование, тенденции, международный опыт*. Т. 3. 2018. С. 102–104.

УДК 504.45

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ ТОБОЛ И КУРГАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Несговорова Н.П., Савельев В.Г.

ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», Курган, e-mail: geograf@kgsu.ru

Курганская область относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод. Основной водной артерией Курганской области является река Тобол. Ее вода используется для питьевого водоснабжения, в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте – в большинстве сфер деятельности. Основным источником централизованного водоснабжения г. Кургана по сей день остается Курганское водохранилище, расположенное на р. Тобол и введенное в эксплуатацию в 1962 г. Основной проблемой исследования явилось выявление с помощью математических методов основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (его химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области. Проведен разносторонний анализ физических характеристик, химического и микробиологического состава р. Тобол и Курганского водохранилища с использованием расчетных методов комплексного индекса загрязнения воды и критического показателя загрязнения. Методы корреляционного и факторного анализов способствовали выявлению внутрисредовых факторов, факторологический анализ – внешнесредового воздействия. Это позволило выявить динамику показателей химического загрязнения воды и ее основные тенденции от впадения р. Уй на границе с республикой Казахстан, по территории Курганской области до границ с Тюменской областью. Анализ компонентов химического загрязнения воды р. Тобол и Курганского водохранилища позволил сгруппировать загрязнители и выявить наличие техногенного, сельскохозяйственного факторов на определенных участках русла реки между конкретными створами, расположенными на территориях сельскохозяйственного либо промышленного пользования.

Ключевые слова: оценка качества воды, комплексный анализ, река, водохранилище

Исследование выполнено при поддержке ВОО «Русское географическое общество», грант № 07/2022-Р.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE WATER QUALITY OF THE TOBOL RIVER AND THE KURGAN RESERVOIR

Nesgovorova N.P., Savelev V.G.

Kurgan State University, Kurgan, e-mail: geograf@kgsu.ru

The Kurgan region is one of the constituent entities of the Russian Federation with extremely limited water resources, both in terms of their quantity and quality of water. The main water artery of the Kurgan region is the Tobol River. Its water is used for drinking water supply, in industry, agriculture, transport - in most areas of activity. The main source of centralized water supply for the city of Kurgan to this day remains the Kurgan reservoir, located on the Tobol River and put into operation in 1962. The main problem of the study was to identify, using mathematical methods, the main factors of natural and anthropogenic origin that affect the quality of water (its chemical composition) of the Tobol River within the Kurgan region. A comprehensive analysis of the physical characteristics, chemical and microbiological composition of the Tobol River and the Kurgan reservoir was carried out using the calculation methods of the complex water pollution index and the critical pollution index. Methods of correlation and factor analysis contributed to the identification of environmental factors, factorological analysis - external environmental impact. This made it possible to identify the dynamics of indicators of chemical water pollution and its main trends from the confluence of the Uy River at the border with the Republic of Kazakhstan, across the territory of the Kurgan region to the borders with the Tyumen region. An analysis of the components of chemical pollution of the water of the Tobol River and the Kurgan Reservoir made it possible to group pollutants and identify the presence of technogenic, agricultural factors in certain sections of the river channel between specific sections located in agricultural or industrial areas.

Keywords: water quality assessment, integrated analysis, river, reservoir

Для Курганской области вопрос изучения качества водных ресурсов стоит очень остро в связи с тем, что регион в силу своих природных особенностей относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод.

Основным источником централизованного водоснабжения г. Кургана является Курганское водохранилище, расположенное на р. Тобол и введенное в эксплуатацию в 1962 г.

По результатам Курганского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и материалов Департамента гражданской защиты, охраны окружающей среды и природных ресурсов Курганской области (в рамках СаНПиНа для вод рыбохозяйственного пользования), в водах р. Тобол присутствуют «соединения меди, марганца, цинка, железа, магния, ионы аммония и нитрит-ионы, сульфаты, фосфаты (по Р), фториды, фенолы, нефтепродук-

ты, легкоокисляемые и трудноокисляемые органические вещества (по показателям БПК₅ и ХПК)» [1].

Рассмотрев возможности анализа накопленных собственных эмпирических данных, мы обратили внимание на работы С.И. Ларина [2, 3], в которых указано на необходимость комплексного мониторинга качества воды рек. Согласившись с авторами публикации, мы разработали процедуру комплексного мониторинга качества воды р. Тобол, в рамках которой вели сезонные наблюдения на каждом участке исследования. Кроме того, осуществляли территориальный мониторинг качества воды по створам реки.

Проведенный анализ усредненных годовых значений данных показателей по створам р. Тобол в рамках территории Курганской области и сравнительный анализ результатов по динамике показателей за четырехлетний период показал наличие колебаний как в динамике по створам каждого компонента в отдельности, так и колебания показателей рассматриваемых компонентов по годам.

Оценить степень загрязненности воды одновременно по широкому перечню показателей качества воды и классифицировать воду по степени загрязненности позволяет метод комплексной оценки с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (далее – УКИЗВ).

Проведенная работа способствовала формированию представления о качестве воды р. Тобол и его динамике, однако не позволяет дать ответ на вопрос: каковы факторы формирования соответствующего качества воды для последующей разработки практических рекомендаций по учету данных факторов при водоподготовке для потребителей.

Основной проблемой явилось выявление основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области.

Анализ имеющейся научно-практической базы позволил выделить следующее. Так, М.В. Рогова считает, и с ней нельзя не согласиться, что для решения комплекса водохозяйственных задач необходимо обосновать способы оценки химического состава воды [4]. В работе «Комплексное моделирование оценки качественных и количественных показателей воды рек», написанной J.H. Wang, W.H. Xiao, H. Wang, Z.K. Chai, C.W. Niu, W. Li, предлагается проводить комплексное моделирование [5]. Это нами и было сделано.

В то же время было проведено изучение возможностей использования интегрированного способа оценки состояния воды по гидрохимическим и биондикационным показателям, предложенного С.Ф. Лихачевым и Б.А. Артеменко [6].

Применение диатомовых водорослей в качестве организмов-индикаторов предлагают использовать O.S. Jakovljević, S.S. Popović, D.P. Vidaković, J. Krizmanić [7]. Данная методика интересна и, скорее всего, дает значимые результаты. Однако мы полагаем, что проведение сравнительного анализа даже на протяжении одного проточного водоема может вызвать затруднения, связанные со сравнением и сопоставлением качественного состава и количественной оценкой данных водорослей в качестве индикаторов динамики состояния химического состава воды водоема.

Микробиологическую оценку качества воды рек используют Л.А. Виноградова, Е.В. Галанина для оценки условий нереста [8]. Данной методикой можно воспользоваться для определения наличия питательной среды для развития микрофлоры.

В процессе проведения собственных исследований, взяв за основу работы А.В. Мельниковой, О.С. Любиной, М.А. Гвоздаревой, Р.Р. Нуретдинова, М.А. Горшкова, которые предлагают использовать биологический способ оценки качества воды водохранилища на основе исследования фитопланктона, зоопланктона и зообентоса [9], разработали собственную методику биомониторинга качества воды р. Тобол и Курганского водохранилища.

В нашей работе проведен анализ микрофлоры с учетом экосистемной оценки качества воды реки. Аналогичная методика предложена L. Mena-Rivera, R. Sánchez-Gutiérrez, O. Vásquez-Bolaños, A. Fonseca-Sánchez, C. Gómez-Castro, A. Rodríguez-Rodríguez [10].

В проведенной работе использованы расчеты комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) и критический показатель загрязненности (КПЗ) по марганцу как имеющему самые высокие количественные показатели. Проведенные исследования и анализ их результатов позволили подобрать подходы к разработке модели динамики химического состава воды р. Тобол и Курганского водохранилища и факторов ее определяющих.

Цель исследования – построение и верификация модели влияния факторов различной природы на качество воды (химический состав) р. Тобол в пределах Курганской об-

ласти на основе методов математического анализа показателей химического состава воды изучаемого водоема.

Объект исследования – вода р. Тобол в границах Курганской области.

Предмет исследования – динамика химического состава воды и факторы ее определяющие.

Материалы и методы исследования

Река Тобол берет начало в месте слияния р. Бозбие и Кокпекты на границе Оренбургской области РФ и Костанайской области Республики Казахстан, впадает в р. Иртыш с левой стороны на территории Тюменской области. Длина реки 1591 км, общая площадь водосбора 426000 км². Протяженность Тобола по территории Курганской области 428 км, река имеет 6 крупных притоков.

Долина р. Тобол шириной 10–40 км. Пойма двухсторонняя, местами шириной до 25 км, сильно изрезана старицами, озерами, заболоченными ложбинами. Русло Тобола извилистое. Ширина его колеблется от 30–50 до 200 м.

На всем протяжении Тобола и его основных притоков расположено большое

количество регулирующих водохранилищ и прудов, которые находятся в Курганской и Челябинской областях Российской Федерации, а также на территории Республики Казахстан. Курганское водохранилище замыкает каскад водохранилищ на р. Тобол и его притоках. Основное его назначение – сезонное регулирование стока для обеспечения промышленного и хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Кургана и Курганского промышленного района.

В процессе исследования отбор проб воды осуществлялся в пяти створах на р. Тобол в пределах Курганской области (рис. 1).

Отбор проб воды проводился совместно с сотрудниками Курганского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и самостоятельно. Оборудование для отбора проб воды: емкости из прозрачного стекла (или сосуды из полиэтилена) с притертой пробкой. Посуда омывалась несколько раз отбираемой водой. Емкости, наполненные пробой воды, подписывались. Усредненную пробу речной воды отбирали в верхней трети общей глубины реки в местах с наиболее сильным течением.



Рис. 1. Расположение створов по р. Тобол.

Примечание. 1 створ – с. Звериноголовское, 2 створ – мкр-н Арбинка, 3 створ – п. Смолино, 4 створ – д. Костоусово, 5 створ – с. Белозерское

В лаборатории комплексных экологических исследований кафедры географии, фундаментальной экологии и природопользования Курганского государственного университета проведен лабораторный анализ проб воды. Сравнительный анализ полученных данных проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77. «Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов» [11]. Определяли: водородный показатель (потенциометрическим методом), растворенный кислород (кондуктометрическим и йодометрическим методами), сухой остаток, нефтепродукты (гравиметрическим методом), гидрокарбонаты, оксид углерода (титриметрическим методом), хлориды (аргентометрическим методом), нитратный азот, сульфат-ион, марганец, медь, цинк (колориметрическим методом). Микробиологический показатель определялся методом культивирования воды на питательной среде, в качестве которой использовались среда сабуро и мясо-пептонный агар. В работе задействованы следующие приборы: рН-метр-милливольтметр рН-410, кондуктометр – иономер Анион-4100, кислородомер – Анион 7040, спектрофотометр LEKISS 2107 UV [12].

Для разработки математической модели необходимо подобрать соответствующие методы. В нашей работе использовался корреляционный анализ, измерялась теснота связи между двумя или более переменными. Проведен факторный анализ материалов (отбор факторов, классификация и систематизация факторов, моделирование взаимосвязей между результативными и факторными показателями, расчет влияния факторов), проведена оценка роли каждого из факторов.

В процессе исследования проведен анализ материалов по показателям химического состава воды р. Тобол в границах Курганской области Департамента по природным ресурсам и охране окружающей среды (за 2014–2019 гг.), материалов отчетов ОАО «Водный союз», накопленных сведений собственных исследований, в том числе результатов лабораторного анализа воды р. Тобол по створам в весенне-летний период (2014–2019 гг.), Курганского водохранилища в 2018–2019 гг. (по всем сезонам года). Собранный материал подвергнут анализу.

При подборе показателей мы расширили анализ качества воды, включив в него анализ некоторых физических показателей воды, (органолептических), расширили рамки физико-химического анализа, включив определение кислотности, жесткости

воды, содержание растворенного кислорода, некоторых анионов (нитрат-ионов, хлоридов и др.). Статистическая обработка данных осуществлялась на основе факторного и корреляционного анализа в программе MS Excel, программе «Статистика 6.0». Оценка влияния факторов окружающей среды на качество воды проводилась на основе моделирования, построения модели внешне среднего воздействия и расчета коэффициентов корреляции Пирсона между фактором и показателем качества воды.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты оценки физико-химических характеристик воды

Прозрачность воды в р. Тобол и Курганском водохранилище в 2018–2019 гг. от 27 до 30 см, вода – прозрачная.

Кислотность. Вода в р. Тобол относится к слабощелочной с диапазоном рН от 7,66 до 8,2 ед. В границах Курганского водохранилища рН воды изменяется по сезонам года от нейтральной до слабощелочной.

Уровень содержания кислорода в воде р. Тобол и Курганского водохранилища колеблется от 3,25 до 4,9 мг/л на протяжении всего года. Факторами влияния на изменение уровня растворенного кислорода в воде являются температурный режим, уровень жесткости воды. Уровень кислорода снижается при понижении температуры, минимальный уровень регистрируется в зимний период.

С повышением уровня содержания солей жесткости наблюдается снижение растворимости кислорода. Данные соли попадают в воду из природных источников (родников, известковых и солевых отложений) и из бытовых и промышленных сточных вод. Выявлены незначительные сезонные колебания в осенние, зимние, весенние периоды.

Содержание катионов в воде и факторы его определяющие. Среди содержащихся в воде катионов особое значение имеет марганец. Содержание марганца характеризуется высокими значениями и сезонными колебаниями концентрации. Так, превышение нормы ПДК составляет 30–50 раз в весенний и осенний периоды и 10–20 раз в зимние и летние периоды.

Природное поступление марганца в реку осуществляется в процессе выщелачивания минералов и марганцевых руд (браунит, псиломелан, черная охра, пиролюзит). Загрязнение воды реки марганцем происходит в промышленной зоне (металлургия).



Рис. 2. Динамика комбинаторного индекса загрязненности воды р. Тобол (2017–2019 гг.).
Примечание. Створ 1 – с. Звериноголовское, створ 2 – Арбинка, створ 3 – Смолино, створ 4 – д. Костюсово, створ 5 – с. Белозерское (створы на р. Тобол), створ 1а – с. Усть-Уйское (р. Уй перед впадением в р. Тобол)

В окружающих породах он содержится как смесь с другими металлами в виде гидроксидов. Марганец в коллоидной и растворенной форме связан с органическими соединениями образованием комплексов с сульфатами и бикарбонатами. С хлором марганец образует комплексы реже.

Усвоение металла в растворенном виде водорослями происходит при аэробных условиях, при этом Mn (II) окисляется до Mn (IV), который осаждается в виде оксида MnO₂. Важными факторами в данных процессах являются температура воды, количество растворенного в воде кислорода и pH (кислотность воды).

В содержании других катионов, как и анионов наблюдается резкий скачок в 2018 г.

Содержание анионов в воде. Содержание нитратов в воде р. Тобол и Курганского водохранилища колеблется в пределах 7,5–20 мг/л, что соответствует нормативам для водоемов рыбохозяйственного назначения. Нитраты попадают в водохранилище из почвы расположенных рядом с водозаборами садоводческих кооперативов и сельскохозяйственных угодий.

Уровень содержания хлоридов в воде составляет 94,3–202,35 мг/л. Наибольшее содержание хлоридов в воде в зимний период связано со снижением скорости течения реки, снижается степень ее самоочищения. Основным источником хлоридов в воде являются коммунальные сточные воды г. Кургана и его окрестностей.

Кроме того, в воде р. Тобол от входного створа до крайнего створа наблюдается снижение среднегодовых концентраций сульфатов в 1,4 раза, растут концентрации трудно окисляемых органических веществ в 1,2 раза, азота аммония в 5,5 раза, азота нитритов в 5,7 раза.

Динамика комбинаторного индекса загрязненности воды р. Тобол

Построенная по трем годам (2017–2019) диаграмма комбинаторного индекса (рис. 2) показывает отсутствие единообразия по загрязненности воды в р. Тобол во времени и на всем протяжении по территории Курганской области.

Нельзя выделить ни одного створа с одинаковым комбинаторным показателем загрязненности по годам. Во временной динамике загрязненности по всем створам выделяется 2018 г. своим скачком загрязненности (рис. 2). Вода на всех створах р. Тобол характеризуется как «грязная», относится к 4 классу опасности, разряду Б. Лишь вода первого створа р. Тобол (у с. Звериноголовское кроме 2018 г.) относится к 4 классу опасности, разряду «А».

По отдельным компонентам загрязнения рассчитан КПЗ (критический показатель загрязненности). Это относится к содержанию в воде соединений марганца. Его КПЗ колеблется от 10,5 (р. Уй, 2018 г.) до 16 (створ Смолино на р. Тобол, 2018 г.).

Результаты анализа химического состава воды р. Тобол по створам в границах Курганской области

В исследовании нами использованы четырехлетние данные «усредненных годовых показателей химического состава воды рек, протекающих по территории Курганской области», ежегодно публикуемых в Докладе Департамента по природным ресурсам и охране окружающей среды администрации Курганской области (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2018–2020) [13].

Динамика химических компонентов воды р. Тобол (2016–2019 гг.)

| Место пробы / Показатели | Год | Cu | Mn | Mg | Zn | Fe | P | SO ₄ | N | Нефть | ХПК |
|--------------------------|------|----------|------|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-------|-----|
| | | доли ПДК | | | | | | | | | |
| Створ 1 Звериноголовское | 2016 | 7,5 | 17,6 | 1,0 | 1,1 | 2,2 | | 2,2 | | | 1,3 |
| | 2018 | 6,6 | 29,0 | 1,1 | 1,1 | 1,7 | | 3,2 | 1,2 | 2,9 | 1,3 |
| | 2019 | 4,5 | 17,8 | 1,2 | 1,1 | 1,4 | | 2,1 | 1,2 | 2,4 | 1,3 |
| Створ 2 Арбинка | 2016 | 2,8 | 23,9 | 2,1 | 2,1 | | 2,8 | 2,5 | | 1,5 | 2,5 |
| | 2018 | 8,5 | 46,2 | 1,5 | 1,6 | | | 1,8 | | 4,0 | 1,8 |
| | 2019 | 6,6 | 17,3 | 1,5 | 1,6 | 1,1 | | 1,9 | | 3,3 | 1,4 |
| Створ 3 Смолино | 2016 | 5,8 | 35,1 | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 2,8 | 2,3 | | 1,2 | 2,1 |
| | 2018 | 8,8 | 51,2 | 1,6 | 1,8 | | | 1,5 | | 3,9 | 1,6 |
| | 2019 | 7,8 | 24,9 | 1,6 | 1,0 | 1,1 | | 1,7 | | 3,4 | 1,5 |
| Створ 4 Костоусово | 2016 | 6,7 | 21,5 | 2,0 | 2,0 | | 1,9 | 2,6 | 1,6 | 2,2 | 2,2 |
| | 2018 | 8,8 | 40,3 | 1,6 | 1,8 | 3,4 | | 1,6 | 2,9 | 3,0 | 1,5 |
| | 2019 | 8,3 | 22,2 | 1,7 | 1,0 | 1,0 | | 1,8 | 2,2 | 3,2 | 1,4 |
| Створ 5 Белозерка | 2016 | 5,8 | 30,4 | 2,4 | 2,3 | 1,0 | 1,9 | 2,6 | 1,6 | 1,0 | 1,5 |
| | 2018 | 7,5 | 31,4 | 1,5 | 1,6 | 1,3 | | 1,3 | | 3,7 | 3,1 |
| | 2019 | 7,3 | 15,5 | 1,0 | 1,3 | | | 1,3 | 2,2 | 3,0 | 1,6 |

Проведенный анализ данных по основным показателям состава воды р. Тобол за 2016–2019 гг. и расчет коэффициентов (долей ПДК), полученных от деления значений концентрации каждого компонента на его ПДК, позволил сделать следующие выводы (таблица).

1. Резкий скачок загрязненности воды р. Тобол и Курганского водохранилища можно объяснить сложившимися гидрометеорологическими особенностями 2018 г. Так, зима 2017–2018 гг. была «умеренно морозная, малоснежная. Весна – затяжная, ветреная, дождливая, холодная с заморозками до начала июня. Лето было умеренно теплым с достаточным количеством осадков, начало осени (сентябрь) – сухим» (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2019) [13].

Пики половодья оказались ниже средних многолетних «на 1–2 метра в створах р. Тобол, в г. Кургане – ниже на 2,6 м. Обеспеченность максимальных уровней составила на Тоболе 75–80%, на Тоболе весеннее половодье 2018 г. было маловодным» (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2018) [14].

При высоком водопотреблении это способствовало скачку концентраций загрязнителей в воде.

2. В процессе анализа выявлены сходные тенденции в динамике коэффициентов ПДК химических компонентов воды, как

по створам, так и во временном отношении (2016–2019 гг.) которые можно объединить в группы.

Выявлены следующие тенденции в динамике химического состава воды р. Тобол:

А – прослеживаются сходные достаточно низкие значения показателей по загрязнителям на входе в территорию области и на створе р. Тобол в с. Звериноголовском (первый створ в пределах Курганской области). Далее наблюдается рост показателей в границах г. Кургана (створы Арбинка – Смолино) с последующим снижением за пределами города (створы Костоусово – Белозерское). Это характерно для содержания в воде ионов меди и марганца. Как мы предполагаем, причины его скрыты в природном происхождении вымытых компонентов из горных пород на входе на территорию региона и последующем росте концентраций за счет соединений техногенного происхождения в пределах г. Кургана. Последующее разбавление и прекращение новых техногенных поступлений снижает концентрации данных компонентов за пределами створов г. Кургана (рис. 1, таблица).

Б – стабильные показатели на входе в Курганскую область и первом створе (с. Звериноголовское) с последующим их ростом на территории г. Кургана и на первом створе за его границами (с. Костоусово), снижение показателей на грани-

це территории Курганской области (створ с. Белозерское). Отражают содержание в воде нефтепродуктов и показатели ХПК и БПК. Это обусловлено комплексным характером, сочетающим природное и техногенное происхождение тяжелой и легкой фракций органики в воде, нефтепродуктов. Может быть связано со смывом органики с полей и нефтепродуктов с обочин дорог и из нефтепродуктопроводов во время аварийных выбросов.

В – Наблюдается нестабильное содержание компонента в воде с постоянными колебаниями: снижение показателя при переходе границы области на первом створе (село Звериноголовское, с последующим ростом в границах г. Кургана (створы Арбинка и Смолино), снижение за границами города и стабилизация концентрации (у с. Костусово и Белозерское). Так ведет себя цинк. Похожее явление наблюдается в динамике содержания в воде железа и магния. Данные явления сходны в пределах городской промышленной зоны.

Г – Динамика содержания в воде сульфатов и азота аммония. Их содержание растет в воде р. Тобол, протекающей по сельской местности и снижается в пределах города, снова повышаясь за его пределами. Данное явление может быть связано с деятельностью сельскохозяйственных предприятий, использованием на полях удобрений и их смывом в воды реки во время паводков и дождей, особенно осенних.

Д – Содержание фторидов и азота нитритного в воде р. Тобол нестабильно, определяется в воде р. Уй, впадающей в Тобол на юге области, не выявляясь в значимых

показателях уже на первом створе (с. Звериноголовское), вероятнее всего в результате смешения вод и падения концентрации. Однако снова их концентрация растет за пределами г. Кургана (створы с. Костусово и Белозерское).

Микрофлора воды и ее состав

Видовой состав микрофлоры представлен родами *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Sarcina*, *Mycobacterium*, *Actinomyces* (рис. 3).

В теплый период в воде реки обнаружены спорообразующие формы рода *Bacillus*. Такое разнообразие микрофлоры связано с попаданием в воду частиц почвы, растительных и животных остатков.

Вспышки численности отдельных видов микроорганизмов возникают вследствие попадания в воду почвенных микроорганизмов в периоды высокого половодья и сильных дождей (с весны по осень). Высокий уровень содержания органики в воде, температурный режим активизируют рост численности микроорганизмов, обуславливают сезонную динамику сменяющих друг друга популяций микрофлоры. Высокая численность эвтрофной группы бактерий и высокое содержание кислорода в воде с июня по октябрь позволяют отнести р. Тобол к водотокам эвтрофного типа.

Численность микроорганизмов подвержена сезонным колебаниям с минимумом в зимний и максимумом в весенне-летне-осенний сезоны. Вода в зимний период характеризуется олигосапробностью, а в весенне-летне-осенний сезоны – постепенным нарастанием в зону бета-мезосапробности.

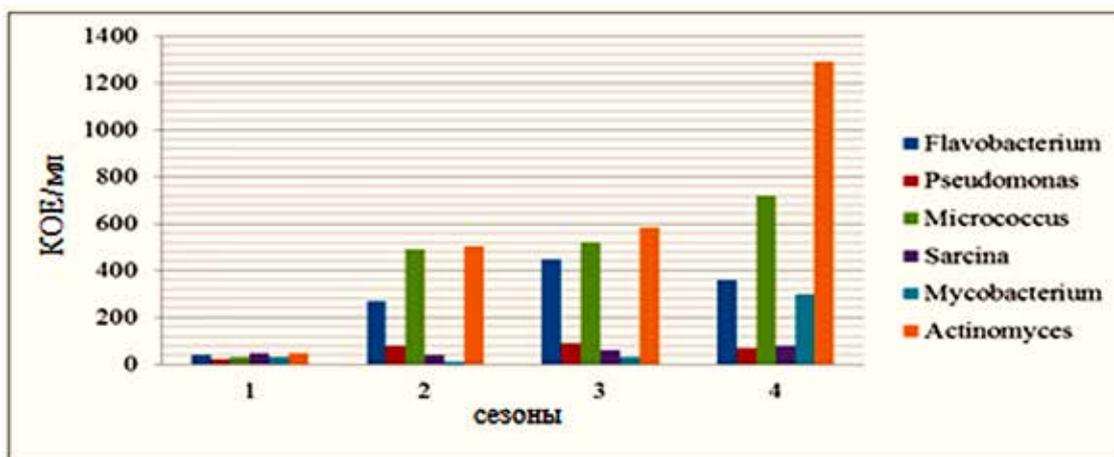


Рис. 3. Бактериологический состав воды в пределах Курганского водохранилища.
Примечание. 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень

Следуя классификации В.Н. Жукинского [14], воды р. Тобол в летние месяцы можно отнести к третьему классу качества по микробиологическим показателям – «удовлетворительно чистая» (от 1300 до 3100 КОЕ/мл). Для нее характерны процессы аэробной деструкции органики, и к зиме происходит самоочищение реки, улучшается качество воды, она относится по данному показателю ко второму классу качества – «чистая» (от 200 до 600 КОЕ/мл).

Проведенный корреляционный и факторный анализ показателей среднегодового химического состава воды позволил сформулировать следующее.

1. Выявлена корреляционная зависимость между содержанием в воде марганца и меди ($r = 0,4496$), что может быть подтверждением их природного происхождения на территории относительно низкого их содержания в воде.

2. Выявлена зависимость между содержанием в воде меди, марганца и нефтепродуктов ($r = 0,5858$). Это может быть подтверждением того, что в воде есть примеси данных элементов техногенного происхождения.

3. Выявлено взаимодействие между содержанием сульфатов и фенола, фосфатов и БПК (связь прямая, $r = 0,5453$, $r = 0,4436$) и с БПК ($r = 0,4333$) и с содержанием азота аммонийного (связь обратная, $r = -0,4921$). Это может быть свидетельством появления данных компонентов в воде с полей сельхозпроизводителей, а процессы, происходящие между данными компонентами и организмами, живущими в воде, могут быть причиной роста БПК.

4. Количество растворенного в воде фосфора в виде фосфатов противоположно содержанию ионов меди. Объясняется это тем, что в результате их взаимодействия могут образовываться нерастворимые соединения ($r = -0,5774$). Высокое содержание фосфора в воде при низком содержании меди за пределами городских территорий может быть свидетельством появления его в воде в результате сельскохозяйственной деятельности.

5. Содержание магния в воде неоднородно. С одной стороны, оно связано с содержанием сульфатов (скорее всего, в удобрениях, $r = 0,5448$), а с другой – с фенолом ($r = 0,5094$), который может быть привнесен с водами притоков и имеет техногенное происхождение.

6. Содержание растворенного железа связано с содержанием азота аммонийного ($r = 0,5196$). Взаимодействие в виде

природного происхождения железа и его вымывания из рудоносных горизонтов (на юге и юго-западе области) в сочетании с азотом аммонийным сельскохозяйственной деятельностью.

7. Содержание нефтепродуктов и фосфора в воде имеет сложное обратное взаимодействие ($r = -0,6028$). Нефтепродукты в воде реки имеют техногенное происхождение, фосфор – продукт сельскохозяйственной деятельности.

В целом проведенный корреляционный анализ позволил построить факторные модели взаимосвязей в химическом составе воды р. Тобол.

Факторы, формирующие качество химического состава воды

1. Группа компонентов в воде р. Тобол в границах г. Кургана (створы Арбинка – Смолино). Они по происхождению имеют техногенный характер (продукты производственной деятельности промышленных предприятий города, в первую очередь машиностроения), автотранспорта. Взаимодействие между ними имеет связь средней силы ($r = 0,5404$). К группе относятся соединения меди, марганца и нефтепродукты (техногенный фактор).

2. Группа компонентов в воде р. Тобол и Курганского водохранилища на участках территории активной сельскохозяйственной деятельности. Это между створами с. Звериноголовское и Арбинкой (возделывание зерновых и животноводство, садоводческие кооперативы) и между створами с. Костоусово и Белозерское (возделывание овощной продукции для г. Кургана и полеводство). Входят коррелирующие между собой соединения магния (с сульфатами и фосфатами), меди (с фосфатами и сульфатами). Их происхождение, возможно, связано с попаданием в воду при смыве с полей удобрений (фосфорных) и пестицидов (серосодержащих). Взаимодействие средней силы ($r = 0,4550$). Это сельскохозяйственный фактор загрязнения.

3. Фактор комплексного воздействия хозяйственной деятельности из взаимодействия между ионами меди и сульфат-ионами используемых пестицидов. С ними связаны фосфат-ионы и нефтепродукты. Данное взаимодействие на участке между створами с. Звериноголовское (первый на территории Курганской области) и створом Арбинки на входе в городскую территорию Кургана. Сила взаимодействия – средняя ($r = 0,46561$).

4. Фактор комплексного взаимодействия промышленных стоков и продуктов сельхозпроизводителей складывается из связи ионов железа, цинка, меди (гальванического производства), магния, меди и сульфат-ионов из удобрений и пестицидов и нефтепродуктов автотранспорта. Выявлено на выходе из г. Кургана между створами Смолино (граница Кургана) и с. Костоусово. Здесь происходит смешение вод р. Тобол и р. Черная, имеющей воды, обогащенные стоками промышленных предприятий и коммунальными стоками. Уровень взаимодействия – средний ($r = 0,4539$).

5. Фактор самоочищения. Взаимодействие между биологическим окислением кислорода (БПК), ионами аммония и сульфат-ионами с одной стороны и катионами железа, цинка, меди. Комплекс используется в экосистеме водоема продуцентами (фото- и хемосинтезирующими организмами). Уровень взаимосвязи внутри фактора ниже среднего ($r = 0.3668$). Взаимодействие может создаваться на отрезке между впадением р. Уй в реку Тобол и створом (с. Звериноголовское). А также между створом у с. Костоусово и створом у с. Белозерское.

*Факторологический анализ
причинно-следственных связей*

Данный раздел статьи посвящен выявлению внешнесредового воздействия на динамику свойств воды р. Тобол. Анализ научных данных позволил разработать модель влияния внешних факторов на состав природных вод. В ядре модели – показатели качества воды (органолептические, физико-химические, химические биологические).

Как считает Н.В. Миклашевский, «к лимитирующим факторам следует отнести сточные воды, залегающие горные породы, почвенный покров, климатические условия» [15]. Эти факторы воздействуют на формирование качества природных вод. Так, залегающие горные породы являются основными факторами формирования минералогического состава природных вод.

К косвенным факторам (определяющим условия, в которых действуют основные) «следует отнести рельеф, гидрологический режим, природные катастрофы, атмосферные осадки, биологические факторы, смешивание вод». Их относим к фоновым факторам нашей модели. Так, от рельефа зависит размер поверхностного стока, дренирование подземных вод, перераспределение выпавших на земную поверхность осадков.

При воздействии всех факторов на компоненты природной воды получаем качество природной воды.

По результатам нашего исследования к лимитирующим внешнесредовым факторам следует отнести не только особенности климата, сбросы сточных, а и трансграничный перенос загрязняющих веществ, смешение природных вод. Доказательством того является динамика качества воды. Так, в пункте наблюдения с. Звериноголовское класс качества воды 4, следовательно, из Казахстана в Курганскую область поступает загрязненная вода. Трансграничный перенос загрязняющих веществ по р. Тобол из Республики Казахстан будет главным фактором, влияющим на качество воды на входе в территорию области.

Относительно крупными притоками р. Тобол в пределах Курганской области являются р. Уй, Убаган, Куртамыш, Утяк, Черная. При попадании вод этих притоков наблюдается смешение вод. Основное влияние на качество воды Тобола будет оказывать вода р. Уй. По значению УКИЗВ она соответствует 4 классу качества воды и характеризуется как «грязная». Наибольшую долю вносит марганец, который вымывается из залегающих горных пород в Казахстане. При впадении Уя в Тобол происходит смешение загрязненных вод.

Река Черная является притоком Тобола в пределах г. Кургана. Она полностью сформирована прямыми сбросами сточных вод предприятий города и жилищно-коммунальными стоками от населения после их очистки на Курганских городских очистных сооружениях канализации. В результате этого качество воды р. Тобол ниже впадения р. Черная ухудшается.

Сброс сточных вод. В Кургане АО «Водный союз» в Курганское водохранилище осуществляет сброс промывных сточных вод от Арбинских водозаборных сооружений и центра города. На качество воды водохранилища будут влиять ливневые стоки, собирающие с территории города загрязняющие вещества, в том числе нефтепродукты.

Климат характеризуется большими сезонными и суточными колебаниями температуры воздуха. На теплый период года приходится 75–79% от суммы осадков. Выпавшие атмосферные осадки на короткий период уменьшают минерализацию воды. Однако в результате испарения поверхностных вод минерализация снова растет.

К фоновым факторам нами отнесены заиливание водохранилища, донные отложения,

маловодность реки, паводки и наводнения, биологические факторы, залегающие горные породы, почва прилегающих территорий, природные катастрофы.

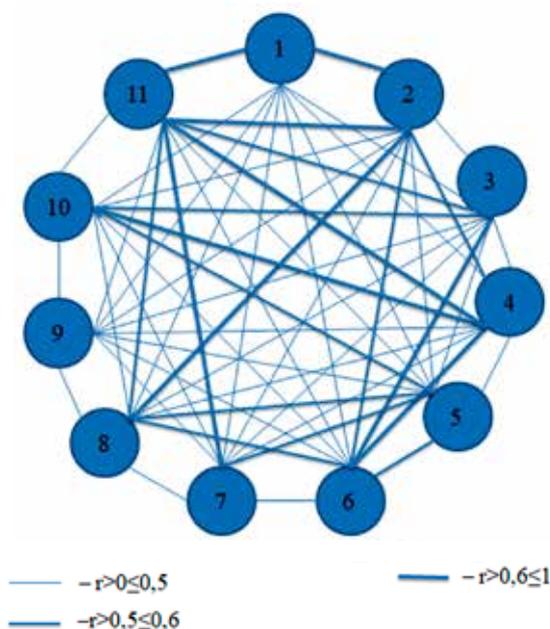


Рис. 4. Коррелограмма показателей воды р. Тобол ($p \leq 0,05$).

Примечание: цифрами обозначены показатели:
 1 – рН, 2 – температура, 3 – прозрачность,
 4 – содержание кислорода, 5 – сухой остаток,
 6 – концентрация марганца, 7 – концентрация нитратов,
 8 – концентрация хлоридов,
 9 – концентрация сульфатов,
 10 – концентрация нефтепродуктов,
 11 – общая численность микроорганизмов

В Курганском водохранилище наблюдается интенсивное заиление, сопровождающееся снижением средних глубин и ростом нагрева воды в летний период, в сочетании с загрязнителями это приводит к зарастанию и цветению воды. В результате снижается концентрация кислорода в воде, интенсивность процесса окисления загрязняющих веществ и создается неблагоприятная ситуация для гидробионтов.

В водохранилище система «вода – донные отложения» подвижна. Загрязняющие вещества депонируются в донных осадках, это приводит к вторичному загрязнению воды.

Река Тобол выше по течению зарегулирована целым рядом гидроузлов, включая крупные Верхне-Тобольское и Каратамарское водохранилища. Это резко снижает естественный сток на границе между Россией и Казахстаном. Объемов для разбав-

ления грязных сточных вод, поступающих в реку ниже г. Кургана, практически нет.

К природным катастрофам следует отнести паводки и наводнения, когда уровень воды достигает больших отметок. В результате – затопление территории дачных кооперативов и поселков, находящихся в пойме р. Тобол, при котором в воду с затопляемых территорий попадают твердые бытовые отходы, загрязняющие вещества, в том числе удобрения, компоненты дорожных покрытий и т.д.

В летний период в связи с повышением температур происходит ухудшение качества воды по микробиологическим показателям, как результат воздействия биологического фактора – несоответствие требованиям санитарных правил и нормативов.

Установлена корреляционная зависимость между температурным режимом воды и микробиологическим компонентом, так как температура воды является одним из основополагающих факторов для жизнедеятельности бактерий.

На основании проведенного анализа к группе фоновых факторов был добавлен режим воды р. Тобол в зимний период, который оказывает влияние на динамику уровня жесткости воды.

Отдельно выделена группа экотоксикантов, как интегрирующий компонент лимитирующих факторов (рис. 4).

Заключение

Курганская область относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод.

1. Основной проблемой исследования явилось выявление с помощью математических методов основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (его химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области, построение и верификация соответствующей модели.

2. Выявлена динамика показателей химического загрязнения воды и ее основные тенденции на протяжении от впадения р. Уй на границе с республикой Казахстан, по территории Курганской области до границ с Тюменской областью. Выявленные в динамике химических компонентов загрязнения различия позволили объединить данные компоненты в группы и предположить возможные источники постоянного или временного сброса.

3. Проведенный корреляционный анализ взаимодействия компонентов химического загрязнения позволил выявить его силу и направленность. Результаты анализа компонентов химического загрязнения воды р. Тобол и Курганского водохранилища позволили сгруппировать их, обозначить наличие техногенного, сельскохозяйственного факторов на участках между створами, расположенными в территориях сельскохозяйственного либо промышленного пользования. Определено наличие двух комплексных факторов на границах их взаимодействия и фактор самоочищения воды.

4. Большая протяженность р. Тобол с юга на север способствует формированию особого режима формирования вод реки и их качества. К лимитирующим внешнесредовым факторам, влияющим на состав воды исследуемых объектов, следует отнести трансграничный перенос загрязняющих веществ, смешение природных вод, особенности климата, сбросы сточных вод.

5. Выявлена зависимость качества воды р. Тобол и Курганского водохранилища от биологического фактора. Установлена зависимость между температурным режимом воды, рН, содержанием кислорода и микробиологическим компонентом.

Отдельно выделена группа экотоксикантов, как интегратор лимитирующих факторов. К группе фоновых факторов добавлен режим воды, связанный с зимней меженью р. Тобол, оказывающей влияние на динамику жесткости воды, концентрацию загрязнителей в зимний период.

В целом разработанная модель влияния факторов различной природы на качество воды (химический состав) р. Тобол и Курганского водохранилища проверена в процессе исследования.

Список литературы

1. Постановление Правительства Курганской области от 14 октября 2013 г. № 498 «О государственной Программе Курганской области “Природопользование и охрана окружа-

ющей среды Курганской области в 2014–2020 годах”» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.priroda.kurganobl.ru/5340.html> (дата обращения: 10.09.2022).

2. Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В., Фирюлина И.И. Мониторинг качества вод притоков р. Тобол // Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 114–121.

3. Ларин С.И. Физико-географические условия формирования качества поверхностных вод Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 12. С. 70–77.

4. Рогова М.В. Оценка гидрохимических показателей качества воды реки Яхромы // Естественные и технические науки. 2020. № 1 (139). С. 45–55.

5. Wang J.H., Xiao W.H., Wang H., Chai Z.K., Niu C.W., Li W. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. Chinese Science Bulletin. 2013. No. 58 (27). P. 3340–3347.

6. Лихачев С.Ф., Артеменко Б.А. Гидрохимическая и биоиндикационная оценка качества воды реки Миасс // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. 2011. № 6. С. 298–304.

7. Jakovljević O.S., Popović S.S., Vidaković D.P., Krizmanić J., Stojanović K.Z. The application of benthic diatoms in water quality assessment (Mlava river, Serbia). Acta botanica croatica. 2016. No. 75 (2). P. 199–205.

8. Виноградова Л.А., Пархомчук Т.К. Комплексные санитарно-микробиологические критерии оценки качества водных объектов в условиях возрастающей антропогенной нагрузки // Гигиена и санитария. 1991. № 1. С. 24–26.

9. Мельникова А.В., Любина О.С., Гвоздарева М.А., Нуретдинов Р.Р., Горшков М.А. Оценка качества воды Нижнекамского водохранилища по гидробиологическим показателям // Вода: химия и экология. 2019. № 3 (6). С. 67–72.

10. Mena-Rivera L., Sánchez-Gutiérrez R., Vásquez-Bolaños O., Fonseca-Sánchez A., Gómez-Castro C., Rodríguez-Rodríguez A. Ecosystemic assessment of surface water quality in the Virilla river: towards sanitation processes in Costa Rica. Water (Switzerland). 2018. No. 10 (7). P. 845.

11. ГОСТ 17.1.2.04-77. «Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026772> (дата обращения: 10.09.2022).

12. Несговорова Н.П., Иванцова Г.В., Неумывакина Н.А., Савельев В.Г. Организация научно-исследовательской деятельности студентов: теоретико-прикладной аспект. Курган, 2017. 352 с.

13. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Курганской области в 2019 году. Курган, 2020. 190 с.

14. Жукинский В.Н., Окснюк О.П., Олейник Г.Я., Кочелева С.И. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1981. Т. 17. № 2. С. 38–40.

15. Миклашевский Н.В. Очистка сточных вод по технологии МБР // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2014. № 12 (156). С. 30–37.

УДК 504:556

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕКИ ПОДКУМОК

Окрут С.В., Зеленская Т.Г., Степаненко Е.Е., Коровин А.А., Халикова В.А.
ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», Ставрополь,
e-mail: s0kr@yandex.ru

В статье дана характеристика современного состояния гидрохимических и гидробиологических показателей р. Подкумок, установлено, что современное состояние речных вод по общим гидрохимическим показателям соответствует сезонной динамике, отмеченные изменения в концентрации кислорода от 3,5 мг/дм³ до 5,0 мг/дм³ выше предельно допустимых позволили характеризовать воды как «загрязненные» и «грязные». Проведенная оценка состояния речных вод на основе мониторинговых данных показала превышение предельно допустимых концентраций по содержанию железа от 6 до 12, сульфатов в 8 раз, фосфатов в 12 раз, нефтепродуктов в 6 раз. Дана оценка гидрохимических показателей р. Бугунта, левого притока р. Подкумок, свидетельствующая о поступлении вод в Подкумок со слабощелочными значениями pH, отмеченное изменение показателя биологического потребления кислорода от 5,4 до 7,3 мг/дм³ позволяет характеризовать воды р. Бугунта как «грязные». Определено влияние малых рек бассейна р. Подкумок на воды главной реки. Отмечено превышение содержания азотистых соединений в устьях всех исследуемых рек, максимально содержание аммония в водах р. Аlikоноква и Березовая, нитрит-ионов в водах р. Яблонька, содержание нитрат-ионов незначительно в водах р. Белоглинка, оно составило 0,62 ПДК, однако имеется опасность их увеличения за счет процессов окисления с участием нитрит-ионов и ионов аммония. Наблюдаемые изменения в динамике показателя перманганатной окисляемости от 1,6 до 6,4 мг/дм³, но при этом не превышающие предельно допустимых концентраций, характерны при поступлении в водоток бытовых сточных вод, а также поверхностного стока, наряду с этим наблюдается поступление стоков с территорий крестьянско-фермерских хозяйств. Характеристика видового состава фитопланктона водных объектов показала присутствие зеленых, диатомовых, эвгленовых, синезеленых водорослей. Установлено соотношение видов, в котором из 15 определенных видов наибольшее количество составили зеленые водоросли 43%, доля синезеленых и эвгленовых составила 14 и 7% соответственно, что свидетельствует о поступлении биогенных элементов в исследуемые водные объекты и дальнейшем развитии процессов эвтрофикации малых водотоков.

Ключевые слова: гидрохимические показатели, река, водные объекты, малые реки, водотоки, загрязнение, фитопланктон

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SMALL WATER CURRENTS ON THE HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL INDICATORS OF THE PODKUMOK RIVER

Okrut S.V., Zelenskaya T.G., Stepanenko E.E., Korovin A.A., Khalikova V.A.
Stavropol State Agrarian University, Stavropol, e-mail: s0kr@yandex.ru

The characteristic of the current state of hydrochemical and hydrobiological indicators of the Podkumok river is given. The current state of the river according to hydrochemical indicators corresponds to the seasonal dynamics. There are changes in oxygen concentration from 3.5 mg/dm³ to 5.0 mg/dm³. Waters can be characterized as "polluted" and "dirty". The monitoring assessment showed the excess of the maximum permissible concentrations for the content of iron from 6 to 12, sulfates – 8 times, phosphates – 12 times, oil products – 6 times. An assessment of the hydrochemical parameters of the Bugunta River is given. left tributary of the Podkumok River. The change in the indicator of biological oxygen consumption from 5.4 mg/dm³ to 7.3 mg/dm³ characterizes the waters of the Bugunta River as "dirty". There is a high content of nitrogenous compounds in the mouths of all the studied rivers. A high content of ammonium in the waters of the Alikonovka and Berezovaya rivers, nitrites in the waters of the Yablonka river was determined. The content of nitrates in the waters of the Beloglinka River is low. The index of permanganate oxidizability varies from 1.6 mg/dm³ to 6.4 mg/dm³. Everything indicates the inflow of domestic wastewater, surface runoff and runoff from the territories of peasant farms into the river. Phytoplankton contains green, diatom, euglenoid and blue-green algae. Established the ratio of species. There are 15 types in total. Green algae 43%, blue-green and euglena 14% and 7% were determined. The presence of algae indicates the entry of nutrients into rivers. A large amount of phytoplankton makes the processes of eutrophication of small rivers.

Keywords: hydrochemical indicators, river, water bodies, small rivers, watercourses, pollution, phytoplankton

«...Водные ресурсы являются одним из самых востребованных и жизненно необходимых видов природных ресурсов. Естественные природные процессы и человеческая деятельность на водосборах водных объектов активизируют изменения в гидросфере, а следовательно, в количестве и качестве водных ресурсов...» [1, 2].

«...Преобразование водных экосистем идет в результате антропогенного воздействия, при этом происходят изменения...» [3] гидрохимического и гидрологического режима водного объекта, обусловленные способностью водоемов и водотоков к саморегуляции, которая зависит от водного стока. Наибольшая способность к самоочи-

щению, восстановлению гидрохимического и экологического баланса проявляется в ситуации, когда отмечаются высокие показатели по водности объекта, его протяженности, разнообразие климатических, геологических и биологических условий его водосбора и местоположения русла.

Проблемы загрязнения поверхностных вод не являются исключением для Ставропольского края. Речная сеть Ставропольского края представлена 225 реками, большая часть которых относится к малым рекам и ручьям, в том числе временным водотокам. Для рек Ставропольского края характерно смешанное питание. Речная сеть в крае распределена неравномерно, что определяет рассмотрение вопросов сохранения и рационального использования водных ресурсов края [3].

Цель исследования – дать оценку современного состояния вод р. Подкумок, провести анализ влияния малых водотоков на гидрохимические и гидробиологические показатели вод р. Подкумок.

Объектом наших исследований явились воды р. Подкумок и ее притоков. Река Подкумок является главной водной артерией региона Кавказских Минеральных Вод, относится к категории малых рек, однако ее значение в хозяйственной деятельности региона очень велико.

Материалы и методы исследования

Воды реки служат источником питьевого водоснабжения городов-курортов, в свя-

зи с этим проводится ежегодная оценка качества водного объекта Кавминводским территориальным комитетом по охране окружающей среды в створах расположенных на территории городов-курортов Кисловодска, Ессентуки, Пятигорска. Однако на малых реках, притоках р. Подкумок, данного рода наблюдения не проводятся. В 2021 г. лабораторией экологического мониторинга СтГАУ было проведено гидрографическое, гидрологическое и гидрохимическое обследование водотоков бассейна р. Подкумок. Для оценки современного состояния вод р. Подкумок на территории г. Ессентуки были определены точки отбора проб по ул. Набережная (Белый уголь) (западная часть г. Ессентуки), городское озеро, пер. Мельничный, ул. Шмидта (восточная часть г. Ессентуки) в соответствии с видами антропогенного воздействия на водные объекты. Наблюдение за состоянием вод малых водотоков проводили в устьях малых рек (рис. 1).

Отбор проб проводился согласно ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб». Места отбора проб соответствовали основным требованиям для качественной оценки проб. Забор проб проводили в центральной части поперечного речного профиля, на глубине более 30 см от поверхности и дна. Проведено обследование источников загрязнения вод р. Подкумок с отбором 48 проб природных вод.

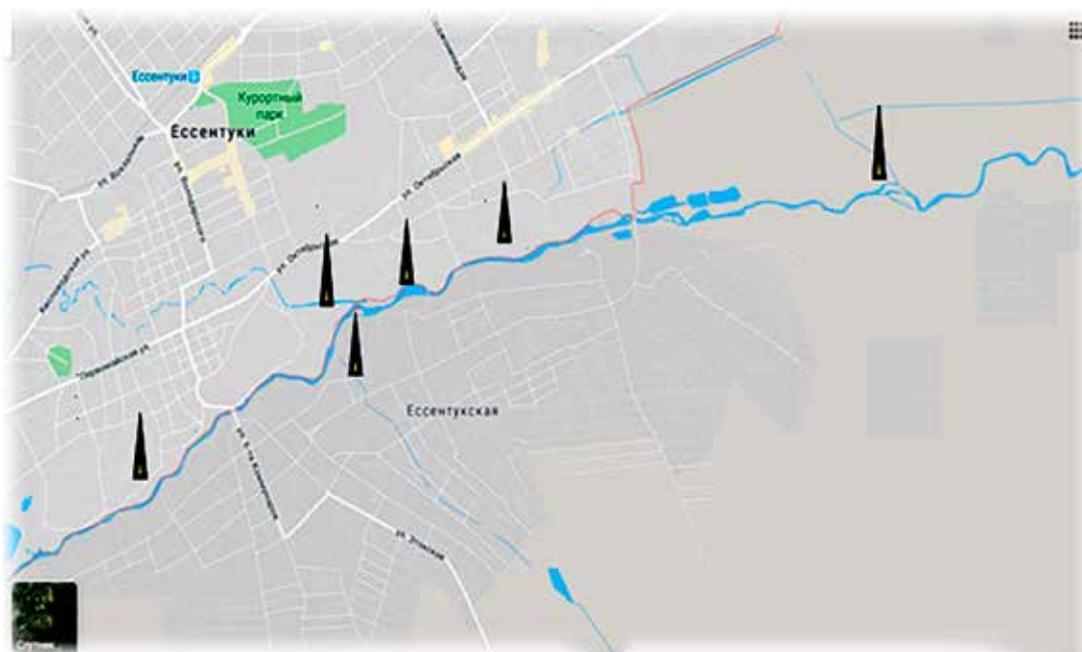


Рис. 1. Точки отбора проб в устьях малых рек

При проведении оценки гидрохимических показателей использовали «Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши», а также методики, внесенные в Государственный реестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды, допущенных для государственного экологического контроля и мониторинга.

Цветность определяли визуально по шкале. Для определения содержания взвешенных веществ использовали гравиметрический метод, основанный на выделении их из пробы фильтрованием воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и взвешивании осадка на фильтре после высушивания его до постоянной массы. Определение общего содержания примесей осуществляли выпариванием известного объема нефилтрованной анализируемой воды на водяной бане, высушиванием остатка при 105 °С до постоянной массы и его взвешиванием. Содержание ионов аммония и аммиака определяли фотометрическим методом с использованием реактива Несслера, нитритов с использованием сульфаниловой кислоты, нитратов с использованием фенолдисульфокислоты, салициловокислого натрия. Содержание нефтепродуктов определяли флуориметрическим методом. В основе нормативов для анализа гидрохимических показателей использованы рыбохозяйственные ПДК, представляющие собой максимальную концентрацию загрязняющих веществ в воде, не оказывающую вредного воздействия на водные организмы.

Отбор и обработку альгологического материала проводили стандартными в альгологии методами.

Результаты исследования и их обсуждение

Гидрографическая сеть исследуемого района хорошо развита и принадлежит Терскому и Кубанскому бассейнам. Река Подкумок относится к наиболее крупным водотокам Терского бассейна среди таких рек, как Баксан, Тызыл, Малка, Кичмалка, Эшкакон, Кума. Линия водораздела между бассейнами имеет субмеридиальное простирание и проходит по линии г. Эльбрус – плато Бечасын. Для рек характерна степень обнаженности верхних частей долин и водоразделов хорошая (до 45%) и удовлетворительная (до 30%), нижние части долин и плато обнажены плохо. Дешифрируемость терри-

тории плохая (55%) и только в северной части удовлетворительная и хорошая [4]. Река Подкумок является правым притоком Кумы, относится к наиболее полноводным рекам с быстрым течением, хорошо выраженными весенне-летними половодьями и бурными дождевыми паводками. Питание рек ледниковое и родниковое, в паводковое время вода мутная. Всего у Подкумка насчитывается 143 притока, общая длина которых составляет 345 км. Самыми многоводными являются верхние притоки, дающие от 70 до 80% всего стока реки. Длина Подкумка составляет 115 км. Площадь водосбора более 2,2 тыс. км². Русло Подкумка в верховье проходит в узких скалистых каньонах, глубина которых достигает 400 м. Пойменная терраса возвышается на полтора метра над уровнем меженных вод и затопляется в высокие воды на небольшую глубину. Около Лысой горы пойма суживается до полукилометра и вновь расширяется, обогнув гору. Ниже станицы Незлобинской Георгиевского района Подкумок выходит на равнину. Ледовые явления реки наступают в середине декабря. Льдом покрываются только берега, что обусловлено быстрым течением реки. Весеннее половодье наступает в марте и оканчивается в июле-августе, продолжительность составляет от 129 до 147 суток. Летние дождевые паводки приходятся в основном на август, средняя продолжительность которых составляет от 6 до 7 суток, отмечено максимальное значение до 15 суток. В связи с тем, что подземные воды курортов Кавказских Минеральных Вод тесно связаны с поверхностными водами, особое значение имеет их качество.

Оценка современного состояния вод р. Подкумок на территории г. Ессентуки, проведенная на основе анализа сезонной динамики общих гидрохимических показателей реки, свидетельствует о слабощелочных значениях рН. В пробах, взятых в разные периоды, сильных колебаний по данному показателю отмечено не было. Гидрохимическая характеристика состава вод р. Подкумок в основные гидрологические сезоны приведена в табл. 1.

Анализ данных показал, что в октябре концентрация цветности соответствовала 64 град. Pt/Co, что связано с обильными стоками ливневых вод, несущих в себе огромное количество органического вещества, смываемого с прилегающих к реке территорий, а также с поднятием уровня грунтовых вод, несущих в себе взвешенные частицы.

Таблица 1

Общие гидрохимические показатели вод р. Подкумок (2021 г.)

| № п/п | Показатель | ПДК | февраль | май | октябрь |
|-------|---|---------|---------|-------|---------|
| 1 | рН, ед | 6,5–8,5 | 8,3 | 8,3 | 8,2 |
| 2 | Цветность, град. Pt/Co | – | 51 | 21 | 64 |
| 3 | Взвешенные вещества, мг/дм ³ | – | 153,0 | 82,0 | 1264,0 |
| 4 | Сухой остаток, мг/дм ³ | – | 819,0 | 675,0 | 817,0 |
| 5 | БПК ₅ , мг/дм ³ | 2,00 | 4,8 | 3,5 | 5,0 |

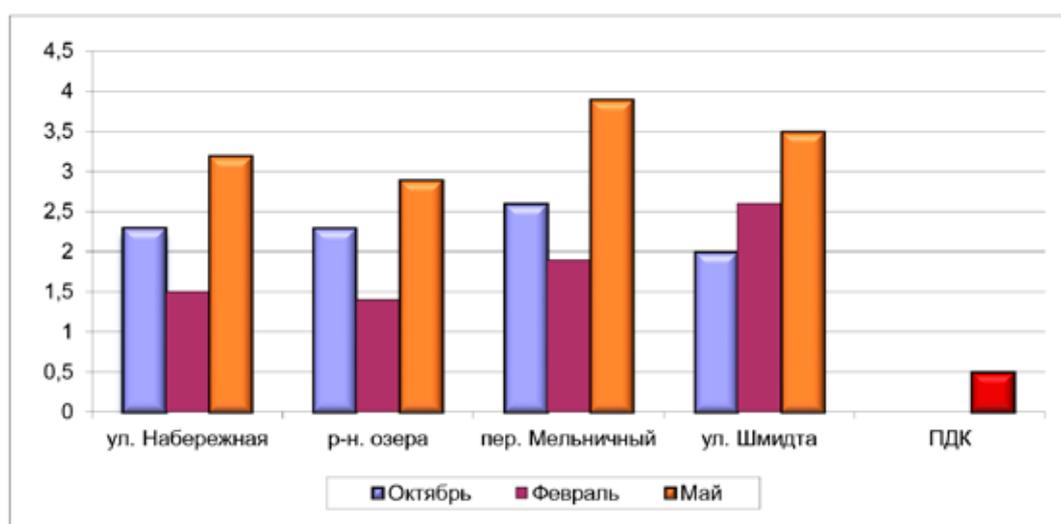


Рис. 2. Содержание ионов аммония в водах р. Подкумок (мг/л)

Наименьшие показатели цветности были отмечены в мае, что составило 21 град. Pt/Co, это связано с малым объемом воды в реке в данный период. Минимальные концентрации взвешенных веществ составили 82,0 мг/дм³, данные значения отмечены в октябре в период осенней межени, что обусловлено как гидрохимическим режимом вод реки осеннего периода, так и поступлением различных веществ с поверхностным стоком. Установили, что сезонная динамика концентрации кислорода изменялась от 3,5 мг/дм³ в мае до 5,0 мг/дм³ в октябре, что выше предельно допустимых концентраций. В летний период и к периоду осенней межени концентрации кислорода в пробах воды снизились, минимальное снижение концентрации кислорода в водотоке составило 1,6 ПДК. В соответствии со шкалой идентификации загрязнения воды по показателю БПК₅ воды р. Подкумок можно характеризовать как «загрязненные» и «грязные».

Результаты анализов по содержанию ионов аммония приведены на рис. 2. В ходе исследо-

ваний отмечено превышение предельно допустимых концентраций ионов аммония во всех точках отбора проб воды в зимний период и период весеннего половодья до 7,8 ПДК. Максимальное значение ионов аммония наблюдалось в мае в точке отбора проб пер. Мельничный, что составило 3,9 мг/л, где отмечена плотная частная застройка.

Присутствие в водах ионов аммония связано главным образом с процессами биохимической деградации белковых веществ, дезаминирования аминокислот, разложения мочевины под действием уреазы.

В ходе исследований установили превышение предельно допустимых концентраций по нитритам во всех точках отбора проб воды до 12,5 ПДК (рис. 3).

Превышение показателей по содержанию нитритов находится в прямой зависимости от наблюдаемых показателей превышения предельно допустимых концентраций по аммонии. Известно, что избыточное поступление ионов аммония в водную экосистему благоприятно влияет на рост водорослей.

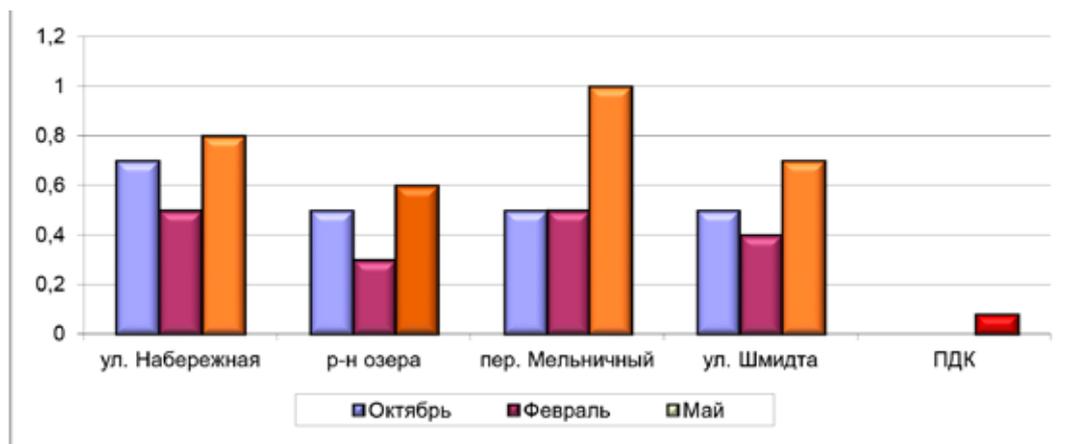


Рис. 3. Содержание нитритов в водах р. Подкумок (мг/л)

Фитопланктон выступает активным продуцентом нитритов, что ведет к повышению их концентрации в водной среде. Максимальное значение нитритов наблюдалось в мае в точке отбора проб пер. Мельничный – 1,0 мг/л., что составило 12 ПДК, минимальное значение 0,3 мг/л наблюдалось в феврале в точке отбора в районе озера.

Проведенный анализ по среднегодовым концентрациям загрязняющих веществ в водах р. Подкумок на территории г. Ессентуки (табл. 2) свидетельствует о превышении предельно допустимых концентраций по всем показателем за исключением хлорид-ионов. Максимальное содержание фосфат-ионов составило 9 ПДК, железа – 4,5 ПДК. Анализ данных свидетельствует о повышенном содержании азотных соединений в водах р. Подкумок. Содержание ионов аммония составило 3,32 мг/л, что соответствует 6,6 ПДК, нитрит-ионов 0,42 мг/л – 5,2 ПДК и нитрат-ионов 165 мг/л – 4,1 ПДК соответственно. Основное поступление азотных соединений идет со сточными водами.

Отмечено незначительное превышение предельно допустимых концентраций по содержанию СПАВ и нефтепродуктов. Источниками поступления загрязняющих веществ могут являться сточные воды с частных подворий, ливневые стоки с территорий плотных застроек, расположенных в прибрежной зоне, а также дорожные ливневые стоки [5, 6].

Проведенные исследования свидетельствуют о влиянии техногенных нагрузок на гидрохимический режим вод бассейна р. Подкумок. В прибрежной зоне были отмечены места нахождения стихийных свалок, скопления мусора, в границах водоохранной зоны реки жилые постройки и многоэтажные дома, неурегулированные стоки.

Таблица 2

Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в водах р. Подкумок

| Показатели | Среднегодовая концентрация (мг/л) | ПДК |
|---------------|-----------------------------------|------|
| Хлорид-ионы | 103,35 | 300 |
| Сульфат-ионы | 678 | 100 |
| Фосфат-ионы | 0,45 | 0,05 |
| Железо | 0,45 | 0,1 |
| Аммоний-ионы | 3,32 | 0,5 |
| СПАВ | 0,51 | 0,5 |
| Нитраты | 165 | 40 |
| Нитриты | 0,42 | 0,08 |
| Нефтепродукты | 0,08 | 0,05 |

Оценка гидрохимических показателей р. Бугунта, левого притока р. Подкумок (табл. 3), свидетельствует о поступлении вод в Подкумок со слабощелочными значениями pH.

Динамика большинства общих показателей вод р. Бугунта соответствует сезонной динамике главной реки. Отмечено изменение показателя биологического потребления кислорода от 5,4 до 7,3 мг/дм³, что позволяет в соответствии со шкалой идентификации загрязнения характеризовать воды р. Бугунта как «грязные». Максимальное превышение азотных соединений соответствует летнему периоду, «...содержание ионов аммония составило 3 ПДК, нитрат-ионов 2 ПДК. Содержание фосфатов в период исследования изменялось от 2,2 ПДК в апреле до 8,2 ПДК в июле...» [2].

Таблица 3

Гидрохимическая характеристика вод р. Бугунта (2021 г.)

| № п/п | Показатель | ПДК | Р. Бугунта | | |
|-------|---|---------|------------|-------|--------|
| | | | апрель | июль | ноябрь |
| 1 | рН, ед. | 6,5–8,5 | 7,8 | 8,2 | 7,4 |
| 2 | Цветность, град. Pt/Co | – | 36 | 49 | 75 |
| 3 | Взвешенные вещества, мг/дм ³ | – | 161,0 | 273,0 | 2756,0 |
| 4 | Сухой остаток, мг/дм ³ | – | 796,0 | 743,0 | 1138,0 |
| 5 | Кислород, мг/дм ³ | 6,00 | 8,5 | 6,9 | 6,4 |
| 6 | БПК ₅ , мг/дм ³ | 2,00 | 7,3 | 5,4 | 6,4 |
| 7 | Температура С° | – | 9,0 | 27,0 | 17,0 |
| 8 | Окисляемость перманганатная, мг/дм ³ | 15,00 | 4,48 | 4,80 | 1,6 |
| 9 | Фосфаты | 0,05 | 0,24 | 0,41 | 0,11 |
| 10 | Аммоний-ионы мг/дм ³ | 0,5 | 1,56 | 0,40 | 0,52 |
| 11 | Нитрит-ион мг/дм ³ | 0,08 | 0,18 | 0,28 | 0,20 |
| 12 | Нитрат-ион мг/дм ³ | 40 | 27,0 | 89,09 | 38,9 |

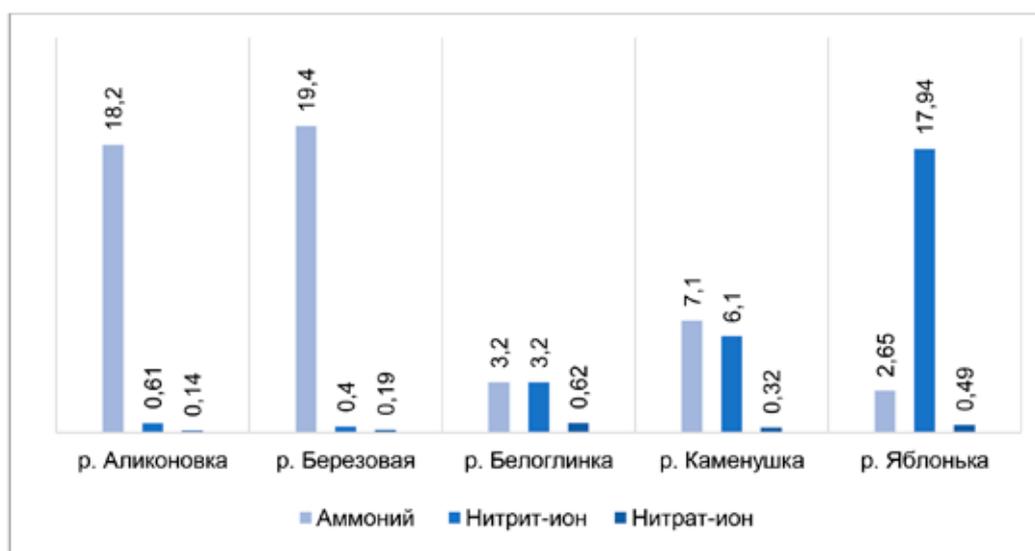


Рис. 4. Содержание азотных соединений в устьях малых рек бассейна р. Подкумок (мг/л)

При оценке нахождения азотистых соединений в устьях малых рек бассейна р. Подкумок (рис. 4) отмечено превышение аммония, нитритов, нитратов во всех исследуемых водотоках. Максимальное наличие аммония определено в водах р. Аликоновка и Березовая, что составило 18,2 и 19,4 ПДК соответственно.

Превышение по предельно допустимым концентрациям нитрит-ионов в водах р. Яблонька составило 17,94 ПДК, р. Каменушка 6,1 ПДК, р. Белоглинка 3,2 ПДК, полагаем, что увеличение содержания нитритов может быть обусловлено как частич-

ной переработкой аммонийных соединений до нитритов, так и активной деятельностью некоторых микроорганизмов и водорослей. Максимальное содержание нитрат-ионов незначительно в водах р. Белоглинка, оно составило 0,62 ПДК, однако имеется опасность их увеличения за счет процессов окисления с участием нитрит-ионов и ионов аммония. Источником поступления азотистых соединений в водотоки в большей степени являются ливневые и хозяйственно-бытовые стоки, а также стоки с территорий крестьянско-фермерских хозяйств.

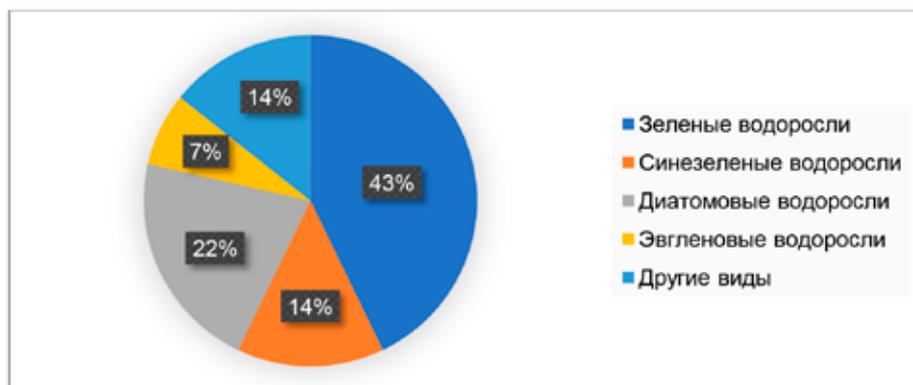


Рис. 5. Соотношение видового состава фитопланктона, %

Во всех водотоках отмечено превышение показателя БПК₅, что свидетельствует о поступлении в водотоки аллохтонного органического вещества с площади водосбора. Наблюдаемые изменения в динамике показателя перманганатной окисляемости от 1,6 до 6,4 мг/дм³, но при этом не превышающие предельно допустимых концентраций характерны при поступлении в водоток бытовых сточных вод, а также поверхностного стока.

В устьях исследуемых малых водотоков были отмечены активные процессы «цветения» воды в летний и осенний периоды. Установлено, что структура фитоценозов чувствительна к факторам загрязнения.

Оценка видового состава фитопланктона водных объектов показала присутствие зеленых, диатомовых, эвгленовых, синезеленых водорослей. Соотношение видов представлено на рис. 5.

Всего было определено 15 видов, из которых наибольшее количество, 43%, составили зеленые водоросли, доля диатомовых водорослей составила 22%, синезеленых и эвгленовых – 14 и 7% соответственно, другие виды – 14%.

Видовой состав фитопланктона свидетельствует о поступлении биогенных элементов в исследуемые водные объекты со сточными, ливневыми водами, что способствует развитию процесса эвтрофикации малых водотоков.

Заключение

Оценивая современное состояние водного объекта, можно отметить, что сезонная динамика общих гидрохимических показателей вод р. Подкумок соответствует сезонным процессам, изменения в концентрации кислорода от 3,5 мг/дм³ в мае до 5,0 мг/дм³ в октябре позволяют характеризовать воды реки как «загрязненные» и «грязные», с превы-

шением предельно допустимых концентраций железа, сульфатов, фосфатов, нитратов, азота, СПАВ и нефтепродуктов.

Анализ влияния малых водотоков свидетельствует о повышенной концентрации азотистых соединений в устьях малых рек бассейна р. Подкумок, источником поступления которых являются ливневые и хозяйственно-бытовые стоки, а также стоки с территорий крестьянско-фермерских хозяйств. Определение показателя биологического потребления кислорода позволило характеризовать воды р. Бугунта, левого притока р. Подкумок, как «грязные». Оценка видового состава фитопланктона водотока характеризует избыточное поступление биогенных элементов в исследуемые водные объекты.

Проведенные исследования свидетельствует о наличии техногенных нагрузок в бассейне р. Подкумок, что может привести к развитию деградационных процессов водного объекта.

Список литературы

1. Дмитриева В.А. Экологический сток в речных потоках // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 3. С. 424–433. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-424-433.
2. Дмитриева В.А., Жигулина Е.В. Динамика водности малых водотоков Верхнедонского бассейна и ее роль в структурно-динамической организации ландшафтов // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 4. С. 404–414. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-404-414.
3. Окрут С.В. Влияние различных видов загрязнения на степень деградационных процессов экосистем малых рек // Вестник АПК Ставрополя. 2012. № 4 (8). С. 104–106.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации: Объяснительная записка / Лист К-38-I, VII (Кисловодск). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. С. 3–4.
5. Истрашкина М.В. Очистка производственных сточных вод многокомпонентными адсорбционными фильтрами от нитро-, amino- и гидроксипроизводных бензола: дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. Казань, 2019. 185 с.
6. Чувьчкин А.Л. Динамика экологического состояния поверхностных вод средних и малых рек бассейна Среднего Дона: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Воронеж, 2020. 310 с.

УДК 504:551.311.3:551.510.41:551.510.42(261.24)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Топчая В.Ю., Чечко В.А.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: piwis@mail.ru*

Работа представляет собой комплексное исследование, объединяющее натурное, аналитическое и модельно-статистическое изучение гетерогенных атмосферных выпадений в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря. За многолетний период (2006–2019 гг.) по единой методике были отобраны пробы всех типов атмосферных выпадений (сухое осаждение, дождевые осадки, снег). Проанализированы особенности их поступления, количественного распределения, вещественного и элементного состава. Рассчитана средняя величина потоков гетерогенных атмосферных выпадений в береговую зону, в весенне-летне-осенний период в сухую погоду она составляет $66,5 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ и с дождевыми осадками – $37,3 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, а в зимний период – $2,7 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Их количественные показатели характеризуются отчетливо выраженной сезонной изменчивостью, достигая наиболее высоких значений к концу лета. Установлено, что атмосферные выпадения в береговой зоне состоят из частиц естественного и антропогенного происхождения, пелитово-алевритовой размерности (1–100 мкм). В их составе весной и летом преобладают литогенные и биогенные, а осенью и зимой – антропогенные частицы. Антропогенный поток тяжелых металлов (Cu, Zn, As, Cd, Pb, Bi) формируют дождевые и снеговые выпадения. Поток редкоземельных элементов в основном обусловлен их включенностью в обменные процессы литогенеза. Проведенный статистический анализ данных об элементном составе дождевых осадков позволил выделить две группы элементов по степени их корреляционной связи. Взаимосвязь элементов в группах объясняется сходством их геохимических параметров и совокупностью их происхождения. Установлено, что величина среднегодового потока Pb, полученная по натурным данным, на 12% превышает его значения, рассчитанные по базе ЕМЕП. Потоки кадмия в регионе незначительны. Вклад трансграничных источников Pb и Cd в загрязнение региона достигает 96%. Потоки гетерогенных атмосферных выпадений в исследуемом регионе формируются под влиянием локальных (минеральный и биогенный) и трансграничных (антропогенный) источников поступления.

Ключевые слова: гетерогенный, атмосферные выпадения, поток, тяжелые металлы, редкоземельные элементы

Анализ и интерпретация данных выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

FORMATION OF FLUXES OF HETEROGENEOUS ATMOSPHERIC DEPOSITS IN THE COASTAL ZONE OF THE SOUTHEAST PART OF THE BALTIC SEA

Topchaya V.Yu., Chechko V.A.

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: piwis@mail.ru

The work is a comprehensive study that combines natural, analytical and model-statistical study of heterogeneous atmospheric deposits in the coastal zone of the southeastern part of the Baltic Sea. Over a long-term period (2006–2019), samples of all types of atmospheric deposits (dry precipitation, rainfall, snow cover) were taken using a unified methodology. The features of their deposition, quantitative distribution, material and elemental composition are analyzed. The average value of heterogeneous atmospheric precipitation fluxes into the coastal zone in the spring-summer-autumn period in dry weather is $66.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and with rainfall – $37.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, and in winter – $2.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Their quantitative indexes are characterized by a pronounced seasonal variability, reaching the highest values by the end of summer. Atmospheric deposits in the coastal zone consists of particles of natural and anthropogenic origin, pelitic-aleuritic dimension (1-100 microns). Their composition is dominated by lithogenic and biogenic particles in spring and summer, and anthropogenic particles in autumn and winter. Anthropogenic flux of heavy metals (Cu, Zn, As, Cd, Pb, Bi) is formed by rain and snow precipitation. The flux of rare earth elements is mainly due to their inclusion in the exchange processes of lithogenesis. The statistical analysis of data on the elemental composition of rainfall allowed select two groups of elements according to the degree of their correlation. The relationship of elements in groups is a set of their geochemical parameters and origin. The value of the average annual Pb flux obtained from field data is 12% higher than its values calculated using the EMEP database. Fluxes of cadmium in the region are not significant. The contribution of transboundary sources of Pb and Cd to the pollution of the region reaches 96%. The fluxes of heterogeneous atmospheric deposits are formed under the influence of local (mineral and biogenic) and transboundary (anthropogenic) sources.

Keywords: heterogeneous, atmospheric deposits, flux, heavy metals, rare earth elements

В условиях глобального взаимодействия геосфер происходит постоянный обмен веществ и энергии, в том числе поступление и осаждение из атмосферы частиц различного генезиса. Субмикронные гетерогенные вещества природного и техногенного про-

исхождения, взвешенные в атмосферном воздухе, переносятся при адвекции и осаждаются, в том числе с осадками. Количественное соотношение гетерогенного вещества зависит от физических, химических и других свойств атмосферы, времени года

и источника их поступления. В аридных зонах океанов, а также в контактных с ними гумидных областях атмосферные выпадения имеют важное, часто определяющее значение, а в арктических районах являются единственным источником седиментации [1]. Они являются одной из форм рассеяния веществ, которые поступают в водоемы и участвуют в процессах осадконакопления [2]. Атмосферные частицы выступают источниками разнообразных техногенных выпадений, оказывающих влияние на качество воздуха и на состояние экосистем [1, 3]. Данные о величинах потоков гетерогенных атмосферных выпадений важны для организации разнообразных геоэкологических исследований и мониторинга.

Важнейший параметр, определяющий направление переноса гетерогенного материала – общая циркуляция атмосферы. Над юго-восточной частью Балтийского моря преобладает западный перенос воздушных масс [4]. Так как береговая зона юго-восточной Балтики находится на пути трансграничного атмосферного переноса, помимо природных осадочных веществ в нее посту-

пает значительное количество сопутствующих антропогенных загрязнений, оказывающих негативное влияние на состояние экосистем. В исследуемой береговой зоне ведется активная хозяйственная деятельность, развиваются рекреация и туризм, однако исследований, посвященных изучению атмосферных выпадений, крайне мало. Поэтому изучение количества и состава поступающих атмосферных выпадений различного генезиса и определение их источников является весьма актуальным.

Цель исследования – выявление особенностей поступления, количественного распределения, вещественного и элементного состава атмосферных выпадений в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря.

