



ИД «Академия Естествознания»

**УСПЕХИ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Научный журнал

№ 1 2026



**ADVANCES
IN CURRENT
NATURAL SCIENCES**

Scientific journal

No. 1 2026



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

Технический редактор

Доронкина Е.Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е.С.,

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н., к.ф-м.н., проф. **Алоев В.З.** (Нальчик); д.г.н., доцент **Андреева Е.С.** (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент **Анищенко Л.Н.** (Брянск); 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.г.-м.н., к.т.н., проф. **Бондарев В.И.** (Екатеринбург); д.г.-м.н., проф. **Гавришин А.И.** (Новочеркасск); д.т.н., профессор **Галкин А.Ф.** (Якутск); д.с.-х.н. **Горянин О.И.** (Самара); д.с.-х.н., доцент **Григорьев М.Ф.** (Кемерово) д.г.-м.н., проф. **Гусев А.И.** (Бийск); д.с.-х.н., проф. **Данилин И.М.** (Красноярск); д.э.н., д.б.н., проф. **Долятовский В.А.** (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. **Дресвянников А.Ф.** (Казань); д.с.-х.н., проф. **Залесов С.В.** (Екатеринбург); д.б.н., доцент **Захарченко А.В.** (Тюмень); д.с.-х.н., проф. **Зволинский В.П.** (Волгоград); д.г.-м.н., доцент **Копылов И.С.** (Пермь); д.с.-х.н., проф. **Костылев П.И.** (Зерноград); д.с.-х.н. **Коцарева Н.В.** (Белгород); д.г.-м.н., проф. **Кучеренко И.В.** (Томск); д.с.-х.н. **Ланцева Н.Н.** (Новосибирск); 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., к.б.н., проф. **Луговской А.М.** (Москва); д.с.-х.н. **Морозова Н.И.** (Рязань); д.т.н., проф. **Мусаев В.К.** (Москва); 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.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. **Теплухин В.К.** (Октябрьский); д.с.-х.н., проф. **Титов В.Н.** (Саратов); д.с.-х.н., проф. **Тихановский А.Н.** (Салехард); д.т.н., доцент **Ульрих Е.В.** (Кемерово); д.с.-х.н., проф. **Шамишев Б.Н.** (Ош); д.т.н., проф. **Шатов А.А.** (Уфа); д.ф.-м.н., проф. **Ширапов Д.Ш.** (Улан-Удэ); 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. **Яматетдинова К.Ш.** (Уфа).

ISSN 1681-7494

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

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

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,976

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,458

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влад. 27		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Телефон	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	30.01.2026	Дата выхода номера	27.02.2026
Формат	60x90 1/8	Усл. печ. л.	7,25
Тираж	1000 экз.	Заказ	УСЕ 2026/1

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

Technical editor

Doronkina E.N.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E.S.,
Dudkina N.A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Nalchik); D.Sc., Docent **Andreeva E.S.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent **Anishchenko L.N.** (Bryansk); D.Sc., Prof. **Beisembaev K.M.** (Karaganda); D.Sc., Prof. **Belozerov V.V.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent **Belous O.G.** (Sochi); D.Sc., C.Sc. Prof. **Bondarev V.I.** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. **Gavrilishin A.I.** (Novocherkassk); D.Sc., Prof. **Galkin A.F.** (Yakutsk); D.Sc. **Goryanin O.I.** (Samara); D.Sc., Docent **Grigoriev M.F.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Gusev A.I.** (Biysk); D.Sc., Prof. **Danilin I.M.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Dolyatovsky V.A.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. **Dresyannikov A.F.** (Kazan); D.Sc., Prof. **Zalesov S.V.** (Ekaterinburg); D.Sc., Docent **Zakharchenko A.V.** (Tyumen); D.Sc., Prof. **Zvolinsky V.P.** (Volgograd); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Perm); D.Sc., Prof. **Kostylev P.I.** (Zernograd); D.Sc. **Kotsareva N.V.** (Belgorod); D.Sc., Prof. **Kucherenko I.V.** (Tomsk); D.Sc. **Lantseva N.N.** (Novosibirsk); D.Sc., Prof. **Larionov M.V.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Lebedev V.I.** (Kyzyl); D.Sc., Prof. **Lerer A.M.** (Rostov-on-Don); D.Sc., C.Sc. Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc. **Morozova N.I.** (Ryazan); D.Sc., Prof. **Musaev V.K.** (Moscow); D.Sc. **Nikitin S.N.** (Ulyanovsk); D.Sc. **Okazova Z.P.** (Vladikavkaz); D.Sc., Prof. **Partoev K.** (Dushanbe); D.Sc., Prof. **Petelko A.I.** (Mtsensk); D.Sc. **Sibileev S.N.** (Saratov); D.Sc., Docent **Sokolskaya O.B.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Stepanov V.V.** (Saint Petersburg); D.Sc. **Teplukhin V.K.** (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. **Titov V.N.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Tikhonovsky A.N.** (Salekhard); D.Sc., Docent **Ulrich E.V.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Shamshiev B.N.** (Osh); D.Sc., Prof. **Shatov A.A.** (Ufa); D.Sc., Prof. **Shirapov D.Sh.** (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. **Shugunov L.Zh.** (Nalchik); D.Sc., Prof. **Yurgenson G.A.** (Chita); D.Sc., Prof. **Yakovenko N.V.** (Voronezh); D.Sc., Prof. **Yamaletdinova K.Sh.** (Ufa)/

ISSN 1681-7494

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

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

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,976

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,458

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History		
	410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.01.2026	Number issue date	27.02.2026
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	7,25
Circulation	1000 copies	Order	YCE 2026/1

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬЯ

КОЛЛЕКЦИОННЫЙ ФОНД ЛЕКАРСТВЕННЫХ И ПРЯНО-АРОМАТИЧЕСКИХ РАСТЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИБИРСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Пищеничкина Ю.А. 6

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНКТОННОГО И БЕНТОСНОГО СООБЩЕСТВ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (НА ПРИМЕРЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ)

*Котова Е.И., Змётная М.И., Махнович Н.М.,
Малхасян Ю.В., Лохов А.С., Мосеев Д.С.* 12

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

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА «ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ – ЦЕМЕНТАЦИЯ – ФЛОТАЦИЯ»

Александрова Т.Н., Люблянова В.А. 23

Физико-математические науки (1.6.22)

СТАТЬИ

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ СОПРОВОЖДЕНИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Михайлов А.А. 33

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА КРАЮ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА НА ПРИМЕРЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОБЬ

Яковлев В.Г. 43

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ И ПАРАМЕТРАМ 3D-КАДАСТРОВОЙ СЪЕМКИ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Яковлева Н.Д. 51

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

THE COLLECTION FUND OF MEDICINAL AND SPICY-AROMATIC PLANTS OF THE CENTRAL SIBERIAN BOTANICAL GARDEN

Pshenichkina Yu.A. 6

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLE

INVESTIGATION OF THE HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PLANKTON AND BENTHOS COMMUNITIES AND ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DREDGING ON THEIR MAIN CHARACTERISTICS (USING THE EXAMPLE OF THE NORTHERN DVINA RIVER ESTUARY)

*Kotova E.I., Zmetnaya M.I., Makhnovich N.M.,
Malkhasian Yu.V., Lokhov A.S., Moseev D.S.* 12

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

REVIEW

MAIN DIRECTIONS AND OPPORTUNITIES FOR IMPROVING COPPER ORE PROCESSING USING THE LEACHING – CEMENTATION – FLOTATION METHOD

Aleksandrova T.N., Lyublyanova V.A. 23

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLES

APPLICATION OF COMPUTER MODELING FOR ACCOUNTING FOR THERMAL DEFORMATIONS OF HIGH-RISE BUILDINGS DURING GEODETIC SUPPORT OF CONSTRUCTION

Mikhaylov A.A. 33

GEODETIC SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF BRIDGE STRUCTURES AT THE EDGE OF CARTOGRAPHIC ZONES, TAKING INTO ACCOUNT THE SCALE FACTOR USING THE EXAMPLE OF A BRIDGE CROSSING ACROSS THE OB RIVER

Yakovlev V.G. 43

SUBSTANTIATION OF ACCURACY REQUIREMENTS AND PARAMETERS FOR 3D-CADASTRAL SURVEYING IN URBAN AREAS USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Yakovleva N.D. 51

СТАТЬЯ

УДК 633.8:581.522.4:581.543
DOI 10.17513/use.38467

КОЛЛЕКЦИОННЫЙ ФОНД ЛЕКАРСТВЕННЫХ И ПРЯНО-АРОМАТИЧЕСКИХ РАСТЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИБИРСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Пшеничкина Ю.А. ORCID ID 0000-0002-2527-2577

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: scutel@yandex.ru*

В статье приводятся результаты ревизии, анализа состояния и успешности интродукции лекарственных и пряно-ароматических растений коллекции Центрального сибирского ботанического сада Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск). В коллекции представлены растения из 61 семейства, относящиеся к 178 родам и 221 виду, в том числе 35 видов из 21 семейства, занесенных в региональные Красные книги России, 3 вида из Красной книги Российской Федерации: *Dioscorea nipponica* Makino (Dioscoreaceae), *Rheum compactum* L. (Polygonaceae), *Rhodiola rosea* L. (Crassulaceae). В видовом разнообразии наиболее широко представлены семейства Asteraceae, Lamiaceae. Отрастание у большинства видов начинается с конца апреля до конца мая – начала июня. Выделено 5 основных феноритмоптипов растений, произрастающих в коллекции: весенне-летнезеленый, весенне-летне-осенне-зеленый, летнезеленый, весенне-летне-зимнезеленый, летне-осенне-зеленый. Среди выделенных жизненных форм растений преобладают гемикриптофиты (73%). Они наиболее устойчивы, хорошо возобновляются семенным путем. Большинство видов коллекции регулярно цветут и плодоносят, по шкале успешности интродукции набирают не менее 60–80 баллов из 100, что может говорить об успешной адаптации к новым условиям произрастания.

Ключевые слова: лекарственные растения, пряно-ароматические растения, коллекция, интродукция

THE COLLECTION FUND OF MEDICINAL AND SPICY-AROMATIC PLANTS OF THE CENTRAL SIBERIAN BOTANICAL GARDEN

Pshenichkina Yu.A. ORCID ID 0000-0002-2527-2577

*Federal State Budgetary Institution of Sciences Central Siberian Botanical Garden
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russian Federation, e-mail: scutel@yandex.ru*

The article presents the results of a revision, analysis of the condition, and success of the introduction of medicinal and aromatic plants in the collection of the Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). The collection includes plants from 61 families, belonging to 178 genera and 221 species. Including 35 species from 21 families listed in the regional Red Books of Russia, 3 species from the Red Book of the Russian Federation: *Dioscorea nipponica* Makino (Dioscoreaceae), *Rheum compactum* L. (Polygonaceae), *Rhodiola rosea* L. (Crassulaceae). In the species diversity, the most widely represented families are Asteraceae, Lamiaceae. Most species begin to grow from late April to late May or early June. There are 5 main phenorhythm types of plants growing in the collection: spring-summer-green, spring-summer-autumn-green, summer-green, spring-summer-winter-green, summer-autumn-green. Among the identified plant life forms, hemicryptophytes predominate (73%). They are the most stable, well renewed by seed. Most of the collection's species regularly bloom and produce fruit, and they receive at least 60–80 points out of 100 on the introduction success scale, indicating successful adaptation to their new growing conditions.

Keywords: medicinal plants, aromatic plants, collection, introduction

Введение

Выращивание лекарственных и пряно-ароматических растений в Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН (г. Новосибирск) (ЦСБС) производилось практически с первых лет создания института с начала 1960-х гг. При интродукции лекарственных растений должны решаться две основные группы задач: научно-теоретические и производственно-практические [1]. Сотрудниками ЦСБС на основе изучения биологии и эволюционной селекции

были созданы сорта, разработаны агротехнические приемы выращивания некоторых видов лекарственных растений: *Acorus calamus* L. «Первенец Сибири», *Mentha* L. «Инна», *Helichrysum arenarium* (L.) Monch «Солнечный», *Hypericum perforatum* L. «Золотодолинский», *Salsola collina* Pall. «Байкальская», *Thymus* L. «Лимонный». В последнее время изучалось содержание фенольных соединений, полисахаридов, тетратерпенов в разных частях растений *Antennaria dioica*, *Bellis perennis* L., *Cen-*

taurea cyanus L., *C. L.*, *Echinacea purpurea* (L.) Moench, *Grossheimia macrocephala* (Muss.-Puschk. ex Willd.) Sosn. et Takht, *Inula helenium* L., *Ligularia macrophylla* (Ledeb.) DC., *Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Iljin, *Solidago canadensis* L., *S. virgaurea* L., *Betonica officinalis*, *Hyssopus officinalis*, *Nepeta cataria* L., *N. sibirica*, *Scutellaria baicalensis* [2; 3]. Установлена противовирусная активность в отношении субтипа H5N1 водных и этанольных экстрактов *Dracocephalum moldavica* L., *Glechoma hederacea* L., *Hyssopus officinalis*, *Melissa officinalis* L., *Mentha x piperita* L., *Nepeta cataria*, *Origanum vulgare*, *Prunella vulgaris* L. [4].

Работы по изучению особенностей адаптации растений, в том числе лекарственных, к новым условиям существования ведутся постоянно. Рядом исследователей было установлено влияние биологических особенностей [5], особенностей сезонного развития [6], жизненных форм [7] видов на перспективность их интродукции. Интродуцируемые виды должны обладать широкой экологической амплитудой.

Цель исследования – ревизия, анализ состояния и успешности интродукции лекарственных и пряно-ароматических растений коллекции ЦСБС.

Материалы и методы исследования

Площадь экспозиции, на которой расположена коллекция лекарственных и пряно-ароматических растений (ЛиПАР), в настоящий момент составляет 0,09 га. Растения высажены группами по принятому в официальной или народной медицине функциональному применению их в качестве лекарственных средств. Такое деление на группы достаточно условно, но оправданно. С одной стороны, формирование коллекции по такому принципу создает определенные сложности, так как при этом трудно учитывать эколого-биологические особенности видов; также одно и то же растение может применяться при различных заболеваниях, и его нужно размещать в разных группах. С другой стороны, учитывается основное направление использования, поэтому классы биологически активных веществ у растений одной группы часто сходны. Успешность интродукции определяли по 100-балльной шкале, учитывая зимостойкость, устойчивость к вредителям и болезням, габитус растения, способы размножения, наличие или отсутствие фаз цветения и плодоношения [8]. При выделении жизненных форм руководствовались классической классификацией [9].

По зональному положению ЦСБС находится в лесостепной зоне с континентальным климатом со значительными колебаниями сезонных и суточных температур [10, с. 12]. Безморозный период длится не более 150 дней. Продолжительность периода с температурой выше 10 °C составляет 120–140 дней. Весной возможны возвратные заморозки в мае–июне. Годовое количество осадков около 400 мм, в период вегетации часто наблюдается дефицит атмосферной и почвенной влаги. Почвы ЦСБС дерново-подзолистые и серо-лесные.

Результаты исследования и их обсуждение

Таксonomicкий анализ показал, что в коллекции представлены лекарственные и пряно-ароматические растения из 61 семейства, относящиеся к 178 родам и 221 виду (таблица).

В основном семейства представлены 1–2 родами. Наибольшее число родов в семействах Asteraceae (18% от общего числа родов в коллекции), Lamiaceae (10,1%), Rosaceae (5,1%). В видовом разнообразии наиболее широко представлены семейства Asteraceae (16,7% от общего числа видов в коллекции), Lamiaceae (13,6%), Rosaceae (6,3%).

В коллекции ЛиПАР поликарпики составляют 72,9%, одно-, двулетники – 17,2%. Травянистые виды традиционно составляют основу коллекции лекарственных растений. В меньшей степени представлены деревянистые и полудеревянистые растения. Деревья – 1,8% (*Catalpa ovata* G. Don, *Juglans mandshurica* Maxim., *Malus baccata* L. Borkh., *Thua occidentalis* L.), кустарники – 2,7% (*Berberis vulgaris* L., *Dasiphora fruticosa* (L.) O. Schwarz, *Eleutherococcus senticosus* (Rupr. & Maxim.) Maxim., виды рода *Juniperus* L., *Ribes nigrum* L.), полукустарники – 1,4% (*Genista tinctoria* L., *Hyssopus officinalis* L., *Lavandula angustifolia* Mill.) полукустарнички – 4,1% (*Ruta graveolens* L., виды рода *Thymus* L.).

При анализе эколого-ценотической приуроченности видов было установлено, что в коллекции преобладают луговые виды (27,6%), лугово-лесные – 9%, лугово-степные – 7,2% (рис. 1). Достаточно большой процент составляют рудеральная (14,9%) и лесостепная (16,3%) группы. Доля лесной группы составляет 10,4%, кустарниково-луговой – 11,8%, Растения, требующие специфических условий выращивания, составляют небольшой процент: водно-болотные и горно-луговые по 0,5%, степные – 1,8%.

Таксономический состав коллекции лекарственных
и пряно-ароматических растений ЦСБС на 2025 г.

№	Семейство	Число		№	Семейство	Число	
		родов	видов			родов	видов
1.	Alliaceae	1	3	32.	Hypericaceae	1	2
2.	Apiaceae	8	8	33.	Iridaceae	1	3
3.	Apocynaceae	2	2	34.	Juglandaceae	1	1
4.	Araceae	1	1	35.	Lamiaceae	18	30
5.	Araliaceae	1	1	36.	Liliaceae	1	2
6.	Aristolochiaceae	1	1	37.	Linaceae	1	1
7.	Asclepiadaceae	1	1	38.	Malvaceae	2	2
8.	Asparagaceae	1	1	39.	Melanthiaceae	1	2
9.	Asteraceae	32	37	40.	Menispermaceae	1	1
10.	Athyriaceae	1	1	41.	Onagraceae	2	2
11.	Berberidaceae	2	2	42.	Onocleaceae	1	1
12.	Boraginaceae	6	6	43.	Paeonaceae	1	2
13.	Bignoniaceae	1	1	44.	Papaveraceae	3	3
14.	Brassicaceae	6	6	45.	Phytolaccaceae	1	1
15.	Campanulaceae	1	1	46.	Plantaginaceae	1	2
16.	Cannabaceae	1	1	47.	Poaceae	1	1
17.	Caryophyllaceae	5	6	48.	Polemoniaceae	1	1
18.	Chenopodiaceae	3	3	49.	Polygonaceae	5	6
19.	Convallariaceae	3	3	50.	Primulaceae	1	1
20.	Crassulaceae	3	6	51.	Ranunculaceae	7	8
21.	Cucurbitaceae	1	1	52.	Rosaceae	9	14
22.	Cupressaceae	2	3	53.	Rubiaceae	1	2
23.	Datiscaceae	1	1	54.	Rutaceae	1	1
24.	Dennstaedtiaceae	1	1	55.	Saxifragaceae	1	1
25.	Dioscoreaceae	1	1	56.	Schisandraceae	1	1
26.	Dipsacaceae	1	1	57.	Scrophulariaceae	6	6
27.	Fabaceae	8	11	58.	Solanaceae	5	5
28.	Fumariaceae	1	1	59.	Urticaceae	1	1
29.	Geraniaceae	1	1	60.	Valerianaceae	2	2
30.	Grossulariaceae	1	1	61.	Violaceae	1	2
31.	Hemerocallidaceae	1	1				

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования



*Рис. 1. Экологово-ценотические группы видов коллекции лекарственных
и пряно-ароматических растений*

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

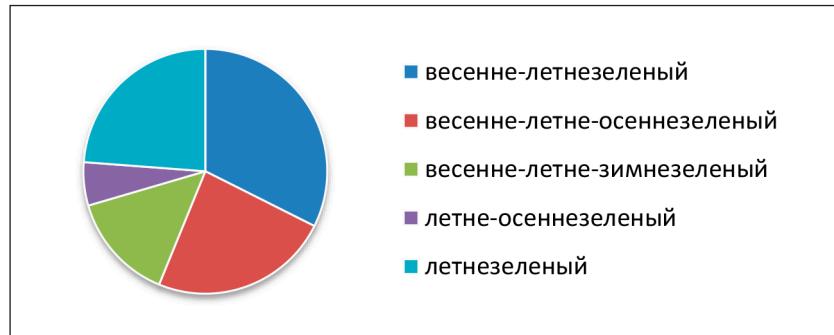


Рис. 2. Феноритмотипы растений коллекции лекарственных и пряно-ароматических растений
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Большинство видов коллекции относится к длительно вегетирующим многолетникам. Отрастание начинается с конца апреля до конца мая – начала июня. К длительно цветущим видам можно отнести *Dasiphora fruticosa* (L.) Rydb., *Chelidonium majus* L., виды рода *Thymus* и др. У *Thymus elegans* Serg. в некоторые годы наблюдалось вторичное цветение в конце августа-сентябре. Было установлено сохранение исходных феноритмов в течение 18 лет наблюдений у растений *Scutellaria baicalensis* Georgi, привезенных из разных эколого-географических мест произрастания (Забайкальский, Приморский край, Амурская область), при интродукции в условиях лесостепной зоны Западной Сибири [11]. Автором было выделено 5 основных феноритмотипов растений, произрастающих в коллекции: весенне-летнезеленый – 33,5% (*Lychnis chalcedonica* L., *Inula helenium* L., *Oenothera biennis* L. и др.), весенне-летне-осеннезеленый – 24,7% (*Galega officinalis* L., *Solidago virgaurea* L., *Tanacetum vulgare* L. и др.), летнезеленый – 20,3% (*Bupleurum longifolium* L. ssp. *aureum* (Fisch. ex Hoffm.) Soó, *Heracleum dissectum* Ledeb., *Althaea officinalis* L. и др.), весенне-летне-зимнезеленый – 15,2% (*Antennaria dioica* (L.) Gaertn, *Ajuga reptans* L., *Vinca minor* L. и др.), летне-осеннезеленый – 6,3% (*Leonurus tataricus* L., *Phlomoides tuberosa* (L.) Moench, *Scutellaria baicalensis* Georgi и др.) (рис. 2).