Материалы и методы исследования

В период исследования с 2006 по 2019 г. на восьми точках отобраны и подвергнуты первичной обработке 274 пробы атмосферных выпадений, из них – 72 пробы нерастворимых выпадений в сухую погоду, 162 пробы дождевых осадков и 40 проб снега (рис. 1).



Рис. 1. Схема района исследования и расположения точек отбора проб:
1 – нерастворимых атмосферных выпадений в сухую погоду
и аккумуляруемых в снеговом покрове; 2 – дождевой водой

Для сбора всех типов атмосферных выпадений и лабораторных исследований применен комплекс методов [5, 1].

В лабораторных условиях все пробы фильтровались под вакуумом $-0,6$ атм через предварительно очищенные в 10% растворе соляной кислоты и взвешенные мембранные фильтры, ацетат-целлюлозные и стекловолоконные фильтры Whatman GF/F диаметром 47 мм с размером пор 0,45 мкм. После фильтрования фильтры высушивались и взвешивались на аналитических весах. Размерный и физический состав вещества, выделенного на фильтры, изучался методами сканирующей электронной микроскопии, на микроскопе JSM-U3 (Jeol, Japan) с ускоряющим напряжением в 25 кВ, рабочим вакуумом 5×10^{-5} мм рт. ст. и увеличением от 100х до 10000х и на микроскопе Vega 3 SEM (TESCAN) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором химического состава INCA Energy (Oxford Instruments Analytical), а элементный его состав – методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном спектрометре Agilent 7500 и атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС) на спектрофотометре «Квант-2А» в ИОРАН, г. Москва. Для оценки качества ИСП-МС и ААС анализа полученные результаты сопоставлялись с аттестованными значениями концентраций стандартов GSD-2, GSD-6 и GSD-7. Стандартные ошибки определения не превышали 15%.

Так же выполнено модельно-статистическое изучение гетерогенных атмосферных выпадений в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря. При использовании модели HYSPLIT4 и данных реанализа метеорологических элементов NCEP/NCAR, доступных на сайте <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>, получены массивы 5-суточных обратных траекторий переноса воздушных масс и сопутствующих примесей в регион исследования за 2006–2019 гг. для центральных месяцев сезона, а также отдельно для дат отбора проб с высоким содержанием тяжелых металлов Pb и Cd.

Поток Pb и Cd из атмосферы в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря рассчитывался на основании данных об элементном составе атмосферных выпадений, а также по методике [6] с использованием данных EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), доступных на сайте <https://www.ceip.at/>, об эмиссиях Pb и Cd в атмосферу с территории Европы.

Результаты исследования и их обсуждение

Количественный состав. Содержание нерастворимых атмосферных выпадений в сухую погоду в береговой зоне изменялось в диапазоне от 5,0 до 364,0 мг и составило в среднем 95,9 мг по 72 определениям, в дождевых осадках – от 1,2 до 10,4 мг/л, в среднем – 5,1 мг/л по 162 определениям и в снеговом покрове – от 2,3 до 12,7 мг/л и в среднем – 6,7 мг/л по 40 определениям. Значимых межгодовых колебаний в содержании нерастворимых атмосферных выпадений разных типов не выявлено.

На основании данных о концентрации были рассчитаны значения потоков гетерогенных атмосферных выпадений в береговой зоне (табл. 1). Основное количество материала поступает в теплый период года в результате сухого осаждения (в среднем $66,5 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) и вымывания дождевыми осадками (в среднем $37,3 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$). В зимний период поток выпадений сокращается до $2,7 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. По многолетним (2006–2019 гг.) данным величина потока атмосферных выпадений в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря составила в среднем $36 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, или $13 \text{ г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [7].

Вещественный состав. Атмосферные выпадения в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря состоят из частиц естественного (литогенная и биогенная компоненты) и антропогенного происхождения, пелитово-алевритовой размерности (1–100 мкм).

Нерастворимые атмосферные выпадения в сухую погоду на 90% представлены частицами естественного происхождения, преимущественно биогенными (пыльца, споры, растительные волокна и др.). Литогенная компонента выпадений встречается в виде отдельных минеральных частиц размером 5–30 мкм. Антропогенная составляющая практически отсутствует и представлена редкими скоплениями сажи и пепла. В составе дождевых осадков выявлена сезонная изменчивость. В весенне-летний сезон преобладает естественная составляющая, порядка 80%, в виде биогенных (пыльца, споры, органический детрит, растительные волокна, отдельные диатомовые микроводоросли) и минеральных частиц алевритовой размерности (10–50 мкм), а в осенний порядка 60%, антропогенная (сажа, в том числе в виде гладких сфер сгорания различного элементного состава, пористые частицы пепла). В снеговом покрове доминирует, до 70%, антропогенная компонента (пористые частицы летучих пеплов, сажа, с преобладанием Ti, рис. 2).

Таблица 1

Значения потоков гетерогенных атмосферных выпадений
в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря в 2006–2019 гг.

| Год | Количество проб | Величина потока, мг м ⁻² сут ⁻¹ | | |
|------|-----------------|---|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Снеговой покров | Дождевые осадки | В сухую погоду |
| 2006 | 14 | $\frac{1,9 (n-5)^*}{1,0-2,6}$ | – | $\frac{42,7 (n-9)}{19,7-76,2}$ |
| 2008 | 22 | – | $\frac{36,7 (n-13)}{7,3-98,7}$ | $\frac{41,2 (n-9)}{16,4-107,7}$ |
| 2009 | 25 | $\frac{1,7 (n-5)}{1,2-2,3}$ | $\frac{34,2 (n-11)}{8,1-75,0}$ | $\frac{57,2 (n-9)}{8,4-127,7}$ |
| 2010 | 22 | $\frac{2,9 (n-5)}{2,4-3,1}$ | $\frac{60,1 (n-8)}{12,8-121,2}$ | $\frac{130,2 (n-9)}{5,6-291,2}$ |
| 2011 | 23 | $\frac{3,0 (n-5)}{2,1-3,9}$ | $\frac{31,3 (n-9)}{7,3-77,5}$ | $\frac{95,2 (n-9)}{4,4-201,7}$ |
| 2012 | 14 | $\frac{1,6 (n-5)}{1,1-2,1}$ | $\frac{35,3 (n-9)}{13,6-70,5}$ | – |
| 2013 | 22 | $\frac{3,4 (n-3)}{2,5-4,5}$ | $\frac{38,1 (n-10)}{5,8-90,0}$ | $\frac{70,2 (n-9)}{10,4-157,7}$ |
| 2014 | 21 | $\frac{1,6 (n-3)}{1,3-2,0}$ | $\frac{22,9 (n-9)}{10,7-82,9}$ | $\frac{62,9 (n-9)}{4,0-129,6}$ |
| 2015 | 19 | – | $\frac{42,5 (n-10)}{21,4-72,6}$ | $\frac{32,8 (n-9)}{20,1-51,2}$ |
| 2016 | 19 | $\frac{3,2 (n-3)}{2,0-4,1}$ | $\frac{30,4 (n-16)}{24,7-66,2}$ | – |
| 2017 | 27 | $\frac{5,0 (n-3)}{4,2-5,9}$ | $\frac{43,8 (n-24)}{36,4-91,2}$ | – |
| 2018 | 16 | $\frac{2,8 (n-3)}{2,1-3,3}$ | $\frac{35,1 (n-13)}{10,7-83,9}$ | – |
| 2019 | 30 | – | $\frac{37,6 (n-30)}{13,1-82,6}$ | – |

*n – количество определений; числитель – среднее значение, знаменатель – диапазон.

В меньшем количестве присутствуют минеральные частицы, представленные комплексом минералов (кремнезем (кварц), силикаты и алюмосиликаты (циркон, гранаты, пироксены, гидрослюда (глауконит), полевые шпаты (плагиоклаз)). Биогенные частицы снегового покрова отличаются большим разнообразием диатомовых микроводорослей (солонатоводные (*Nitzschia frigida* Grunow, *Melosira arctica* Dickie и др.), пресноводные (*Stephanodiscus hantzschii* Grun., *Cocconeis* sp., *Asterionella formosa* Hassall, *Aulacoseira* sp., *Anomoeoneis sphaerophora* E.Pfitzer, *Navicula* sp.) диатомеи и морские планктонные диатомовые рода *Thalassiosira*) [8].

Элементный состав. В составе нерастворимых атмосферных выпадений дождевых осадков в береговой зоне Самбийского п-ва (точка 6, 7) и на Балтийской косе (точка 8) в 2008, 2009, 2012 и 2013 гг. проанализировано содержание Fe, Mn, Cu, Ni и Zn.

Закономерности межгодовых изменений содержания Mn, Cu, Ni и Zn не выявлено, однако отмечается неравномерность их пространственного распределения. Так, максимальные содержания Mn (2200 мкг/г) и Zn (8100 мкг/г) зафиксированы на Самбийском п-ве в 2008 г., а Cu (2500 мкг/г) и Ni (110 мкг/г) – на Балтийской косе в 2009 г. При этом максимальные среднегодовые значения Zn (1443 мкг/г), Ni (90 мкг/г) в 2009 г. и Cu (1610 мкг/г) в 2012 г. выявлены на Балтийской косе, а Mn (1335 мкг/г) в 2008 г. на Самбийском п-ове.

Наиболее широкий спектр элементов, включая все токсичные тяжелые металлы, а также редкоземельные элементы (РЗЭ), был изучен в твердом веществе дождей 2017 и 2019 гг. Данные о содержании тяжелых металлов в нерастворимых выпадениях дождя 2017 и 2019 гг. представлены в табл. 2.

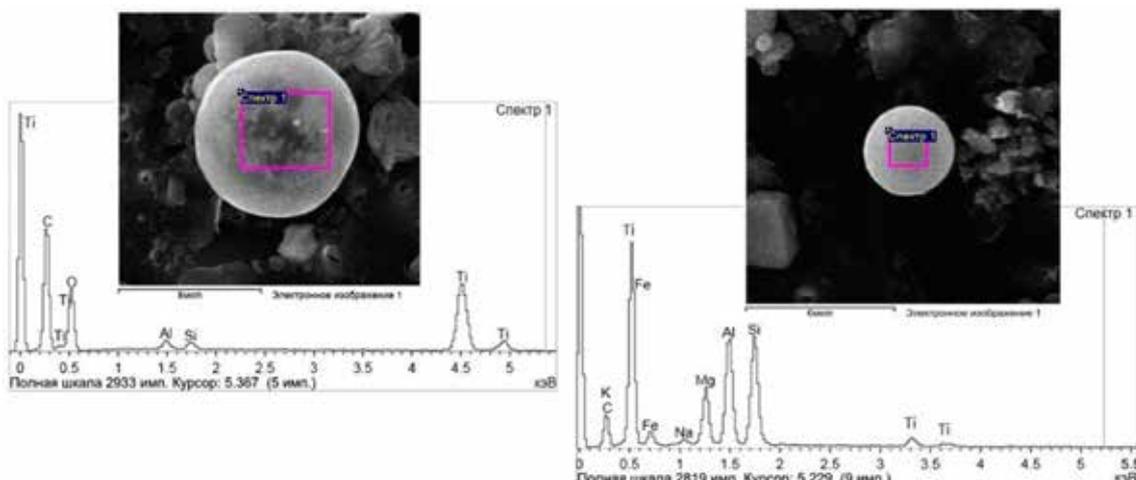


Рис. 2. Элементный состав сажи в виде гладких сфер сгорания в снеговом покрове

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в нерастворимых выпадениях
дождевых осадков в 2017 г. (n = 17) и 2019 г. (n = 11), мкг/г

| Элемент | Самбийский п-ов | | Балтийская коса | |
|---------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 2017 г. | 2019 г. | 2017 г. | 2019 г. |
| | Ср. ± Ст. откл. (М) | Ср. ± Ст. откл. (М) | Ср. ± Ст. откл. (М) | Ср. ± Ст. откл. (М) |
| Li | 8,2±4,0 (6,9) | 7,5±5,2 (6,2) | 8,6±5,8 (9,7) | 10±6,8 (8,5) |
| Be | 0,6±0,4 (0,6) | – | 0,8±0,5 (0,7) | – |
| Al | 12988,2±6752,9 (10419,9) | 8762,3±7031,1 (6204,1) | 9377,8±10040,3 (4862,2) | 12162,4±9011,2 (8371,9) |
| Sc | 3,5±1,9 (2,5) | 1,6±1,6 (0,8) | 7,2±4,5 (5,5) | 2,1±1,8 (1,2) |
| Ti | 1464,9±595,9 (1454,7) | 758,1±472,8 (558,9) | 1024,1±998,8 (440,9) | 1339,3±1131,8 (1042,5) |
| V | 47,8±33,2 (55,8) | 17,3±12,8 (10) | 36,1±29,2 (33) | 21,8±14,4 (15,6) |
| Cr | 89,0±61,4 (59,4) | 32,6±15,8 (30,3) | 61,8±27,8 (56,7) | 70,3±52,2 (62,5) |
| Mn | 162,4±92,6 (125,8) | 231,9±224 (194,5) | 204,1±168,3 (120) | 310,5±290,7 (171,5) |
| Co | 8,3±4,5 (6,2) | 4,9±3,7 (3,8) | 5,3±5,7 (2,8) | 5,4±4,2 (3,7) |
| Ni | 83,1±57,7 (70) | 73,9±84 (56,3) | 116,7±47,1 (119) | 89,8±61,7 (86,7) |
| Cu | 330,5±254,4 (227,5) | 81,6±39,7 (89,8) | 631±693 (317) | 209,4±267,4 (120,5) |
| Zn | 1250,3±1471,5 (711,5) | 438±401 (369,3) | 1908,3±1469,6 (1451,6) | 825,3±775,7 (610,7) |
| Ga | 4,6±2,4 (3,6) | 3,2±2,5 (2) | 4,4±4 (2,4) | 4,4±3,2 (3,3) |
| As | 38,8±38,9 (16,3) | 3,9±2,4 (3) | 13,2±11,8 (10,1) | 6,1±5,2 (4,9) |
| Rb | 22,9±9,8 (21,7) | 29,4±14,3 (32,2) | 16,9±14,7 (11) | 15,3±15,5 (10,2) |
| Sr | 71,5±51,2 (45,5) | 34±23,3 (29,8) | 122,8±125,9 (68,2) | 58,8±42,3 (49,1) |
| Mo | – | 1,5±1 (0,9) | 4,1±1,3 (4) | 2,5±1,9 (2,3) |
| Cd | 26,3±58,1 (16) | 3,7±3,5 (2,2) | 17,7±21 (7) | 5,5±6,8 (2,9) |
| Cs | 1,2±0,4 (1,1) | 0,7±0,8 (0,6) | 1,5±0,5 (1,6) | 0,9±0,8 (0,6) |
| Ba | 311,6±309,3 (184) | 93,9±86,7 (56) | 169,6±227,4 (77,2) | 160,5±119,2 (122,6) |
| W | – | 1,7±1,9 (1,1) | – | 2±1,9 (1,5) |
| Tl | 0,3±0,2 (0,2) | 0,5±0,2 (0,6) | 0,2±0,1 (0,1) | 0,2±0,1 (0,1) |
| Pb | 189,9±146,5 (140) | 73,3±36,8 (66) | 125,4±83,9 (117,8) | 151,2±157,3 (110,1) |
| Bi | 1±0,6 (0,9) | 0,7±0,5 (0,4) | 0,9±0,7 (0,8) | 1,1±0,9 (0,8) |

Ср. ± Ст. откл. (М) – среднее ± стандартное отклонение (медиана).

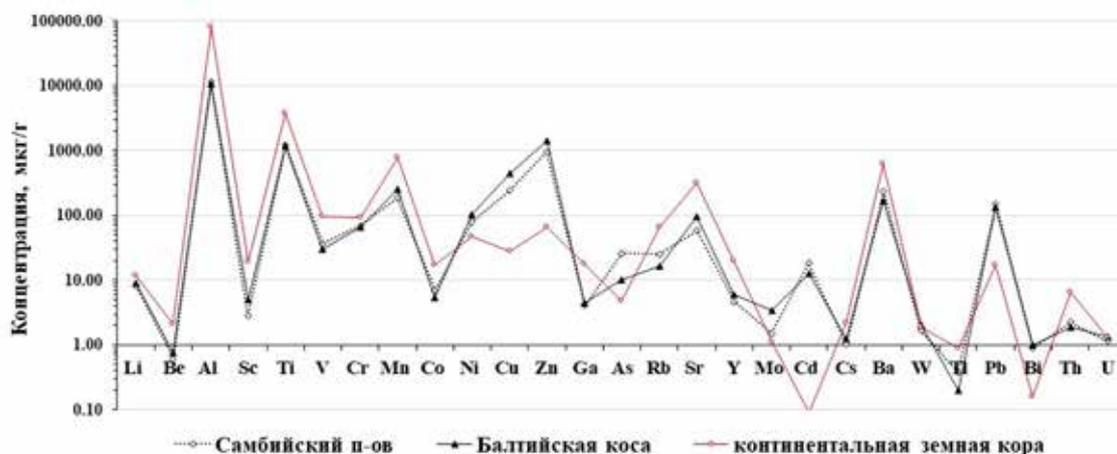


Рис. 3. Среднее содержание элементов в нерастворимых выпадениях дождевых осадков береговой зоны и в верхнем слое континентальной земной коры

Наибольшие среднегодовые значения Li, Be, Sc, Mn, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Cs выявлены на Балтийской косе в 2017 г., а Al, Ti, V, Cr, Co, Ga, As, Rb, Cd, Ba, Tl, Pb, Bi – в дождевых осадках береговой зоны Самбийского п-ова. Однако в 2019 г. среднегодовые значения уже всех элементов (за исключением Rb и Tl) были выше на Балтийской косе.

Сопоставление полученных средних концентраций микроэлементов в нерастворимых выпадениях дождевых осадков со средним содержанием в земной коре [9] выявило повышенное содержание Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, Bi и более низкое – Li, Be, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ga, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, Tl и радиоактивных Th и U, относительно их кларковых значений (рис. 3).

Межгодовые значения коэффициента концентрации радиоактивных U/Th в нерастворимых выпадениях дождевых осадков изменяются в диапазоне от 0,46 до 0,81 и в среднем составляют 0,60, что в среднем в 2,5 раза превышает их коэффициент концентрации в верхней континентальной коре, равный 0,26.

Для выявления вклада антропогенного или природного источника формирования элементного состава нерастворимых выпадений дождевых осадков были более детально изучены редкоземельные элементы (La-Lu) [10]. Данные о среднем содержании легких (ЛРЗЭ) от лантана до европия (La-Eu) и тяжелых (ТРЗЭ) от гадолиния до лютеция (Gd-Lu) редкоземельных элементов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Содержание и распределение РЗЭ (мкг/г) в нерастворимых выпадениях дождевых осадков ($n = 28$)

| ЛРЗЭ | | ТРЗЭ | |
|-----------|------------------|---------|-----------------|
| Элемент | *Ср. ± Ст. откл. | Элемент | Ср. ± Ст. откл. |
| La | 8,65 ± 1,89 | Gd | 1,81 ± 0,25 |
| Ce | 16,99 ± 3,53 | Tb | 0,19 ± 0,01 |
| Pr | 1,89 ± 0,41 | Dy | 1,08 ± 0,38 |
| Nd | 7,49 ± 0,24 | Ho | 0,24 ± 0,04 |
| Sm | 1,24 ± 0,97 | Er | 2,02 ± 0,32 |
| Eu | 0,33 ± 0,02 | Tm | 0,33 ± 0,03 |
| | | Yb | 0,54 ± 0,23 |
| | | Lu | 0,27 ± 0,01 |
| ΣЛРЗЭ | 36,59 | ΣТРЗЭ | 6,48 |
| ЛРЗЭ/ТРЗЭ | | | 5,65 |

*Ср. ± Ст. откл. – средняя концентрация (± Стандартное отклонение)

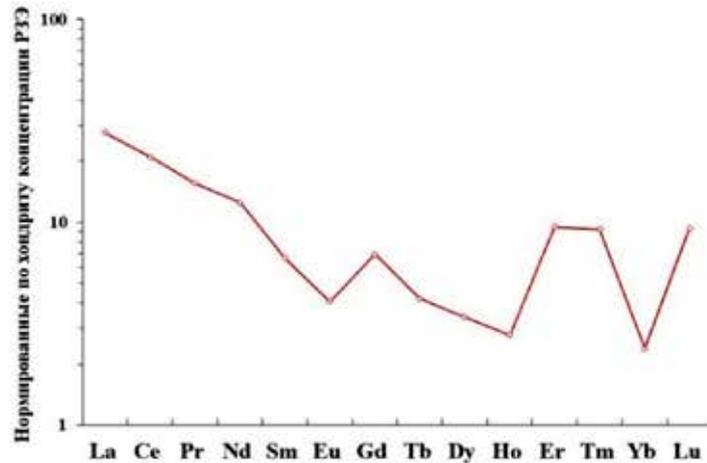


Рис. 4. Нормированный по хондриту состав РЗЭ в нерастворимых выпадениях дождевых осадков

Для распределения РЗЭ в нерастворимых выпадениях дождевых осадков характерно их обогащение ЛРЗЭ по отношению к ТРЗЭ. Среднее содержание ТРЗЭ составляет 15% от суммы редкоземельных элементов.

Для детального изучения изменений состава РЗЭ при экзогенных процессах, полученные данные о их содержании в нерастворимых выпадениях дождевых осадков были нормализованы по хондриту (рис. 4) [11].

Для нормированных образцов РЗЭ также характерно увеличение содержания ЛРЗЭ по отношению к ТРЗЭ. Однако при нормировании выявлено незначительное обогащение РЗЭ гадолинием, эрбием, тулием и лютецием, относящихся к ТРЗЭ. Степень накопления ЛРЗЭ по отношению к значению La_n/Sm_n составляет в среднем 4,16, в то время как для ТРЗЭ Gd_n/Yb_n – 2,90. То есть отмечается преобладание РЗЭ цериевой группы (La_n/Yb_n – 11,59).

Европейская аномалия (Eu/Eu^*) была рассчитана по формуле [12]:

$$Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n + Gd_n) \times 2. \quad (1)$$

В составе РЗЭ нерастворимой компоненты дождевых осадков выявлена отрицательная аномалия европия, ее значения варьируют от 0,30 до 0,91, со средним – 0,59. Что, в совокупности с соотношением ЛРЗЭ/ТРЗЭ, указывает на отсутствие антропогенного влияния на состав и распределение РЗЭ в нерастворимых выпадениях дождевых осадков береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря.

Роль различных источников тяжелых металлов в формировании элементного состава нерастворимых выпадений дождевых осад-

ков береговой зоны оценена путем расчета их коэффициентов обогащения (KO) относительно состава верхней части континентальной земной коры [9] по формуле:

$$KO = (\text{Эл}/Ga) \text{ проба} / (\text{Эл}/Ga) \text{ земная кора}, \quad (2)$$

где $(\text{Эл}/Ga)$ проба – отношение содержаний элемента и галлия в пробе, $(\text{Эл}/Ga)$ земная кора – отношение содержаний элемента и галлия в верхней части континентальной земной коры. Элемент Ga использовался как индикатор литогенного источника вещества.

Расчет KO для дождевых осадков всей береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря представлен на рис. 5.

Высокие значения $KO (> 10)$ подтверждают ведущую роль антропогенных источников в поставке тяжелых металлов Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, и Bi в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря. А низкое содержание литогенных элементов Al (KO в среднем равен 0,6) и Fe (KO в среднем равен 1,6) в нерастворимых выпадениях дождевых осадков береговой зоны указывает на преобладание в их составе биогенного материала.

Проведен статистический анализ полученных данных об элементном составе дождевых осадков береговой зоны и выполнена группировка элементов по степени их корреляционной связи. Выделены две группы:

1) РЗЭ – La, Ce, Pr, Nd, Sm, Tb, Dy ($R = 0,86-0,98$) и Yb, Th, Ga, Ba, Y, Co, Al, Be и Li ($R > 0,74$). Значимая корреляционная взаимосвязь между данными элементами указывает на общий источник, вероятно терригенный, их поступления, а также на общность химических и токсикологических параметров Y и РЗЭ.

2) Объединены антропогенные элементы Cd, Zn, As, Mo ($R = 0,96$) и Pb ($R = 0,73-0,89$), Bi ($R = 0,40-0,65$). Вероятными источниками большинства выделенных во вторую группу элементов являются: теплоэнергетика (Mo, As, Bi), автотранспорт (Pb, Cd, Zn, Bi) [13] и сельскохозяйственная деятельность, а именно выветривание удобрений (фосфорсодержащих (Zn, As, Pb, Cd), калийных (прежде всего, Mo) и азотных (As, Cd, Mo, Pb)) [14].

Элементный состав атмосферных выпадений, накапливающихся в снеговом покрове береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря подробно описан в работе [8].

Потоки Pb и Cd в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря. Потоки тяжелых металлов (Pb, Cd) вычислялись на основании натуральных данных об их содержании в нерастворимых выпадениях дождевыми осадками и в снеговом покрове. Для сравнения потоки Pb и Cd также были рассчитаны с использованием базы ЕМЕР и модели HYSPLIT. Анализ среднесезонных вариаций содержания Pb и Cd в дождевых осадках и в снеговом покрове выявил, что наибольшее их количество поступает в летний период года (рис. 6).

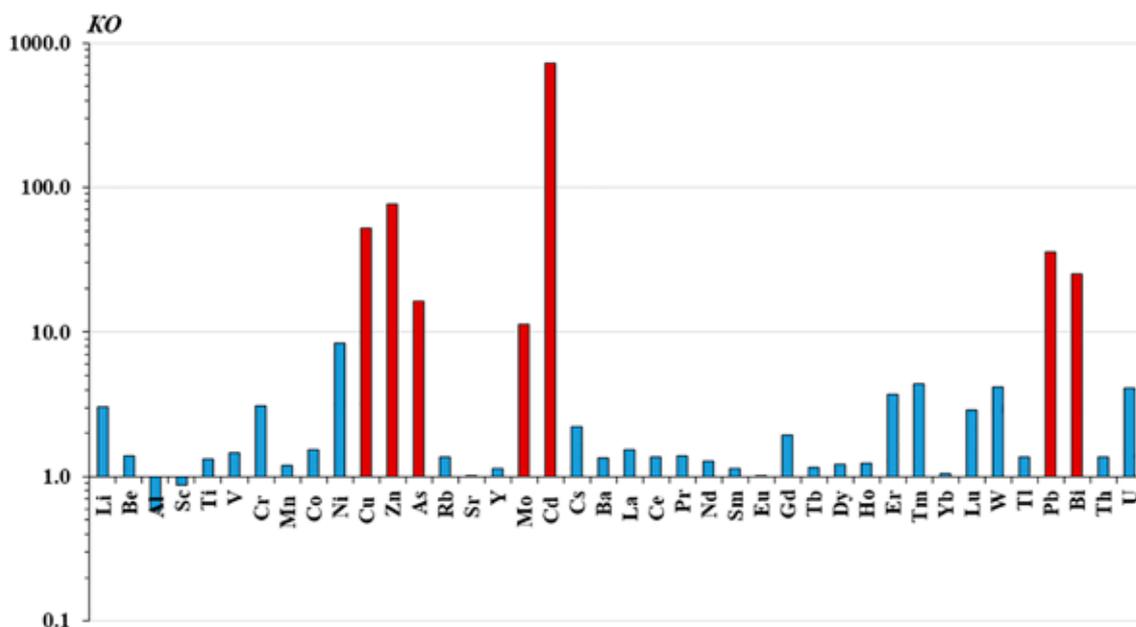


Рис. 5. Средние значения коэффициентов обогащения элементами дождевых осадков береговой зоны (красным цветом выделены элементы преимущественно антропогенного происхождения)

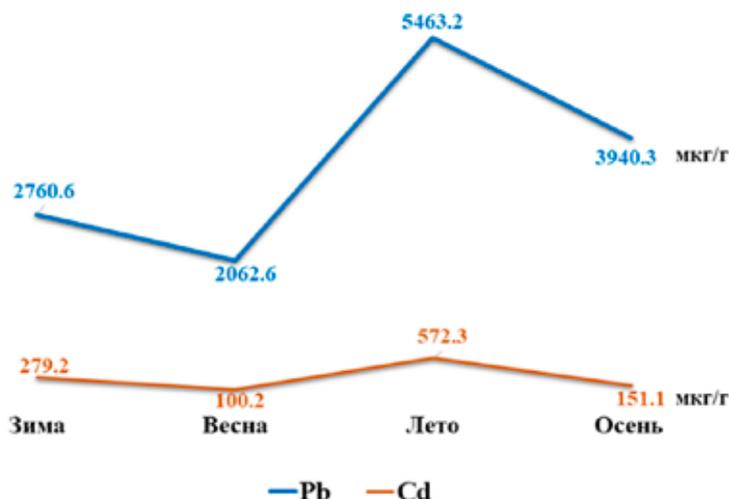


Рис. 6. Среднесезонные вариации содержания Pb и Cd в нерастворимых выпадениях дождевых осадков и снега береговой зоны

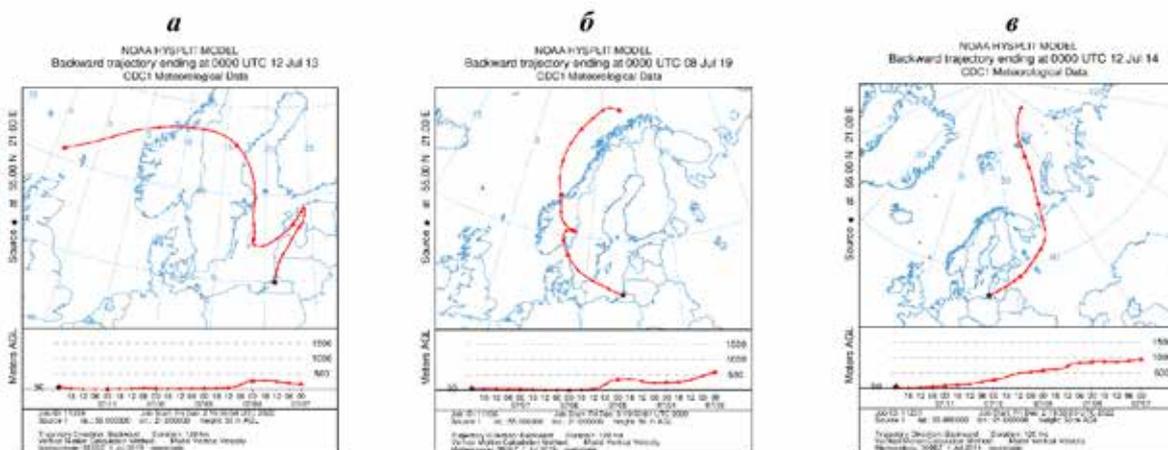


Рис. 7. Траектории переноса воздушных масс в точку отбора проб дождевых осадков с наименьшими концентрациями Pb (б, в) и Cd (а, в)

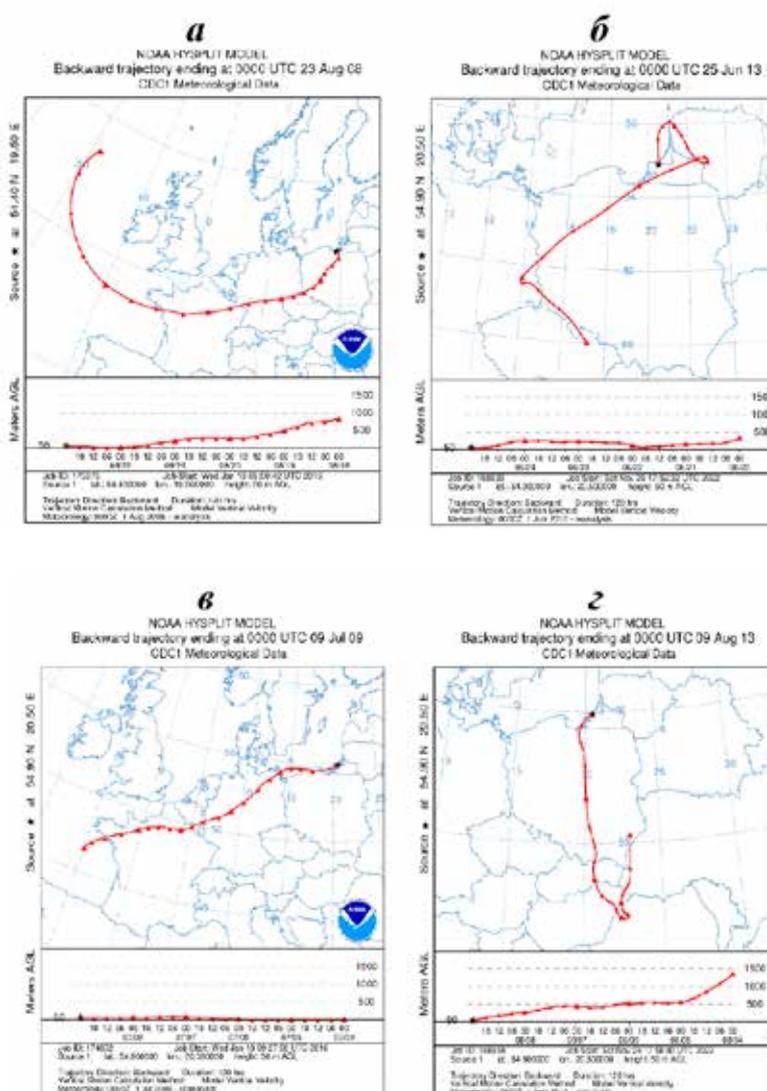


Рис. 8. Траектории переноса воздушных масс в точку отбора проб дождевых осадков с наибольшими концентрациями Pb (а, б) и Cd (в, г)

Для дат отбора проб летних дождевых осадков с наименьшими и наибольшими концентрациями Pb и Cd были рассчитаны 5-суточные обратные траектории с использованием программы HYSPLIT (рис. 7 и 8).

В периоды выпадения дождевых осадков с наименьшими концентрациями Pb и Cd воздушные массы в основном поступали с северо-запада и северо-востока.

В периоды дождевых осадков с наибольшими концентрациями Pb и Cd преобладал западный и юго-западный перенос воздушных масс над промышленно развитыми странами Западной Европы.

На основании натуральных данных о поступлении Pb и Cd рассчитаны значения их потоков. Среднесезонные изменения значений потоков Pb и Cd представлены в табл. 4.

Таблица 4

Среднесезонные вариации потоков Pb и Cd в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря

| Тяжелые металлы | Поток мкг м ⁻² мес ⁻¹ | | | |
|-----------------|---|---------|----------|--------|
| | Зима | Весна | Лето | Осень |
| Pb | 289,51 | 1129,08 | 10941,12 | 862,16 |
| Cd | 29,53 | 105,91 | 636,16 | 53,02 |

Наиболее высокие значения потоков Pb и Cd выявлены в летний период, а наиболее низкие – в зимний. То есть отмечается более эффективное выведение рассматриваемых тяжелых металлов из атмосферы с дождевыми осадками, по сравнению с их накоплением в снеговом покрове. Среднегодовой поток в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря для Pb составляет 39665,61 мкг м⁻² год⁻¹, и для Cd – 2473,86 мкг м⁻² год⁻¹ или 3,9 кг км⁻² год⁻¹ для Pb и 0,02 кг км⁻² год⁻¹ для Cd.

Расчетные данные. Наибольшие значения концентрации Pb и Cd в атмосфере над регионом исследования обнаружены в зимний период. Вклад трансграничного переноса Pb и Cd в загрязнение атмосферного воздуха значительно превышает влияние выбросов локальных источников. В значениях потоков тяжелых металлов по сравнению с их концентрацией в атмосфере наблюдается иная сезонная зависимость. Наибольшие значения трансграничного и локального потоков Pb и Cd отмечаются в летний период. При этом осенью потоки тяжелых металлов наиболее низкие. Среднегодовой общий (трансграничный + локальный) поток в регионе за 2006–2019 гг. для Pb составляет 3,5 кг км⁻² год⁻¹ и для Cd –

0,03 кг км⁻² год⁻¹. Следовательно, вклад трансграничных источников Pb и Cd в загрязнение региона составляет 96 %.

Сопоставление натуральных и расчетных данных. При сравнении значений потоков тяжелых металлов (Pb, Cd), полученных по натурным и расчетным данным, выявлено их сезонное сходство. Полученные натурные данные о межсезонных потоках вполне согласуются с их расчетными величинами, занимая при этом некое промежуточное значение. Сопоставление значения среднегодового общего (трансграничный + локальный) потока Pb, составляющего 3,5 кг км⁻² год⁻¹ (расчетные данные), со среднегодовым его потоком 3,9 кг км⁻² год⁻¹ (натурные данные), выявило превышение его величины потока, рассчитанного на основании натуральных данных на 12 %, относительно его значения, рассчитанного по базе ЕМЕР.

Величина потока Pb существенно превышает его фоновые показатели (1,86 кг км⁻² год⁻¹ Pb), установленные для всего северо-западного региона России [15]. Различий в значении среднегодовых потоков Cd практически не выявлено. Его значения, полученные по расчетным данным, в 1,5 раза выше показателя, рассчитанного по натурным данным, и намного меньше его фоновых показателей (0,12 кг км⁻² год⁻¹ Cd), принятых для всей территории России [15].

Заключение

Установлено, что атмосферные выпадения в береговой зоне состоят из частиц естественного и антропогенного происхождения, пелитово-алевритовой размерности (1–100 мкм). В дождевых осадках в весенне-летний сезон преобладает естественная составляющая, а в осенний – антропогенная. В снеговом покрове доминирует антропогенная компонента. Количественные показатели (концентрация, поток) гетерогенных атмосферных выпадений характеризуются отчетливо выраженной сезонной изменчивостью, достигая наиболее высоких значений к концу лета. Антропогенный поток тяжелых металлов (Cu, Zn, As, Cd, Pb, Bi) формируют дождевые и снеговые выпадения. Поток редкоземельных элементов в основном обусловлен их включенностью в обменные процессы литогенеза. Выявлены значимые корреляционные связи между химическими элементами в составе атмосферных выпадений дождевых осадков, а также выполнена их кластеризация. Взаимосвязь элементов, выделенных в группы, объясняется сходством их геохимических

параметров и совокупностью их происхождения. Основные потоки атмосферных выпадений в исследуемом регионе формируются под влиянием локальных (минеральный и биогенный) и трансграничных (антропогенный) источников поступления. Величина среднегодового потока Рb, полученная по натурным данным, на 12% превышает его значения, рассчитанные по базе ЕМЕР. Потоки кадмия в регионе незначительны. Вклад трансграничных источников Рb и Cd в загрязнение региона достигает 96%. Наибольший вклад в загрязнение береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря вносит летний трансграничный атмосферный перенос тяжелых металлов.

Авторы благодарны докт. геол.-минерал. наук Е.В. Краснову за ценные советы и замечания.