Более перспективными для интродукции считаются виды с длительным вегетационным периодом, ранним началом вегетации, ранним и продолжительным цветением [6]. Пластичность фенологического ритма, прохождение всех фаз фенологического развития растением не только является одним из важных показателей успешности интродукции данного вида [12], но и значимо

с практической точки зрения, так как у части растений в лекарственных целях используются генеративные органы. Большинство видов коллекции регулярно цветут и плодоносят, по шкале успешности интродукции набирают не менее 60–80 баллов, что может говорить об успешной адаптации к новым условиям произрастания.

Жизненная форма вида может влиять на перспективность интродукции. По данным Е.С. Васфиловой [7], при интродукции у гемикриптофитов средний балл интродукционной перспективности был достоверно выше, чем у фанерофитов. У последних преобладало вегетативное размножение, у терофитов и гемикриптофитов – семенное размножение. В коллекции ЦСБС представлены растения следующих жизненных форм: фанерофиты (3,2%), хамефиты (8,1%), гемикриптофиты (72,9%), криптофиты (8,1%), терофиты (7,7%) (рис. 3). Гемикриптофиты, как наиболее устойчивые виды, доминируют в коллекции, хорошо возобновляются семенным путем.

В коллекции представлены 35 видов из 21 семейства, занесенные в региональные Красные книги России [13], в том числе 3 вида из Красной книги РФ [14, с. 182, 197, 460].

Dioscorea nipponica Makino (Dioscoreaceae) – многолетняя травянистая лиана, реликт. Применяется в комплексной терапии атеросклероза, экстракты обладают кардиопротективными, иммуномодулирующими, антиаллергическими свойствами. В условиях Новосибирской области вегетация начинается в начале мая. Цветения за годы наблюдения не фиксировалось. Растение плохо переносит засуху. По шкале успешности интродукции – 70 баллов. Считаем растение перспективным для дальнейшего изучения.

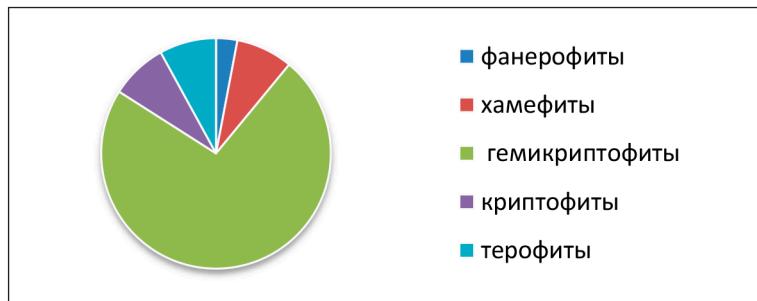


Рис. 3. Жизненные формы растений коллекции лекарственных и пряно-ароматических растений
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Rheum compactum L. (Polygonaceae) – многолетнее травянистое растение. В разных органах растений, произрастающих в ЦСБС, найдены флавоноиды, катехины, сапонины, танины, каротиноиды [15]. Весенне-летнезеленый. Ежегодно цветет и плодоносит. Растения зацветают в июне – июле, семена созревают в конце июля – августе. Можно выращивать на солнечных или слегка затененных местах. Пересадку переносит не очень хорошо. По шкале успешности интродукции – 95 баллов. Безусловно перспективное растение для изучения и выращивания.

Rhodiola rosea L. (Crassulaceae) – многолетнее травянистое растение. Используется в качестве тонизирующего средства, повышает сопротивляемость организма к неблагоприятным воздействиям. Растения, полученные путем размножения *in vitro*, активно росли в течение шести лет исследования в ЦСБС [16]. Весенне-летнезеленый. Начало вегетации в конце мая, цветение в мае – июне, семена созревают в июне – августе. Хорошо развиваются на освещенных участках с легкой песчаной почвой. По шкале оценки успешности интродукции набирает 90 баллов и является безусловно перспективным для дальнейшего изучения.

Ряд видов коллекции подвержены выреванию (*Ajuga reptans* L., *Helichrysum arenarium* (L.) Moench, *Hypericum ascyron* L., виды рода *Thymus*, *Viscaria vulgaris* Bernh.), плохо переносят переувлажнение почвы (*Melilotus albus* Medik.), влаголюбивы или недостаточно засухоустойчивы (*Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem., *Veratrum lobelianum* Bernh., *Thalictrum foetidum* L., *Sanguisorba tenuifolia* Fisch. ex Link., *Mentha x piperita* L.), в холодные, малоснежные зимы могут подмерзать верхушки побегов (*Eleutherococcus senticosus*, *Genista tynctoria*). Данные виды по шкале успешности интrodu-

кции набирают не менее 70 баллов и считаются перспективными для дальнейшего изучения. Наиболее устойчивыми к вредителям и болезням оказались: *Adonis vernalis* L., *Althaea officinalis*, *Antennaria dioica*, *Apocynum cannabinum* L., *Asparagus officinalis* L., *Betonica officinalis* L., *Borago officinale* L., *Cichorium intybus* L., *Datisca cannabina* L., *Matteuccia struthiopteris* L. Tod., *Nepeta sibirica* L., *Hypericum perforatum*, *Hyssopus officinalis*, *Pimpinella saxifraga* L., *Plantago lanceolata* L., *Scopolia carniolica* Jacq., виды рода *Sedum* L., *Vinca minor* L. и др. В разные годы были отмечены повреждения насекомыми (в том числе тлей), грибковыми заболеваниями (мучнистой росой, ржавчиной) у *Alchemilla* L. s.l., *Bidens tripartita* L., *Cynoglossum officinale* L., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *F. hexapetala* Moench, *Glycyrrhiza uralensis* Fisch., *Humulus lupulus* L., *Origanum vulgare* L., *Paeonia anomala* L., *Polemonium caeruleum* L., *Rhodiola rosea*, *Sanguisorba officinalis* L., *Stemmacantha carthamoides* (Willd.) Dittrich, *Thalictrum minus* L.

Заключение

В коллекции лекарственных и пряно-ароматических растений ЦСБС представлен 221 вид, в том числе 35 видов, занесенные в региональные Красные книги России, 3 вида из Красной книги РФ. Основу коллекции составляют травянистые растения. Определено 5 феноритмотипов растений, произрастающих в коллекции: весенне-летнезеленый (33 % от общего числа растений коллекции), весенне-летне-осеннецеленый (25 %), летнезеленый (20 %), весенне-летне-зимнезеленый (15 %), летне-осеннецеленый (6 %). В коллекции представлены растения следующих жизненных форм: фанерофиты (3 % от общего числа видов), хамефиты (8 %), гемикриптофиты (73 %), криптофиты (8 %), терофиты (8 %). По шка-

ле успешности интродукции большинство видов набирают не менее 60–80 баллов, что может говорить об успешной адаптации растений к новым условиям произрастания.

Список литературы

- Цицилин А.Н. Интродукция лекарственных и эфиромасличных растений в ботанических садах (современное состояние, перспективы, проблемы) // Биология растений и садоводство: теории, инновации. 2021. № 4 (161). С. 86–92. URL: <https://scbook.elpub.ru/jour/article/view/652/549> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.36305/2712-7788-2021-4-161-86-92.
- Храмова Е.П., Лебедева М.А., Шалдаева Т.М., Пшеничкина Ю.А., Проценко М.А., Макаревич Е.В., Филиппова Е.И., Мазуркова Н.А. Фитохимическая характеристика некоторых видов родов *Solidago* L. и *Bellis* L. (Asteraceae), культивируемых в условиях Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33. № 3. С. 383–392. URL: <https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=190588> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.15372/KhUR2025663.
- Lebedeva M.A., Kukushkina T.A., Shaldaeva T.M., Pshenichkina Yu.A., Khramova E.P. Biologically active substances and antioxidant activity of some species of Asteraceae family cultivated in West Siberia // Chemistry for sustainable development. 2023. Vol. 31. № 4. P. 394–400. URL: <https://www.sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=187021> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.15372/CSD2023483.
- Protsenko M.A., Mazurkova N.A., Filippova E.I., Kukushkina T.A., Lobanova I.E., Pshenichkina Yu.A., Vysochinskaya G.I. Anti-Influenza activity of extracts from plants of the Lamiaceae family // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2022. Vol. 48. № 7. P. 1534–1541. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1068162022070238> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.1134/S1068162022070238.
- Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П. Эфиромасличные растения в условиях меняющегося климата. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 178 с. ISBN 978-5-907198-74-6.
- Васильева Е.С. Взаимосвязь особенностей сезонного развития растений с результатами их интродукции в условиях Среднего Урала // Растительный мир Азиатской России. 2020. № 2 (38). С. 48–55. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=182027&ARTICLE_ID=182034 (дата обращения: 15.12.2025). DOI: <http://dx.doi.org/10/21782/RMAR1995-2449-2020-2>.
- Васильева Е.С. Взаимосвязь жизненных форм растений с результатами их интродукции в новые условия среды // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 2. С. 94–104. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2018/02/2018-02-12.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).
- Куприянов А.Н. Теория и практика интродукции растений: учебное пособие. Кемерово: КРЭОО «Ирбис», 2013. 159 с. ISBN 978-5-8353-1569-7.
- Raunkjaer Ch. The life forms of plants and statistical plant geography. Oxford: Clarendon Press, 1934. 632 p.
- Растительное многообразие Центрального сибирского ботанического сада СО РАН // Новосибирск: Гео, 2014. 492 с. ISSN 978-5-906284-51-8.
- Pshenichkina Yu.A. Biology of *Scutellaria baicalensis* Georgi (Lamiaceae) from Different Ecological and Geographical Places of Growth during Introduction // Contemporary Problems of Ecology. 2022. Vol. 15. № 6. P. 653–658. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425522060129> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.1134/S1995425522060129.
- Трулевич Н.В. Эколого-фитоценотические основы интродукции растений. М.: Наука, 1991. 216 с. ISBN 5-02-004007-X.
- Интродукция редких и исчезающих видов растений Сибири и Дальнего Востока / отв. ред. Т.В. Елисавченко, А.Н. Куприянов. Новосибирск: СО РАН, 2024. 808 с. ISBN 978-5-6052501-2-8.
- Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / Гл. редколл.: Ю.П. Трутнев и др.; Сост. Р.В. Камелин и др. М., 2008. 855 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://djvu.online/file/gJezgSTQlOCQ8> (дата обращения: 15.12.2025).
- Высочина Г.И., Кукушкина Т.А., Костикова В.А. Динамика содержания основных групп биологически активных веществ в *Rheum compactum* L. при интродукции в Новосибирскую область // Сибирский медицинский журнал. 2015. № 1. С. 91–94. URL: <http://smj.ismu.baikal.ru/index.php/osn/issue/view/21/2015-1> (дата обращения: 15.12.2025).
- Erst A.A., Kotsupiy O.V., Erst A.S., Kuznetsov A.A. Individual Differences in Growth and in Accumulation of Secondary Metabolites in *Rodiola rosea* Cultivated in Western Siberia // International Journal of Molecular Sciences. 2023. № 24. P. 11244. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/14/11244> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.3390/ijms241411244.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта «Теоретические и прикладные аспекты изучения генофондов природных популяций растений и сохранения растительного разнообразия вне типичной среды обитания (*ex situ*)» AAAA-A21-121011290027-6. При подготовке публикации использовались материалы биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте», USU 440534.

Financing: The work was carried out within the framework of the project “Theoretical and applied aspects of studying the gene pools of natural plant populations and preserving plant diversity outside a typical habitat (*ex situ*)” AAAA-A21-121011290027-6. In preparing the publication, materials from the bioresource scientific collection of the CSBS SB RAS, UNU “Collections of living plants in open and closed ground”, USU 440534 were used.

СТАТЬЯ

УДК 504.454
 DOI 10.17513/use.38468

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 ПЛАНКТОННОГО И БЕНТОСНОГО СООБЩЕСТВ
 И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
 НА ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
 (НА ПРИМЕРЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ)**

¹Котова Е.И., ²Змётная М.И., ¹Махнович Н.М.,

³Малхасян Ю.В., ¹Лохов А.С., ¹Мосеев Д.С.

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»,
 Москва, Российская Федерация, e-mail: ecopp@yandex.ru;

²Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
 Архангельск, Российская Федерация;

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный
 исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова
 Уральского отделения Российской академии наук», Архангельск, Российская Федерация

Устьевое взморье реки Северная Двина в силу концентрации в прибрежной части промышленных предприятий и объектов транспортной инфраструктуры подвержено интенсивной промышленной нагрузке, которая непосредственно влияет на сообщества гидробионтов данного района. Цель исследования – изучение гидробиологических характеристик сообществ устьевой области реки Северная Двина в летний период при проведении дноуглубительных работ и оценка влияния данных работ на основные характеристики сообществ. Изучены основные гидробиологические характеристики, такие как видовой состав, численность и биомасса сообществ. Исследования показали, что в данном районе фитопланктон представлен 47 видами и надвидовыми таксонами, зоопланктонное сообщество – 35 видами и надвидовыми таксонами, макрообентос – 4 видами и надвидовыми таксонами. В фитопланктонном сообществе доминирующее положение занимали цианопрокариоты, основу качественного состава зоопланктона формировали представители отряда весплоногих, в сообществе макрообентоса доминировали моллюски и полихеты. Исследования показали высокую устойчивость планктонного сообщества к кратковременному увеличению мутности, вызванному дноуглубительными работами. Его отклик является минимальным и не приводит к долгосрочным структурным перестройкам. Напротив, бентосные сообщества подвержены более сильному локальному влиянию, что приводит к их деградации в зоне прямого воздействия и времененным изменениям в прилегающих акваториях, хотя эти изменения являются обратимыми благодаря процессам естественного восстановления.

Ключевые слова: зоопланктон, фитопланктон, макрообентос, Северная Двина, устьевое взморье, дампинг грунта

**INVESTIGATION OF THE HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS
 OF PLANKTON AND BENTHOS COMMUNITIES AND ASSESSMENT
 OF THE IMPACT OF DREDGING ON THEIR MAIN CHARACTERISTICS
 (USING THE EXAMPLE OF THE NORTHERN DVINA RIVER ESTUARY)**

¹Kotova E.I., ²Zmetnaya M.I., ¹Makhnovich N.M.,

³Malkhasian Yu.V., ¹Lokhov A.S., ¹Moseev D.S.

¹Federal State Budgetary Scientific Institution «P.P. Shirshov Institute of Oceanology
 Russian Academy of Sciences», Moscow, Russian Federation, e-mail: ecopp@yandex.ru;

²The Northern Directorate for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
 Arkhangelsk, Russian Federation;

³ Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center
 for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov
 Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Arkhangelsk, Russian Federation

The estuary of the Northern Dvina River is subject to intensive industrial load due to the concentration of industrial enterprises and transport infrastructure in the coastal area, which directly impacts the communities of hydrobiotic in this region. The purpose of the study is to study the hydrobiological characteristics of communities in the mouth of the Severnaya Dvina River during summer dredging and to assess the impact of these works on the main characteristics of communities. The main hydrobiological characteristics investigated include species composition, abundance, and biomass of the communities. The research showed that in this area, phytoplankton comprises 47 species and higher taxonomic groups, zooplankton 35 species and higher taxonomic groups, and macrozoobenthos 4 species and higher taxonomic groups. Cyanoprokaryotes dominated the phytoplankton community, representatives of the order copepoda formed the basis of the qualitative composition of zooplankton, and mollusks and polychaetes dominated the macrozoobenthos community. Studies have shown a high resistance of the plankton community to a short-term increase in turbidity caused by dredging operations. Its response is minimal and does not lead to long-term structural changes. On the contrary, benthic communities are subject to a stronger local influence, which leads to their degradation in the zone of direct impact and temporary changes in adjacent water areas, although these changes are reversible due to natural restoration processes.

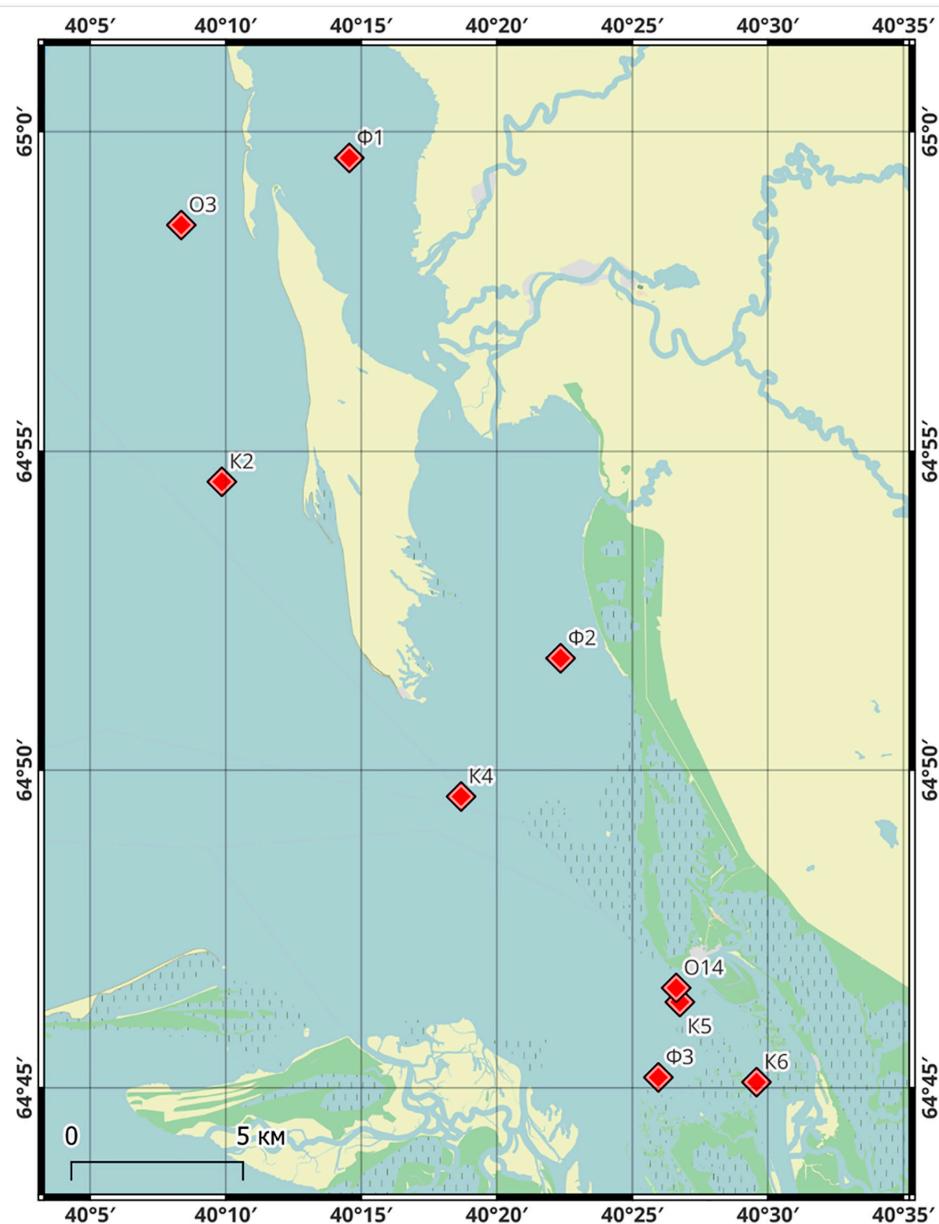
Keywords: zooplankton, phytoplankton, macrozoobenthos, Northern Dvina, estuarine seashore, soil dumping

Введение

Устьевая область реки Северная Двина с многорукавной дельтой и с приглубым устьевым взморьем занимает вершину Двинского залива Белого моря и включает устьевой участок реки длиной 150 км и устьевое взморье – часть Двинского залива южнее условной линии – м. Куйский (зимний берег Белого моря) – м. Толстик (летний берег Белого моря) [1; 2, с. 132]. Концентрация устьевой области реки промышленных предприятий и объектов транспортной инфраструктуры вносит существенный вклад в жизнедеятельность гидробионтов данного района [3], что подтверждается наличием большого коли-

чества работ по данной тематике [4; 5]. Эксплуатация и реконструкция объектов транспортной инфраструктуры, а также работы по поддержанию в должном состоянии каналов судоходства имеют непосредственное влияние на гидробиологические показатели сообществ [6]. В морском порту Архангельск дноуглубительные работы проводятся ежегодно в течение безледного периода [7].

Цель исследования – изучение гидробиологических характеристик сообществ устьевой области реки Северная Двина в летний период при проведении дноуглубительных работ и оценка влияния данных работ на основные характеристики сообществ.



Карта-схема размещения станций контроля

Материалы и методы исследования

Исследования сообществ гидробионтов проводились в летний период 2025 г. в точках контроля при проведении дноуглубительных работ морского порта Архангельск (рисунок): канал Мудьюгских башен (К2), Устьяновский канал (К4), Чижовский канал (К6), Лапоминский канал (К5), отвал 144А и отвал севернее отвала 144А (О3), отвал в районе д. Лапоминка (О14), фоновые точки (Ф1, Ф2, Ф3). Всего было собрано и обработано 9 проб на качественный и количественный состав зоопланктона, фитопланктона и бентосных организмов. Фоновая точка (станция Ф1) наиболее удалена от судоходных объектов и отвалов грунта. Сбор и камеральную обработку материала по показателям для фитопланктонного сообщества осуществляли в соответствии со стандартными методами [8, с. 6]. Фиксацию фитопланктона производили кислым раствором Утермеля. Численность (тыс. кл./л) фитопланктона в единице объема воды определяли с использованием камеры Фукса – Розенталя (глубина 0,2 мм), расчет биомассы (мг/л) проводили счетно-объемным стереометрическим методом [9, с. 14]. За счетную единицу принималась клетка. Домinantные виды в сообществах выделялись по относительной численности при нижнем уровне доминирования не менее 10%. Отбор зоопланктона проводился планктонной сетью Джеди с диаметром входного отверстия 36 см путем вертикального протягивания в слое воды дно-0 м, с последующей фиксацией 4%-ным формалином [10, с. 68]. Обработка материала проводилась визуально с использованием стереоскопического микроскопа. Видовая принадлежность устанавливалась с помощью определителей зоопланктона для европейских и морских вод [11]. Биомасса устанавливалась с помощью методического пособия [12].