Список литературы

1. Шевченко В.П. Аэрозоли и морские льды, их роль в полярном седиментогенезе в Арктике // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: материалы 7-го Всероссийского литологического совещания. 2013. С. 277–280.
2. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Под ред. Л.И. Лобковского и Р.И. Нигматулина. М.: Научный мир. 2014. С. 331–571.
3. Цыро С.Г. Исследование свойств аэрозольных частиц в атмосфере Европы с помощью региональной модели их формирования, трансформации и дальнего переноса // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 45–59.
4. Стонт Ж.И. Современные тенденции изменчивости гидрометеорологических параметров в юго-восточной части Балтийского моря и их отражение в прибрежных процессах: дис. ... канд. геогр. наук. АО ИО РАН. Калининград, 2014. 165 с.
5. Чечко В.А., Курченко В.Ю. Методы исследований эолового материала в береговой зоне юго-восточной Балтики // Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов. Труды международной конференции. Новосибирск, 2009. С. 175–180.
6. Виноградова А.А., Котова Е.И. Оценка потоков тяжелых металлов из атмосферы на поверхность // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 63–67.
7. Топчая В.Ю., Чечко В.А. Потоки вещества из атмосферы в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. С. 194–199. DOI: 10.17513/use.36825.
8. Topchaya V.Yu., Chechko V.A. Study of insoluble atmospheric material of the snow cover of the coastal zone of the southeastern Baltic Sea. Regional Studies in Marine Science. Elsevier. 2022. Vol. 52. P. 102399. DOI: 10.1016/J.RSMA.2022.102399.
9. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry. The crust. Amsterdam: Elsevier. 2003. Vol. 3. P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
10. Sojka M., Siepak M. & Pietrewicz K. Concentration of rare Earth elements in surface water and bottom sediments in Lake Wadag, Poland. J. Elem. 2019. № 24. P. 125–140. DOI: 10.5601/jelem.2018.23.2.1648.
11. Boynton W.V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies, in Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry, Henderson P. ed. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
12. Sharayu K., Rajamanickam M., Hideki A., Tatsuo A., Sarata K.S.A. Microwave Digestion Technique for the Analysis of Rare Earth Elements, Thorium and Uranium in Geochemical Certified Reference Materials and Soils by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. Molecule. 2020. № 25. P. 51–78. DOI: 10.3390/molecules25215178.
13. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 3. С. 14–22.
14. Янин Е.П. Подходы к оценке интенсивности и опасности техногенного загрязнения городских почв химическими элементами // Экологическая экспертиза. Обзор. инф. ВИНТИ РАН. 2021. № 2. С. 66–105.
15. Ивлев Л.С. Свойства аэрозолей и аэрозолеобразующих примесей нижней атмосферы в Ленинградской области // Биосфера. 2015. Т. 7. № 4. С. 403–414.

СТАТЬИ

УДК 550.831:681

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭТАЛОННОГО ТЕЛА
ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ**

Васильев П.С.

*ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск,
e-mail: psvasiliev1461@mail.ru*

Территориальный и природно-ресурсный потенциал России пропорционален разнообразию видов полезных ископаемых, в первую очередь топливно-энергетических и минеральных ресурсов. Скорость и успешность освоения последних напрямую зависят от развития технологий геофизических методов поисков и разведки. Совершенствование и повышение эффективности указанных методов стоит отнести к актуальным задачам настоящего времени. Даже с появлением высокопроизводительных вычислительных инструментов вопросы ускорения и уменьшения объема используемой вычислительной машины памяти стоят во главе угла. Актуальность темы статьи обоснована сокращением объема математических вычислений при интерпретации гравитационных аномалий путем применения известных методик интерпретации исходных аномалий. В настоящей статье продолжено научное исследование по ранее опубликованным автором работам, связанным со способами интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с применением взаимно-обратных функций, высокочувствительных к формам источников потенциальных полей. Разработано приложение теоретических методик интерпретации потенциальных аномалий, которые были рассмотрены профессором С.А. Серкером в трудах о корреляционных, спектральных, потенциальных методах анализа в грави- и магниторазведке. В статье описаны разработанные двухмерные способы интерпретации гравимагнитных аномалий, чувствительные к форме источников полей, с применением заданного эталонного тела. Рассматриваются способы интерпретации аномалий с упором на наиболее часто применяемые в практических экспериментах эталонные тела: бесконечную горизонтальную материальную линию или горизонтальный круговой цилиндр, также известный в технической литературе под термином «магнитная однополюсная линия»; бесконечную горизонтальную материальную полосу, или горизонтальную заряженную полосу; бесконечную вертикальную материальную полосу, или вертикальную заряженную полосу. Нужно отметить, что, помимо применения заданного эталонного тела, методика указанных в статье способов основывается на применении значений взаимно-обратных функций исходных гравитационных и магнитных аномалий.

Ключевые слова: гравитационные и магнитные аномалии, взаимно-обратная функция, нормированные значения аномалий, вертикальная или горизонтальная производная, чувствительность к форме тела, эталонное тело

**APPLICATION OF A CAUSATIVE BODY REFERENCE
FOR THE INTERPRETATION OF GRAVITY AND MAGNETIC ANOMALIES**

Vasilev P.S.

*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk,
e-mail: psvasiliev1461@mail.ru*

The territorial and natural resource potential of Russia is proportional to the diversity of minerals types, primarily fuel, energy and mineral resources. The speed and success of the development of the latter directly depends on the technologies for geophysical methods of prospecting and exploration. Improving and increasing the efficiency of these methods should be attributed to the actual tasks of the present. Even with the advent of high-performance computing tools, issues of accelerating and reducing the amount of memory used by a computer are at the forefront. The relevance of the paper topic is substantiated by the reduction in the amount of mathematical calculations in the interpretation of gravity anomalies by applying the well-known methodologies for interpreting the initial anomalies. This paper continues the scientific research on previously published by the author works related to methods of interpreting gravitational and magnetic anomalies using mutually inverse functions that are highly sensitive to the forms of potential field sources. An application of theoretical methods for interpreting potential anomalies has been developed, which were considered by Professor S.A. Serkerov in his works on correlation, spectral, and potential methods of analysis in gravity and magnetic exploration. The paper describes the developed two-dimensional methods for interpreting gravitational and magnetic anomalies, sensitive to the shape of field sources, using a given causative body. Methods for interpreting anomalies are considered with an emphasis on the most commonly used causative bodies in practical experiments: an infinite horizontal material line or a horizontal circular cylinder, also known in the technical literature under the term magnetic unipolar line; an endless horizontal material strip, or a horizontal charged strip; an infinite vertical material strip, or a vertical charged strip. It should be noted that in addition to using a given reference body, the methodology of the methods indicated in the article is based on the use of the values of mutually inverse functions of the initial gravitational and magnetic anomalies.

Keywords: gravitational and magnetic anomalies, mutually inverse functions, normalized anomaly values, vertical or horizontal derivative, solid shape sensitivity, causative body reference

Процесс извлечения данных из результатов полевых гравитационных и магнитных наблюдений и экспериментов весьма трудоемок. Современные приборы способ-

ны обеспечивать высокую точность определения значений исследуемых свойств и параметров пород. Но теория гравиразведки, а именно интерпретации потенциальных

полей, не вполне успевает за развитием техники [1]. Данные, полученные с приборов, представляют собой набор карт и графиков, содержащих материал о составе, свойствах пород и геологическом строении исследуемого участка. Стоит отметить, что указанные наборы данных сами по себе нельзя назвать полной геологической информацией. После получения наборов данных начинается процесс интерпретации, состоящей из аналитических и синтетических процедур. Интерпретация геофизических полей позволяет выяснить природу аномалий, связать аномалии с геологическими процессами, которые, в свою очередь, привели к образованию наблюдаемых объектов. Также интерпретация аномалий позволяет определить размеры и глубины залегания источников [2]. Автором предлагается аналитический метод, основанный на математических методах обработки данных [3, 4]. Разработанный метод позволяет сократить объемы математических вычислений, тем самым решить упомянутую проблему отставания теории гравиразведки от возможностей современной аппаратуры [1]. На основе существующей теоретической базы о гравитационном и магнитном потенциалах можно утверждать, что процесс интерпретации гравитационной или магнитной аномалии более эффективен при анализе исходного поля совместно с производными: горизонтальными, вертикальными, первого или второго порядков. Природа источников аномалии может быть различной в зависимости от физических свойств, например намагниченности, глубины залегания, формы, размеров тел. Обратная задача гравиразведки решается для уточнения геологического строения разреза пород [5]. Определение формы эталонного тела перед началом процесса интерпретации оптимизирует и значительно уменьшает неоднозначность решения обратной задачи гравиразведки. Однозначное решение обратной задачи возможно в некоторых случаях, когда фактор одновременного влияния нескольких источников гравитационных аномалий исключается из математических расчетов [6], например в случае, если определяются параметры уступа на поверхности слоя пород или известна избыточная плотность рельефа местности. В данной работе рассматривается способ применения эталонного тела для повышения однозначности решения обратной задачи в сложных геологических средах и получения достоверной информации о местоположении источников аномального поля.

Цель исследования – анализ возможностей применения эталонного тела для решения обратной задачи магниторазведки и гравиразведки.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования применяется физико-геологическая модель нефтеносной структуры, приведенная в работе [7] профессора С.А. Серкерова. Для совершенствования существующих методов интерпретации аномалий силы тяжести разработаны двумерные способы интерпретации гравимагнитных аномалий, чувствительных к форме источников полей. Ниже рассмотрены разработанные способы, в которых используются значения взаимно-обратных функций нормированных аномалий – значения горизонтальных координат X_a , X'_a , определяемые равенствами:

$$X_a = f(V_Z(x)_H), \quad (1)$$

$$X'_a = g(V_{XZ}(x)_H), \quad (2)$$

где $V_Z(x)_H$, $V_{XZ}(x)_H$ – нормированные значения гравитационной аномалии и ее первой производной. На рисунках 1а, 1б представлены графики изменений упомянутых значений:

$$C_2 = X_{ГП} / X_{МЛ} \text{ и } C_2 = X_{ВП} / X_{МЛ}, \quad (3)$$

где $X_{ГП}$, $X_{ВП}$, $X_{МЛ}$ – значения взаимно-обратных функций X_a бесконечных горизонтальной, вертикальной полос и материальной линии, рассчитанных из формул, приведенных в [4] при различных значениях a .

Параметры кривых: значения l / h и $\Delta h / h$, где l – ширина полосы, h – глубина залегания; $\Delta h = h_2 - h_1$ где h_1 и h_2 – глубины залегания верхней и нижней кромок полосы. Кривые с параметрами 0 в обоих графиках соответствуют случаю, когда интерпретируемая кривая является аномалией от тела той же формы, что и эталонное, а именно от бесконечной горизонтальной материальной линии. Указанные кривые во всех точках принимают постоянное значение, равное 1.

Сравним графики, представленные на рисунках 2а, 2б. Изменение значений C_2 для аномалий от бесконечных материальных горизонтальных и вертикальных полос имеют разные формы: в первом случае они являются возрастающими, во втором – убывающими. Этот признак, то есть разные формы кривых, позволяет относительно легко определить формы тела, а затем и их параметры l / h и $\Delta h / h_1$ (по той же методике, что и по кривым C_1) [4].

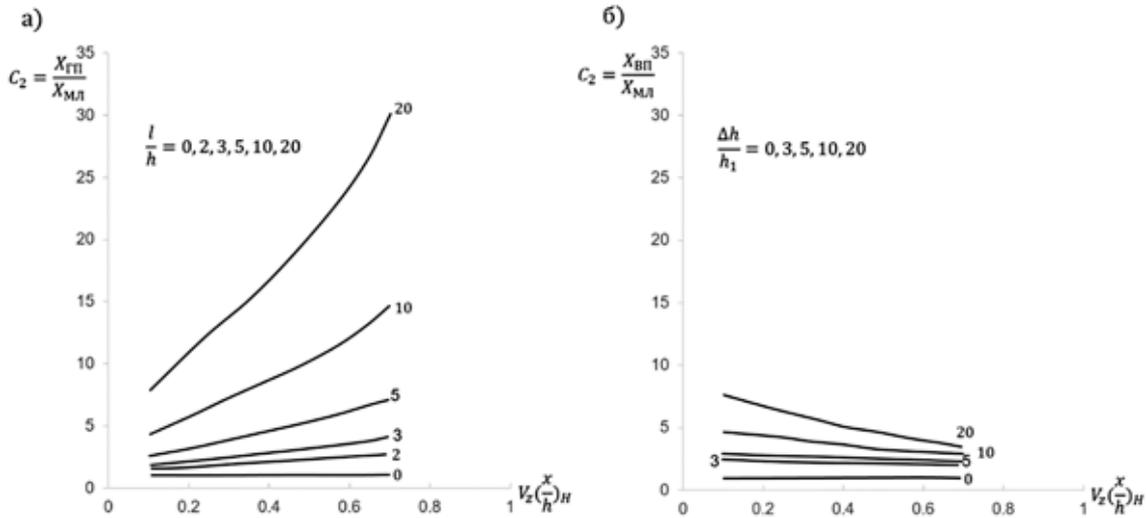


Рис. 1. кривые C_2 : а – бесконечная горизонтальная полоса; б – бесконечная вертикальная полоса

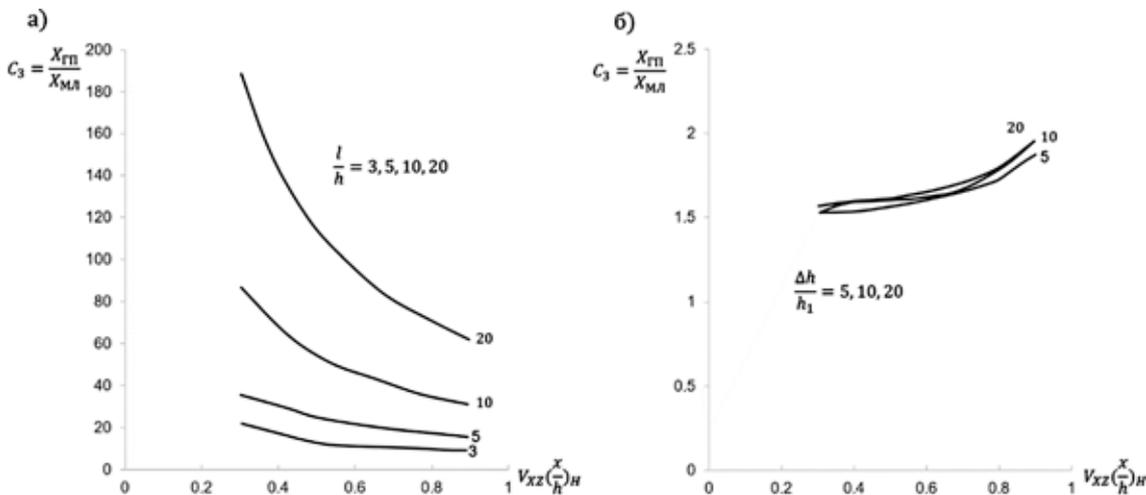


Рис. 2. Кривые C_3 : а – горизонтальная полоса; б – вертикальная полоса

На рисунке 2 приведены кривые изменения значений функции:

$$C_3 = X'_{ГП} / X'_{МЛ} \text{ и } C_3 = X'_{ВП} / X'_{МЛ} \quad (4)$$

(случаи а, б соответственно)

где $X'_{ГП}$, $X'_{ВП}$, $X'_{МЛ}$ – рассчитанные в статье [4] значения взаимно-обратных функций для нормированной горизонтальной производной исходной аномалии V_{xz} , см. формулу (2). В этом случае кривые для разных аномалий (случаи а, б) отличаются разной формой, что также можно использовать для определения формы тела. Параметрами кривых также являются отношения l/h и $\Delta h/h_1$.

По кривым рисунка 2а можно легко определить параметры l/h . В случае, представленном на рисунке 2б, параметр $\Delta h/h_1$ можно определить только в благоприятных случаях, поскольку кривые, соответствующие разным параметрам, мало отличаются друг от друга.

В случае применения эталонного тела нужно знать также нормированные значения аномалий. Для нахождения аномалий определяется глубина залегания указанного эталонного тела. В соответствии с ранее выполненными автором расчетами [4], глубина залегания полосы определяется значениями h и h_1 , которые можно получить посредством спектральных способов, из-

ложенных в работе [7], например по угловому коэффициенту асимптоты, проведенной к точкам $\ln|S(\omega)|$ в области высоких частот, где $S(\omega)$ – спектр аномалии. Зная h или h_1 , можно определить $V_Z(x)_H$ по следующей формуле:

$$V_Z(x)_H = h^2 / (h^2 + x^2), \quad (5)$$

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Разработанные аналитические способы позволяют интерпретировать аномалию силы тяжести от нефтегазоносной структуры. Рассмотрим пример, представленный на рисунке 3.

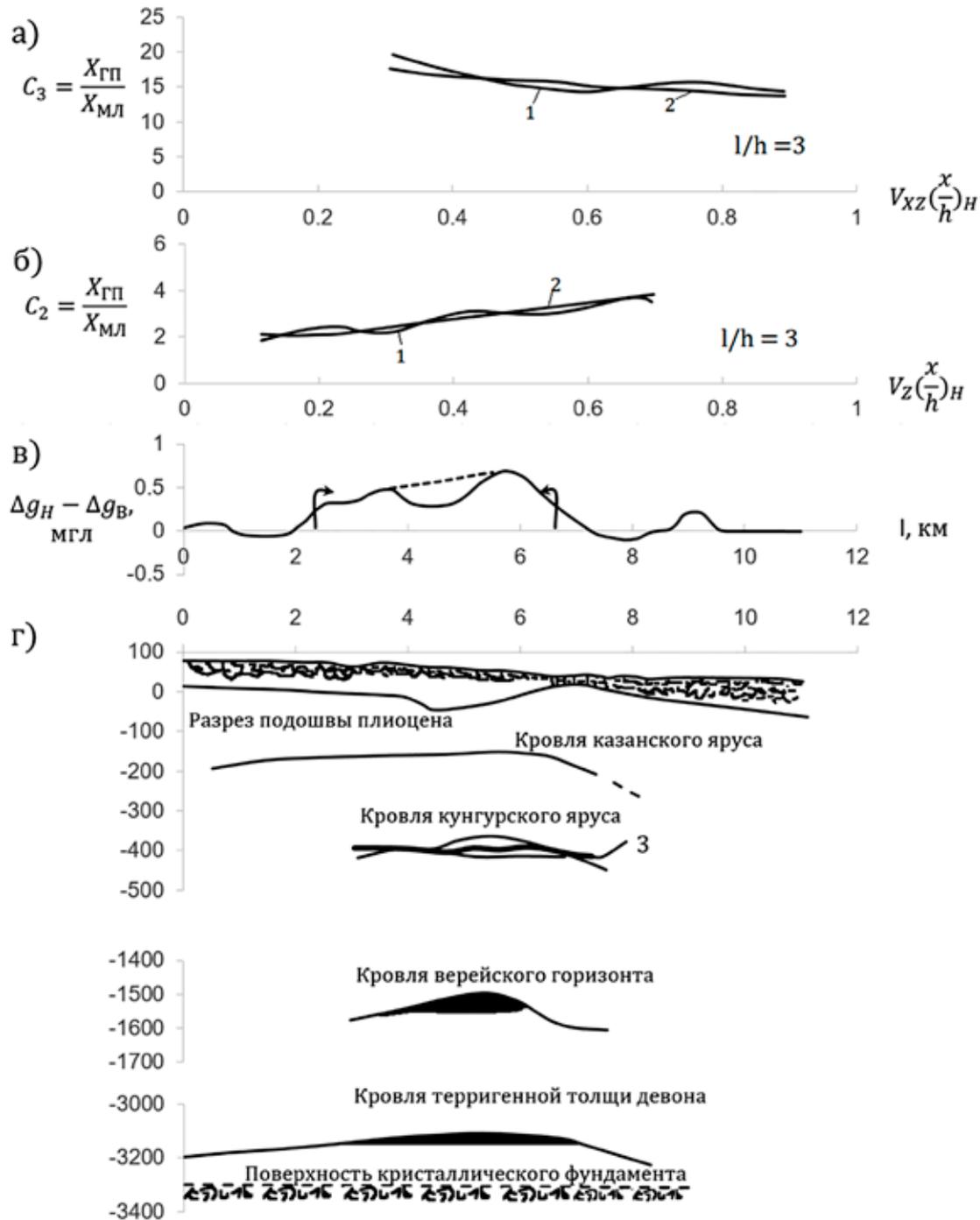


Рис. 3. Интерпретация гравитационной аномалии

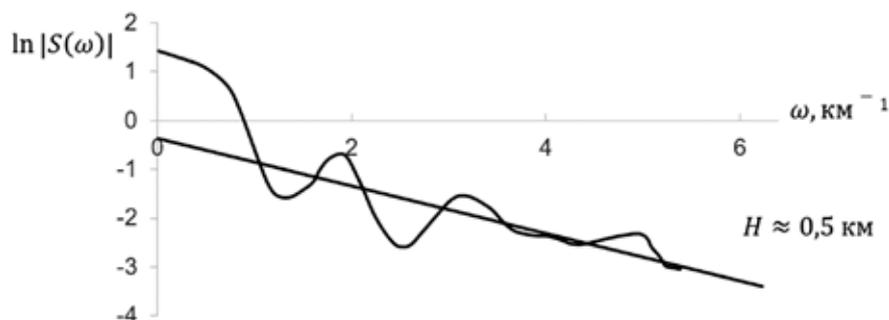


Рис. 4. График $\ln|S(\omega)|$ аномалии силы тяжести

На рисунке 3в представлена кривая остаточной аномалии нефтегазоносной структуры. Поверхностные неоднородности представлены здесь пунктирной линией. По этой кривой были найдены значения первой производной аномалии V_{xz} . Кривые V_z и V_{xz} были нормированы, после чего определены значения горизонтальных координат X_a и X'_a . По этим значениям были построены кривые C_2 и C_3 , представленные на рисунках 3а и 3б (кривые под цифрами 1 и 2). Эти кривые по своим формам подходят к кривым рисунка 1а и рисунка 2а. Следовательно, рассматриваемую аномалию можно аппроксимировать бесконечной горизонтальной полосой. Кривые, обозначенные цифрами 1 и 2, на обоих графиках лучше всего совпадают с линиями, соответствующими параметру $l/h = 3$.

Значения h можно определить из графика $\ln|S(\omega)|$ (рис. 4) или из выражений для горизонтальной полосы:

$$X_3 = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(l^2 - h^2) + 2\sqrt{l^2 + l^2 h^2 + h^4}} \quad (6)$$

$$= \pm \frac{h}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\left(\frac{l}{h}\right)^2 - 1\right) + 2\sqrt{\left(\frac{l}{h}\right)^4 + \left(\frac{l}{h}\right)^2 + 1}}$$

где X_3 – абсциссы экстремумов V_{xz} , $X_{1/2}$ – абсциссы точек с координатой, равной $1/2\Delta g_{\max}$.

Для рассматриваемого примера $X_3 = 1,3$ км найдена из графика $(V_{xz})_H$, а из (6) $X_3 = 3h$, откуда $h \approx 0,43$ км, $2l = 2X_3 = 2,6$ км. Аномалия силы тяжести подходит для аппроксимации. Возникновение указанной аномалии вызвано бесконечной горизонтальной полосой. Ширина полосы – $2l = 2h \approx 2,6$ км; глубина залегания – $h = 0,43$ км. Вернемся

к рассмотрению рисунка 3. Цифра 1 отмечает интерпретацию посредством метода хорд. Интерпретированная аномалия также связана с горизонтальной полосой. В качестве параметров можно привести глубину залегания полосы – $h = 0,42$ км и ширину полосы – $2l = 3,3$ км. На рисунке 3г представлена схема залегания пород, по оси абсцисс – ширина полосы в километрах, по оси ординат – глубина залегания. Под цифрой 3 на указанном рисунке обозначается аномальное тело, интерпретированное с применением предложенного метода. Результат интерпретации соответствует глубине и горизонтальным размерам залегания пород кунгурского яруса.

Заключение

Методы гравиразведки и магниторазведки особенно важны при поисках месторождений полезных ископаемых. Представлен способ совершенствования существующих методов анализа и интерпретации. Отличительной чертой разработанных способов интерпретации гравимагнитных аномалий является высокая чувствительность к форме источников. Указанная особенность, в первую очередь, позволяет определить форму тел, что расширяет возможности интерпретации, затем их параметры. Это стало возможным посредством взаимно-обратных функций нормированных аномалий и заданного эталонного тела. Необходимо отметить эффективность применения предложенных методов интерпретации на практических материалах, показывающих гравитационное поле нефтегазоносных структур. Представленный результат интерпретации аномалии поля соответствует породам кунгурского яруса, но стоит отметить, что данный метод подходит также и для других источников гравитационных полей.

Список литературы

1. Балк П.И. Аддитивные технологии количественной интерпретации гравитационных аномалий // Геофизика. 2016. № 1. С. 43-47.
2. Sindirgi P., Ozyalin S. Estimating the location of a causative body from a self-potential anomaly using 2D and 3D normalized full gradient and Euler deconvolution. Turkish Journal of Earth Sciences. 2019. V. 28. P. 640-659.
3. Васильев П.С., Серкерев С.А. Способ интерпретации гравимагнитных аномалий с применением взаимнообратных функций нормированных гравимагнитных аномалий // Ученые записки. Серия: Строительство. Горное дело. Геофизика. 1994. С. 70-77.
4. Васильев П.С. О способах интерпретации, высокочувствительных к форме источников потенциальных полей // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2021. №3 (23). С. 66-72.
5. Долгаль А.С. Аддитивные технологии локализации источников геопотенциальных полей // Вестник Пермского университета. 2019. Том 18. № 4. С. 380-385.
6. Петрищевский А.М. Три образа мышления и три подхода к интерпретации гравитационных аномалий // Региональные проблемы. 2014. Том 17. № 2. С. 5-17.
7. Серкерев С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке. М.: Издательство "Недра", 1986. 247 с.

УДК 504:630:581.5:574

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ «ТАТНЕФТЬ»

¹Галимуллин А.Ф., ²Бахтеев К.Р.

¹ООО «Гафэль», Богатые Сабы, Республика Татарстан, e-mail: 1@gafel.ru;

²Индивидуальный предприниматель, Казань, e-mail: kam.rav@bk.ru

В статье поднимаются актуальные вопросы, связанные с ролью лесов в компенсации углеродного следа в условиях перехода мировой экономики к углеродному регулированию и декарбонизации. Отмечается особая значимость проблемы сохранения лесов в России; рассматриваются меры, предпринимаемые на уровне государства и крупных компаний, направленные на ее решение и обеспечение баланса «выбывтия и воспроизводства лесов» с учетом естественных и техногенных факторов, определяющих оптимальный уровень лесистости в различных регионах страны. Особое внимание уделено опыту отечественной нефтяной компании ПАО «Татнефть» по разработке и успешному внедрению климатических проектов по искусственному лесовосстановлению, которая вносит свой ощутимый вклад в реализацию регионального проекта «Сохранение лесов в Республике Татарстан» в рамках федерального проекта «Сохранение лесов» национального проекта «Экология» и содействия национальному проекту «Образование». Дается подробное описание проекта искусственного лесовосстановления на территории двух районов РТ с использованием нового подхода к проектированию земельных участков на основе плантационной посадки селекционного материала с применением возможностей цифровой платформы для повышения эффективности искусственного лесовосстановления в регионе.

Ключевые слова: леса, лесистость, выбросы парниковых газов и CO₂ в атмосферу, поглощающая способность лесов, углеродный след, лесовосстановление

INCREASING THE EFFICIENCY OF FOREST REGENERATION AS AN ELEMENT OF THE SUSTAINABLE LOW-CARBON DEVELOPMENT STRATEGY OF TATNEFT OIL COMPANY

¹Galimullin A.F., ²Bakhteev K.R.

¹Gafel LLC, Bogatye Saby, Republic of Tatarstan, e-mail: 1@gafel.ru;

²Individual Entrepreneur, Kazan, e-mail: kam.rav@bk.ru

The article raises topical issues related to the role of forests in compensating the carbon footprint in the context of the transition of the world economy to carbon regulation and decarbonization. The special importance of the problem of forest conservation in Russia is noted; the measures taken at the level of the state and large companies, aimed at its solution and ensuring the balance of “forest retirement and reproduction” with regard to natural and man-made factors that determine the optimal level of forest cover in different regions of the country, are considered. Particular attention is paid to the experience of a domestic oil company – Tatneft PJSC – on the development and successful implementation of climate projects for artificial reforestation, which makes a tangible contribution to the regional project “Conservation of forests in the Republic of Tatarstan” in the federal project “Forest Conservation” national project “Ecology” and promoting the national project “Education”. A detailed description of the project of artificial afforestation on the territory of two districts of RT using a new approach to the design of land plots based on plantation planting of breeding material using the capabilities of a digital platform to improve the effectiveness of artificial reforestation in the region is given.

Keywords: forests, forest cover, emissions of greenhouse gases and CO₂ into the atmosphere, absorptive capacity of forests, carbon footprint, reforestation

Леса, занимающие треть суши (около 4 млрд га) на нашей планете, являются одной из важнейших экосистем, оказывающих существенное влияние на климатические и биологические процессы. Более половины (54%) лесов мира приходится всего на пять стран: Российскую Федерацию, Бразилию, Канаду, Соединенные Штаты Америки и Китай. Около 20% от всех лесов мира находится на территории России. Более 90% российских лесов сконцентрированы в районах Сибири и Дальнего Востока. При этом есть регионы (например, Республика Калмыкия, Москва), где уровень

лесистости (т.е. отношение покрытой лесом площади к общей площади их территории) составляет менее 1%. Прежде всего, эти особенности обусловлены физико-географическими, климатическими и почвенными условиями, способствующими лесообразовательному процессу. Существуют факторы, действующие в противовес созидательному процессу леса, – это естественные причины (насекомые-вредители, ураганные ветры, переувлажнение, заболачивание и т.п.), а также антропогенные факторы, т.е. вызванные непосредственно деятельностью человека (отторжение лесных земель

под строительство различных объектов, рубка лесов, малоэффективное естественное и искусственное возобновление леса, выпас скота и т.п.). Наиболее значимым техногенным фактором воздействия на лесные экосистемы является атмосферное загрязнение промышленными выбросами. Различие между ростом насаждений в аналогичных природно-климатических условиях, в пределах зоны выраженного техногенного воздействия, и насаждений вне этой зоны отражает комплексное воздействие на леса. Поэтому лесистость варьирует в различных регионах в больших пределах, и оптимальный уровень для каждого из них свой, главным индикатором оптимальности является наиболее полное выполнение лесами своих основных функций: экологической, социальной и сырьевой.

Леса – это возобновляемый ресурс, но и они истощаются. Как свидетельствуют результаты исследований, опубликованные ФАО ООН в докладе «Глобальная оценка лесных ресурсов – 2020», во всем мире площадь лесов за последние 30 лет сократилась на 178 млн га. Только в результате обезлесения, в том числе из-за вырубки лесов, в ряде стран Африки (Демократическая Республика Конго, Ангола, Танзания, Мозамбик), Южной Америки (Бразилия, Боливия, Парагвай), Юго-Восточной Азии (Мьянма, Камбоджа) и Индонезии с 1990 г. площадь мировых лесов сократилась на 420 млн га. Потери лесов в мире частично компенсируются их увеличением за счет лесонасаждения и естественного распространения лесов, например, в таких европейских странах, как Франция, Италия, Румыния, а также в Китае, Индии, Вьетнаме, США и ряде других стран [1]. В восстановлении утраченного лесного покрова бесспорным лидером является Китай. Если в целом в мире лесной покров сокращается ежегодно примерно на 6 млн га, то в Китае он ежегодно увеличивается на 4 млн га [2]. Что касается Европы в целом, то из-за повышенного спроса на древесину и участвовавших пожаров состав ее лесов значительно изменился, к тому же уменьшилась их способность поглощать углекислый газ.

В России из-за интенсивно вырубаемых хвойных древостоев, лесных пожаров, насекомых-вредителей и болезней в лесосырьевых базах в период с 1990 по 2000 г. площадь лесов сократилась на 3,1%; чистое ее сокращение составляло 8,5 млн га в год. Однако, как отмечают эксперты «Рослесинфорга», невосполнимого сокращения площади ле-

сов в России не происходит. Как показывают данные, имеющиеся в открытом доступе, за последние 10 лет площадь лесов увеличилась на 4,3 млн га [3]. Основные факторы роста: включение заброшенных и заросших сельхозземель в состав лесфонда; снижение законных и незаконных рубок, а также реализация в рамках национального проекта «Экология» федерального проекта «Сохранение лесов». В частности, только с 2019 г., когда этот проект стартовал, ежегодная площадь лесовосстановления увеличилась на 26%. В 2021 г. площадь лесовосстановительных работ превысила 1,2 млн га.

Поскольку леса одновременно являются и источником, и поглотителем двуокиси углерода (CO_2), то прекращение процесса обезлесения позволяет избежать прямых выбросов в результате потери биомассы, а также сохранить способность лесов поглощать углерод, содействовать устойчивости к внешним факторам и поддерживать устойчивые источники средств к существованию. Особую значимость проблема сохранения лесов и лесовосстановления в России получила после ратификации ею в сентябре 2019 г. Парижского соглашения по климату, принятому 189 странами и ЕС в 2015 г., а также после объявления Западом «зеленой» повестки путем декарбонизации энергетики и мировой экономики с целью достижения углеродной нейтральности – баланса выбросов CO_2 и его поглощения на определенной территории. Начиная с 2023 г. ЕС планировала ввести трансграничный углеродный налог на импортную продукцию с большими выбросами парниковых газов (ПГ), что для России, где 42% экспорта приходится на компании, выпускающие наиболее углеродоемкую продукцию, последствия таких нововведений могут быть весьма ощутимыми. Конечно, с февраля 2022 г., из-за известных событий, ситуация кардинально изменилась. Однако, несмотря на нынешнюю политическую напряженность и снижение взаимодействия с Европой из-за ввода санкций, климатическая повестка остается актуальной, поскольку для России в целом и для крупного бизнеса, особенно энергетического, в частности важными рынка сбыта остаются Индия и Китай, где эти нормы уже внедрили. Поэтому Россия активно включилась в данный процесс как на уровне государства в целом, устанавливая таргетируемые на национальном уровне цели устойчивого развития (ЦУР) и цели по климату на краткой и среднесрочную перспективу (до 2030 г.),

так и на уровне крупных углеродоемких компаний, которых обязали предоставлять отчетность не только о своих финансовых показателях, но производить расчет углеродоемкости производимой продукции, сравнивать этот показатель с европейскими конкурентами, чтобы на основании этого анализа оценить потенциал сокращения углеродного следа, в том числе с точки зрения возможных проектов по энергосбережению, по работе с качеством сырья, которое используется в технологических процессах.

В условиях существующих регуляторных рисков, увеличения числа иностранных бирж, инвесторов и партнеров, которые отказываются от сотрудничества с компаниями, имеющими плохие углеродные характеристики, крупные компании проявляют повышенный интерес к климатическим проблемам, а также готовность заниматься выращиванием и сохранением леса, поскольку за счет роста его поглотительной способности можно компенсировать углеродный след, создав таким образом дополнительный фактор конкурентоспособности экспортной продукции на внешних рынках. При этом есть компании, которые традиционно уделяют достаточно внимания вопросам охраны окружающей среды, противодействия изменению климата и перехода на углеродную нейтральность. Ярким примером тому является крупнейшая нефтяная компания «Татнефть», накопившая достаточный опыт эффективного лесовосстановления на территории Республики Татарстан.

Цель исследования – использование нового подхода к проектированию земельных участков путем плантационной посадки селекционного материала с применением возможностей цифровой платформы для повышения эффективности искусственного лесовосстановления в регионе.

Материалы и методы исследования

Исследование построено на анализе опыта искусственного лесовосстановления в РТ, применении методов обобщения, наблюдения, сравнения, расчетно-конструктивного, а также геоинформационных технологий.

Результаты исследования и их обсуждение

Республика Татарстан (РТ) характеризуется крайне низкой лесистостью (17%) для своей природной зоны. По данным Министерства лесного хозяйства РТ, в 2019 г. площадь выбытия лесов в результате сплошной

вырубки спелых, перестойных насаждений и сплошной санитарной вырубки составляла 2496 га, площадь погибших лесных насаждений – 167 га [4]. В 2022 г. поставлена задача осуществить посадку лесных культур на площади 1,4 тыс. га, естественное лесовосстановление – на 2,1 тыс. га, комбинированное лесовосстановление – 4 га и лесоразведение – 104 га. Главная цель, обозначенная в рамках реализации регионального проекта «Сохранение лесов в Республике Татарстан» федерального проекта «Сохранение лесов» национального проекта «Экология», – обеспечение баланса «выбытия и воспроизводства лесов в соотношении 100% к 2024 г.» [5].

Тренд на решение поставленных задач в республике задают крупные компании, а флагманом выступает крупнейшая нефтяная компания «Татнефть», для которой посадка лесов за счет их поглощающей способности является одним из ключевых компенсирующих мероприятий по снижению углеродного следа. Уже с 2013 г. здесь реализуется проект «Лес от АЗС», по которому определенная часть выручки от продажи топлива на заправках компании тратится на посадку зеленых насаждений. Высаживаются не только деревья хвойных (сосна, ель) и лиственных (дуб, тополь, плодовые деревья) пород, но и кустарники. За период с 2013 по 2019 г. рознично-сбытовые предприятия этой компании посадили около 8 млн саженцев, в 2020 г. – 2 млн деревьев. С 2021 г. восстановление лесов осуществляется Благотворительным фондом «Татнефть». Всего в 2021 г. на территории РТ было высажено 7,8 млн саженцев на площади в 4 000 га [6].

Для культивирования бережного отношения к природе среди подрастающего поколения в рамках содействия национальному проекту «Образование» на протяжении уже более четырех лет компания «Татнефть» вкладывает значительные средства в реализацию инновационного образовательного проекта по созданию современных биологических классов и лабораторий в школах РТ, который реализуется АНО «Академия цифрового творчества» под эгидой Благотворительного фонда «Татнефть». Сегодня на базе школ, расположенных в «нефтяной республике» Татарстана – Альметьевске и четырех муниципальных районах РТ (Альметьевском, Азнакаевском, Лениногорском и Ютазинском), функционируют 8 биологических лабораторий (5 из них находятся в сельской местности) и 2 теплицы. Числен-

ность школьников, участвующих в проекте с 2019 г., составила более 500 чел., и с каждым годом уровень вовлеченности детей в данный процесс только увеличивается.

Все лаборатории оснащены современными методами и технологиями для работы в области микрочлониального размножения растений в условиях *in vitro*. Здесь выполняется более 33 различных работ, в том числе:

- изучение технологии культуры *in vitro*;
- фитопатологический анализ семян древесных растений;
- исследование кислотности почвы;
- выявление различия строений клеток.

После размножения растения отправляются в собственные теплицы для дальнейшей адаптации к почве и окружающей среде.

Основная цель функционирования школьных биолaborаторий в РТ – формирование экологической культуры, вовлечение школьников в работу по восстановлению природного биоразнообразия за счет создания посадочного материала для озеленения территорий городов и районов, а также лесопосадочного материала, что во многом способствует практическому улучшению состояния окружающей среды в регионе. При этом в выигрыше остаются и сами школы, получающие возможность заработать, и компания «Татнефть», приобретающая необходимое количество саженцев для своих программ по более низким ценам.

На сегодняшний день в лабораториях выращивают различные породы деревьев, кустарников и цветов, но акцент делается на осине триплоидной из-за особенностей, помогающих восстановлению экосистем, нарушенных промышленностью. Прежде всего, эта осина отличается от обычной тем, что имеет три полных набора хромосом, экземпляры которых были найдены в лесах Татарстана. Благодаря этому триплоидная осина обладает такими свойствами, как бóльшая гнилеустойчивость, высокая степень поглощаемости углекислого газа (CO_2) и выработки кислорода. Учитывая, что антропогенная эмиссия CO_2 , как в России в целом, так и в Республике Татарстан, в первую очередь связана с деятельностью предприятий энергетического сектора, посадка триплоидной осины, как хорошего поглотителя CO_2 , является для компании «Татнефть» наиболее предпочтительной [7]. Так, в преддверии Дня эколога на участке под Альметьевском работниками компании «Татнефть» было высажено 1 тыс. саженцев триплоидной осины, выращенных в этих школьных биолaborаториях.