Отбор проб макрозообентоса производился по стандартным методикам [9, с. 333; 13]. Применили коробчатый дночерпатель ДАК-250. В отобранном грунте относительно крупных животных выбирали вручную, далее грунт промывали через сита с размером отверстий 0,5-1 мм. Полученный материал просчитывали, обнаруженных животных фиксировали 85% этиловым спиртом. В местах отбора проб отмечался характер донных отложений. Гидробионты из всех проб макробентоса просчитаны totally под бинокуляром Bresser. При обработке материалов обнаруженные организмы определяли до вида или более крупных таксонов,

также находили численность и биомассу гидробионтов. Вес донных животных после их обсушивания до исчезновения влажных пятен на фильтровальной бумаге определяли в лаборатории на аналитических весах Adventurer Ohaus RV214. В дальнейшем количественные показатели обилия макро-зообентоса пересчитывали на площадь, равную 1 м². Систематика животных приведена по атласу «Флора и фауна Белого моря» [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Фитопланктон. Видовой состав фитопланктона в устьевой области р. Северной Двины за данный период представлен 47 видовыми и надвидовыми таксонами (табл. 1), принадлежащими пяти отделам микроводорослей: диатомовые (*Bacillariophyta*) – 24 вида, зеленые (*Chlorophyta*) – 14, цианопрокариоты (*Cyanoprokaryota*) – 5, золотистые (*Chrysophyta*) – 2, динофитовые (*Dinophyta*) – 1 вид. На всех станциях исследования отмечено доминирование цианопрокариот *Anabaena spiroides* и *Microcystis aeruginosa* за исключением станции К2, где в роли доминанта выступила только *Anabaena spiroides*. Основной вклад в развитие численности фитопланктона привнесли цианопрокариоты, основу биомассы составляли диатомовые, зеленые микроводоросли и цианопрокариоты.

Численность изменялась от 603,75 (канал Мудьюгских башен, станция К2) до 3106,25 тыс. кл./л (Лапоминский канал, станция О14). Высокие значения численности обусловлены развитием колониальных цианопрокариот *Anabaena spiroides* и *Microcystis aeruginosa*. Биомасса варьировалась от 0,094 (станция Ф1) до 0,369 мкг/л (Лапоминский канал, станция К5).

На фоновой станции Ф1 обнаружено 15 видовых и надвидовых таксонов, основу составили диатомовые водоросли (8 видов), в меньшей степени представлены зеленые водоросли и цианопрокариоты. Наибольший вклад в численность фитопланктона внесли цианопрокариоты (86% численности). Биомасса сформирована за счет цианопрокариот и диатомовых водорослей (47% и 36% соответственно). Численность составила 1060 тыс. кл./л, биомасса – 0,094 мг/л.

В канале Мудьюгских башен (станции К2, О3) видовой состав представлен 19 видовыми и надвидовыми таксонами, относящимися к 3 отделам микроводорослей (табл. 2): диатомовые (*Bacillariophyta*) – 12 видов, зеленые (*Chlorophyta*) – 3, цианопрокариоты (*Cyanoprokaryota*) – 4.

Таблица 1

Таксономический состав и встречаемость фитопланктона
в точках контроля при проведении дноуглубительных работ
морского порта Архангельск в летний период 2025 г.

№ п/п	Таксон	Станции отбора								
		Ф1	К2	О3	Ф2	К4	Ф3	К5	К6	О14
Bacillariophyta										
1	<i>Amphora ovalis</i>	-	-	-	-	+	-	+	-	+
2	<i>Asterionella formosa</i>	-	-	-	+	-	+	+	-	+
3	<i>Aulacoseira granulata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>Chaetoceros borealis</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-
5	<i>Coccconeis placentula</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
6	<i>Coscinodiscus rothii</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
7	<i>Cymatopleura solea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
8	<i>Diploneis ovalis</i>	-	-	-	+	+	-	-	-	-
9	<i>Epithemia sorex</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-
10	<i>Fragilaria construens</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	-
11	<i>Fragilaria crotonensis</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
12	<i>Gyrosigma acuminatum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
13	<i>Melosira moniliformes</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-
14	<i>Melosira varians</i>	-	+	+	+	-	-	-	-	-
15	<i>Navicula sp.</i>	+	+	+	-	-	-	+	+	+
16	<i>Nitzschia acicularis</i>	-	-	-	-	+	+	-	-	+
17	<i>Nitzschia holsatica</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18	<i>Nitzschia sigma</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	+
19	<i>Nitzschia sigmoidea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
20	<i>Nitzschia sp.</i>	+	-	+	-	+	-	+	+	-
21	<i>Nitzschia tryblionella</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-
22	<i>Paralia sulcata</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-
23	<i>Rhopalodia gibba</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-
24	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
25	<i>Synedra acus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
26	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	+	+	+	-	+	-	+	-	-
27	<i>Thalassiosira sp.</i>	+	+	+	-	+	-	+	-	-
28	<i>Tropidoneis lepidoptera</i>	-	-	+	+	-	+	-	-	-
Chlorophyta										
29	<i>Actinastrum hantzschii</i>	-	-	-	+	-	+	+	+	-
30	<i>Closterium acutum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
31	<i>Closterium moniliferum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
32	<i>Coelastrum astroideum</i>	-	-	-	-	+	-	-	+	+
33	<i>Coelastrum microporum</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
34	<i>Crucigenia tetrapedia</i>	+	+	-	-	-	+	-	+	+
35	<i>Oocystis sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
36	<i>Pediastrum boryanum</i>	+	-	-	-	-	+	+	-	-
37	<i>Pediastrum duplex</i>	-	-	-	-	-	+	+	-	-
38	<i>Pediastrum tetras</i>	+	+	+	-	-	-	-	+	+
39	<i>Scenedesmus acuminatus</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-

Окончание табл. 1

№ п/п	Таксон	Станции отбора								
		Ф1	К2	О3	Ф2	К4	Ф3	К5	К6	О14
40	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
41	<i>Tetraedron incus</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
42	<i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
	Cyanoprokaryota									
43	<i>Anabaena spiroides</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
44	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	-	+	+	-	-	+	+	+	+
45	<i>Gloeocapsa turgida</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
46	<i>Merismopedia glauca</i>	+	+	-	-	-	-	-	-	+
47	<i>Microcystis aeruginosa</i>	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	Chrysophyta									
45	<i>Ebria tripartita</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
46	<i>Mallomonas sp.</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	+
	Dinophyta									
47	<i>Peridinium sp.</i>	-	-	-	-	-	+	+	+	-

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Таблица 2

Количественные показатели фитопланктона в точках контроля
при проведении дноуглубительных работ
морского порта Архангельск в летний период 2025 г.

Станция отбора	Численность, тыс. кл./л	Биомасса, мг/л	Количество видов, шт.
Ф1	1060,00	0,094	15
К2	603,75	0,101	16
О3	1002,50	0,126	15
Ф2	1586,25	0,334	16
К4	2171,25	0,133	18
Ф3	1748,75	0,330	18
К5	2415,00	0,369	23
К6	2901,25	0,337	20
О14	3106,25	0,274	24

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Наибольший вклад в численность фитопланктона внесли цианопрокариоты (79% численности). Основу биомассы составили диатомовые (79% биомассы) за счет крупной *Rhopalodia gibba* и *Tropidoneis lepidoptera*. Численность составила от 603,75 до 1002,5 тыс. кл./л, что было меньше фоновых значений из-за отсутствия колониальной цианопрокариоты *Microcystis aeruginosa*. Значения биомассы значительно не отличались от фоновых и варьировали от 0,101 до 0,126 мг/л.

В Устьяновском канале (станции – К4, Ф2) видовой состав представлен 25 видовыми и надвидовыми таксонами, отно-

сящимися к 4 отделам микроводорослей: диатомовые (*Bacillariophyta*) – 19 видов, зеленые (*Chlorophyta*) – 3, цианопрокариоты (*Cyanoprokaryota*) – 2, золотистые (*Chrysophyta*) – 1 вид. Наибольший вклад в численность фитопланктона внесли цианопрокариоты (от 85 до 91% численности). Основу биомассы составили диатомовые (от 50 до 62% биомассы) за счет крупной *Tropidoneis lepidoptera* и колониальных *Chaetoceros borealis*, *Aulacoseira granulata*, *Thalassiosira* sp., *Melosira moniliformes*. Численность составила от 1586,25 до 2171,25 тыс. кл./л, биомасса – от 0,133 до 0,334 мг/л.

В Чижовском канале (К6) обнаружено 20 видовых и надвидовых таксонов, основу составили диатомовые (*Bacillariophyta*) и зеленые (*Chlorophyta*) водоросли (9 и 7 видов соответственно), в меньшей степени представлены цианопрокариоты (*Cyanoproteobacteria*) и динофитовые (*Dinophyta*) микроводоросли. Наибольший вклад в численность фитопланктона внесли цианопрокариоты (91% численности). Основу биомассы составили диатомовые водоросли (43% биомассы) за счет крупной *Coscinodiscus rothii* и колониальных *Aulacoseira granulata* и *Nitzschia holsatica*. Вклад цианопрокариот в общую биомассу составил 23%. Численность составила 2901,25 тыс. кл./л, что было выше фоновых значений из-за большей численности колониальной цианопрокариоты *Anabaena spiroides*. Биомасса составила 0,337 мг/л и не отличалась от фоновых значений.

В районе Лапоминского канала (станции – К5, Ф3, О14) сообщество фитопланктона представлено 36 видовыми и надвидовыми таксонами (табл. 3), принадлежащими пяти отделам микроводорослей: диатомовые (*Bacillariophyta*) – 17 видов, зеленые (*Chlorophyta*) – 12, цианопрокариоты (*Cyanoproteobacteria*) – 5, золотистые (*Chrysophyta*) – 1, динофитовые (*Dinophyta*) – 1 вид.

Основу биомассы составили зеленые (от 32 до 42% биомассы) за счет колониальных представителей рода *Pediastrum*, а также диатомовые (от 34 до 47% биомассы) водоросли за счет крупных *Cumatopleura solea*, *Nitzschia sigmaidea* и колониальных *Aulacoseira granulata*, *Nitzschia holsatica*. На станции О14 основу биомассы также составляли цианопрокариоты (45% биомассы) за счет колониальных *Anabaena spiroides* и *Microcystis aeruginosa*. Численность составляла от 1748,75 до 3106,45 тыс.кл./л, биомасса от 0,274 до 0,369 мг/л.