Успешному выполнению «Татнефтью» своих «лесных» программ на территории республики во многом способствует поддержка компанией частных IT-стартапов, в числе которых стартап по разработке цифровой платформы (ЦП) «GafelUrman», основателями которого являются авторы данной статьи. Проект был запущен в 2021 г. Данная платформа позволяет объединить на единой площадке всех участников деятельности в сфере компенсационного лесовосстановления и лесоразведения (предприятия – эмитенты CO_2 , поставщики посадочного материала и сопутствующих услуг, поставщики кадастровых услуг и т.п.), осуществлять автоматическое сопровождение всех этапов бизнес-процессов участников, а также мониторинг за состоянием лесопосадок: от селекционного отбора до выращивания саженцев лесных культур хвойных и лиственных пород на протяжении всего жизненного цикла лесных насаждений, вплоть до их переработки. В частности, функционал ЦП «GafelUrman» дает возможность в онлайн-формате рассчитывать выбросы парниковых газов и формировать заявки на лесовосстановление; подбирать посадочный материал, землю для посадки и подрядчиков; заключать договоры и согласовывать нюансы; отслеживать исполнение обязательств участников. Кроме того, платформа предоставляет возможность для научных коммуникаций с целью обмена знаниями, внедрения результатов научных разработок с привлечением частных инвестиций, сокращая тем самым период от появления научной идеи до ее практической реализации, в том числе с использованием потенциала участников платформы [7, 8].

За 2021 г., в том числе благодаря использованию возможностей и услуг, предоставляемых ЦП «GafelUrman», на территории РТ были произведены работы на площади около 900 га и посажены деревья хвойных (сосна, ель, пихта) и лиственных (триплоидная осина, береза) пород. Значительная часть саженцев триплоидной осины была выращена в селекционном центре Сабинского лесхоза (РТ). Посадка осуществлялась плотностью 2000–4000 саженцев на 1 га, что соответствует традиционно рекомендуемой норме (2000 шт./га).

Как показывает практика, при традиционной посадке подростов плотностью 2000 шт./га саженцы, как правило, бывают мелкими; в процессе роста большинство из них погибают. Для повышения эффективности лесовосстановления в регионе в 2022 г. «Акаде-

мией цифрового творчества» инициирована научно-исследовательская работа по искусственному лесовосстановлению на площадях в 250 га с использованием нового подхода к проектированию земельных участков: посадка осуществляется плантационно, плотность посадки подроста – 400 шт./га, высота саженцев – 1,5 м.

Проект осуществляется на договорной основе. Все работы производятся в полном соответствии с его техническим заданием. Планируемый период реализации – два года. Выделенные под посадку земельные участки находятся на территории двух районов – Азнакаевском (на юго-востоке РТ) и Сармановском (в восточной части РТ). В первом районе посадка запланирована на 2022 г., во втором – на 2023 г.

Согласно ТЗ проекта технологическая схема создания лесных культур включает выбор породы, определение схемы смешения и метод создания плантаций. В качестве основной лесной древесной породы, соответствующей лесорастительным условиям выделенных для посадки участков, выбрана триплоидная осина. Отбор растений-доноров осуществлялся в лесах Азнакаевского и Сармановского районов республики. Саженцы для посадки были выращены методом микроклонального размножения в условиях *in vitro* в школьных биолaborаториях.

Основу проекта составляет схема смешения, которая показывает пространственное размещение чистых культур триплоидной осины по отношению друг к другу, их количество и порядок размещения на площади. Подготовка почвы в виде борозд под посадку саженцев триплоидной осины осуществляется с использованием плуга ПКЛ-70. Борозды расположены на расстоянии 5 м с шагом посадки – 5 м (рис. 1).

Такой вариант искусственного лесовосстановления выбран не случайно, поскольку характеризуется относительной дешевизной такого способа подготовки почвы, возможностью посадки сразу после напашки борозд, а также неплохой первоначальной приживаемостью. Посадка саженцев деревьев производится вручную в дно плужных борозд.

Расчет количества посадочного материала произведен исходя из схемы размещения на площади саженцев и необходимости дополнения лесных культур по формуле

$$N = 10000 / (A \times B),$$

где N – количество посадочных мест на 1 га;

A – расстояние между рядами;

B – шаг посадки (расстояние между саженцами в ряду).

Исходя из расчетного значения 400 шт./га, полученного по данной формуле (именно такое количество саженцев, как показывает практика, успешно приживается), были составлены ведомости ресурсов и объемов работ посадки, а также определена расчетная сметная стоимость посадки осин на 1 га с одним поливом в размере 78 848 руб./га. Сюда вошли: затраты на машины (культиваторы, машины поливомоечные, тракторы, оборудование навесное сельскохозяйственное, автомобили-самосвалы) и погрузочно-разгрузочные механизмы; материальные затраты (колья деревянные посадочные); фонд оплаты труда рабочих и машинистов; накладные расходы.

Детальные схемы территорий для посадок с точным указанием их кадастровых номеров были предоставлены ЦП «GafelUrtan» (рис. 2).

Размеры земельных участков, выделенных для искусственного лесовосстановления, приведены в таблице.

Как видно из таблицы, размеры земельных участков по конкретным кадастровым номерам и по Азнакаевскому району в целом получены из трех источников. Данные публичной карты показывают размеры площадей в гектарах, которые были выделены районами в соответствии с кадастровой картой. Согласно данным, полученным по схемам маркшейдеров, размер выделенной площади указывается за минусом тех участков земли, где расположены наземные (линии электропередачи, телефонные и телевизионные кабели и т.п.) и/или подземные коммуникации (высоковольтные и слаботочные кабели, газо- и водопроводы, а также канализационные, ливневые и дренажные трубы).

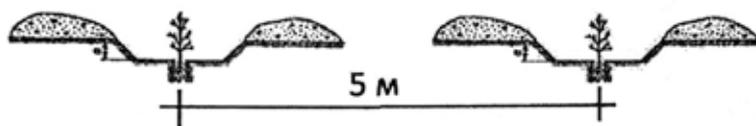


Рис. 1. Схема смешения



Рис. 2. Схемы территории в 250 га, полученные с помощью системы «GafelUrman» – no-co2.ru

Данные о земельных площадях, выделенных под посадку саженцев триплоидной осины в Азнакаевском районе, согласно кадастровым номерам

| Участки под посадку с указанием кадастрового номера | Площадь, га | | |
|---|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | По данным публичной карты | По схемам маркшейдеров | Проработанная по системе «GafelUrman» |
| 16:02:010101-935 | 9,62 | 7,7 | 6,8 |
| 16:02:000000:5398/7 | 5,84 | 5,42 | 5,6 |
| 16:02:000000:5398/8 | 32,4 | 29,68 | 15,2 |
| 16:02:000000:5398/9 | 23,44 | 21,87 | 13,8 |
| 16:02:010107-290 | 25,6 | 15,0 | 17,35 |
| 16:02:010202:1497/10 | 2,82 | 2,5 | 2,5 |
| 16:02:130102549 | 70,1 | 70,1 | 31,0 |
| Рядом с 16:02:230113:337 | 19,2 | 19,0 | 18,8 |
| Рядом с 16:02:230113:462 | 12,0 | 10,5 | 10,0 |
| 16:02:220202:24 | 62,29 | Нет данных | 39,5 |
| 16:02:220202:22 | | | |
| 16:02:220202:23 | | | |
| 16:02:220203:163 | | | |
| 16:02:220203:152 | | | |
| 16:02:220203:153 | | | |
| 16:02:220203:154 | | | |
| 16:02:220203:130 | 10,0 | Нет данных | 7,58 |
| В составе 16:02:010107-312 | | | |
| 16:02:000000:5398/7 | | | |
| 16:02:000000:5398/7 | 2,2 | Нет данных | 1,9 |
| 16:02:000000:5398/7 | 8,0 | Нет данных | 7 |
| Итого по Азнакаевскому району | 283,51 | Нет данных | 177,03 |

И, наконец, данные, полученные с помощью системы «GafelUrman», показывают ту площадь в гектарах, которая реально была использована под посадку лесных насаждений (на фото выше эти участки вы-

делены зеленым цветом; желтым цветом обозначены участки, на которых либо планируется посадка, либо уже ведутся работы; красный цвет показывает участки, непригодные для посадки).

Если сравнить значения лишь по девяти конкретным участкам с кадастровыми номерами, по которым имеется полная информация из всех трех источников (таблица), то можно увидеть, что площадь с ровным рельефом, пригодная для посадки лесных насаждений (даже с учетом участков с коммуникациями), на 30% меньше от заявленной, что не могло не отразиться на значениях показателей, предусмотренных ТЗ.

Как и планировалось, проект стартовал в Азнакаевском районе в апреле 2022 г. В природном отношении данный район находится на возвышенной равнине, а следовательно, рельеф ее территории характеризуется структурностью и резко выраженной асимметрией склонов. При составлении ведомости ресурсов и объемов работ по посадке, а также при определении сметы затрат исходили из того, что вся выделяемая площадь в 250 га будет иметь ровную поверхность. Наличие ровного рельефа – это одно из основных условий плантационной посадки. С учетом механизации работ предельный уровень должен быть не более 5°, а поперечный – не более 3°. С учетом реальной ситуации и ввиду сложности проведения лесовосстановительных работ из-за крутизны склона на данных площадях по факту удалось освоить 169 га из фактических 177,03 га (по данным ЦП «GafelUrman») или 283,51 га (по кадастровой схеме). Поскольку в данном проекте были использованы новые современные методы проектирования, основанные на плантационном лесовосстановлении, то при закладке плантации саженцами триплоидной осины посадку производили с редким размещением: на расстоянии 5 м по отношению друг к другу. Это позволило применять соответствующие технические средства (плуг, культиваторы, тракторы и т.п.) с заранее заданными параметрами, благодаря чему впоследствии обеспечивается не только достаточная густота посадки насаждений, но и создаются условия для механизированного ухода за растущими деревьями, а также снижается поражаемость их корневыми гнилями.

Для обеспечения качественной посадки были проведены соответствующие организационно-хозяйственные, агротехнические, лесомелиоративные и гидротехнические мероприятия (расчистка, выравнивание и рыхление почвы, улучшение ее механических свойств и т.п.). Кроме обычных уходов, которые применяются при вы-

ращивании лесных культур, при плантационной посадке осуществлялись работы по удалению обвязки, формированию кроны, изреживанию и т.п. Поскольку часть участков находится на склонах, то в состав дополнительных мелиоративных мероприятий вошли: глубокая обработка почвы по горизонталям, проведение специальных водозадерживающих приемов обработки почвы (прерывистое бороздование, лункование и т.п.). Все они направлены на борьбу с линейной эрозией, обеспечение усиленного водопоглощения почвами и повышение их плодородия.

Всего в 2022 г. в Азнакаевском районе на площади в 169 га было высажено 100 тыс. саженцев триплоидной осины, выращенных к моменту посадки в школьных биолaborаториях. За счет использования селекционно-улучшенного посадочного материала и более зрелых саженцев, высота которых составляет 1,5 м, предполагается повысить их приживаемость и устойчивость. Важную роль в этом призвана сыграть ЦП «GafelUrman», функциональные возможности которой позволяют осуществлять как взаимодействие между всеми заинтересованными сторонами, участвующими в процессе лесовосстановления, так и мониторинг за посадкой лесных насаждений, их состоянием и ростом, а также обеспечить хранение информации о посадках, что в полной мере соответствует Правилам лесовосстановления [9].

Однако, учитывая, что все расчетные данные по объемам ресурсов, работ и затрат в ТЗ были определены на основе посадки лесных насаждений в заданных районах на ровных территориях, требуется некоторая их корректировка, связанная с дополнительными работами и затратами с учетом реального рельефа участков, выделенных для искусственного лесовосстановления. Это позволит реализовать данный проект в намеченные сроки и добиться желаемых результатов, что, в свою очередь, станет еще одним шагом в обеспечении баланса выбытия и воспроизводства лесов в Республике Татарстан.

Выводы

1. Климатическая повестка остается по-прежнему актуальной, несмотря на нынешнюю политическую напряженность и снижение взаимодействия с Европой из-за ввода санкций, а выращивание леса за счет роста его поглотительной способности являет-

ся важным элементом стратегии снижения углеродного следа в России.

2. Флагманом реализации проектов по искусственному лесовосстановлению в Республике Татарстан среди представителей крупного бизнеса выступает нефтяная компания «Татнефть». Благодаря ее инвестиционной поддержке в регионе успешно функционируют школьные биолaborатории и теплицы, реализуется IT-проект «GafelUrtan», стартовал «Проект искусственного лесовосстановления участков на площадях 250 га».

3. Особенности нового подхода к искусственному лесовосстановлению состоят не только в применении плантационной посадки селекционно-улучшенных саженцев триплоидной осины, но и в использовании возможностей современных цифровых технологий по взаимодействию всех участников по лесовосстановлению, включая мониторинг посадки лесных насаждений, их состояния и роста, а также хранение информации о посадках. Все это в совокупности позволяет повысить эффективность лесовосстановления в РТ и способствует обеспечению баланса выбытия и воспроизводства лесов в регионе, а для самой компании «Татнефть» является элементом стратегии устойчивого низкоуглеродного развития и дополнительным фактором ее конкурентоспособности на внешних рынках.

Список литературы

1. Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года. Основные выводы. Продовольственная сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/ca9825ru/> (дата обращения: 17.02.2023).
2. Живой лес. Интернет-журнал. [Электронный ресурс]. URL: <https://givoyles.ru/articles/nauka/vosstanovlenie-lesov/> (дата обращения: 17.02.2023).
3. Площадь лесов России за последние 10 лет увеличилась на 4,3 млн га // Газета «Известия» от 09.07.2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://iz.ru/1190554/2021-07-09/ploshchad-lesov-rossii-za-poslednie-10-let-uvlechilas-na-43-mln-ga> (дата обращения: 17.02.2023).
5. Официальный сайт Министерства лесного хозяйства Республики Татарстан. [Электронный ресурс]. URL: <https://minleshoz.tatarstan.ru/> (дата обращения: 17.02.2023).
6. Интегрированный годовой отчет 2021 / Татнефть: Объединяем усилия. Достигаем цели. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tatneft.ru/uploads/publications/62b5b3197d035342141266.pdf> (дата обращения: 17.02.2023).
7. Galimullin A., Bakhteev K. Reducing of greenhouse gas emissions in Russia: state of the problem and compensating measures for restoration of forests as a net CO₂ sensor. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2021. Vol. 12. No. 2. P. 59–66. DOI: 10.17816/edgcc72075.
8. Bakhteev K.R., Galimullin A.F. The role of Russian forests in the compensation of CO₂ emissions in the atmosphere and the possibility of application of digital technologies in solving the issues of forest restoration and forestry. *Proc. SPIE 12296, International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022)*. 1229608 (6 July 2022). DOI: 10.1117/12.2642854.
9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 04.12.2020 г. № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления. Состав проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений» / Гарант.ру. Информационно-правовой портал. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74983471/> (дата обращения: 17.02.2023).

УДК 504:550.46

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РАЗМЕР И МАССА ПЫЛИ $PM_{0,1}$ ОКОЛО УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ

**Казанцева У.Д., Яковенко О.С., Лешукова М.К.,
Легошин К.В., Лешуков Т.В., Ларионов А.В.**

*ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, Кемерово,
e-mail: tvleshukov@kemsu.ru;*

В статье представлены результаты оценки пылевого загрязнения фракцией $PM_{0,1}$ окрестностей четырех угольных разрезов, а также контрольных территорий в зимнее время. Исследования проведены на территории Кемеровской области – Кузбасса. Анализ пылевой нагрузки производился с использованием снегомерного метода. Точки отбора проб располагались на различном удалении от источника пылевой нагрузки через каждые 500 м. Необходимая пылевая фракция выделялась и подготавливалась методами фильтрации, центрифугирования, диспергирования. Для анализа морфологии исследуемой фракции твердых частиц применялась электронная микроскопия. В результате исследований установлены особенности миграции и накопления пылевых частиц фракции $PM_{0,1}$ в сравнении с контрольными территориями, не затронутыми деятельностью горнодобывающих предприятий. Определено, что преобладающей фракцией являлись частицы 0,5–0,6 мкм. Для частиц характерна вытянутая, реже изометричная форма. Распространены частицы со сложной поверхностью. В вещественном составе преобладали кальцит, гипс. Форма частиц способствует адсорбции на их поверхности различных соединений, в том числе ПАУ и других потенциально токсичных компонентов. Пространственные особенности распространения пылевой нагрузки от источников сложны. Установлено существенное превышение количества пылевых частиц в снегу около угольных разрезов по сравнению с контрольными территориями. Не выявлено закономерной зависимости накопления пыли фракции $PM_{0,1}$ в снегу от расстояния от источника. Вероятно, частицы фракции $PM_{0,1}$ могут переноситься на большие расстояния. Их динамика и особенности седиментации сложны и определяются наряду с процессами переноса во взвешенном состоянии также вторичным перемещением в составе снежной массы. Значительную роль в накоплении пылевых частиц фракции $PM_{0,1}$ в зимнее время играют особенности микрорельефа и другие микроусловия седиментации.

Ключевые слова: каменный уголь, открытый способ добычи, угольно-каменная пыль, фракционный состав пыли, твердые частицы (ТЧ), $ТЧ_{0,1}$, Кузбасс, Кемеровская область

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50114.

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS, SIZE AND MASS OF $PM_{0,1}$ DUST NEAR THE OPEN COAL MINES

**Kazanceva U.D., Yakovenko O.S., Leshukova M.K.,
Legoshchin K.V., Leshukov T.V., Larionov A.V.**

Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: tvleshukov@mail.ru;

The article presents the results of an assessment of dust pollution by the $PM_{0,1}$ fraction in the vicinity of four coal mines, as well as control areas in winter. The studies were carried out on the territory of the Kemerovo region – Kuzbass. Dust load analysis was carried out using the snow measurement method. Sampling points were located at different distances from the dust load source every 500 m. The required dust fraction was isolated and prepared by filtration, centrifugation, and dispersion methods. Electron microscopy was used to analyze the morphology of the studied fraction of solid particles. As a result of the research, the features of migration and accumulation of dust particles of the $PM_{0,1}$ fraction were established in comparison with control areas not affected by the activities of mining enterprises. It was determined that the predominant fraction was particles of 0.5-0.6 μm . The particles are characterized by an elongated, less often isometric shape. Particles with a complex surface are common. The material composition was dominated by calcite and gypsum. The shape of the particles promotes the adsorption of various compounds on their surface, including PAHs and other potentially toxic components. The spatial features of the distribution of dust load from sources are complex. A significant excess of the amount of dust particles in the snow near the coal mines was established in comparison with the control areas. No regular dependence of the accumulation of dust of the $PM_{0,1}$ fraction in snow on the distance from the source was found. It is likely that particles of the $PM_{0,1}$ fraction can be transported over long distances. Their dynamics and features of sedimentation are complex and are determined, along with the processes of transfer in suspension, also by secondary movement in the composition of the snow mass. A significant role in the accumulation of dust particles of the $PM_{0,1}$ fraction in winter is played by the features of the microrelief and other microconditions of sedimentation.

Keywords: coal, open pit mining, coal-stone dust, fractional composition of dust, particulate matter (PM), $PM_{0,1}$, Kuzbass, Kemerovo region

Твердые частицы (ТЧ) в настоящее время рассматриваются как крайне опасный загрязнитель воздуха, который способен вызывать ряд проблем со здоровьем у населения. Сообщается, что ТЧ способны про-

никать глубоко в дыхательную систему и вызывать там хронические воспалительные процессы [1, 2]. Также известно, что данные частицы из-за своего размера могут попадать в кровеносную систему и вы-

зывать ряд проблем с сердечно-сосудистой системой [3, 4], а также обладают канцерогенным эффектом [5, 6]. Возникает определенная закономерность, отражающая увеличение токсичности и опасности пыли с уменьшением ее размера.

Источниками пыли являются и естественные ландшафты [7], и ландшафты, созданные человеком, так называемые антропогенные [8]. В последних по производству пылевых частиц выделяются автомобильные магистрали и горнодобывающая промышленность [8]. Также известно, что размер частиц серьезно влияет на их миграционную способность, в связи с чем наиболее мелкие фракции фиксируются на достаточном удаленном расстоянии от места происхождения. Особенно важно исследовать ТЧ, переносимые на значительное расстояние от промышленных предприятий (угольных шахт, разрезов и др.), а также содержащие канцерогенные элементы, их воздействию может массово подвергаться резидентное население. Таким образом, миграционная способность пыли возрастает с уменьшением ее размера.

Известно, что содержание частиц пыли в атмосфере обладает большими флуктуациями, которые обычно связывают с климатическими, погодными [9, 10] и антропогенными факторами [11]. Снежный покров и длительное время аккумуляции в нем загрязняющих веществ из атмосферы позволяют получить интегральный показатель загрязнения воздуха. По этой причине загрязнение снега часто используется в качестве индикатора загрязнения атмосферы в исследованиях [12]. Кроме того, в зимнее время обычно существенно снижается поступление частиц пыли в атмосферу от естественных источников (почвы, растений и т.п.), а возрастает доля частиц пыли от источников, произведенных человеком. В дополнение к этому загрязнение атмосферы в зимнее время существенно выше, что обусловлено снижением адвекции и конвекции воздуха, наличием температурных инверсий в атмосфере и т.п. [13]. Это, несомненно, увеличивает важность и точность подобных исследований в регионах с продолжительными периодами снегонакопления.

Целями исследования являются изучение и оценка объема, размера и морфологических характеристик частиц $PM_{0,1}$, накопленных в снежном покрове возле угольных карьеров. Данное исследование позволит впервые оценить пылевую нагрузку данной фракцией окрестностей угольных карьеров

Кемеровской области – Кузбасса. Размер выбранных частиц обусловлен наибольшей токсичностью данной пыли, ее высокой миграционной способностью и недостаточной изученностью для территорий Кузбасса.

Материалы и методы исследования

Мы изучали окрестности угольных карьеров, расположенных на территории Кузнецкого угольного бассейна (Кемеровская область – Кузбасс, РФ) (рис. 1).

Точки отбора проб снега располагались в присалаирской, центральной и приалатаусской зонах Кузбасса. Вмещающие каменный уголь породы относятся к каменноугольно-пермскому времени, имеют ритмичное строение и состоят из песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей, а в отдельных случаях – известняков. Данные породы перекрыты горизонтально залегающими неоген-четвертичными отложениями, представленными преимущественно суглинками. На данных карьерах производится добыча угля открытым способом. Общий ежегодный объем добычи угля различен и составляет до 15–20 млн т в год. Рельеф территории представлен преимущественно широкими речными долинами. Средние высоты составляют 240–260 м. Преобладающие ветры юго-западные и северные в зимнее время года. Среднегодовое количество осадков от 300–400 мм в год с максимумом в летнее время. Рельеф заметно изменился из-за деятельности человека, в основном из-за добычи угля. Почвы представлены преимущественно черноземом. Контрольные образцы отобраны вблизи пос. Кузбасский (К1) и пос. Красное (К2), которые расположены на расстоянии не менее 15 км от угледобывающих предприятий.

Пробы снега отбирались в 2020, 2021 гг. на участках 5x5 м согласно ГОСТ 17.1.5.05-85 на расстоянии 500–3250 м от источника пыли (угольные разрезы). Шаг между точками отбора проб – 500 м. Снег собирали в пластиковые бочки общим объемом 50 л. Пробы отбирали пластиковой трубой, изготовленной из химически стойкого полимерного материала. Чтобы уменьшить попадание частиц почвы в образец во время сбора снега, надземный слой снега толщиной примерно 5 см не отбирался в пробу. Оттаявшие образцы подвергали последовательной фильтрации с помощью мембранных нейлоновых фильтров размером 10, 2,5 и 0,1 мкм (CVS, Сэнфорд, Флорида, США) и вакуумной системы Sterifil (Merck KGaA, Дармштадт, Германия).

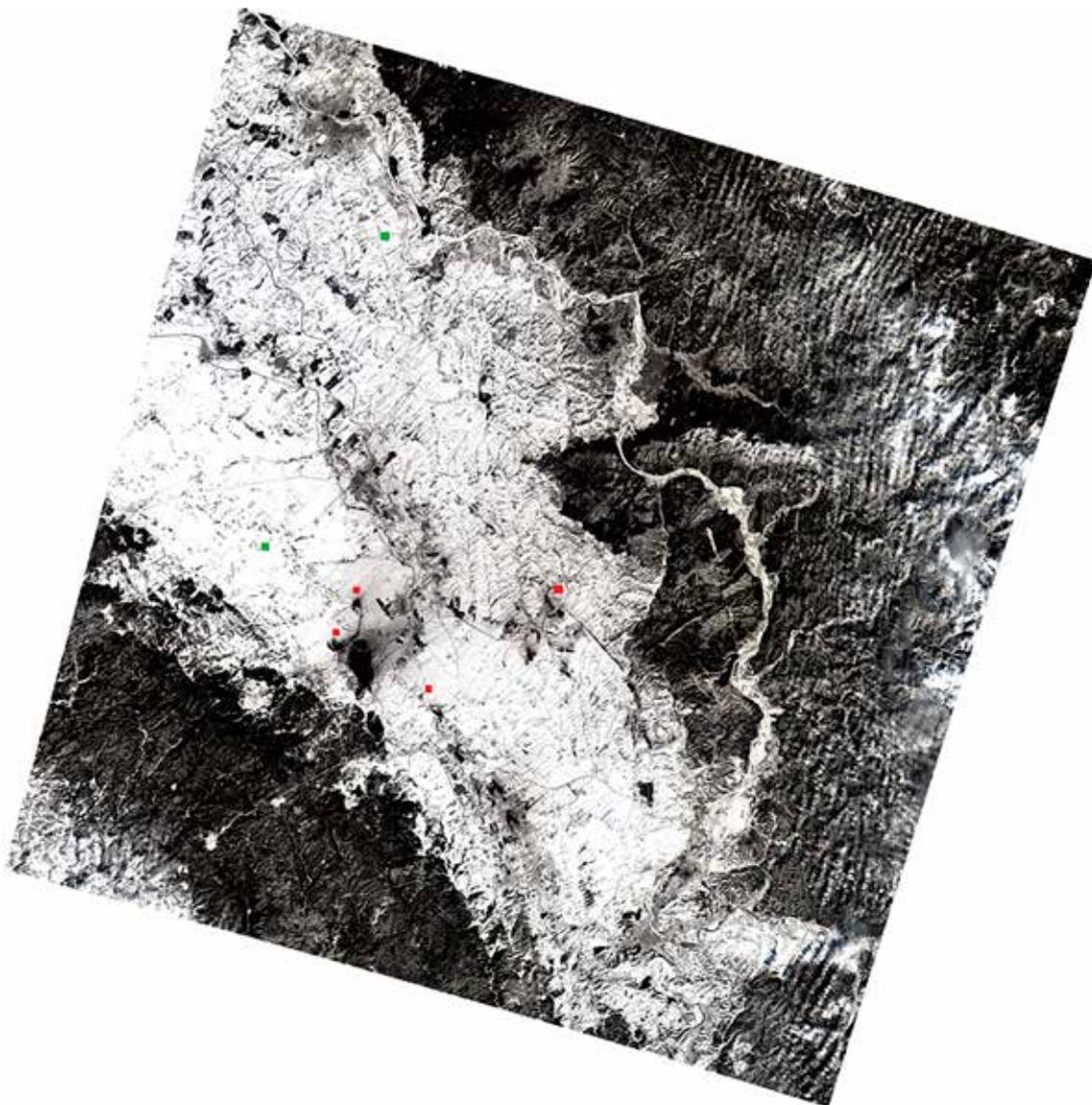


Рис. 1. Точки забора снега возле угольных карьеров и контрольных территорий: красные квадраты – точки около угольных карьеров, зеленые квадраты – контрольные точки

Завершающим этапом было получение суспензии $PM_{0,1}$ путем частичного концентрирования с использованием концентратора Erpendorf и вакуумного роторного концентратора (Erpendorf, Гамбург, Германия).

Изображения частиц менее 0,1 мкм были получены с помощью трансмиссионного электронного микроскопа (ТЭМ) JEOL JEM-2100 (JEOL LTD, Акишима, Япония) в режиме съемки: изображение в светлом поле и энергия пучка: 200 кэВ. Образцы $PM_{0,1}$ были диспергированы перед нанесением с помощью микропипетки на сетку с углеродным покрытием на предметных сте-

клах. Для этого использовали диспергатор Bandelin SONOPULS HD 2070 (BANDELIN, Берлин, Германия) с последующей обработкой ультразвуком до 2 мл в течение 10 мин при мощности 50% на шкале прибора (использовалась максимальная мощность используемого излучателя).

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице представлены результаты полученной массы пылевой фракции $PM_{0,1}$ и скорости ее накопления. Полученные данные по массе пыли и скорости ее накопления свидетельствуют о том, что

фракция пыли $PM_{0,1}$ способна мигрировать на достаточно большие расстояния от угольного карьера. Эти расстояния существенно превышают нормативные требования, составляющие 1 км, для возможного размещения жилой зоны. Контрольные точки наблюдения имеют существенно меньше пыли ($PM_{0,1}$) в снегу, чем на участках возле угольных карьеров. Отсутствует ранее очевидная закономерность снижения пылевой нагрузки данной фракцией с расстоянием от карьера.

Такая ситуация может быть связана с вторичным переносом уже осевших частиц пыли вместе со снегом, пока они не попадут в наиболее выраженную седиментационную ловушку, которая обычно является крупной балкой с растительностью. Но данные результаты требуют дополнительной

проверки с более детальными площадными исследованиями. Таким образом, пылевая нагрузка на расстоянии 1–3 км показывает содержание пыли фракции $PM_{0,1}$ в 2–3 раза выше, чем на контрольных территориях. Можно предположить, что на интенсивность загрязнения пылевыми частицами отдельных участков ландшафтов в зимний сезон года большое влияние оказывает рельеф, в том числе микрорельеф, определяющий условия седиментации перевеиваемых снежных масс с пылью.

На рисунке 2 показаны фотографии пылевой фракции, полученной с помощью ТЭМ. Среди размеров частиц во фракции $PM_{0,1}$ преобладает размерность 0,5–0,6 мкм. Форма частиц часто вытянутая в одном направлении, но также встречаются и частицы формы, близкой к изометричной.

Характеристики извлеченной из снега пыли фракции $PM_{0,1}$

| Угольные карьеры / Контроль | Точка отбора | Масса пыли, мкг/см ² | Скорость накопления, мкг/см ² *сутки | Расстояние до карьера, м |
|------------------------------|--------------|---------------------------------|---|--------------------------|
| Бачатский | 1 | 273,3 | 2,44 | 1250 |
| | 2 | 242,98 | 2,17 | 1300 |
| | 3 | 94,6 | 0,845 | 1480 |
| | 4 | 105 | 0,938 | 1800 |
| | 5 | 100,1 | 0,894 | 2180 |
| | Ср. | 163,196 | 1,457 | 1602 |
| Новобачатский | 1 | 358,85 | 3,016 | 500 |
| | 2 | 149,49 | 1,256 | 1000 |
| | 3 | 125,13 | 1,052 | 1500 |
| | 4 | 122,31 | 1,028 | 2000 |
| | 5 | 158,08 | 1,328 | 2500 |
| | Ср. | 182,772 | 1,536 | 1500 |
| Пермяковский | 1 | 131,03 | 1 | 1250 |
| | 2 | 89,87 | 0,686 | 1750 |
| | 3 | 199,23 | 1,521 | 2250 |
| | 4 | 86,54 | 0,661 | 2750 |
| | 5 | 212,82 | 1,625 | 3250 |
| | Ср. | 143,898 | 1,099 | 2250 |
| Бачатский – 2 | 1 | 378 | 2,759 | 500 |
| | 2 | 482,5 | 3,522 | 1000 |
| | 3 | 351,5 | 2,566 | 1500 |
| | 4 | 290,5 | 2,120 | 2000 |
| | 5 | 295,5 | 2,157 | 2500 |
| | Ср. | 359,6 | 2,665 | 1500 |
| Контроль 1 (пос. Кузбасский) | 1 | 109,74 | 0,998 | >15000 |
| Контроль 2 (пос. Красное) | 1 | 86,73 | 0,789 | >25000 |

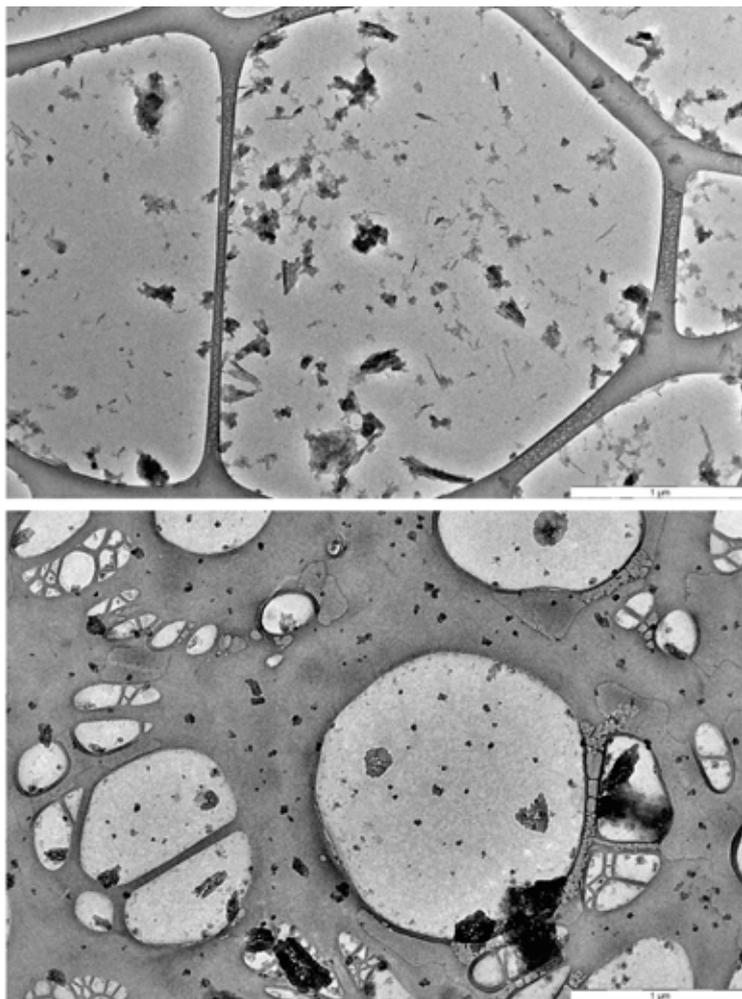


Рис. 2. ТЭМ-фото пылевой фракции $PM_{0,1}$ из окрестностей угольных карьеров

По ранее полученным данным рентгеновской, рамановской спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа частицы пыли $PM_{0,1}$ представлены в основном кальцитом ($CaCO_3$), гипсом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), а другие минеральные виды находятся в меньшем количестве. В другом исследовании отмечается присутствие кварца в пробах $PM_{0,1}$ [14]. Вследствие этого форма частиц связана со свойствами преобладающих минералов в пыли. Ранее установленный элементный состав показал присутствие Sr, Cu, Zn, Hf, Al, Mn, Zr, Rn [14]. Некоторые из них являются весьма токсичными для человека. Наблюдаемые в исследовании морфологические формы ТЧ, обладающие большой поверхностью, могут приводить к абсорбции на их поверхности металлов, полиароматических углеводородов (ПАУ) и других органических соединений, которые способны усилить токсическое воздействие пыли, в том числе и на ДНК [15].

Выводы

В исследовании произведена оценка объема, размера и морфологических характеристик частиц $PM_{0,1}$, а также пылевой нагрузки данной фракцией в окрестностях четырех предприятий по добыче угля открытым способом и на двух контрольных территориях в пределах Кемеровской области – Кузбасса. Выявлено, что содержание пылевых частиц в снежном покрове вблизи мест открытой добычи угля существенно превосходит уровень данного показателя на контрольных территориях, не затронутых горнодобывающей деятельностью. Результаты исследований показали, что фракция пыли $PM_{0,1}$ способна мигрировать от источника на значительные расстояния, существенно превышающие размеры установленных санитарно-защитных зон. Кроме того, не выявлено закономерного изменения количества и состава пылевых частиц

указанной фракции от точки к точке в зависимости от расстояния в пределах исследованной территории. Вероятно, твердые частицы фракции $PM_{0,1}$ способны переноситься на весьма существенные расстояния от источника во взвешенном в воздухе состоянии, а также путем переувлажнения снега. Можно предположить, что на интенсивность загрязнения пылевыми частицами локальных участков ландшафтов в зимнее время большое влияние оказывают микро-рельеф и микроусловия седиментации. В гранулометрическом отношении господствовали частицы размером 0,5–0,6 мкм вытянутой и изометричной формы, часто со сложной поверхностью, преимущественно кальцитового состава. Сложная форма поверхности, благоприятная для адсорбции большого количества различных компонентов, в совокупности с выявленным содержанием тяжелых металлов является фактором, потенциально определяющим их токсичность для человека и различных компонентов экосистем. Для более полного установления пространственных особенностей пылевого загрязнения, факторов, определяющих накопление в снежном покрове частиц фракции $PM_{0,1}$, перспективны дальнейшие исследования с углубленной детальностью и расширенной площадью.

Список литературы

1. Luong L.T.M., Dang T.N., Thanh Huong N.T., Phung D., Tran L.K., Van Dung D., Thai P.K. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children. *Environ. Pollut.* 2020. V. 257. 113424. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113424.
2. Priyankara S., Senarathna M., Jayaratne R., Morawska L., Abeysundara S., Weerasooriya R., Knibbs L.D., Dharmage S.C., Yasaratne D., Bowatte G. Ambient PM_{2.5} and PM₁₀ Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021. № 18. P. 9617. DOI: 10.3390/ijerph18189617.
3. Bulejko P., Adamec V., Škeřil R., Schüllerová B., Bencko V. Levels and Health Risk Assessment of PM₁₀ Aerosol in Brno, Czech Republic. *Cent. Eur. J. Public Health.* 2017. № 25. P. 129–134. DOI: 10.21101/cejph.a4495.
4. Ljungman P.L.S., Andersson N., Stockfelt L., Andersson E.M., Nilsson Sommar J., Eneroth K., Gidhagen L., Johansson C., Lager A., Leander K. et al. Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke. *Environ. Health Perspect.* 2019. № 127. P. 107012. DOI: 10.1289/EHP4757.
5. Roy D., Singh G., Seo Y.-C. Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risks from PM₁₀-and PM_{2.5}-Bound Metals in a Critically Polluted Coal Mining Area. *Atmos. Pollut. Res.* 2019. № 10. P. 1964–1975. DOI: 10.1016/j.apr.2019.09.002.
6. Cortes-Ramirez J., Naish S., Sly P., Jagals P. Mortality and Morbidity in Populations in the Vicinity of Coal Mining: A Systematic Review. *BMC Public Health.* 2018. № 18. P. 721. DOI: 10.1186/s12889-018-5505-7.
7. Perrone M.G., Vratolis S., Georgieva E., Török S., Šega K., Veleva B., Osán J., Bešlić I., Kertész Z., Pernigotti D. et al. Sources and Geographic Origin of Particulate Matter in Urban Areas of the Danube Macro-Region: The Cases of Zagreb (Croatia), Budapest (Hungary) and Sofia (Bulgaria). *Sci. Total Environ.* 2018. № 619–620. P. 1515–1529. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.092.
8. Richardson C., Rutherford S., Agranovski I.E. Open Cut Black Coal Mining: Empirical Verification of PM_{2.5} Air Emission Estimation Techniques. *Atmos. Res.* 2019. № 216. P. 151–159. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.10.008.
9. Brzezina J., Kőbőlová K., Adamec V. Nanoparticle Number Concentration in the Air in Relation to the Time of the Year and Time of the Day. *Atmosphere.* 2020. № 11. P. 523. DOI: 10.3390/atmos11050523.
10. Dedele A., Miškinyte A. Seasonal and Site-Specific Variation in Particulate Matter Pollution in Lithuania. *Atmos. Pollut. Res.* 2019. № 10. P. 768–775. DOI: 10.1016/j.apr.2018.12.004.
11. Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P., Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Gavrilkina S.V., Bulanova A.V., Yakimova O.N. Insights into Particle-Bound Metal(Loid)s in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia. *Sustainability.* 2021. № 13. P. 4596. DOI: 10.3390/su13094596.
12. Talovskaya A.V., Volodina D.A., Yazikov E.G. Macroelement and Mineral-Phase Composition of Particulate Matter in the Impacted Area of Cement Production Plant Based on Snow Cover Study (Kemerovo Region). *CSD.* 2019. P. 180–189. DOI: 10.15372/CSD2019126.
13. Alfonsi L.L., Macri P., Nazzari M. Rock Magnetic and Micro-Morphological Analysis on Snow Deposits: Recognition of Anthropogenic Origin of Particulate Matter in Urban and Wilderness Areas (Central Italy). *Ann. Geophys.* 2021. № 64. GM215. DOI: 10.4401/ag-8515.
14. Larionov A., Volobaev V., Zverev A., Vdovina E., Bach S., Schetnikova E., Leshukov T., Legoshchin K., Eremeeva G. Chemical Composition and Toxicity of PM₁₀ and PM_{0.1} Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations. *Life* 2022. № 12. P. 1047. DOI: 10.3390/life12071047.
15. Leshukov T., Legoshchin K., Yakovenko O., Bach S., Russakov D., Dimakova D., Vdovina E., Baranova E., Avdeev K., Kolpina E. et al. Fractional Composition and Toxicity Coal-Rock of PM₁₀-PM_{0.1} Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station. *Sustainability.* 2022. № 14. P. 16594. DOI: 10.3390/su142416594.