Зоопланктон. При проведении исследований сообществ зоопланктона всего в данном районе выявлено 35 видовых и надвидовых таксонов, относящихся к пяти систематическим группам: подклассу Copepoda (веслоногие раки), надотряду Cladocera (ветвистоусые раки), классу Rotifera (ковшватки), подклассу Cirripedia (усоногие), классу Ostracoda (ракушковые раки). Также в пробах отмечалась личиночная стадия морских моллюсков – класс Bivalvia. Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса Copepoda, которые представлены 21 видом и надвидовым таксоном, Cladocera (ветвистоусые раки) представлены – 11 видами, Rotifera,

Ostracoda и подкласс Cirripedia представлены 1 видом.

Численность зоопланктона варьировала от 219 экз./м³ (Устьяновский канал) до 11 818 экз./м³ (Лапоминский канал), максимальная биомасса составляла 289,33 мг/м³ (Лапоминский канал), минимальная 5,96 мг/м³ (Устьяновский канал).

Основу качественного и количественного состава формировали представители отряда веслоногих ракообразных Calanoida с явным доминированием типичного морского borealного теплолюбивого вида *Acartia longiremis*, который вносил наибольший вклад в общую численность и биомассу на всех точках контроля и составлял в зависимости от участка 59,6–90,4% от общей численности и 44,0–86,1% от общей биомассы. Максимальная величина вклада данного вида в общую численность (90,4%) и биомассу (86,1%) наблюдается на станции Ф2 – Устьяновский канал.

Видовой состав зоопланктона на фоновой станции (Ф1) преимущественно сформирован типично морскими boreальными видами (*Acartia longiremis*, *Temora longicornis*, *Pseudocalanus minutus*), единично встречаются пресноводные виды (*Ceriodaphnia quadrangula*, *Sida crystallina*, *Acanthocyclops vernalis*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina (Bosmina) longirostris*, *Mesocyclops leuckarti*). Всего выявлен 21 вид и надвидовой таксон зоопланктона, относящийся к 3 систематическим группам: подклассу Copepoda (веслоногие раки), надотряду Cladocera (ветвистоусые раки), подклассу Cirripedia (усоногие). Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса Copepoda, которые представлены 14 видовыми и надвидовыми таксонами, Cladocera (ветвистоусые раки) представлены 6 видами, подкласс Cirripedia 1 видом.

Основу качественного и количественного состава формировали представители отряда веслоногих ракообразных Calanoida, с доминированием вида *Acartia longiremis*. Вклад в общую численность и биомассу данного вида составляет 87,8 и 75,1% соответственно. Общая численность зоопланктона составляет 2391 экз./м³, биомасса – 68,01 мг/м³.

В канале Мудьюгских башен (станции – К2, О3) существенных изменений в видовом составе зоопланктона на станции К2, по сравнению с фоновой станцией канала (Ф1), не наблюдается. Видовой состав зоопланктона преимущественно сформирован также типично морскими boreальными видами (*Acartia longiremis*, *Temora longicornis*,

Pseudocalanus minutus), единично встречаются пресноводные виды (*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina longirostris*, *Mesocyclops leuckarti*, *Asplanchna priodonta*). Всего выявлено 23 видовых и надвидовых таксонов на зоопланктона, относящихся к 4 систематическим группам: подклассу Сорепода (веслоногие раки), надотряду Cladocera (ветвистоусые раки), классу Rotifera (ковшватки), подклассу Cirripedia (усоногие). Отмечалась личиночная стадия морских моллюсков – класс Bivalvia. Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса Сорепода, которые представлены 15 видами и надвидовыми таксонами, Cladocera (ветвистоусые раки) представлены 5 видами, класс Rotifera, подкласс Cirripedia и класс Bivalvia – по 1 виду.

Основу качественного и количественного состава также формировали представители отряда веслоногих ракообразных Calanoida с доминированием вида *Acartia longiremis*. Вклад в общую численность и биомассу данного вида составляет 59,6 и 66,1% соответственно. Однако общая численность и биомасса ниже, чем на станции Ф1, и составляет от 1484 до 331 экз./м³, биомасса – от 40,44 до 7,71 мг/м³ соответственно. Уменьшение значений данных показателей происходит преимущественно за счёт снижения численности всех видов, в том числе доминирующего вида *Acartia longiremis* (табл. 3).

В Устьяновском канале (станции – К4, Ф2) видовой состав зоопланктона преимущественно сформирован типично морскими boreальными видами (*Acartia longiremis*, *Temora longicornis*, *Pseudocalanus minutus*, *Oithona similis*), единично встречаются пресноводные виды (*Ceriodaphnia quadrangula*, *Sida crystallina*, *Acanthocyclops vernalis* *Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina (Bosmina) longirostris*, *Mesocyclops leuckarti*). Всего выявлено 27 видовых и надвидовых таксонов зоопланктона, относящихся к 4 систематическим группам: подклассу Сорепода (веслоногие раки), надотряду Cladocera (ветвистоусые раки), подклассу Cirripedia (усоногие), классу Ostracoda (ракушковые раки). Также в пробах отмечалась личиночная стадия морских моллюсков – класс Bivalvia. Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса Сорепода, которые представлены 18 видами и надвидовыми таксонами, Cladocera (ветвистоусые раки) представлены 6 видами, подкласс Ostracoda и подкласс Cirripedia, класс Bivalvia представлены 1 видом.

Основу качественного и количественного состава формировали представители отряда веслоногих ракообразных Calanoida, с доминированием вида *Acartia longiremis*. Вклад в общую численность и биомассу данного вида составляет 90,4 и 86,1% соответственно. Общая численность зоопланктона составляет от 220 до 1868 экз./м³, биомасса от 5,96 до 53,49 мг/м³.

В Чижовском канале (К6) выявлены 2 систематические группы – подкласс Сорепода (веслоногие раки) и надотряд Cladocera (ветвистоусые раки). Видовой состав зоопланктона преимущественно сформирован также типично морскими boreальными видами (*Acartia longiremis*, *Temora longicornis*, *Pseudocalanus minutus*), встречаются, хоть и в меньшем количестве по сравнению с фоновой станцией, пресноводные виды (*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina (Bosmina) longirostris*, *Mesocyclops leuckarti*, *Cyclops scutifer*). Всего выявлено 19 видов и надвидовых таксонов зоопланктона. Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса Сорепода, которые представлены 14 видовыми и надвидовыми таксонами, Cladocera (ветвистоусые раки) представлены 5 видами.

Основу качественного и количественного состава также формировали представители отряда веслоногих ракообразных Calanoida с доминированием вида *Acartia longiremis*. Вклад в общую численность и биомассу данного вида составляет 72,5 и 70,8% соответственно. Однако общая численность и биомасса существенно ниже, чем на станции Ф1, и составляет 365 экз./м³, биомасса – 9,82 мг/м³. Уменьшение значений данных показателей происходит преимущественно за счёт снижения численности всех видов, в том числе доминирующего вида *Acartia longiremis*.

Видовой состав зоопланктона Лапоминского канала (станции – К5, Ф3, О14) преимущественно сформирован типично морскими boreальными видами, а также видами-космополитами (*Acartia longiremis*, *Mesocyclops leuckarti*, *Bosmina (Eubosmina) coregoni*), широко представлены пресноводные виды (*Ceriodaphnia quadrangula*, *Sida crystallina*, *Acanthocyclops vernalis* *Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina (Bosmina) longirostris*, *Daphnia longispina*). Всего выявлено 28 видовых и надвидовых таксонов зоопланктона, относящихся к 3 систематическим группам: подклассу Сорепода (веслоногие раки), надотряду Cladocera (ветвистоусые раки), классу Ostracoda (ракушковые раки).

Таблица 3

Видовой состав зоопланктона в точках контроля при проведении дноуглубительных работ морского порта Архангельск в летний период 2025 г.

№ п/п	Таксон	Станции отбора								
		Ф1	К2	О3	Ф2	К4	Ф3	К5	К6	О14
Copepoda										
1	<i>Acanthocyclops vernalis</i>	+	-	-	-	-	+	+	-	+
2	<i>Acartia juv</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-
3	<i>Acartia longiremis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>Calanoida sp.</i>	+	+	+	+	+	-	+	+	-
5	<i>Calanus glacialis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	<i>Centropages hamatus</i>	-	-	+	+	-	-	-	-	+
7	<i>Copepoda nauplii</i>	+	+	+	+	-	-	+	+	-
8	<i>Cyclops furcifer</i>	+	-	+	+	-	-	+	+	+
9	<i>Cyclops scutifer</i>	-	-	-	+	-	-	-	+	+
10	<i>Cyclops strenuus</i>	+	-	+	+	+	+	-	-	+
11	<i>Ectocyclops phaleratus</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
12	<i>Eurytemora affinis</i>	+	+	+	+	-	+	+	+	+
13	<i>Harpacticoida sp.</i>	-	-	-	-	+	-	-	+	-
14	<i>Mesocyclops leuckarti</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15	<i>Metridia longa</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-
16	<i>Microcyclops varicans</i>	-	+	-	-	-	+	-	+	-
17	<i>Microsetella norvegica</i>	+	+	+	+	-	+	+	+	+
18	<i>Oithona similis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
19	<i>Pseudocalanus minutus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
20	<i>Temora longicornis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
21	<i>Triconia borealis</i>	+	-	+	+	-	-	+	-	+
Cladocera										
22	<i>Alona quadrangularis</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
23	<i>Bosmina (Bosmina) longirostris</i>	+	+	+	+	+	-	+	+	+
24	<i>Bosmina (Eubosmina) coregoni</i>	+	-	-	-	-	+	-	+	+
25	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>	+	-	+	+	-	+	+	+	+
26	<i>Chydorus sphaericus</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
27	<i>Cladocera juv.</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
28	<i>Daphnia cucullata</i>	-	-	+	+	-	-	+		+
29	<i>Daphnia longispina</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-
30	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
31	<i>Podon leuckarti</i>	+	+	-	+	-	-	-	-	-
32	<i>Sida crystallina</i>	+	-	-	+	-	+	-	-	+
Rotatoria										
33	<i>Asplanchna priodonta (Gosse)</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Cirripedia										
34	<i>Verruca stroemia</i>	+	+	-	+	+	-	-	-	-
Ostracoda										
35	<i>Boreostoma variabile</i>	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Bivalvia										
36	<i>Bivalvia sp.</i>	-	+	-	+	-	-	+	+	-
<i>Всего таксонов</i>		21	18	18	23	15	21	18	19	21

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Также в пробах отмечалась личиночная стадия морских моллюсков – класс *Bivalvia*. Наибольшее видовое разнообразие принадлежало представителям подкласса *Copepoda*, которые представлены 18 видами и надвидовыми таксонами, *Cladocera* (ветвистоусые ракчи) представлены 9 видами, класс *Ostracoda* и *Bivalvia* – 1 видом.

Основу качественного и количественного состава формировали представители отряда веслоногих ракообразных *Calanoida* с доминированием вида *Acartia longiremis*. Вклад в общую численность и биомассу данного вида составляет 87,7 и 83,4% соответственно. Общая численность зоопланктона составляет от 800 до 11818 экз./м³, биомасса – от 26,84 до 289,33 мг/м³ (табл. 4).

Таблица 4

Значения численности и биомассы зоопланктона в точках контроля при проведении дноуглубительных работ морского порта Архангельск в августе 2025 г.

Станция	Численность, экз./м ³	Биомасса, мг/м ³
Ф1	2391	68,01
К2	331	7,71
О3	1484	40,44
Ф2	1868	53,491
К4	220	5,96
Ф3	11818	289,33
К5	800	26,84
К6	365	9,82
О14	1501	31,36

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Существенное увеличение значений гидробиологических показателей на станции Ф3, происходит за счёт наличия, наравне с морскими, большого количества пресноводных видов, что объясняется её местоположением в эстuarной фронтальной зоне смешения морских и пресных вод.

Макрообентос. За период исследования было обнаружено 4 вида и надвидовых таксона в бентофауне, среди которых два вида полихет и два вида моллюсков. Встреченные организмы относились к двум типам (кольчатые черви *Annelida*, моллюски *Mollusca*) и двум классам (многощетинковые черви *Polychaeta*, двустворчатые моллюски *Bivalvia*). Численность макрообентоса составила от 1,33 до 21 экз./м², составив

в среднем 7,42 экз./м², биомасса характеризовалась показателями от 0,04 до 2,35 г/м², составив в среднем 0,81 г/м². Обследованные станции отличаются по типам грунтов, хотя и незначительно. Средне- и мелкозернистые песчаные, илисто-песчаные и глинистые грунты с примесью ракушки, гниющей органики накладывают отпечаток на развитие сообществ животных, среди которых наиболее распространенными являются виды, живущие в верхнем слое грунта.

Видовой состав макрообентоса на фоновой станции (Ф1) представлен многощетинковыми червями *Polychaeta* gen. spp. Выявлен один надвидовой таксон. Грунты представлены засыпанным песком и глиной. Общая численность составляет 1,43 экз./м², биомасса – 0,92 г/м².

В канале Мудьюгских башен (станции – К2, О3) существенных изменений в видовом составе макрообентоса на станциях по сравнению с фоновой станцией канала (Ф1) не наблюдается. Видовой состав сформирован также многощетинковыми червями *Polychaeta* gen. spp. Общая численность составляет 5,65 экз./м², биомасса – 1,08 г/м². На станции К2 грунты представлены неплотным илом, в составе бентосного сообщества обнаружен один вид – молодь *Macoma balthica*, общая численность составляет 21 экз./м², биомасса – 0,13 г/м².

В Устьяновском канале (станции – К4, Ф2) видовой состав несколько богаче, выявлено 3 видовых и надвидовых таксона.

На станции К4 грунты представлены илом и среднезернистым песком, в составе бентосного сообщества обнаружено два вида – молодь *Macoma balthica*, *Polychaeta* gen. spp. Общая численность составляет 15,96 экз./м², биомасса – 1,64 г/м².

На станции Ф2 грунты представлены мелкозернистым песком, в составе бентосного сообщества обнаружено два вида моллюсков – молодь *Macoma balthica* и *Mya arenaria*, общая численность составляет 6,65 экз./м², биомасса – 0,75 г/м².

В Чижовском канале (К6) выявлен один вид полихет – *Phyllodoce maculata*. Грунты представлены илом с остатками гниющей растительности. Общая численность составляет 4,04 экз./м², биомасса – 0,21 г/м².

Видовой состав макрообентоса Лапоминского канала (станции – К5, Ф3, О14) преимущественно сформирован двустворчатыми моллюсками. На станции К5 грунты представлены илом с остатками гниющей древесины. В составе бентосного сообщества обнаружен моллюск – молодь

Macoma balthica, общая численность составляет 8,08 экз./м², биомасса – 2,35 г/м². На станции Ф3 грунты представлены мелкозернистым песком, в составе бентосного сообщества обнаружено два вида полихет – *Phyllodoce maculata* и *Polychaeta gen. spp.* Общая численность составляет 2,66 экз./м², биомасса – 0,04 г/м². На станции О14 грунты представлены илом, в составе бентосного сообщества обнаружен моллюск – молодь *Macoma balthica*. Общая численность составляет 1,33 экз./м², биомасса – 0,21 г/м².

В таблице 5 указаны значения численности и биомассы макрозообентоса в точках контроля при проведении дноуглубительных работ морского порта Архангельск в августе 2025 г.

Таблица 5

Значения численности и биомассы макрозообентоса в точках контроля при проведении дноуглубительных работ морского порта Архангельск в августе 2025 г.

Станция	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²
Ф1	1,43	0,92
К2	21,00	0,13
О3	5,65	1,08
Ф2	6,65	0,75
К4	15,96	1,64
Ф3	2,66	0,04
К5	8,08	2,35
К6	4,04	0,21
О14	1,33	0,21

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Приведенные показатели биомассы и численности макрозообентоса согласуются с данными других авторов и расчетами средней продуктивности для разных участков Белого моря [15; 16].

Заключение

Сообщество фитопланктона в основном представлено пресноводными и солоноватоводными видами прибрежных ценозов. Несмотря на то, что на всех станциях отбора проб в основе видового состава выступали диатомовые водоросли, доминировали по численности и биомассе виды цианопрокариот *Anabaena spiroides* и солоноватоводный вид – *Microcystis aeruginosa*, за исключением станции К2, где в роли

доминанта выступила только *Anabaena spiroides*. Минимальные значения численности и биомассы зафиксированы в районе канала Мудьюгских башен на станции К2, максимальные значения в районе Лапоминского канала на станции О14 и К5 соответственно. На всех станциях отбора проб, за исключением станции К2 – значения численности и биомассы выше относительно фоновой станции. Стоит отметить, что наличие доминирующих вышеперечисленных видов водорослей, обнаруженных в ходе проведения исследования, обуславливает «цветение воды», а также свидетельствует об умеренном загрязнении вод. Таким образом, для понимания факторов развития цианопрокариот в данном районе следует обратить внимание на динамику содержания органических и биогенных веществ в исследуемых водах, а также на ряд других гидрохимических показателей. Сообщество зоопланктона на всех станциях отбора представлено как типичными морскими видами, так и пресноводными, с явным доминированием характерного для данного района морского boreально-теплолюбивого вида – *Acartia longiremis*, который вносил наибольший вклад в общую численность и биомассу на всех станциях. На всех станциях, за исключением станции Лапоминского канала – Ф3, значения гидробиологических показателей – численности и биомассы были ниже, чем на фоновой станции. Минимальные значения численности и биомассы зафиксированы в районе Устьяновского канала на станции К4, максимальные в районе Лапоминского канала на станции Ф3. Установлено также, что видовой состав на станциях отбора проб существенно не отличался от выявленного видового состава фоновой станции. Видовое разнообразие остается идентичным или несущественно снижается относительно фоновой станции. При этом обнаруженные морские виды являются характерными для зоопланктонного сообщества прибрежных вод Двинского залива Белого моря, а выявленные пресноводные виды – типичными представителями устьевой области р. Северная Двина. Таким образом, можно говорить о том, что работы по углублению канала влияют на видовой состав незначительно, наибольшее их влияние связано с уменьшением значений численности и биомассы. В ходе работ выявлено, что состав макрозообентоса характеризуется низким видовым и таксономическим разнообразием (четыре таксона,

относящихся к двум классам – Polychaeta и Bivalvia). Численность и биомасса также незначительны, что связано с антропогенной нагрузкой на этот участок реки.

Представленные данные обладают значительным потенциалом для комплексной оценки экологического ущерба, а также для анализа воздействия различных форм водопользования в активно эксплуатируемой акватории Северной Двины. Данные исследований могут быть использованы специалистами при проведении рыбохозяйственного мониторинга, который демонстрирует экологические последствия негативного антропогенного воздействия. Данные о биомассе сообществ гидробионтов используются при расчёте последствий негативного воздействия на состояние водных биологических ресурсов и среды их обитания. Эти материалы могут быть интегрированы в научные исследования, направленные на изучение биогеохимических процессов в устье реки.

Список литературы

- Кравцова В.И., Вахнина О.В., Лебедева С.В., Харьковец Е.Г., Чалова Е.Р. Современная динамика дельты Северной Двины: исследование по разновременным космическим снимкам // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0321059623010108.
- Лоция Белого моря (№ 1110). СПб.: ГУНиО МО РФ, 2021. 411 с.
- Коробов В.Б., Шевченко В.П., Котова Е.И. Нерешенные задачи исследования устьевой области Северной Двины // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 125–138. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).6.
- Торцев А.М. Система факторов антропогенного воздействия на ихиофауну бассейна реки Северная Двина // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. № 4. С. 606–619. DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-4-606-619.
- Имант Е.Н., Новоселов А.П. Динамика состава зоопланктона нижнего течения реки Северная Двина и некоторые факторы, определяющие его численность // Экология. 2021. № 1. С. 40–50 DOI: 10.31857/S0367059721010042.
- Новоселов А.П., Имант Е.Н., Артемьев С.Н., Матвеев Н.Ю., Матвеева А.Д. Современное состояние планктонных и бентосных сообществ устьевой области реки Северная Двина // Экология. 2022. Т. 60, № 3. С. 211–220. DOI: 10.31857/S0367059722030088.
- Иглин С.М., Алабян А.М., Коробов В.Б. Особенности штормовой заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск в устье Северной Двины // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 648–659. DOI: 10.31857/S0030157422040037.
- Радченко И.Г., Капков В.И., Федоров В.Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского планктона: учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. М.: Мордвинец, 2010. 60 с. URL: <https://docs.yandex.ru/docs?type=docx> (дата обращения: 10.12.2025). ISBN: 978-5-904480-03-5.
- Методы гидробиологических исследований внутренних вод / под ред. А.В. Крылова. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с. URL: <https://www.ibiv.ru/download/4222116.PDF>. (дата обращения: 10.12.2025). ISBN: 978-5-6052860-0-4.
- Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / Под. ред. А.В. Цыбань. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1980. 192 с. URL: <https://djvu.online/file/wS3bYNVpnCLmo> (дата обращения: 10.12.2025).
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Зоопланктон / Под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолихина. Товарищество научных изданий КМК. Т. 1. 2010. 495 с. URL: <https://djvu.online/file/017r3VusguUHO>. (дата обращения: 10.12.2025). ISBN 978-5-9907572-4-0.
- Кононова О.Н., Фефилова Е.Б. Методическое руководство по определению размерно-весовых характеристик организмов зоопланктона Европейского Севера России. Сыктывкар, 2018. 152 с. ISBN: 978-5-89606-572-2.
- Илюшин Д.Г., Исаенко А.И., Шабалин Н.В., Мокиевский В.О. Современные методы исследования донных сообществ // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 95–101. EDN: TEGEYH.
- Флора и фауна Белого моря: иллюстрированный атлас / Под ред. А.Б. Цетлина, А.Э. Жадан, Н.Н. Марфенина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 471 с. URL: <https://www.cnshb.ru/content/2024/04340833.pdf> (дата обращения: 10.12.2025). ISBN: 978-5-87317-672-4.
- Артемьев С.Н., Новоселов А.П., Левицкий А.Л. «Таксономическое и видовое разнообразие макрообентоса в Двинском заливе Белого моря» // Arctic Environmental Research. 2017. Vol. 17. № 4. P. 302–320. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.308.
- Студенова М.А., Студенов И.И., Чупов Д.В., Саводов А.С. «Зообентос дельты реки Северная Двина» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 34–39. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-060-065.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 622.7
DOI 10.17513/use.38469