СТАТЬИ

УДК 55:622.273.218

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА
ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ****Алексеев К.Н., Петров Д.Н.***ФГБУН Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, e-mail: const1711@mail.ru*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению прочности образцов льдопородной закладки на сжатие в зависимости от содержания воды и коротких полипропиленовых волокон диаметром 10÷15 мкм. Промораживание и испытание исследуемых образцов проводились при температуре -20 °С. Установлено оптимальное содержание фибры для льдопородной закладки из дробленого алевролита с золотосодержащим месторождения «Бадран». Наибольший прирост прочности льдопородных образцов на 38% с 8,7 до 12 МПа достигается при объемном содержании фибры $\mu \approx 0,5\%$ (4,35 кг/м³). При содержании фибры от 4,35÷17,4 кг/м³ ($\mu = 0,5\pm 2\%$) прочность исследуемых образцов варьируется в пределах от 12 до 10,4 МПа. Дальнейшее увеличение содержания фибры до 34,8 кг/м³ ($\approx 4\%$) приводит к снижению плотности исследуемых образцов с 1763 до 1476 кг/м³ и прочности до 5,8 МПа. В условиях неполного водонасыщения при объемном содержании воды в 15 и 30% введение фибры в состав льдопородной закладки не приводит к росту прочности. Исследуемые образцы разрушались в части, где количество льда-цемента было наименьшим. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии технической возможности повышения прочности льдопородного закладочного материала путем введения в состав смеси хаотично ориентированных микроармирующих волокон. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения прочности целиков из льдопородной закладки без существенного изменения апробированной технологии, при минимальных дополнительных затратах. Полученные результаты исследований рекомендуются для использования при формировании закладки из промораживаемых пород в натуральных условиях и расчетах конструктивных параметров систем разработки с применением смерзающей закладки.

Ключевые слова: лед, льдопородная закладка, полипропиленовая фибра, криолитозона, шахты и рудники Севера, прочность на сжатие

Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

**INFLUENCE OF POLYPROPYLENE FIBER
ON THE STRENGTH PROPERTIES OF ICE-ROCK STACKING MIX****Alekseev K.N., Petrov D.N.***Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: const1711@mail.ru*

The article presents the results of experimental studies to determine the compressive strength of samples of ice-rock backfill depending on the content of water and short polypropylene fibers with a diameter of 10÷15 micrometers. Freezing and testing of the studied samples were carried out at a temperature of -20°C. The optimal content of fiber for ice-rock filling from crushed siltstone from "Badran" gold deposit has been established. The greatest increase in the strength of ice samples by 38% from 8.7 to 12 MPa is achieved with a fiber volume content $\mu \approx 0.5\%$ (4.35 kg/m³). When the fiber content is from 4.35÷17.4 kg/m³ ($\mu = 0.5\pm 2\%$), the strength of the studied samples varies from 12 to 10.4 MPa. A further increase in the fiber content to 34.8 kg/m³ ($\approx 4\%$) leads to a decrease in the density of the studied samples from 1763 to 1476 kg/m³ and strength to 5.8 MPa. Under conditions of incomplete water saturation with a volumetric water content of 15 and 30%, the introduction of fiber into the composition of the ice backfill does not lead to an increase in strength. The studied samples were destroyed in the part where the amount of ice-cement was the smallest. The results of the studies carried out indicate that it is technically possible to increase the strength of the ice-rock filling material by introducing randomly oriented micro-reinforcing fibers into the composition of the mix. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of increasing the strength of the pillars from the ice-rock backfill without a significant change in the proven technology, at minimal additional costs. The obtained research results are recommended for use in the formation of backfill from frozen rocks in natural conditions and in the calculation of design parameters of development systems using frozen backfill.

Keywords: ice, ice-rock backfill, polypropylene fiber, permafrost zone, mines and mines of the North, compressive strength

Применение промораживаемых водородных смесей в качестве закладочного материала при разработке ряда рудных месторождений криолитозоны в нашей стране и за рубежом показало эффективность данного вида закладки [1–3].

В ИГДС СО РАН была разработана и внедрена в промышленных масштабах камерная система разработки с использованием льдопородной закладки при разработке золоторудного месторождения «Бадран», что позволило достичь высоких показате-

лей извлечения ценной руды (потери 1–3%). Исследования позволили установить влияние на прочность льдопородной закладки технологии ее возведения, конструктивных параметров, состава и температуры очистного пространства. По результатам исследований, с учетом опыта применения данной технологии на рудной шахте «Бадран», были разработаны рекомендации по повышению эффективности применения смерзающей закладки [4; 5].

Технология подземной добычи руды с использованием льдопородной закладки является весьма перспективной, например, при отработке малообъемных рудных тел, отдельных участков рудных залежей, возведения предохранительных целиков и искусственных потолочин при освоении месторождений, расположенных в зоне распространения многолетней мерзлоты [6]. В связи с вышеизложенным исследования, направленные на повышение прочностных характеристик смерзающихся водопородных смесей, весьма актуальны.

Известным способом повышения прочности льда является введение в его матрицу различных наполнителей, например в виде коротких волокон, и получения на этой основе композиционного материала [7–9]. Номенклатура применяемых волокон весьма обширна, от искусственных: базальтовых, стеклянных, углеродных и др. [9, с. 106; 10] – до наполнителей природного происхождения: древес-

ные волокна, хлопок, сено, лен, хвоя и др. [11; 12]. В конструкционном отношении волокна природного происхождения уступают искусственным, которые, при равном коэффициенте армирования за счет малого диаметра в 10–20 мкм, обладают гораздо большей удельной поверхностью сцепления с армируемой матрицей (льдом) [13, с. 4].

В работах [11; 14] приведены результаты исследования механических свойств фиброармированных слоистых льдокомпозиатов на трехточечный изгиб, которые свидетельствуют о рациональности их применения для строительства ледовых переправ, ледяных аэродромов, зимних дорог и т.п. [11; 15]. Необходимо отметить, что применение в данной сфере химически стойких или инертных искусственных волокон ведет к повышению техногенной нагрузки на окружающую среду.

На первом этапе было исследовано влияние содержания полипропиленовой фибры на прочность льда при сжатии в зависимости от температурных условий. Результаты экспериментов показали, что введение полипропиленовой фибры в матрицу льда способно повысить его прочность на сжатие (рис. 1). При температуре -10 °С с увеличением содержания фибры прочность микроармированного льда возрастает примерно в 9 раз, с 0,9 до 8,1 МПа, а с ее понижением до рекомендованных температур формирования целика [4] в -20 °С прочность льдокомпозиата увеличивается с 2,5 до ≈14 МПа.

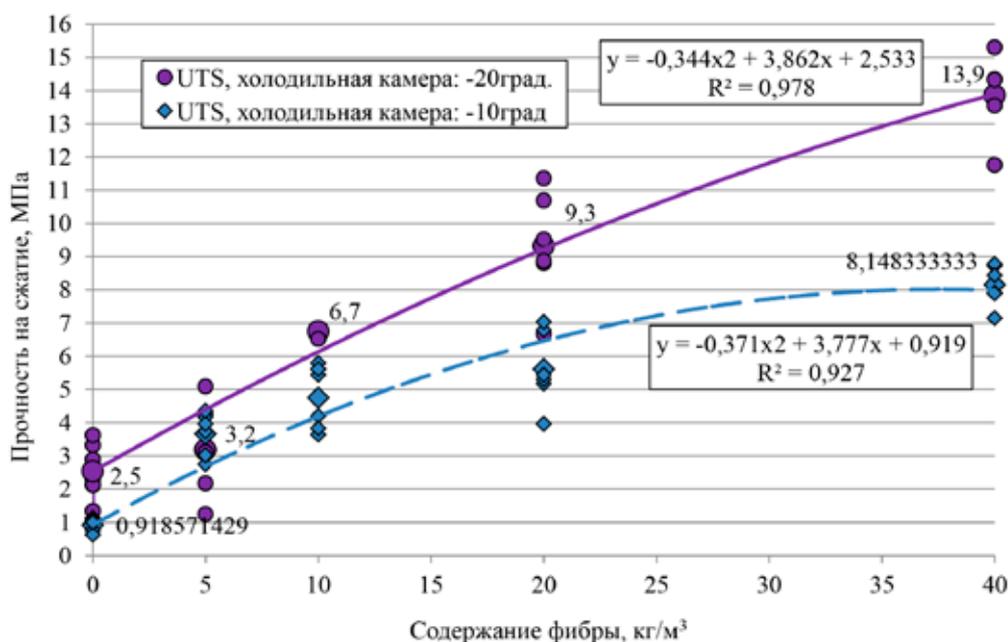


Рис. 1. Влияние содержания полипропиленовой фибры ВСМ-6 на прочность льда при сжатии в зависимости от температурных условий

Полученный материал по своим прочностным характеристикам вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к смерзающим закладочным массивам. Однако в реальных условиях подземной разработки месторождений не может быть воспроизведен в масштабах, необходимых для эффективного применения в качестве искусственных целиков, вследствие длительности возведения ледяной закладки, промораживание необходимого объема которой может занимать годы [16]; кроме того, необходимо учесть дополнительные затраты на возведение и поддержание гидроизоляции в условиях отрицательных температур подземной разработки. Использование полипропиленовой фибры в льдопородном закладочном массиве позволит добиться ее равномерного распределения и повышения прочностных характеристик искусственных целиков без применения дополнительных мероприятий при их возведении.

Цель исследования заключается в экспериментальной оценке влияния полипропиленовой фибры диаметром $10 \div 20$ мкм на прочность льдопородной закладки различного гранулометрического состава.

Материалы и методы исследования

Льдопородные образцы кубической формы размерами 100×100 мм изготавливали путем замораживания смесей из дробленых пород, воды и фибры в климатической камере ТСС 7160 при рекомендованной температуре промораживания [4] в -20 °С, с использованием следующих материалов:

– дробленый алевролит с золотоносного месторождения «Бадран» РС (Я), насыпная плотность 1370 кг/м^3 , гранулометрический состав (табл. 1) соответствовал ранее проведенным ИГДС СО РАН экспериментам [5];

Таблица 1

Гранулометрический состав дробленого алевролита

| Размер отверстий сит, мм | Частный остаток, % |
|--------------------------|--------------------|
| 5 | $25 \div 30$ |
| $5 \div 10$ | $40 \div 45$ |
| $10 \div 15$ | $15 \div 20$ |
| 15 | $5 \div 10$ |

– фибра полипропиленовая марки ВСМ-6, длина волокна 6 мм, диаметр $10 \div 15$ мкм, плотность 910 кг/м^3 [13, с. 16].

– вода с максимальным содержанием солей не более 500 мг/л .

В ходе экспериментальных исследований в соответствии с ГОСТ 10180-2012, 18105-2018 определялась прочность образцов льдопородной закладки на одноосное сжатие. Испытания образцов проводились в термокамере, при температуре -20 °С [5], на установке UTS250 (погрешность измерения в диапазоне $0,8 \div 2 \text{ Кн} - 8 \text{ Н}$, в диапазоне $2 \div 250 \text{ кН} - 0,5\%$ от измеренной величины).

Результаты исследования и их обсуждение

Были проведены три серии испытаний на образцах из хаотично микроармированного дробленого алевролита с различным объемом содержания воды: максимальное $43,5\%$, оптимальное 30% и минимальное 15% [4].

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Установлено, что в условиях полного водонасыщения ($43,5\%$) при содержании фибры от 0 до $8,7 \text{ кг/м}^3$ ($\mu = 0 \div 1\%$) находится оптимальное содержание волокна для льдопородной закладки из дробленого алевролита. Наибольшее увеличение прочности на 38% с $8,7$ до 12 МПа достигается при содержании фибры в количестве $4,35 \text{ кг/м}^3$ ($\mu = 0,5\%$). При содержании фибры в диапазоне от $4,35$ до $17,4 \text{ кг/м}^3$ ($\mu = 0,5 \div 2$) прочность фиброармированных льдопородных образцов превышает контрольную и варьируется в пределах от 12 до $10,4 \text{ МПа}$. При увеличении содержания волокна до $38,4 \text{ кг/м}^3$ ($\mu = 4\%$) плотность исследуемых образцов снижается с 1763 до 1476 кг/м^3 (табл. 2), а прочность падает до $5,8 \text{ МПа}$.

Как видно из данных табл. 2, в условиях неполного водонасыщения (при содержании воды в 15 и 30%) введение фибры в состав льдопородной закладки не приводит к росту прочности. Исследуемые образцы разрушались в части, где количество льда-цемента было наименьшим, где вода не полностью заполнила пустоты между кусками дробленых пород (рис. 3).

Необходимо отметить, что приведенные результаты справедливы лишь для вышеприведенных условий проведения экспериментов. При ведении закладочных работ в конкретных производственных условиях для получения целиков требуемой несущей способности необходимо учитывать зависимость прочности льдопородного материала от определенных термовлажностных условий формирования [5].

Таблица 2

Физико-технические характеристики образцов льдопородной закладки

| Материал | Масса, кг/м ³ | | Фибра | | Плотность | | Прочность на сжатие | | Sm, МПа | Vm, % |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|------|---------------------|-----|---------|-------|
| | Заполнитель | Вода | Объемное содержание μ, % | кг/м ³ | кг/м ³ | % | МПа | % | | |
| Дробленый алевролит | 1370 | 435 (максимальное содержание) | 0 | 0 | 1763 | 100 | 8,7 | 100 | 0,6 | 7,2 |
| | | | 0,5 | 4,35 | 1752 | 101 | 12,0 | 138 | 0,2 | 1,3 |
| | | | 1 | 8,7 | 1788 | 103 | 11,2 | 129 | 0,3 | 3,0 |
| | | | 2 | 17,4 | 1784 | 103 | 10,4 | 119 | 0,8 | 7,3 |
| | | | 4 | 34,8 | 1476 | 85 | 5,8 | 67 | 0,04 | 0,6 |
| | | 300 (оптимальное содержание [4]) | 0 | 0 | 1672 | 100 | 4,1 | 100 | 0,9 | 21,0 |
| | | | 0,5 | 4,35 | 1700 | 102 | 4,5 | 110 | 1,0 | 23,2 |
| | | | 1 | 8,7 | 1674 | 100 | 3,3 | 80 | 0,5 | 16,2 |
| | | | 1,9 | 17,4 | 1685 | 101 | 4,0 | 98 | 0,5 | 13,0 |
| | | | 3,8 | 34,8 | 1675 | 100 | 4,3 | 103 | 0,5 | 10,8 |
| | | 150 (минимальное содержание [4]) | 0 | 0 | 1596 | 100 | 1,6 | 100 | 0,6 | 38 |
| | | | 0,5 | 4,35 | 1545 | 97 | 1,4 | 90 | 0,5 | 37 |
| | 1 | | 8,7 | 1530 | 96 | 1,6 | 104 | 0,1 | 4 | |
| | 1,9 | | 17,4 | 1534 | 96 | 1,7 | 109 | 0,5 | 29 | |
| | 3,8 | | 34,8 | 1544 | 97 | 2,38 | 151 | 0,6 | 25 | |

Sm – среднее квадратическое отклонение, МПа; Vm – коэффициент вариации, %.

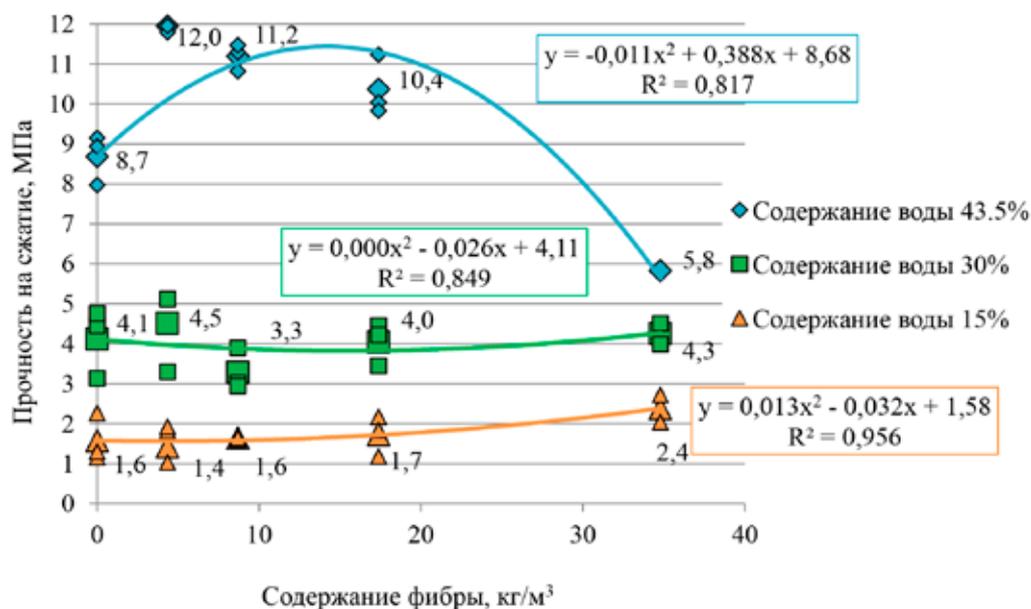


Рис. 2. Прочность образцов льдопороды на сжатие при различном содержании воды и полипропиленовых волокон



Рис. 3. Образец льдопородной закладки $\mu_{\text{воды}} = 30\%$ с отчетливой границей водонасыщения/недостаток льда-цемента

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии технической возможности повышения прочности льдопородного закладочного материала путем введения в состав смеси микроармирующих полипропиленовых волокон. Установлено оптимальное содержание армирующего волокна ($\mu \in [0;1]\%$) для закладки на основе алевролитового щебня, позволяющее повысить прочность на сжатие образцов льдопородной закладки на 38% с 8,7 до 12 МПа при $\mu = 0,5\%$.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения прочности целиков из льдопородной закладки без существенного изменения апробированной технологии, при минимальных дополнительных затратах.

Необходимо отметить, что возведение фиброармированных ледяных или льдопородных закладочных массивов, целиков, могильников токсичных отходов в области рудников криолитозоны не ведет к повышению техногенной нагрузки. Более того, может способствовать ее снижению путем частичной утилизации отвалов, хвостов обогащения горно-обогатительного предприятия, используя их в качестве наполнителя при изготовлении льдопородной закладки.

Полученные результаты исследований рекомендуются для использования при формировании закладки из промораживаемых пород в натуральных условиях и расчетах конструктивных параметров систем разработки с применением смерзающей закладки.

Список литературы

1. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. 1994. 21 p.
2. Киселев В.В., Хохолов Ю.А. Экогеотехнологический способ подземной отработки техногенных россыпных месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 3. С. 29–33.
3. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and Constraints of Engineering Frozen Backfill for Underground Mining Applications in Permafrost. ISCORD: Planning for Sustainable Cold Regions. Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development. 2013. P. 175–190.
4. Петров Д.Н., Хохолов Ю.А. Прогноз продолжительности формирования льдопородного целика в зависимости от горно-геологических условий, температуры промораживания и конструктивных параметров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 10. С. 24–29.
5. Зубков В.П., Необутов Г.П., Петров Д.Н. Повышение плотности и качества извлечения запасов при подземной разработке золоторудных месторождений Республики Саха (Якутия) // Горный журнал. 2017. № 4. С. 53–56.
6. Необутов Г.П., Зубков В.П., Мамонов А.Ф. Подземная добыча руды с использованием льдопородной закладки на месторождении Бадран в Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 10. С. 71–74.
7. Васильев Н.К., Пронк А.Д.С. Ледяные и льдогрунтовые композиты как строительные материалы в ледяных сооружениях // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 277. С. 35–45.
8. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of ice with basalt materials. Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 196. P. 103490.
9. Райс В.В. Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019. 216 с.
10. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1 (11). С. 98–107.
11. Сыромятникова А.С., Федорова Л.К. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переprav // Арктика: экология и экономика. 2022. № 2. С. 281–287.
12. Wu Y., Lou X., Liu X., Pronk A. The property of fiber reinforced ice under uniaxial compression. Materials and Structures. 2020. № 2. P. 29.
13. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2009. 168 с.
14. Нужный Г.А., Бузник В.М., Черепанин Р.Н., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д. Создание и исследование композиционных материалов на основе льда // Полярная механика. 2018. № 4. С. 22–29.
15. Васильев Н.К., Шаталина И.Н. Методы армирования льда для создания ледяных и льдогрунтовых композитов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 119–129.
16. Шерстов В.А., Хохолов Ю.А., Ушницкий И.М., Елшин В.К., Киселев В.В. Влияние нерегулируемого теплового режима на условия эксплуатации россыпных шахт Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Отдельный выпуск № 3. С. 136–137.

УДК 622.79

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНОГО БЕНТОНИТА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПРОЦЕССЕ ЕГО АКТИВАЦИИ

Бортников С.В., Горенкова Г.А., Беспалова М.А., Ворожцов Е.П.

*ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова», Абакан,
e-mail: svb@khsu.ru*

На примере процесса обогащения (активации) щелочноземельной бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Республика Хакасия) изучено влияние растворов минеральных кислот на технологические характеристики алумосиликатного природного сырья. Показано, что добавление минеральной кислоты в систему водной суспензии бентонита существенно изменяет технологические параметры минерального сырья. Растворы соляной и серной кислот снижают коллоидальность материала до минимальных значений для исследуемой системы, при этом концентрация подвижных ионов щелочноземельных металлов увеличивается. Появление в модельных системах катионов натрия восстанавливает характерные свойства бентонитовой глины. Коллоидальность восстанавливается в ряде случаев до максимальных значений, что может означать, что бентонит в кислой среде сохраняет свою уникальную слоистую структуру, при этом за счет лучшего «вымывания» изначально входивших в его состав ионов кальция и магния ионообменная емкость материала существенно увеличивается. Контакт бентонита с раствором минеральной кислоты способствует увеличению содержания крупных фракций частиц глины. Последующее добавление соды, наоборот, способствует уменьшению среднего размера частиц и, соответственно, увеличению удельной поверхности дисперсной фазы системы. В модельной системе с серной кислотой происходит значительное увеличение удельной поверхности даже по сравнению с известным способом активации бентонита кальцинированной содой. Описываемая технология обработки природного минерального сырья, включающая последовательное воздействие на алумосиликат серной кислоты и кальцинированной соды, может быть предложена как альтернативный вариант процесса обогащения щелочноземельного бентонита.

Ключевые слова: бентонитовая глина, обогащение, кислотная активация, фракционный состав, коллоидальность, ионный обмен

Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 90 от 12.12.2022).

INFLUENCE OF ACID TREATMENT OF ALKALINE EARTH BENTONITE ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE PROCESS OF ITS ACTIVATION

Bortnikov S.V., Gorenkova G.A., Bepalova M.A., Vorozhtsov E.P.

Khakass State University named N.F. Katanov, Abakan, e-mail: svb@khsu.ru

Using the example of the process of enrichment (activation) of alkaline earth bentonite clay from the «10th Khutor» deposit (Republic of Khakassia), the influence of mineral acid solutions on the technological characteristics of aluminosilicate natural raw materials was studied. It is shown that the addition of a mineral acid to the system of an aqueous suspension of bentonite significantly changes the technological parameters of the mineral raw material. Solutions of hydrochloric and sulfuric acids reduce the colloidal nature of the material to the minimum values for the system under study, while the concentration of mobile ions of alkaline earth metals increases. The appearance of sodium cations in model systems restores the characteristic properties of bentonite clay. Colloidal nature is restored in some cases to maximum values, which may mean that bentonite in an acidic environment retains its unique layered structure, while, due to the better «washout» of the calcium and magnesium ions originally included in its composition, the ion-exchange capacity of the material increases significantly. The contact of bentonite with a solution of mineral acid contributes to an increase in the content of large fractions of clay particles. The subsequent addition of soda, on the contrary, contributes to a decrease in the average particle size and, accordingly, to an increase in the specific surface area of the dispersed phase of the system. In the model system with sulfuric acid, there is a significant increase in the specific surface even in comparison with the known method of activation of bentonite with soda ash. The described technology for processing natural mineral raw materials, including the sequential action of sulfuric acid and soda ash on aluminosilicate, can be proposed as an alternative variant of the alkaline earth bentonite enrichment process.

Keywords: bentonite clay, enrichment, acid activation, fractional composition, colloidal nature, ion exchange

Наиболее распространенные в природе формы щелочноземельного бентонита для практического использования в различных сферах, как правило, требуют предварительной обработки сырья с целью улучшения технологических показателей глинопо-

рошков. Суть дополнительного воздействия на природное сырье (активация бентонита) заключается в насыщении минеральной основы исходного материала ионами натрия. Одним из самых распространенных способов активации является обработка гли-

ны карбонатом натрия (кальцинированной содой), в ходе которой происходит замена двухзарядных катионов щелочноземельных металлов (кальция и магния) на более подвижные в водной среде однозарядные катионы натрия, содержащиеся в данной системе в избытке [1]. Анионы добавляемого реагента способны связывать ионы кальция в нерастворимый в воде карбонат кальция, способствуя смещению равновесия ионного обмена в сторону выхода ионов кальция из структуры бентонита и внедрения в него ионов натрия. Можно предположить, что использование еще более подвижного иона – катиона водорода – будет способствовать более полному вытеснению ионов кальция, а это, в свою очередь, сделает более эффективным дальнейший этап насыщения ионами натрия (процесс активации) [2, 3].

Целью работы является изучение влияния растворов минеральных кислот в процессе активации щелочноземельной бентонитовой глины на технологические характеристики природного сырья.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили образцы бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Республика Хакасия). Минеральный состав исследуемого бентонита (объем. %): монтмориллонит – 70–72; гидрослюда – 1–2; каолинит – 7–8; кварц – 7–8; щелочной полевой шпат – 6–7; слюда – 4–5; кальцит – 1–2. Соотношение суммы ионов K^+ и Na^+ к сумме ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} – 0,17 [4]. Подготовка образцов и выполнение количественных измерений проводились в соответствии с ГОСТ 28177-89 [5].

Для получения модельных систем глину количеством 30 г смешивали с 10 мл 0,1М раствора минеральной кислоты, выдерживали в закрытой чашке Петри 24 часа. Затем образец сушили при температуре 110°C в течение 6 часов. Высушенное сырье измельчали и просеивали через сито № 05. Дальнейшую активацию бентонита проводили, смешивая глину с карбонатом натрия при комнатной температуре в следующем соотношении компонентов, мас. %: бентонит: карбонат натрия – 65–70: 20–25, остальное – вода. Смесь выдерживали в закрытой чашке Петри 24 часа, затем сушили при температуре 110°C в течение 6 часов. Высушенный материал измельчали и просеивали через сито № 05.

В качестве индикаторов происходящих изменений в процессе активации бентонитовых дисперсий проводили оценку ионо-

обменного комплекса модельной системы (содержание подвижных форм ионов щелочноземельных металлов), коллоидальности и степени дисперсности полученных образцов.

Определение суммы катионов кальция и магния

Навеску глины массой 1 г помещали в мерную колбу на 100 мл, прибавляли 0,2 г углекислого кальция, доливали до метки 1 н раствором хлористого натрия, выдерживали 24 часа и отфильтровывали. В полученном фильтрате определяли содержание ионов кальция и магния. Для этого к пробе объемом 50 мл добавляли 5 мл аммонийного буферного раствора, индикатор (эриохром черный) и титровали 0,05 н раствором трилона Б до перехода окраски от красной к синей. Концентрацию катионов кальция и магния (X), мг·экв на 100 г глины вычисляли по формуле:

$$X = (V \cdot 0,05 \cdot 100) / m,$$

где V – объем раствора трилона Б, израсходованный на титрование, мл; 0,05 – нормальность раствора трилона Б; 100 – коэффициент для пересчета на 100 г глины; m – масса глины в аликвотной части раствора, г.

Определение коллоидальности проводили методом, основанным на измерении седиментационного объема, образующегося в глинистой суспензии во времени. Для этого навеску глины массой 0,5 г помещали в мерную пробирку, приливали воду до общего объема 15 мл и взбалтывали до получения однородной суспензии. Затем добавляли 0,1 г окиси магния и снова взбалтывали в течение 1 минуты. По истечении 24 часов измеряли объем образовавшегося осадка. Коллоидальность (K) в процентах вычисляли по формуле:

$$K = (V \cdot 100) / 15,$$

где V – объем осадка глины в пробирке, мл; 15 – общий объем глины и воды в пробирке, мл.

Фракционный состав бентонитовых дисперсий, размер частиц и удельную поверхность определяли методом дифракции лазерного излучения на лазерном анализаторе микрочастиц «Ласка ТД».

Результаты исследования и их обсуждение

В работе исследовалось поведение образцов бентонитовой глины в растворах минеральных кислот в качестве предварительного этапа процесса активации природного сырья.

Таблица 1

Исследуемые модельные системы

| Модельная система | Обозначение | Описание |
|-------------------|---|--|
| Система 1 |  | Исходная карьерная бентонитовая глина (пробоподготовка по ГОСТ 28177-89 [5]) |
| Система 2 |  | Активированный карбонатом натрия бентонит (Система 1 + Na ₂ CO ₃) |
| Система 3 |  | Бентонит, обработанный соляной кислотой (Система 1 + HCl) |
| Система 4 |  | Активированный карбонатом натрия бентонит (Система 3 + Na ₂ CO ₃) |
| Система 5 |  | Бентонит, обработанный серной кислотой (Система 1 + H ₂ SO ₄) |
| Система 6 |  | Активированный карбонатом натрия бентонит (Система 5 + Na ₂ CO ₃) |

Таким образом, ионом, вытесняющим катионы щелочноземельных металлов, выступает протон – катион водорода (H⁺). Обладая наибольшей подвижностью в водной среде ввиду своих минимальных размеров, протон в процессе ионного обмена должен максимально увеличить ионообменную емкость материала, переведя при этом дополнительные количества ионов кальция и магния в подвижную форму.

Исследованию подвергались 6 модельных систем, включающих бентопорошок в различном сочетании с растворами соляной, серной кислот и карбоната натрия (табл. 1).

Замена воды в модельной системе на раствор минеральной кислоты существенно меняет свойства материала. В системе 3, в которой исходная глина обрабатывалась 0,1М раствором HCl, коллоидальность составила 27,3%, в системе 5, в которой исходная глина обрабатывалась 0,1М раствором H₂SO₄ – 20,0%. Сумма обменных катионов в химически модифицированных бентопорошках составила: 33,5 и 35,0 мг·экв на 100 г глины соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Физико-химические характеристики модельных систем

| Модельная система | Коллоидальность, % | [Ca ²⁺]+[Mg ²⁺], мг·экв/100 г |
|-------------------|--------------------|---|
| Система 1 | 23,3 | 32,5 |
| Система 2 | 93,3 | 17,5 |
| Система 3 | 27,3 | 33,5 |
| Система 4 | 88,6 | 18,0 |
| Система 5 | 20,0 | 35,0 |
| Система 6 | 98,6 | 24,0 |

Полученные результаты показывают, что присутствие в системе избытка ионов водорода (кислая среда) способствует увеличению концентрации ионообменного комплекса бентонита (ионов, не связанных с кристаллической решеткой алюмосиликата иными, кроме ионной связи, взаимодействиями). Факт увеличения концентрации ионов кальция в обработанных кислотой системах 3 и 5 по сравнению с контрольным образцом (система 1) свидетельствует об их наличии в составе минерала.

Коллоидальность всех образцов после воздействия кислоты резко уменьшается. Это вполне объяснимо и ожидаемо, так как протон – очень плохо гидратируемый ион и не может в этом плане конкурировать с катионами металлов. Между тем, именно за счет связывания воды катионами в межслоевых пространствах структуры минералов бентонита происходит набухание материала, что является основной причиной способности глины образовывать и сохранять в водной среде устойчивую коллоидную систему [6]. Низкая коллоидальность модельных систем, обработанных кислотой, может быть связана также с тем, что кислая среда для отрицательно заряженных слоев минералов бентонитовой глины негативно сказывается на способности частиц алюмосиликата сохранять устойчивую водную дисперсию.

Для восстановления более привычного для бентонита катионного состава из ионов металлов в качестве второго этапа активации бентопорошков использовали добавление в систему ионов натрия в форме кальцинированной соды – карбоната натрия (системы 4, 6).

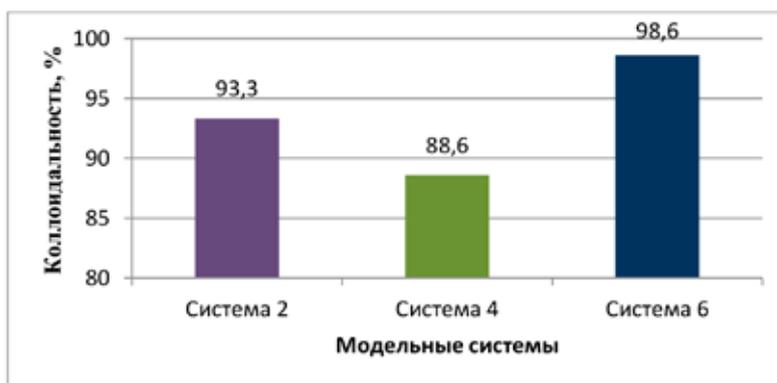


Рис. 1. Коллоидальность модельных систем

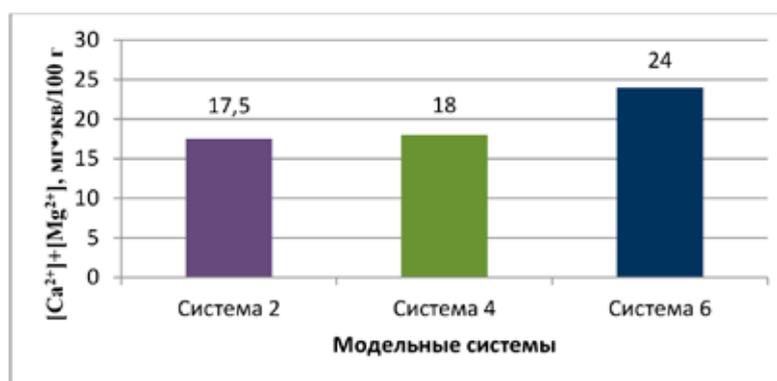


Рис. 2. Содержание обменных катионов

Определены физико-химические характеристики полученных модельных систем. В системе 4 значение коллоидальности составило 88,6%, в системе 6 – 98,6%. Сумма обменных катионов в системе 4 – 18,0, в системе 6 – 24,0 мг-экв на 100 г глины (рис. 1, 2).

Таким образом, в обоих случаях наблюдаются связывание ионов щелочноземельных металлов и восстановление показателей коллоидальности до максимальных значений. Все это можно объяснить активно протекающими ионообменными процессами. Значит, предварительная обработка кислотой структуру алюмосиликата не повреждает, а лишь только способствует более интенсивному вымыванию катионов. Это, в свою очередь, дает возможность для более эффективного процесса обогащения бентонитового сырья ионами натрия (процесс активации).

На емкость ионного обмена глинистых частиц влияет и степень дисперсности материала. При уменьшении размера частиц глины можно ожидать и увеличение коллоидальности образцов вследствие увеличения суммарной площади поверхности системы

и более свободного доступа воды к межслоевым пространствам минерала.

Модельные системы были исследованы на предмет определения размеров составляющих их частиц и удельной поверхности (табл. 3, 4).

Полученные данные показывают, что контакт бентонита с раствором кислоты способствует увеличению содержания крупных фракций частиц глины. При этом в случае обработки раствором серной кислоты этот эффект минимальный. В исследуемых образцах бентонитовой глины среди основных фракций представлены частицы размером от 2 до 5 мкм, от 5 до 20 мкм и от 20 до 50 мкм. При обработке кислотами содержание мелких частиц (фракция 2–5 мкм) значительно уменьшается (на 99% и 63% в случае воздействия соляной и серной кислот соответственно). Содержание средней фракции (5–20 мкм) практически не изменяется, а доля крупных частиц (20–50 мкм) значительно увеличивается. Последующее добавление соды, наоборот, способствует уменьшению среднего размера частиц и, соответственно, увеличению удельной поверхности дисперсной фазы системы.

Таблица 3

Фракционный состав модельных систем

| Фракция частиц, мкм | | Содержание частиц в модельных системах, % | | | | | |
|---------------------|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| min | max | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,50 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 |
| 1,00 | 2,00 | 0,32 | 0,09 | 0,00 | 0,12 | 0,07 | 2,87 |
| 2,00 | 5,00 | 16,49 | 6,83 | 0,90 | 8,90 | 6,08 | 39,69 |
| 5,00 | 20,00 | 79,51 | 79,22 | 65,49 | 81,06 | 78,82 | 56,61 |
| 20,00 | 50,00 | 3,68 | 13,59 | 32,17 | 9,81 | 14,71 | 0,75 |
| 50,00 | 100,00 | - | 0,28 | 1,43 | 0,10 | 0,31 | - |

Таблица 4

Сравнение удельной поверхности частиц бентопорошков модельных систем

| Модельная система | Средний диаметр частиц, мкм | Удельная поверхность, мкм ² /г | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 847 531 | 622 393 | 412 329 | 679 745 | 601 903 |
| 1 | 9,12 | 847 531 | 1,00 | | | | |
| 2 | 12,91 | 622 393 | -0,73 | 1,00 | | | |
| 3 | 18,61 | 412 329 | -0,49 | -0,66 | 1,00 | | |
| 4 | 11,66 | 679 745 | -0,80 | +1,09 | +1,65 | 1,00 | |
| 5 | 13,31 | 601 903 | -0,71 | -0,97 | +1,46 | -0,89 | 1,00 |
| 6 | 6,30 | 1 259 772 | +1,49 | +2,02 | +3,06 | +1,85 | +2,09 |

Следует отметить, что в модельной системе с серной кислотой происходит значительное увеличение удельной поверхности даже по сравнению с известным способом активации бентонита кальцинированной содой [1]. В дисперсии наблюдается резкое снижение доли крупной (20–50 мкм) и средней (5–20 мкм) фракций на 95% и 28% соответственно. При этом доля мелких фракций заметно возрастает. Так, доля фракции от 2 до 5 мкм в системе 2 (активированный обычным способом бентонит) составляет 6,83%, а в системе 6, прошедшей предварительную обработку серной кислотой, доля этой фракции увеличивается практически в 6 раз (39,69%). Кроме того, в системе 6 появляются фракции еще более мелких частиц (от 1 до 2 мкм в количестве 2,87%). Наблюдаемые закономерности можно объяснить большей эффективностью ионного обмена в изучаемой системе, где присутствие сильной минеральной кислоты обеспечивает большую подвижность всех катионов в системе и более эффективную замену ионов щелочноземельных металлов на ионы натрия, что является конечной целью обо-

гащения природного бентонитового сырья путем его химической активации.

Заключение

Добавление минеральной кислоты в систему водной суспензии щелочноземельной бентонитовой глины существенно изменяет технологические параметры минерального сырья. Растворы соляной и серной кислот снижают коллоидальность материала до минимальных значений для исследуемой системы. При этом концентрация подвижных ионов щелочноземельных металлов увеличивается. Увеличение концентраций ионов кальция и магния можно объяснить присутствием в системе ионов водорода, которые, являясь более подвижными ионами в водной среде, активно вытесняют катионы металлов из межслоевых пространств минералов бентонита.

Появление в модельных системах катионов натрия восстанавливает характерные свойства бентонитовой глины. Коллоидальность восстанавливается в ряде случаев до максимальных значений, что может означать, что бентонит в кислой среде сохраняет

свою уникальную слоистую структуру, при этом за счет лучшего «вымывания» изначально входивших в его состав ионов кальция и магния ионообменная емкость материала существенно увеличивается (в условиях нашего эксперимента – на 30–40%).

Контакт бентонита с раствором минеральной кислоты способствует увеличению содержания крупных фракций частиц глины. Последующее добавление соды, наоборот, способствует уменьшению среднего размера частиц и, соответственно, увеличению удельной поверхности системы. В модельной системе с серной кислотой происходит значительное увеличение удельной поверхности даже по сравнению с известным способом активации бентонита кальцинированной содой.

Описываемая технология обработки природного минерального сырья, включающая последовательное воздействие на алюмосиликат серной кислоты и кальцинированной соды, может быть предложена как альтернативный вариант процесса обогащения щелочноземельного бентонита.

Авторы благодарят ООО «Бентонит Хакасии» за предоставленные для изучения образцы.

Список литературы

1. Бортников С.В., Горенкова Г.А. Изучение активации щелочноземельного бентонита карбонатом натрия // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2012. № 1. С. 14-17.
2. Даудова А.Л., Межидов В.Х., Висханов С.С. Кислотная модификация бентонитов различного химического состава // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 1. С. 118-123. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-118-123.
3. Мосталыгина Л.В., Чернова Е.А., Бухтояров О.И. Кислотная активация бентонитовой глины // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2012. № 24 (283). С. 57-61.
4. Белоусов П.Е., Крупская В.В., Чупаленков Н.М., Морозов И.А., Закусин С.В. // Новое в познании процессов рудообразования: труды молодых ученых, посвященные 90-летию ИГЕМ РАН. М., 2020. С. 13-15.
5. ГОСТ 28177-89. Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. 21 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.

СТАТЬИ

УДК 528.024.1-187.4:528.13

**ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ РАВНОТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ НАЛОЖЕНИИ
ДОПУСКОВ НИВЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНОГО РАНГА****Волкова Т.Н., Волков Н.В.***Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург,
e-mail: volkov.nikita@yahoo.com*

В рамках прогностических, изыскательских и техногенных геодинамических полигонов создаются сети высокоточного нивелирования. На таких полигонах производятся исследования в областях современной геодинамики, прогноза сейсмических событий, контроля сдвижений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа, а также решение других научно-практических задач геофизики и инженерной геодезии. Для решения приведенных задач в сетях нивелирования геодинамических полигонов через определенные промежутки времени выполняется повторное высокоточное нивелирование I и II классов точности. На современном этапе процесс нивелирования выполняется с применением высокоточных оптических нивелиров в комплекте со штриховыми инварными рейками и цифровыми нивелирами, укомплектованными кодовыми инварными рейками. Точность нивелирования I и II классов, выполняемого в полевых условиях, зависит от приборной точности и совокупного влияния многих внешних факторов, таких как температура и влажность воздуха, вид и состояние почвогрунтов, стабильность угла наклона нивелира, гидротермические движения земной поверхности и других. Повторное высокоточное нивелирование I и II классов точности должно обеспечивать достоверные и значимые кинематические характеристики современных вертикальных сдвижений физической поверхности Земли. Такие сдвижения обусловлены проявлением современной геодинамики и техногенными деформационными процессами приповерхностных слоев земной коры. Нивелирование I класса точности требует выполнения на нивелирных станциях сложных громоздких программ наблюдений, что снижает оперативность и эффективность его реализации. Вместе с тем имеется возможность замены нивелирования I класса менее громоздкой и затратной программой нивелирования II класса без потери точности со значительным повышением оперативности повторного нивелирования. В работе приводится теоретическое обоснование возможности замены нивелирования I класса нивелированием II класса путем сокращения программы нивелирования и наложения более жестких допусков, касающихся исполнения программы нивелирования на станциях нивелирных ходов.

Ключевые слова: нивелирование, цифровой нивелир, оценка результатов нивелирования, допуски и программа нивелирования

**ESTIMATION OF THE VARIANCE OF THE EQUIVALENT RESULTS
OF REPEATED LEVELING WITH THE IMPOSITION
OF LEVELING TOLERANCES OF VARIOUS RANKS****Volkova T.N., Volkov N.V.***St. Petersburg University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg,
e-mail: volkov.nikita@yahoo.com*

Within the framework of prognostic, survey and technogenic geodynamic polygons, high-precision leveling networks are being created. At such landfills, research is carried out in the fields of actual geodynamics, prediction of seismic events, control of the Earth's surface movements in the developed hydrocarbon deposits and underground gas storage facilities, as well as solving other scientific and practical problems of geophysics and engineering geodesy. To solve the above problems in the leveling networks of geodynamic polygons, repeated high-precision leveling of accuracy classes I and II is performed at certain intervals. High-precision optical levelers complete with dashed invar rails and digital levelers equipped with code invar rails perform leveling at the present stage. The accuracy of leveling of classes I and II performed in the field depends on the instrument accuracy and the combined influence of many external factors such as air temperature and humidity, the type and condition of soils, the stability of the angle of inclination of the level, hydrothermal movements of the Earth's surface and others. Repeated high-precision leveling of accuracy (classes I and II) should provide reliable and significant kinematic characteristics of actual vertical movements of the physical surface of the Earth. Such deformations are caused by the manifestation of geodynamics and technogenic deformation processes of the near-surface layers of the Earth's crust. Leveling of accuracy class I requires the implementation of complex cumbersome observation programs at leveling stations, which reduces the efficiency and effectiveness of its implementation. At the same time, it is possible to replace class I leveling with less cumbersome and costly Class II leveling without loss of accuracy and with a significant increase in the efficiency of repeated leveling. The paper provides a theoretical justification for the possibility of replacing class I leveling with Class II leveling by reducing the leveling program and imposing stricter tolerances regarding the execution of the leveling program at leveling stations.

Keywords: leveling, digital leveling, evaluation of leveling results, tolerances and leveling program

Для изучения кинематических характеристик современной геодинамики, прогноза сейсмических событий, контроля сдвижений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа, а также для решения других научно-практических задач геофизики и инженерной геодезии

создаются сети высокоточного нивелирования на прогностических, изыскательских и техногенных геодинамических полигонах [1; 2]. При этом в сетях нивелирования геодинамических полигонов через определенные промежутки времени выполняется повторно высокоточное нивелирование I и II классов точности.

В настоящее время на геодинамических полигонах нивелирование выполняется с применением высокоточных оптических нивелиров в комплекте со штриховыми инварными рейками, имеющими основную и дополнительную шкалы, и чаще цифровыми нивелирами, укомплектованными кодовыми инварными рейками, имеющими

лишь «одну шкалу». Приборная точность таких нивелиров позволяет выполнять нивелирование в «лабораторных условиях» с точностями 0,5 мм/км (III класс) и 0,3 мм/км (I класс). В действительности точность нивелирования I и II классов, выполняемого в полевых условиях, зависит от совокупного влияния многих внешних факторов (температуры и влажности воздуха, вида и состояния почвогрунтов, стабильности угла наклона нивелира, гидротермических движений земной поверхности и других) [3-5] на процесс измерения превышений на нивелирных станциях, которое проявляется в случайных и систематических погрешностях нивелирования [6; 7].

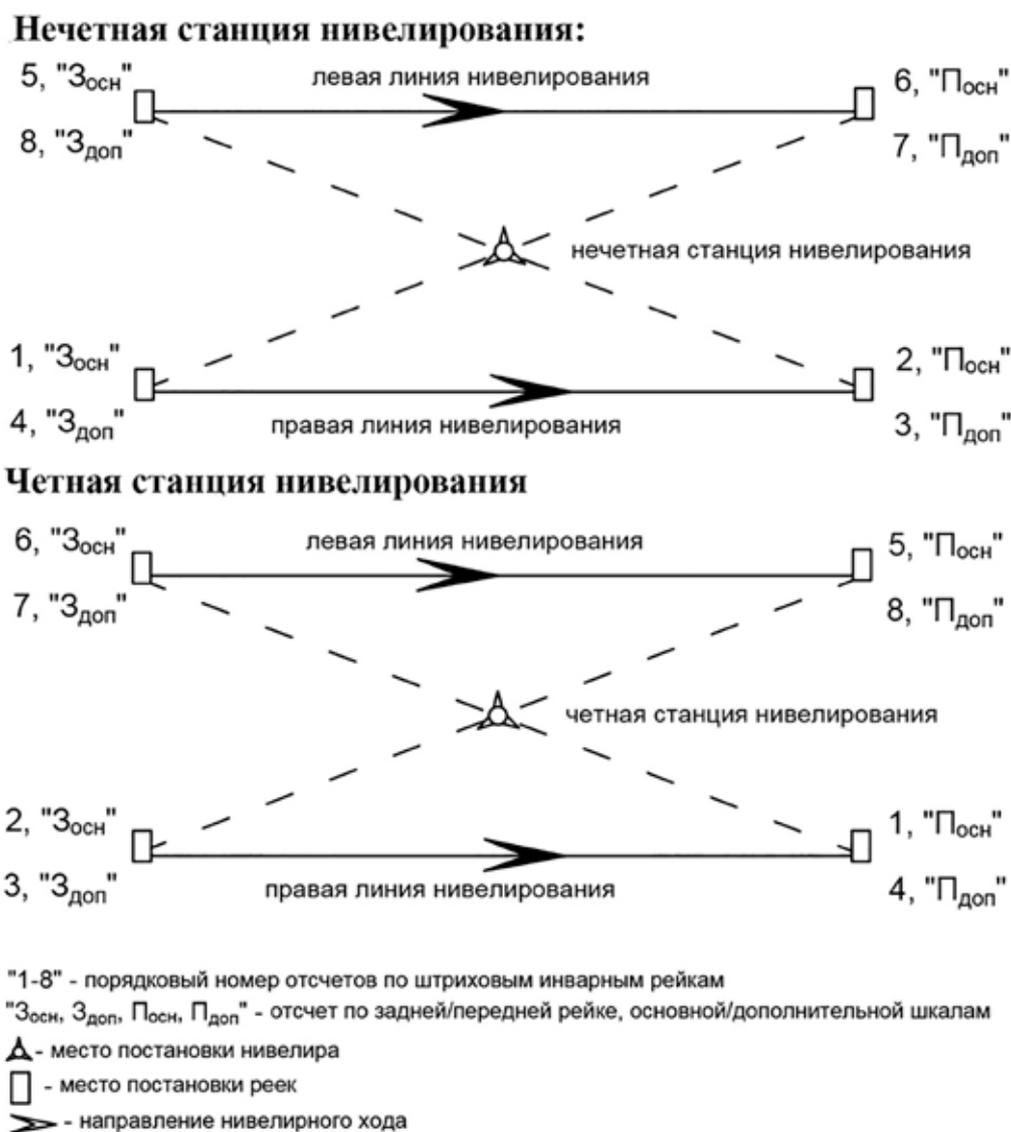


Рис. 1. Реализация оптическим высокоточным нивелиром программы нивелирования I класса на станции нивелирного хода

Целью исследования является обоснование возможности замены нивелирования I класса нивелированием II класса (менее громоздким, затратным и более высокопроизводительным). Очевидно, что возможность такой замены требует теоретического обоснования с позиции повышения жесткости допусков на расхождения измеренных превышений и количества приемов (горизонтов прибора) при измерениях. Если такая замена возможна, то также необходимо определить дополнительные условия использования замены.

Материалы и методы исследования

Современные технологии нивелирования I и II классов, использующие оптические нивелиры, позволяющие путем применения специальных программ нивелирования на станции [6; 7] исключать или ослаблять до требуемых пределов влияние внешних факторов на результаты измерения превышений. Реализация таких программ (рис. 1) возможна при включении в них серии отсчетов по основным ($Z_{осн}$, $P_{осн}$) и дополнительным ($Z_{доп}$, $P_{доп}$) шкалам инварных реек при нивелировании по правой и левой линиям нивелирования [6; 7], а именно: $Z_{осн}$ (прав), $P_{осн}$ (прав), $P_{доп}$ (прав), $Z_{доп}$ (прав), и $Z_{осн}$ (лев), $P_{осн}$ (лев), $P_{доп}$ (лев), $Z_{доп}$ (лев). Выполнение программ позволяет также осуществлять контроль качества измерения превышения на четных и нечетных станциях путем соблюдения допусков на разности превышений d_i , установленных нормативными документами [6-8].

При нивелировании высокоточными цифровыми нивелирами используются кодовые инварные рейки с «одной» шкалой, что исключает возможность применения программ на нивелирной станции, рекомендованных нормативными материалами [6; 7] при применении оптических нивелиров (рис. 2).

Фактически программы для нивелирования цифровым нивелиром на станции при нивелировании I и II классов состоят из измерений превышения между кодовыми рейками соответственно при четырех и двух горизонтах нивелира, что позволяет контролировать измерение превышений по контрольным разностям d_i .

Результаты исследования и их обсуждение

Сначала покажем, что если при больших допусках все n наблюдений практически являются независимыми и дисперсия

среднего арифметического в n раз меньше дисперсии одного наблюдения, то при малых допусках мы имеем дело фактически с одним наблюдением, и дисперсия среднего арифметического наблюдений практически равна дисперсии одного, отдельно взятого наблюдения [9; 10].

Пусть имеется n независимых наблюдений: $f(x)$ – плотность распределения одного, независимо от остальных проведенного наблюдения; $F(x)$ – функция распределения независимо проведенного наблюдения. Предположим следующую схему наложения допусков на ряд независимых наблюдений, проводимых n приемами.

Проводим наблюдение первым приемом, получим значение x_1 случайной величины x . Пусть x_i – результат наблюдения i приемом, тогда должны быть выполнены включения:

$$x_i \in \bigcap_{j < i} [x_j - \delta, x_j + \delta], i = 2, 3, \dots, n, (1)$$

где δ – величина допуска. Затем вычисляется арифметическая средняя:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} (2)$$

Если же включения (1) нарушаются при некотором i , то результаты наблюдений x_1, \dots, x_{i-1} отбраковываются и снова выполняется вся процедура получения результатов измерений n приемами (при разных горизонтах).

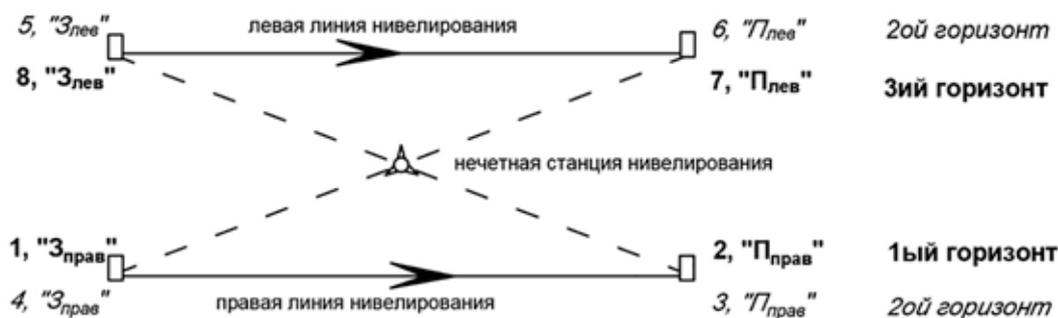
Далее без ограничения общности, для простоты выкладок, будем считать, что измеримая величина равна нулю. Тогда $M(x_1) = 0$, а при отсутствии допусков и $M(x_2) = \dots = M(x_n) = 0$.

При наличии допусков возникают несимметричные усечения распределения $F(x)$ случайных величин x_i (при $i \in [1; n]$), зависящие от x_1, x_2, \dots, x_{i-1} . Более точно можно считать, что случайные величины x_i имеют условные плотности распределения f_i^δ , где $f_i^\delta(x) = f(x)$ [9]:

$$f_i^\delta = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq \alpha_i, \\ A_i f(x), & \text{при } \alpha_i \leq \beta_i, \\ 0, & \text{при } x > \beta_i, \end{cases} (3)$$

где $\alpha_i = \min_{1 \leq j \leq i} \{x_j - \delta\}$;

$\beta_i = \max_{1 \leq j \leq i} \{x_j - \delta\}$;

Нечетная станция нивелирования:**Четная станция нивелирования:**

"1-8" - порядковый номер отсчетов по кодовым рейкам

З_{прав}, З_{лев}, П_{прав}, П_{лев} - отсчет по задней/передней рейке, правой/левой линии нивелирования

▲ - место постановки нивелира

□ - место постановки реек

➤ - направление нивелирного хода

Рис. 2. Реализация цифровым высокоточным нивелиром программы

$$A_i = \frac{1}{F(\beta_i) - F(\alpha_i)}, \quad 2 \leq i \leq n.$$

Отметим, что $A_n \geq A_{n-1} \geq \dots \geq A_{i-1} \geq \dots \geq A_1 = 1$.

Тогда совместная плотность распределения $f(x_1, \dots, x_n)$ системы случайных величин (x_1, \dots, x_n) имеет вид:

$$f(x_1, \dots, x_n) = f(x_1) \prod_{i=2}^n f_i^\delta(x_i). \quad (4)$$

Вычислим функцию распределения $F_x^\delta(r)$ случайной величины $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$ по формуле [9]:

$$F_x^\delta(r) = \iint_{D \subset R^n} \dots \int f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n, \quad (5)$$

где область D в n -мерном пространстве R^n задается неравенством $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \leq r$.

После перехода к n -кратному повторному интегралу получим:

$$F_{\bar{x}}^\delta(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{n \cdot r - x_1} \dots \int_{-\infty}^{n \cdot r - \sum_{i=1}^{n-1} x_i} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{n \cdot r - x_1} \dots \int_{-\infty}^{n \cdot r - \sum_{i=1}^{n-1} x_i} f(x_1) dx_1 \dots dx_n. \quad (6)$$

С целью упрощения математических выкладок ограничимся случаем двух измерений превышения на станции, т.е. пусть $n = 2$, тогда: $F_x^\delta(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) \int_{-\infty}^{2r-x_1} f_2^\delta dx_1 dx_2$.

Продифференцируем $F_x(r)$ по верхнему пределу r , получим:

$$f_{\bar{x}}(r) = F_x'(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) f_2^\delta(2r - x_1) dx_1. \tag{7}$$

Далее вычислим [9]:

$$M(\bar{x}^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} r^2 \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) f_r^\delta(2r - x_1) dx_1 dr = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) \int_{x-\delta/2}^{x+\delta/2} \frac{r^2 f(2r - x_1)}{A_2} dr dx_1 \tag{8}$$

В (8) мы учли, что вне интеграла $x_1 - \delta/2 \leq r \leq x_1 + \delta/2$ функция $f_2^\delta(2r - x_1)$ в силу условия (3) равна 0. Итак:

$$M(\bar{x}^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) c^2 \int_{x-\delta/2}^{x+\delta/2} \frac{f(2r - x)}{F(x + \delta)F(x - \delta)} dr dx.$$

В силу теоремы о среднем для внутреннего интеграла (3) имеем:

$$M(\bar{x}^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) c^2 \int_{x-\delta/2}^{x+\delta/2} \frac{f(2r - x)}{F(x + \delta)F(x - \delta)} dr dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) c^2 dx_1,$$

где $c(x)$ некоторая функция от x из интервала $[x - \delta/2; x + \delta/2]$. Поэтому, пренебрегая бесконечно малыми порядка малости выше δ представим $c(x)$ в виде $c(x) = x + o(\delta)$.

В результате получаем:

$$M(x^2) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) x^2 dx + o(\delta) = D(x_1) + o(\delta). \tag{9}$$

Из равенства (9) и вытекает утверждение о том, что при малых (жестких) допусках качество результатов двух и более измерений превышений на станции совпадает с качеством измерений превышений одним и тем более двумя приемами.

Рассмотрим теперь случай больших допусков, т.е. устремим $\delta \rightarrow \infty$. Тогда $A_1 \rightarrow 1$ и $f_i^\delta(x) \rightarrow f(x)$. Тогда, исходя из (6):

$$F_{\bar{x}_{n-1}}^\delta(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{n \cdot r - x_1} \dots \int_{-\infty}^{n \cdot r - \sum_{i=1}^{n-1} x_i} f(x_1) \prod_{i=2}^n f_i^\delta(x_i) dx_1 \dots dx_n \xrightarrow{\delta \rightarrow \infty} \\ \xrightarrow{\delta \rightarrow \infty} F_{\bar{x}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1) \int_{-\infty}^{n \cdot r - x_1} f(x_2) \dots \int_{-\infty}^{n \cdot r - \sum_{i=1}^{n-1} x_i} f(x_n) dx_1 \dots dx_n.$$

То есть при больших допусках наблюдения можно считать практически независимыми:

$$D(\bar{x}_\delta) \rightarrow D(\bar{x}) = \frac{D(x_1)}{n}.$$

Современные цифровые технологии нивелирования II класса, предусматривающие применение высокоточных цифровых нивелиров, укомплектованных кодовыми инвариантными рейками, позволяют реализовать программу нивелирования на станции, представленную на рисунке 3.

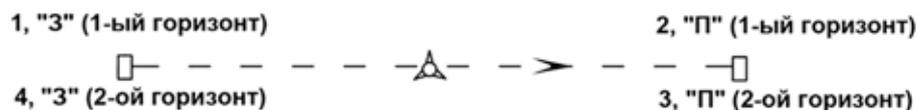
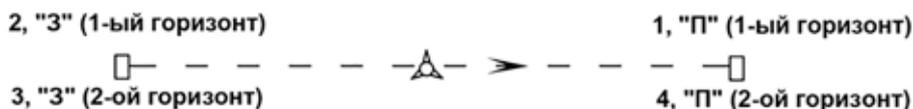
Нечетная станция нивелирования:**Четная станция нивелирования:**

Рис. 3. Реализация цифровым нивелиром программы нивелирования II класса на станции прямого нивелирного хода

Сопоставление программы нивелирования I класса на четной станции правой нивелировки (рис. 2) с программой нивелирования II класса на нечетной станции (рис. 3) указывает на их идентичность друг другу. В целом программа нивелирования I класса на станции отличается от программы нивелирования II класса лишь количеством измеренных превышений (4 и 2 соответственно). Следовательно, при равных внешних условиях нивелирования и допусках на процессы нивелирования, с учетом выражения (9), можно утверждать о равной точности результатов измерения превышений цифровым нивелиром на станции, выполненных по программам I и II классов. Также очевидным является тот факт, что увеличение допуска в n раз снижает точность многократно измеряемой величины превышений примерно в n раз.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований научно обосновано положение о возможности замены нивелирования I класса нивелированием II класса при использовании цифровых нивелиров в комплекте с кодовыми инварными рейками и выполнении определенных условий.

К таким условиям относятся наложение предельно возможных по жесткости допусков в процессе реализации программы нивелирования на нивелирной станции при 2-кратном измерении превышения.

Замена нивелирования I класса нивелированием II класса резко повышает

оперативность повторного нивелирования при резком снижении затрат на его исполнение без снижения точности получаемых результатов.

Список литературы

1. Волков, Н.В. О размещении, выборе конструкций и глубины заложений нивелирных пунктов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2017. № 5. С. 54-59.
2. Волков В.И., Волков Н.В. Условия эффективного применения геодезических методов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений // Маркшейдерский вестник. 2018. № 2. С. 21-25.
3. Уставич Г.А., Шаульский В.Ф., Винокурова О.И. Разработка и совершенствование государственного нивелирования I, II, III и IV классов // Геодезия и картография. 2003. №3. С. 10-15.
4. Simonyan V.V., Labuznov A.V. Evaluation criteria of landslide stability. MATEC Web Conferences. 2018. V. 196. P. 03003. XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP).
5. Квятковская С.С., Кузьмин Ю.О., Никитин Р.С., Фаттахов Е.А. Анализ деформаций земной поверхности на Степановском ПХГ методами спутниковой и наземной геодезии // Вестник СГУГиТ. Т. 22. 2017. № 3. С. 34-39.
6. Нивелирование I и II классов (практическое руководство) / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. М.: Недра, 1982. 264 с.
7. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Федеральная служба геодезии и картографии России: [ГКИНП (ГНТА)-03-010-02: введ. 1.02.2004]. М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 2004. 244 с.
8. Грунин А.Г., Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. 2014. № 6. С. 24-31.
9. Дерр В.Я. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 596 с.
10. Simonyan V.V., Shendyapina S.V. Calculating the accuracy of strain observations of high-rise buildings and structures using electronic total stations. E3S Web of Conferences 164. 02022 (2020). TRACEE. 2019. 9 p.

УДК 528.45

ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СПОСОБОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ НА НАЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК КОНТУРОВ СМЕЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ

Головко А.Н., Скворцов В.П.

*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»,
Зерноград, e-mail: alexnikgol@rambler.ru*

Проблема наложения границ смежных объектов недвижимости остается актуальной сегодня, несмотря на высокий уровень современных технологий и оборудования, используемых для определения характерных точек контура границ объектов недвижимости. Основные факторы, для каждого способа измерений влияющие на наличие таких ошибок, так же как и погрешность измерений, будут различными. Это зависит от используемых в технологии измерений явлений и, соответственно, имеющихся при производстве измерений естественных и искусственных условий. Использование различных способов определения характерных точек контуров смежных объектов недвижимости создает потенциальную ситуацию получения разных значений одной и той же характерной точки смежной границы контуров, что, в свою очередь, влияет как на изменение площади объекта недвижимости в положительную или отрицательную сторону, так и на изменение сроков регистрации объектов недвижимости из-за наличия необходимости устранения ошибок, а также невозможности регистрации объекта недвижимости из-за отклонения межевого дела по причине несоответствия данных. Решение данной проблемы может быть обеспечено анализом использования существующих способов определения характерных точек границ объектов недвижимости, а также факторов, влияющих на погрешность измерения. Основные факторы, влияющие на ошибки в измерениях характерных точек, зависят от используемых в технологиях и оборудовании для производства геодезических работ физических явлений. С помощью физических явлений можно проанализировать характер и природу влияющих факторов, чтобы разработать рекомендации по использованию данных характерных точек контура объекта недвижимости, определенных различными существующими способами. Данные рекомендации позволяют минимизировать случаи наложения границ смежных объектов недвижимости.

Ключевые слова: геодезическая съемка, наложение контуров, наложение границ, смежные объекты недвижимости, способы геодезической съемки

INFLUENCE OF GEODETIC SURVEY METHODS USED AND INSTRUMENT BASE USED ON OVERLAPPING BOUNDARIES OF INDIVIDUAL POINTS OF CONTOURS OF ADJACENT REAL ESTATE OBJECTS

Golovko A.N., Skvortsov V.P.

*Azov-Black Sea Engineering Institute of the Don State Agrarian University, Zernograd,
e-mail: alexnikgol@rambler.ru*

The problem of overlapping the boundaries of adjacent real estate objects remains relevant today, despite the high level of modern technologies and equipment used to determine the characteristic points of the contour of the boundaries of real estate objects. The main factors affecting the presence of such errors, as well as the error of measurements, for each measurement method will be different. This depends on the phenomena used in the measurement technology and, accordingly, the natural and artificial conditions available in the measurement. The use of different methods of determining the characteristic leaks of the contours of adjacent real estate objects creates a potential situation of obtaining different values of the same characteristic point of the adjacent boundary of the contours, which in turn affects both the change in the area of the property in the positive or negative direction, as well as to change the timing of registration of real estate objects due to the need to eliminate errors, as well as the impossibility of registering a real estate object due to the rejection of the boundary case due to data inconsistency. The solution to this problem can be provided by analyzing the use of existing methods for determining the characteristic points of the boundaries of real estate objects, as well as factors affecting the measurement error. The main factors affecting errors in the measurements of characteristic points depend on the physical phenomena used in technologies and equipment for geodetic work. Using physical phenomena, you can analyze the nature and nature of influencing factors in order to develop recommendations for using these characteristic points of the contour of a real estate object, determined in various existing ways. These recommendations will minimize cases of overlapping the boundaries of adjacent real estate objects.

Keywords: geodetic survey, overlaying contours, overlapping boundaries, related properties, geodetic survey methods

В современных условиях цифровизации в России все больше баз данных, необходимых для осуществления производственной деятельности, переводятся в электронный

цифровой формат. Одним из направлений, которое интенсивно развивает и использует цифровизацию баз данных, является кадастровая деятельность. В этом направлении

наряду с данными, пополняемыми текущими геодезическими съемками, пополнение баз данных осуществляется путем оцифровки картографических и других материалов архивного характера. При развитии современного геодезического оборудования, использующего для съемки спутниковые системы и мобильные сети, погрешность измерений при соблюдении условий эксплуатации значительно уменьшается. Производится уточнение границ существующих объектов, а также постановка на учет новых или ранее не стоящих на кадастровом учете. Для подготовки документации существует широкий спектр программного обеспечения, в том числе и предлагаемого производителями геодезического оборудования, обычно предоставляемого в комплекте с оборудованием, или распространяемого производителем для серии геодезического оборудования различной модификации. Востребованность таких видов работ, как геодезическая съемка, обусловлено массовой востребованностью постановки на учет объектов недвижимости при осуществлении ряда государственных программ поддержки, таких как «Дачная амнистия» и «Гаражная амнистия». Также значительный объем работ выполняется при уточнении кадастровой стоимости объектов недвижимости, их объединении, разделении или выделе. Ограничение сроков и загруженность кадастровых организаций требует использования самых точных и передовых технологий, что не всегда соответствует возможностям этих организаций, которые, как правило, являются муниципальными унитарными предприятиями районных органов власти и имеют ограниченное финансирование. От точности и качества съемки при создании или уточнении плана объекта при постановке на кадастровый учет или корректировке данных зависит время документооборота, а также площадь и кадастровая стоимость объекта, влияющая на размер налогообложения. Анализ существующих способов съемки и погрешностей используемого при этом оборудования и технологий является важной оптимизационной задачей для поддержания качества выполняемых кадастровыми организациями работ и, как следствие, повышения их финансовой устойчивости.

Цель исследования – определить зависимость влияния наложения границ объектов недвижимости блокированной застройки от способов геодезической съемки и используемой приборной базы.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании применялись методы системного анализа и системного синтеза. Объектом исследования выступал процесс определения (съемки) характерных точек контуров объектов недвижимости. Предметом исследования выступала точность измерения характерных точек контуров объектов недвижимости. Для изучения объекта исследования был применен метод системного анализа – системный подход. Данный процесс был представлен как система, входом которой является задание на съемку, внешними факторами, влияющими на процесс съемки и качество результатов, выходом – координатами точек и геометрическими параметрами контура. Для описания объектов системы и связи между ними использовался метод системного синтеза. В процессе исследования отбирались критерии оценки способов геодезической съемки и используемой приборной базы характерным факторам, влияющим на качественный и количественные показатели. Анализ производился на основе отзывов на сайтах производителей и коллективных оценок профессиональных форумов, а также на основе опроса обучающихся заочной формы обучения кафедры землеустройства и кадастров Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», имеющих стаж работы по специальности, а также предприятий и организаций, являющихся базами практик обучающихся кафедры. Основным критерием оценки исследуемых способов геодезической съемки и используемой приборной базы выступала средняя квадратическая погрешность измерения местоположения характерной точки относительно ближайшего пункта государственной геодезической сети или опорной межевой сети.

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения проводились на учебном полигоне Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской ГАУ». Для оценки факторов, влияющих на погрешности определения границ объектов недвижимости, был проведен анализ факторов, влияющих на погрешность измерений в зависимости от используемых методов определения координат характерных точек границ земельного участка, определенных в законодательстве [1]. Согласно этому документу определено пять методов определения координат характерных точек

границ земельного участка, обозначенных на рисунке. Геодезический метод предполагает при определении характерных точек использование приемов триангуляции, полигонометрии, трилатерации, прямых, обратных или комбинированных засечек и иных геодезических методов. Приборная база, применяемая при этом методе, предполагает проведение непосредственных измерений в пределах прямой видимости объекта измерения [2, 3]. Координаты характерных точек земельного участка определяются в этих случаях путем аналоговой и цифровой обработки оптического преобразования светового излучения, а также электромагнитного УКВ-излучения. Согласно вышеуказанному документу погрешность в данном случае, если полученные при съемке данные обрабатываются вручную, а не с помощью специализированной компьютерной программы, рассчитывается по следующей формуле:

$$M_t = \sqrt{m_0^2 + m_1^2}, \quad (1)$$

где M_t – средняя квадратическая погрешность местоположения характерной точки

относительно ближайшего пункта государственной геодезической сети или опорной межевой сети;

m_0^2 – средняя квадратическая погрешность местоположения точки съемочного обоснования относительно ближайшего пункта государственной геодезической сети или опорной межевой сети;

m_1^2 – средняя квадратическая погрешность местоположения характерной точки относительно точки съемочного обоснования, с которой производилось ее определение.

Значительное влияние на погрешность измерений геодезическим методом оказывают климатические условия в период съемки, такие как колебания температуры, осадки в виде тумана и т.д. [3]. Одним из факторов является также человеческий фактор, заложенная в начале измерений ошибка как по местоположению характерной точки относительно съемочного обоснования относительно ближайшего пункта государственной геодезической сети или опорной межевой сети, так и местоположения характерной точки относительно точки съемочного обоснования, с которой производилось ее определение.

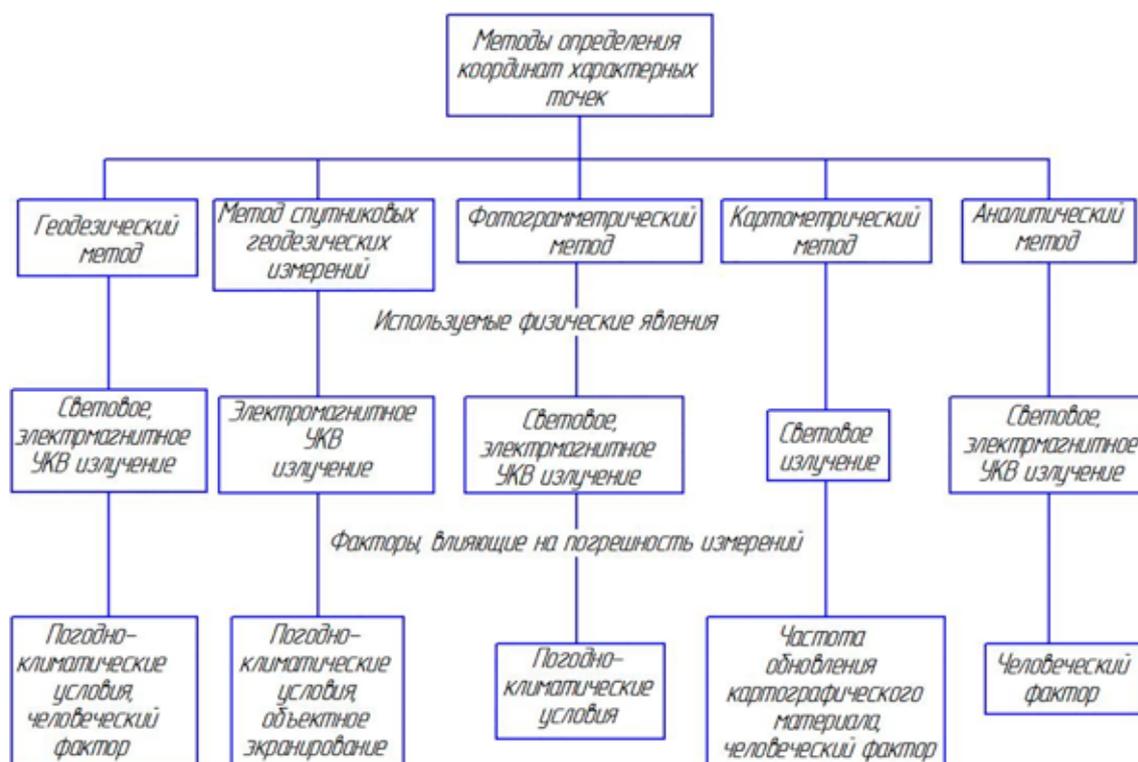


Схема классификации методов определения координат характерных точек границ земельного участка по используемым физическим явлениям и факторам, влияющим на погрешность измерений

Особенно трудно в данном случае получить измерения координат характерных точек границ земельного участка объектов блокированной застройки: одноэтажного домовладения на несколько владельцев или, например, гаража в гаражном кооперативе. В этом случае некоторые характерные точки контура земельного участка, на котором расположен объект недвижимости, находятся на границе общих стен или фундамента строений. Вычислить координаты таких точек затруднительно также потому, что не всегда соблюдаются размеры строений в соответствии с имеющимися на них проектными или инвентаризационными документами. Согласно нормативному документу [1] в этом случае при отсутствии возможности выполнения измерений непосредственно на контуре объекта средняя квадратическая погрешность местоположения характерной точки контура подземного конструктивного элемента здания, сооружения или объекта незавершенного строительства определяется по следующим формулам.

При наличии результатов обмеров ограждающих конструкций (стен) здания:

$$M_t = \sqrt{m_n^2 + m_n^2 + m_k^2}, \quad (2)$$

где M_t – средняя квадратическая погрешность местоположения характерной точки подземного конструктивного элемента;

m_n^2 – средняя квадратическая погрешность местоположения точки контура наземного конструктивного элемента;

m_n^2 – средняя квадратическая погрешность линейных (линейно-угловых) измерений параметров подземных конструктивных элементов;

m_k^2 – средняя квадратическая погрешность передачи координат с наземного на подземный конструктивный элемент здания.

Метод спутниковых геодезических измерений предполагает использование системы спутниковой связи, а также спутников системы ГЛОНАСС, находящихся на геостационарных орбитах, что позволяет более точно производить измерения без участия пунктов ГГС [4, 5]. Метод является наиболее распространенным, чему способствует наличие большого разнообразия используемых при этом методе определения характерных точек контура земельного участка приборной базы в основном зарубежных производителей. Принцип работы приборной базы основан на обмене данными со спутниками посредством электромагнитного сигнала УКВ-излучения. Обмен данными с несколькими спутниками

после обработки информации прибором дает точные координаты его расположения. Прохождение сигнала УКВ-излучения во многом зависит от наличия на пути прохождения препятствий, так как короткие электромагнитные волны в отличие от длинных не могут огибать препятствия и теряются в пространстве, отражаясь от предметов, или создают ложные сигналы помехи. Помехой УКВ-излучения может выступать низкая облачность, горная местность, нависающие кроны деревьев, высокие здания и т.д. Согласно классификации на рисунке этот метод выделяет такие факторы, влияющие на погрешность и точность измерений, как погодноклиматические условия и объектное экранирование [6]. Вычисление средней квадратической погрешности при выполнении измерений спутниковыми методами также рассчитывается по формулам (1) и (2).

Фотограмметрический метод предполагает определение координат характерных точек контура земельного участка с помощью фотографического или спутникового снимка части земной поверхности, в пределах которой находится исследуемый земельный участок. Для получения снимка используются два физических явления: световое и электромагнитное УКВ-излучение [5, 6]. Как и в предыдущем методе, здесь факторами, влияющими на погрешность измерений, выступают погодноклиматические условия и объектное экранирование.

Картометрический метод относится к камеральным методам, и точность определения координат характерных точек контура земельного участка целиком зависит от качества и даты обновления используемого в измерениях картографического материала. Согласно нормативным источникам [1] величина средней квадратической погрешности при измерениях этим методом принимается равной 0,0005 м в масштабе используемой карты или плана. При выполнении измерений координат данным методом, основным используемым физическим явлением выступает световое излучение, так как от освещенности зависит качество измерения. Однако, так как измерения проводятся камерально, то есть в помещении на рабочем месте с обеспеченной по нормативным документам [1], то влиянием на данные условия можно пренебречь. Основными факторами, влияющими на неточность измерений, здесь выступают частота обновления картографического, метод получения основы для картографического материала и человеческий фактор.

Данные исследования результатов измерений
методами определения характерных точек контуров участков
объектов недвижимости на учебном полигоне

| № п/п | Метод измерений | Используемая приборная база | Количество повторов измерений | Средняя квадратическая погрешность |
|-------|-------------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Геодезический | Электронный теодолит VEGA ТЕО-20В | 3 | 0,031 |
| 2 | Спутниковых геодезических измерений | ГНСС комплект SinoGNSS T300 | 2 | 0,018 |
| 3 | Фотограмметрический | Ортофотоплан Управления Росреестра Ростовской области М1:5000 | 2 | 0,025 |
| 4 | Картометрический | Учебная топографическая карта северо-восточной окраины г. Зернограда М1:1000 | 2 | 0,047 |
| 5 | Аналитический | Фотоплан г. Зернограда М1:5000 | 2 | 0,081 |

Аналитический метод предполагает использование данных, полученных из готовых технических и инвентаризационных планов других объектов, в которых содержатся также сведения об искомом объекте. Данные для используемых технических и инвентаризационных планов могут быть получены с помощью четырех предыдущих способов, поэтому на погрешности в измерениях могут влиять все факторы, обозначенные в схеме на рисунке для четырех предыдущих методов. Величина средней квадратической погрешности местоположения характерных точек, при проведении измерений аналитическим методом [1], принимается равной величине средней квадратической погрешности местоположения характерных точек, используемых для вычислений или, если точнее, погрешности метода, с помощью которого получены данные характерных точек, используемых для измерения.

В тех случаях [1], где смежные земельные участки имеют различные требования к точности определения координат их характерных точек, общие характерные точки границ земельных участков должны определяться с точностью, соответствующей более высокой точности определения координат характерных точек границ земельного участка.

Исходя из вышесказанного можно выделить несколько причин наложения границ смежных объектов недвижимости [7]. Основных причин несколько: использование различных способов межевания с различной погрешностью измерений; наличие при выполнении измерений факторов, влияющих на погрешность измерений; частота обновления картографического ма-

териала, используемого для определения характерных точек контуров; использование устаревших архивных оцифрованных картографических материалов. Результаты исследования по измерениям указанными выше способами, проведенные на учебном полигоне, представлены в таблице.

Заключение

Величина средней квадратической погрешности существующих методов определения характерных точек контура объекта недвижимости существенно не влияет на результаты измерений, так как ее значение определяется по одинаковым формулам, поэтому при выборе метода определения характерных точек смежного контура объекта недвижимости этот фактор можно не учитывать. Обозначенные в схеме классификации методов определения характерных точек контуров объектов недвижимости используемые физические явления позволяют определить характер и вид факторов, влияющих на технические погрешности в измерениях. Соответственно, методы с одинаковыми группами факторов могут использоваться для определения характерных точек при одинаковых внешних условиях без риска получить существенно различающиеся параметры смежных точек, влияющих на наложение границ. Аналитический метод, без риска получить наложение границ смежных объектов недвижимости, может использоваться при измерениях только с аналогичным аналитическим методом. Геодезический метод, согласно выделенным факторам, влияющим на погрешность измерений, может использоваться совместно с методом спутниковых геодезических построений, а фотограмметриче-

ский метод – совместно с картографическим методом. Для более точных рекомендаций необходимо дальнейшее исследование данной проблемы.

Список литературы

1. Приказ Минэкономразвития РФ от 01.03.2016 № 90 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения и помещения» [Электронный ресурс]. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/19247> (дата обращения: 19.12.2022).
2. Авакян В.В. Прикладная геодезия. Геодезическое обеспечение строительного производства: учебное пособие. М.: Академический проект, 2017. 588 с.
3. Елисеев С.В. Геодезические инструменты и приборы. Основы расчета, конструкции и особенности изготовления. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 2017. 645 с.
4. Кузнецов О.Ф. Инженерная геодезия. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 268 с.
5. Большаков В.Д. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве / Под ред. В.Д. Большакова. М.: Недра, 2018. 345 с.
6. Елисеев С.В. Геодезические инструменты и приборы. Основы расчета, конструкции и особенности изготовления. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 2017. 645 с.
7. Маслов А.В., Гордеев А.В., Батраков Ю.Г. Геодезия. М.: КолосС, 2016. 598 с.

УДК 528.481

**ВАРИАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ,
ВЫЗВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯМИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ,
ОСАДКОВ И УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ПЛОЩАДКЕ
СТРОИТЕЛЬСТВА УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Морозов А.В., Баранов В.Н.

*ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, Москва,
e-mail: morarte@yandex.ru*

При строительстве уникальных зданий и сооружений (УЗиС) используются передовые технологии и высокоточное оборудование (спутниковые многочастотные приемники, высокоточные нивелиры и тахеометры, абсолютные и относительные гравиметры). В статье рассмотрены вопросы вариаций геодезических высот при строительстве и эксплуатации уникальных зданий и сооружений, способы оценки современных движений земной поверхности (СДЗП) с помощью спутникового оборудования. Получены числовые подтверждения вариаций эллипсоидальных высот в зависимости от сезона выполнения наблюдений вдоль крупных рек, озер или водохранилищ, где наблюдаются вариации силы тяжести и уровня грунтовых вод. Геометрическое нивелирование зависит от отсчетной поверхности и дает объективную оценку деформаций зданий и сооружений и СДЗП при небольших расстояниях между исходными пунктами и площадкой строительства, особенно с учетом современной точности цифровых нивелиров. Спутниковые наблюдения не зависят от уровенной поверхности и изменения координат и высот, демонстрируют реальные изменения движения земной поверхности, зависящие от точности самих спутниковых наблюдений, а также метода обработки. Метод PPP с вводом поправок за атмосферу и учетом движения литосферных плит позволяет получить миллиметровую точность и применим для реальной оценки СДЗП. Предложен критерий выбора зон влияния вариаций силы тяжести. Доказана связь уровня грунтовых вод и силы тяжести.

Ключевые слова: вариация геодезических высот, уникальные здания и сооружения, реальная оценка СДЗП, уровень грунтовых вод, сила тяжести, метод PPP, эллипсоидальная высота, высокоточное нивелирование, корреляция

**VARIATIONS OF GEODETIC HEIGHTS CAUSED BY FLUCTUATIONS
IN GRAVITY, PRECIPITATION AND GROUNDWATER LEVEL
AT THE CONSTRUCTION SITE OF UNIQUE BUILDINGS AND STRUCTURES**

Morozov A.V., Baranov V.N.

State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: morarte@yandex.ru

Advanced technologies and high-current equipment (satellite multi-frequency receivers, high-precision levellers and tachometers, absolute and relative gravimeters) are used in the construction of unique buildings and structures (UBaS). This paper deals with the issues of variations of geodetic heights during the construction and operation of unique buildings and structures, methods for assessing modern movements of the Earth's surface (MMoES) using satellite equipment. Numerical confirmations of variations of ellipsoidal heights were obtained depending on the season of observations along large rivers, lakes or reservoirs, where variations in gravity and groundwater level (GWL) are observed. Geometric leveling depends on the reference surface and provides an objective assessment of the deformations of buildings and structures and MMoES at small distances between the starting points and the construction area, especially given the modern accuracy of digital levels. Satellite observations do not depend on the level surface and changes in coordinates and heights demonstrate real changes of the MMoES and depending on the accuracy of the satellite observations themselves, as well as the processing method. The PPP method with the introduction of corrections for the atmosphere and taking into account the movement of lithospheric plates, allows you to obtain millimeter accuracy and is applicable for a real assessment of the MMoES. A criterion for selecting zones of influence of gravity variations is proposed. The correlation of the groundwater level and gravity is proved.

Keywords: variation of geodesic heights, unique buildings and structures, real assessment of the MMoES, groundwater level (GWL), gravity, PPP method, high-precision leveling, ellipsoidal height, correlation

Согласно действующим нормативным документам [1], [2], для УЗиС средняя квадратическая погрешность (СКП) определения значений вертикального смещения наиболее удаленного пункта должна быть не более 1,0 мм.

Если учесть, что измерения во всех циклах равноточны, то СКП определения высоты пункта в слабом месте сети (наиболее

удаленного пункта от исходных реперов) не должна превышать:

$$M_{H_i} \leq \frac{m_s}{\sqrt{2}} = 0,7 \text{ мм,}$$

где m_s – СКП определения вертикального смещения;

M_{H_i} – СКП определения высоты пункта.

Для соблюдения таких требований необходимы не только высокоточные инструменты, но и соблюдение специальных методов наблюдений и учет всех факторов.

Целями исследования являются демонстрация сезонных вариаций силы тяжести и геодезических высот, оценка коррелированности вариаций силы тяжести с уровнем грунтовых вод и результатами спутниковых наблюдений.

В статье приводится критерий выбора зон учета вариаций силы тяжести. Для пунктов, попадающих в эти зоны, предлагается проводить оценку устойчивости с помощью спутниковых методов.

На основе результатов нескольких циклов наблюдений (гравиметрических, гидрологических, высокоточного геометрического нивелирования, спутниковых наблюдений) обнаружена зависимость геодезических наблюдений от уровня грунтовых вод. В данной статье будет рассмотрено влияние уровня грунтовых вод на эллипсоидальные (геодезические) высоты.

Для учета сезонных вариаций предлагается проводить минимум два цикла комплексных наблюдений при максимальном и минимальном уровне вод на площадках строительства УЗиС вблизи крупных водоемов.

Материалы и методы исследования

Материал исследований получен по результатам абсолютных гравиметрических наблюдений, данных от пьезометрических скважин и гидрологических постов, высокоточного геометрического нивелирования I класса и спутниковых наблюдений на одной из площадок строительства УЗиС.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно исследованиям [3] выявлено изменение силы тяжести из-за уровня грунтовых вод и в зависимости от сезона выполнения гравиметрических наблюдений на площадке строительства УЗиС.

По данным, приведенным в работе А.П. Юзефовича [4, с. 141], а также согласно инструкции по развитию Государственной гравиметрической сети России [4] подъем грунтовых вод на 1 м в слое песка с плотностью $0,4 \text{ г/см}^3$ вызывает изменение силы тяжести на 17 мкГал.

На основе научных трудов и инструкций выбран критерий влияния вариаций силы тяжести в качестве удвоенного значения изменения силы тяжести за 1 м повышения уровня грунтовых вод – 35 мкГал.

Данный критерий позволил выбрать пункты, на которые распространяется методика учета вариаций силы тяжести.

При строительстве УЗиС необходимо соблюдать высокие требования к точности и методике выполнения работ. Неучет сезонных вариаций вызывает погрешности в оценке СДЗП, а также вносит погрешности при строительстве УЗиС.

Как пример, поправка за температуру может достигать нескольких миллиметров в измеренные превышения и должна учитываться при обработке высококлассного нивелирования [5].

Основная методика учета вариаций силы тяжести – подсчет отклонений отвесных линий (УОЛ) и ввод соответствующей поправки в измеренное превышение [7, с. 25].

Результаты высокоточного геометрического нивелирования зависят от отсчетной поверхности и дают объективную оценку деформаций зданий и сооружений и СДЗП на небольших расстояниях между исходными пунктами геодезического полигона (ГДП) и площадкой строительства, особенно с учетом точности современных цифровых нивелиров.

В рамках исследования предлагается подход, позволяющий дополнительно к измерениям традиционными геодезическими методами в поле силы тяжести Земли использовать спутниковые методы, в основе которых лежит геометрическая правильная и неизменная эллипсоидальная высота, исходя из теории геодезических высот.

На сегодняшний день множество работ посвящено точности определения геодезических высот спутниковыми методами [6-8].

Научная работа И.М. Кравчука [9] посвящена спутниковому нивелированию и оценке точности полученных геодезических и нормальных высот.

В целом, можно утверждать, что спутниковое нивелирование при соблюдении ряда условий позволяет получить точность нивелирования IV класса и в редких случаях – III класса (10 мм на 1 км).

Точность геодезических высот позволяет применять метод ГНСС для геодезических исследований.

А.В. Устинов в своей работе доказал эффективность метода Precise Point Positioning (PPP) на Загорской ГАЭС-2, получив точность абсолютных координат 2 мм в плане и 5 мм по высоте [12]. Работы [13-15] посвящены исследованиям метода PPP.

Таблица 1

Разность эллипсоидальных высот на пунктах исследования, определенных методом PPP с 2017 по 2021 гг.

| Месяц и год наблюдений | Пункт 3 δН, мм | Пункт 4 δН, мм | Пункт 0 δН, мм |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Сентябрь 2018 | 6 | 17 | -170 |
| Март 2019 | -64 | -29 | 112 |
| Август 2019 | 48 | -11 | 104 |
| Март 2020 | -4 | -26 | -113 |
| Апрель 2021 | 18 | -26 | -3 |

Таблица 2

Корреляционный анализ между уровнем грунтовых вод и силой тяжести на гравиметрических пунктах исследования

| ID | ГР2-1 и g2-1 | ГР3-2 и g3-2 | ГР4-3 и g4-3 | ГР5-4 и g5-4 | ГР6-5 и g6-5 |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Пункт 02 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 05 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Пункт 09 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Пункт 0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Пункт 11 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 13 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 14 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 15 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 16 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Пункт 20 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Пункт 21 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Пункт 23 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Пункт 27 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Пункт 28 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

В результате выполненных спутниковых наблюдений на трех пунктах принудительного центрирования (ППЦ или РРС) были получены координаты и высоты методом Precise Point Positioning (PPP), обработанные в одном из сервисов (CSRS-PPP Magic GNSS Trimble RTX, GrafNet). Схема расположения пунктов представлена на рисунке 1. Межцикловое сравнение геодезических высот от сезона к сезону представлено в таблице 1.

Данные изменения уровня грунтовых вод на исследуемой площадке строительства УЗиС представлены в статье [3]. Исходя из многолетних наблюдений, минимум приходится на март – апрель, максимум – на август – сентябрь.

В результате исследования доказана коррелированность значений силы тяжести и изменения уровня грунтовых вод (рис. 2, табл. 2) для пунктов исследования (рис. 3).

Аномальные изменения наблюдаются на пункте, расположенном непосредственно у реки, – Пункт 0, при этом пункты Пункт 4 и Пункт 3 демонстрируют стабильность в нескольких циклах наблюдений (рис. 3).

В ходе обследования Пункта 0 не были выявлены какие-либо повреждения с 2017 по 2021 гг.

Можно утверждать, что существенное изменение эллипсоидальной высоты (превышающее годовое движение литосферной плиты и атмосферную нагрузку) является критерием неустойчивости пункта и служит реальной оценкой СДЗП.

В качестве независимого доказательства сезонности изменения геодезических высот за гидрологические эффекты взяты данные с пунктов ДНАК и BRN2 с официального сайта службы ITRF [16].



Рис. 1. Пункты исследования на площадке строительства УзиС

Изменение в пространстве пункта ITRF ДНАК представлено на рисунке 4. Удаленность между площадкой УзиС и пунктом ITRF ДНАК – порядка 130 км. Надо отметить, что г. Дакка подвержен сезонным наводнениям, что не раз освещалось в СМИ.

При увеличении масштаба становится отчетливо видна периодичность изменений геодезических высот пункта ДНАК с минимальной и максимальной амплитудой в апреле и сентябре, что согласовывается с изменением грунтовых вод на площадке УзиС.

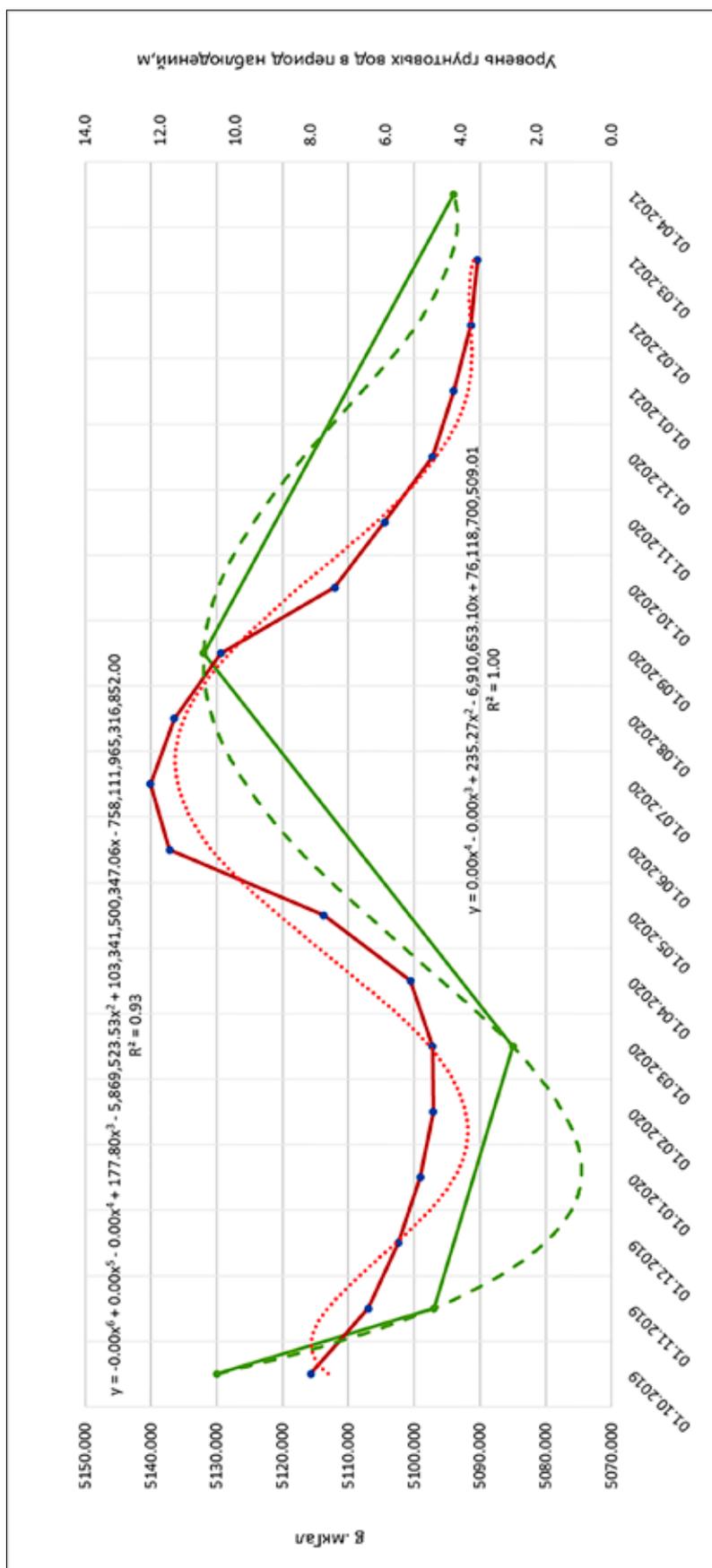


Рис. 2. График зависимости силы тяжести на пункте у реки от уровня грунтовых вод

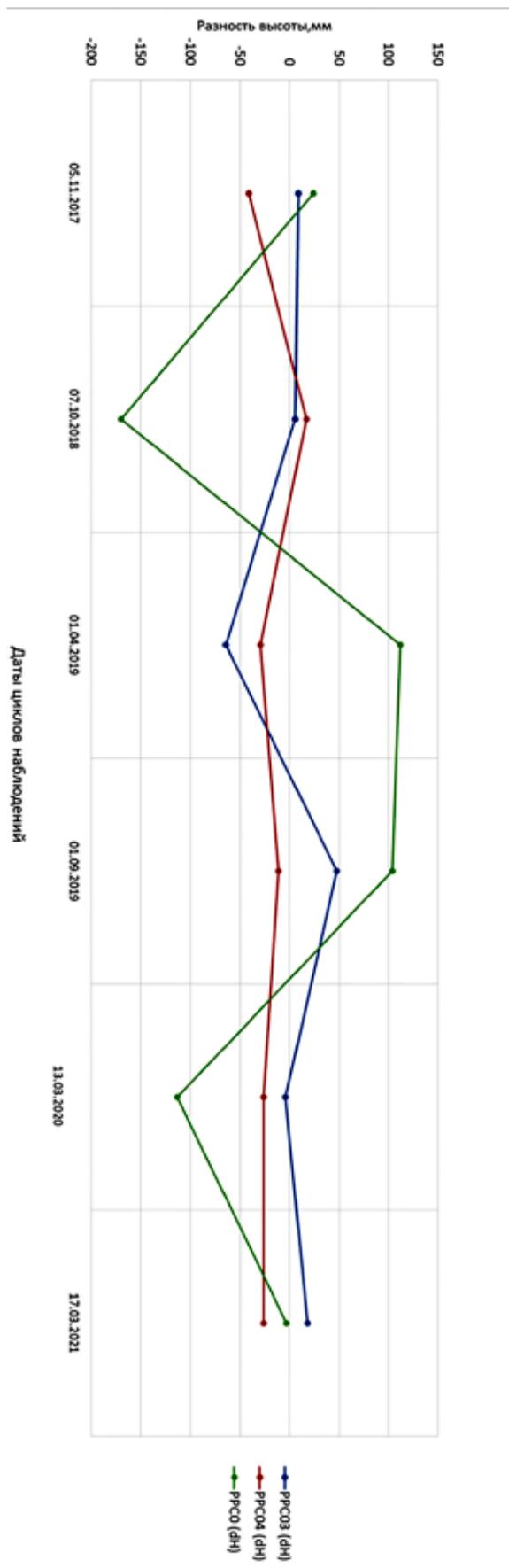


Рис. 3. Графики изменения эллипсоидальной высоты с 2017 по 2021 гг. на пунктах исследования

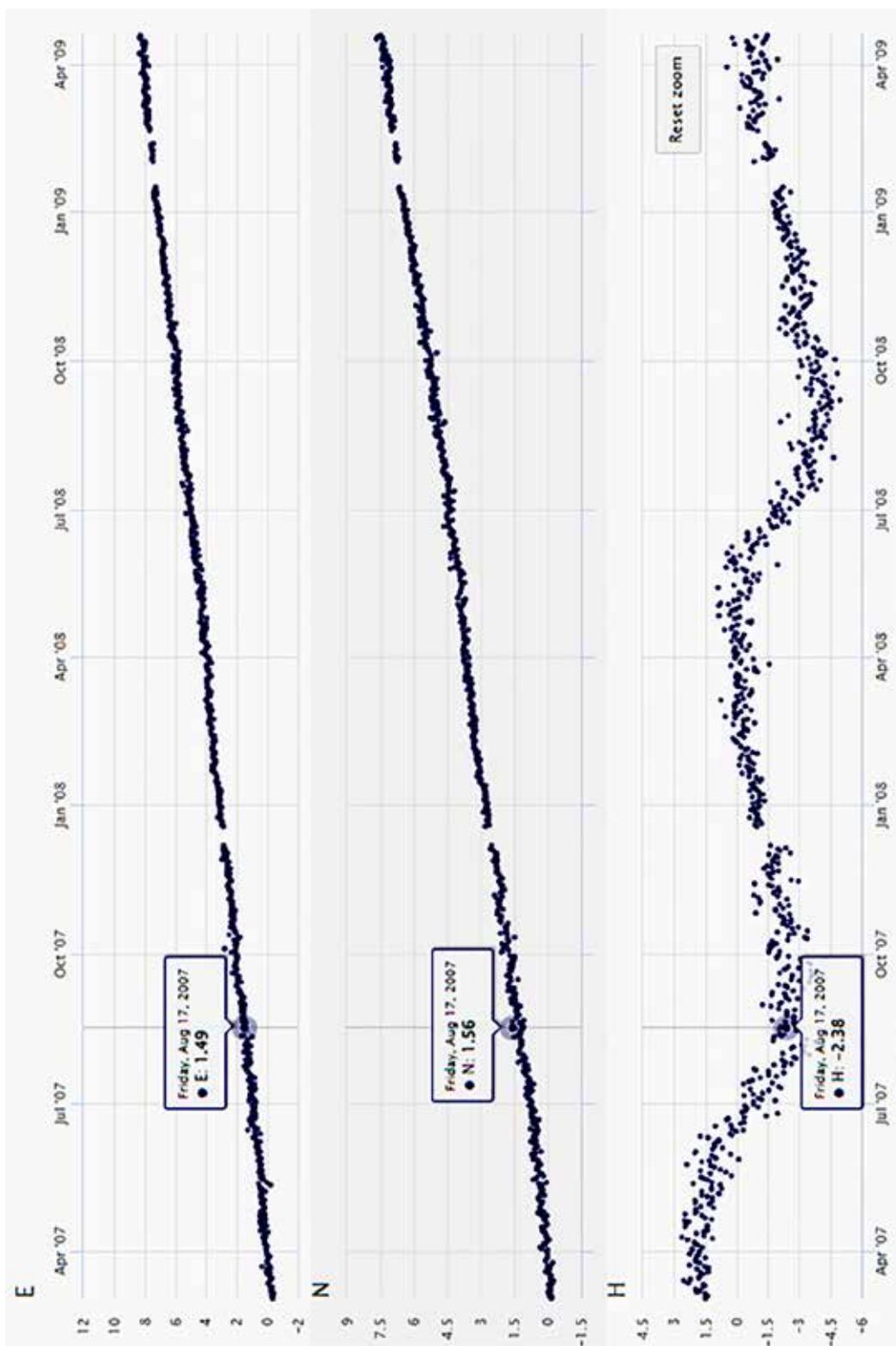


Рис. 4. Динамика изменения положения пункта ITRF DHAК

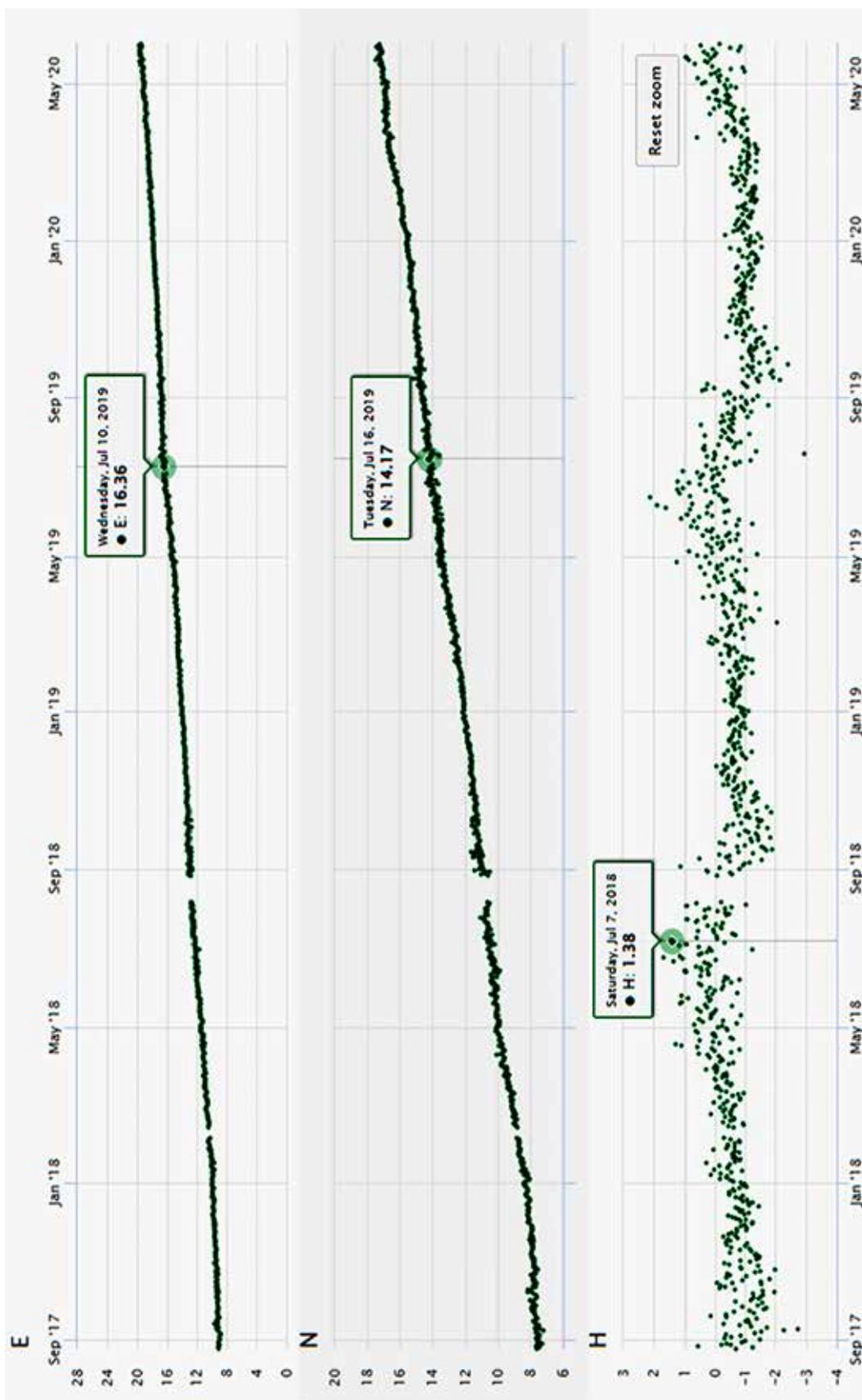


Рис. 5. Динамика изменения положения пункта ITRF BRN2

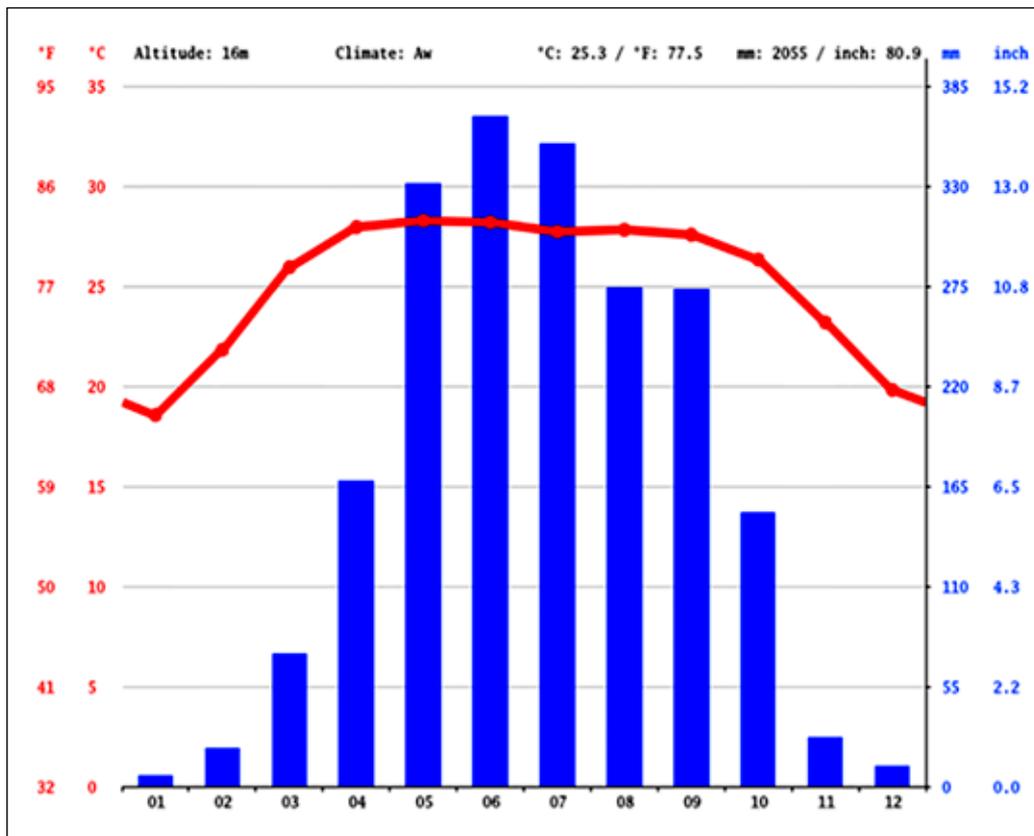


Рис. 6. Среднемесячная сумма осадков для г. Дакка

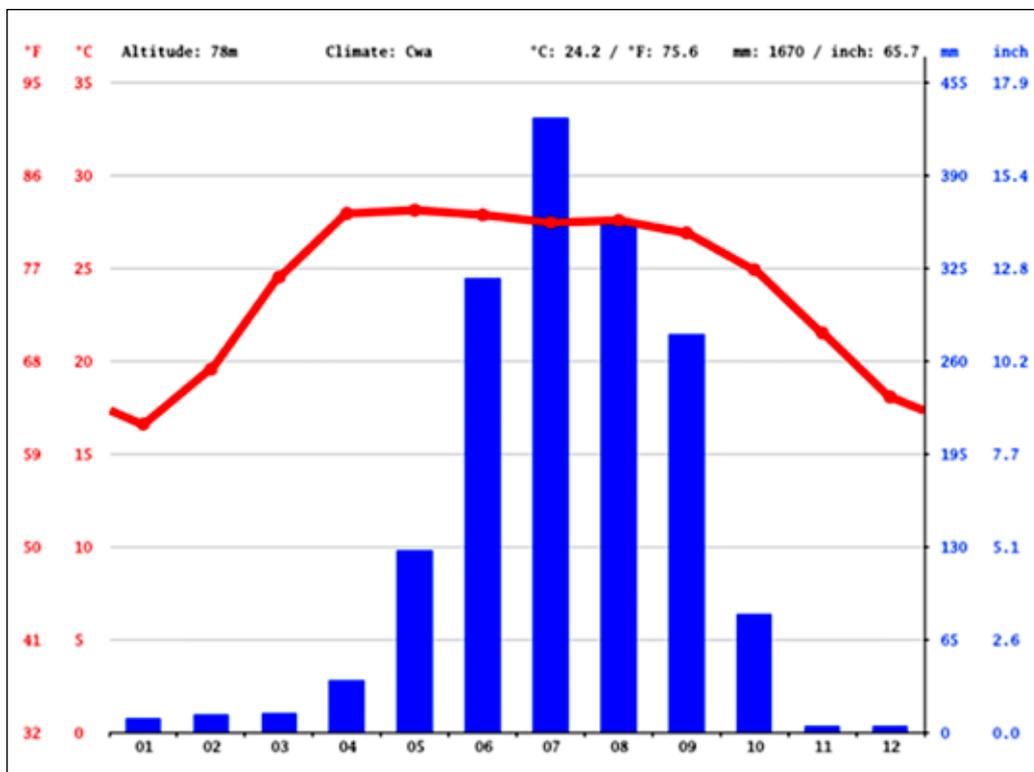


Рис. 7. Среднемесячная сумма осадков для г. Биратнагар

Другая ситуация наблюдается с пунктом ITRF BRN2, расположенным в г. Биратнагаре в Непале. Данные ограничены 2020 г. Город расположен далеко от рек, траектория изменения BRN2 представлена на рисунке 5.

Информация о среднемесячных осадках г. Дакка и г. Биратнагар представлена на рисунках 6 и 7.

В статье [17] описано, что атмосферные нагрузки приводят к изменениям геодезических высот порядка 5 мм. При движении литосферных плит порядка 4 см полугодовое смещение составит 20 мм.

Заключение

В результате полученных данных было подсчитана разность эллипсоидальных высот в зависимости от сезона наблюдений. Эти данные доказывают зависимость геодезических высот от сезона наблюдений.

Объединив результаты ранее выполненных исследований [3], получаем зависимость силы тяжести и геодезических высот от гидрологических изменений.

Статья [18] также подтверждает корреляционную зависимость между уровнем грунтовых вод и силой тяжести. Используя модель затопления [19, с. 69, 89], возможно построить единую модель изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод на площадках УЗиС вблизи водоемов с высокими требованиями к точности геодезических работ.

Предлагается с помощью спутниковых технологий проводить реальную оценку устойчивости пунктов на основе абсолютных наблюдений по методу PPP и проводить измерение современного движения земной поверхности за вычетом других физических факторов.

Вариации за гидрологию можно разделить на две категории:

первая категория – вариации, связанные с крупными водоемами;

вторая категория – вариации, связанные с осадками.

При этом амплитуда вариаций первой категории почти в два раза превышает амплитуду второй категории.

При закладке пунктов немаловажным является учет агрессивного воздействия среды. Рекомендации по учету приведены в [20].

Результаты исследования предлагается использовать для создания методики учета сезонных вариаций в результате геодезических измерений.

Список литературы

1. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений: дата введения 01.01.1975. М.: Стройиздат, 1975. 95 с.

2. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений: дата введения 01.01.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 13 с.

3. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. 2022. № 4. С. 92-97.

4. Юзефович А.П. Поле силы тяжести и его изучение. М.: МИИГАиК, 2014. 194 с.

5. ГКИНП (ГНТА)-04-122-03. Инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России: дата введения 2004.02.01. М.: Роскартография, 2004. 108 с.

6. ГКИНП (ГНТА)-03-010-03 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов: дата введения 01.02.2004. М.: Роскартография, 2004. 120 с.

7. Кузьмин В.И. Гравиметрия. Новосибирск: СГТА, 2011. 193 с.

8. Кутушев Ш-И.Б. Геосистемные исследования процессов формирования зон геодинамических рисков региональных нефтегазоносных территорий (на примере Башкирии): специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... докт. тех. наук. Москва, 2021. 48 с.

9. Маркович К.И. Совершенствование геодезических методов мониторинга геодинамических процессов с привлечением глобальных моделей Земли и обеспечением многодисциплинарного подхода: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2021. 24 с.

10. Остроумов Л.В. Разработка технологии определения нормальных высот с использованием спутникового метода на акватории морей: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2011. 24 с.

11. Кравчук И.М. Разработка методов вычисления нормальных высот по результатам спутниковых измерений в инженерно-геодезических работах: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2010. 24 с.

12. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях его применения в геодинамических исследованиях // Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. № 6. С. 605-615.

13. Терещенко В.Е., Лагутина Е.К. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений / В.Е. Терещенко // Вестник СГУ-ГиТ. 2019. Т. 24. № 2. URL: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2019_2_76-94 (дата обращения: 21.01.2023).

14. Трофимов Д.А. Определение координат пунктов из ГНСС-наблюдений методом PPP: учебное пособие. СПб., 2019. 73 с.

15. Устинов А.В. Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания (на примере здания Загорской ГАЭС-2): дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2022.

16. International Terrestrial Reference Frame (ITRF): [Электронный ресурс]. URL: <https://itrf.ign.fr/en/homepage> (дата обращения: 23.01.2023).

17. Калинин В.В., Устинов А.В., Косарев Н.С. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 3. С. 34-41.

18. Костицын В.И. О корреляционной зависимости между колебаниями уровня грунтовых вод и изменениями силы тяжести // Электронная библиотека Полоцкого государственного университета. 2016. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/18390> (дата обращения: 23.01.2023).

19. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.

20. ГОСТ 31384-2017: дата введения 2018.03.01. М.: Стандартинформ, 2018. 50 с.