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ
МЕДНОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА
«ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ – ЦЕМЕНТАЦИЯ – ФЛОТАЦИЯ»**

**Александрова Т.Н. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Люблянова В.А. ORCID ID 0009-0005-2302-7454**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: lyublyanova.spb.lera@yandex.ru*

Сокращение запасов легкобогатимых медных руд обуславливает необходимость переработки труднообогатимого сырья, для которого характерен неравномерный минералогический состав, а также тонкая вкрапленность ценных компонентов. Проблемой в области переработки окисленных и смешанных медных руд является высокая стоимость и низкая экологичность ионообменных смол, что предопределяет необходимость поиска альтернативных методов, среди которых комбинированный способ – «выщелачивание – цементация – флотация». Цель работы – систематизация данных и теоретический расчет термодинамических параметров выщелачивания и цементации для обоснования возможных направлений совершенствования процессов переработки медных окисленных и смешанных руд методом «выщелачивание – цементация – флотация». В ходе исследования проведен анализ более 100 источников научной и научно-технической литературы (1973–2025 гг.), опубликованных в рецензируемых журналах ВАК, а также в базах данных Scopus, Web of Science, из которых выделены для подробного изучения 37. Информация была систематизирована и сопоставлена с результатами собственных термодинамических расчетов, основанных на связи между термодинамическим потенциалом и электродным потенциалом реакции. Установлено, что на стадии выщелачивания большое влияние оказывают ионы кальция, железа и др., существенно увеличивающие расход серной кислоты. Показано, что при цементации эффективность процесса зависит от соотношения основной реакции восстановления Cu^{2+} и побочных процессов окисления осажденной меди и взаимодействия железа с серной кислотой. Обосновано, что перспективным направлением для исследований в области флотации цементной меди является изучение возможности применения новых, селективных азотсодержащих реагентов. Результаты проведенного анализа подтверждают перспективность использования схемы «выщелачивание – цементация – флотация» для переработки труднообогатимых окисленных и смешанных медных руд благодаря большей экологичности и экономичности процесса и возможности извлечения сопутствующих ценных компонентов.

Ключевые слова: цементная медь, флотация, выщелачивание, термодинамика, сульфидрильные собираители

**MAIN DIRECTIONS AND OPPORTUNITIES
FOR IMPROVING COPPER ORE PROCESSING USING
THE LEACHING – CEMENTATION – FLOTATION METHOD**

**Aleksandrova T.N. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Lyublyanova V.A. ORCID ID 0009-0005-2302-7454**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II”, Saint Petersburg,
Russian Federation, e-mail: lyublyanova.spb.lera@yandex.ru*

The reduction in reserves of easily enrichable copper ores necessitates the processing of difficult-to-process ore, which are characterised by uneven mineralogical composition and fine dispersion of valuable components. The problem in the processing of oxidised and mixed copper ores is the high cost and low environmental friendliness of ion exchange resins, which necessitates the search for alternative methods, including the combined method of ‘leaching – cementation – flotation’. The aim of the work is to systematise data and theoretically calculate the thermodynamic parameters of leaching and cementation processes to substantiate possible directions for improving the processing of oxidised and mixed copper ores using the ‘leaching-cementation-flootation’ method. During the study, more than 100 sources of scientific and scientific-technical literature (1973–2025) published in peer-reviewed journals of the Higher Attestation Commission, as well as in the Scopus and Web of Science databases, were analysed, of which 37 were selected for detailed study. The information was systematised and compared with the results of our own thermodynamic calculations based on the connection between the thermodynamic potential and the electrode potential of the reaction. It has been established that calcium, iron and other ions have a significant impact on the leaching stage, substantially increasing the consumption of sulphuric acid. It has been shown that during cementation, the efficiency of the process depends on the ratio of the main Cu^{2+} reduction reaction and the side processes of oxidation of precipitated copper and the interaction of iron with sulphuric acid. It has been substantiated that a promising direction for research in the field of cement copper flotation is to study the possibility of using new, selective nitrogen-containing reagents. The results of the analysis confirm the promise of using the ‘leaching-cementation-flootation’ scheme for processing difficult-to-enrich oxidised and mixed copper ores due to the greater environmental friendliness and cost-effectiveness of the process and the possibility of extracting associated valuable components.

Keywords: cement copper, flotation, leaching, thermodynamics, sulphhydryl collectors

Введение

Минерально-промышленный сектор занимает ключевое место в структуре мировой экономики, а одна из его приоритетных задач состоит в рациональном использовании природно-ресурсной базы [1, 2]. Сокращение доступной минерально-сырьевой базы на фоне устойчивого роста спроса на медь обуславливает необходимость вовлечения в переработку все более сложных, труднообогатимых видов сырья, характеризующегося низким содержанием и тонкой вкрапленностью ценных компонентов, а также неоднородным минералогическим составом [3, 4]. К ним относятся смешанные и окисленные медные руды, в которых медь находится в составе различных минералов, таких как сульфиды, карбонаты, силикаты и др. [5]. Актуальные направления повышения эффективности обогащения комплексного сырья включают модернизацию флотационных и рудоподготовительных [6, 7] операций, использование различных физических воздействий на минеральное сырье, а также развитие цифровых и математических методов [8] описания процессов, что позволяет комплексно воздействовать на обогатительные процессы, одновременно повышая степень раскрытия минеральных сростков, избирательность реагентных режимов, а также обеспечивать более точный прогноз и контроль основных технологических показателей. При переработке медных руд сложного вещественного состава перспективным методом является выщелачивание [9], поскольку оно позволяет избирательно переводить медь и сопутствующие компоненты в раствор, обеспечивает высокую степень селективности за счет точного контроля Eh-рН-параметров и среды выщелачивания, представляя возможность эффективного вовлечения в переработку окисленных минералов, имеющих тонкую вкрапленность.

Для извлечения меди из смешанных и окисленных медных руд возможно применение метода «выщелачивание – цементация – флотация», основными достоинствами метода являются: большая экологичность по сравнению с применением экстракции, возможность работы с растворами умеренной концентрации меди (5–15 г/л), для которых жидкостная экстракция и электролиз обычно не применяются, а также возможность использования доступного и дешевого железного материала как восстановителя на стадии цементации. Однако процесс переработки руд смешанного и окисленного

типа с применением метода «выщелачивание – цементация – флотация» требует комплексного учета как химико-минералогических особенностей сырья, так и специфики каждого из перечисленных этапов.

На стадии выщелачивания режимные параметры, формирующие необходимые характеристики продуктивного раствора, определяют возможность и эффективность последующего выделения меди на стадиях цементации и флотации. По причине многокомпонентности и сложности минералогического состава медных руд, в том числе присутствия кальция в виде карбонатов, кальцитов, перовскитов и др., а также железа, входящих в состав сульфидных или окисленных минералов, актуальным направлением исследований является применение термодинамического моделирования [10], которое позволит оценить возможность и степень взаимодействия данных элементов с серной кислотой, что тем самым даст возможность спрогнозировать необходимость увеличения расхода серной кислоты, подаваемой в процесс выщелачивания.

Полученные значения извлечения и концентрации меди служат исходными условиями при выборе способа ее выделения из раствора. На стадии цементации меди на железной стружке одним из ключевых факторов является термодинамическое соотношение основной реакции восстановления меди до металлической формы и ряда побочных реакций, протекающих в многокомпонентном растворе. В присутствии ионов железа и растворенного кислорода возможно окисление осажденной меди, что приводит к потере части металла, также возможно значительное увеличение расхода кислоты, затрачиваемой на окисление железа. По этой причине актуальными являются исследования с применением термодинамического моделирования, позволяющие количественно оценить вероятностные направления протекания сопутствующих реакций и тем самым обосновать оптимальные области рН, окислительно-восстановительного потенциала и соотношения Fe:Cu для минимизации вторичного растворения меди и перерасхода железа и серной кислоты.

Образующаяся цементная медь далее подвергается флотации [11] в кислой среде, где в качестве реагентов-собирателей используются реагенты класса дитиофосфаты. Однако в настоящее время синтезируется большое количество новых реагентов, отно-

сящихся как к категории сульфидильных, так и к категории неионогенных (тионокарбаматы) собирателей, способных к флотации в условиях кислых и щелочных сред. Также разрабатываемые в настоящее время месторождения медных руд часто можно отнести к комплексным, так как в своем составе помимо меди, они содержат другие ценные компоненты [12], такие как благородные металлы, которые не переходят в продуктивный раствор при выщелачивании, что предопределяет актуальность поиска новых реагентов и оценки возможности извлечения их при флотации цементной меди.

Таким образом, **цель исследования** – систематизация данных и теоретический расчет термодинамических параметров выщелачивания и цементации для обоснования возможных направлений совершенствования процессов переработки медных окисленных и смешанных руд методом «выщелачивание – цементация – флотация».

Материалы и методы исследования

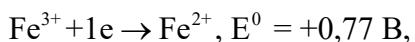
Методологическую основу работы составил систематический обзор научной и технической литературы, посвященный проблематике процесса флотационного обогащения цементной меди, а также анализ особенностей протекания процесса выщелачивания и цементации. Поиск соответствующих теме исследования научных статей производился в научнотехнических базах данных Scopus, Web of Science, также в качестве источников информации использовались научные статьи журналов, индексируемых в базе данных ВАК. При проведении исследования было проработано более 100 источников в период с 1973 по 2025 г., из которых было выделено 37 русскоязычных и зарубежных научных статей для более детального анализа и обработки полученной информации.

В качестве метода определения изменения энергии Гиббса для окислительно-восстановительных реакций, а также реакций обмена был принят метод, использующий связь между изменением термодинамического потенциала и электродным потенциалом реакции:

$$\Delta G = -nFE,$$

где n – число электронов, участвующих в реакции; E – электродный потенциал гальванического элемента, который рассчитывается как разность потенциалов окислителя и восстановителя, V ; F – постоянная Фарда $F = 96485 \text{ Кл/моль}$.

Ниже приведены стандартные электродные потенциалы, требуемые для проведения расчетов в рамках работы [13]:



Термодинамическое моделирование зависимости нахождения элементов в различных формах от изменения уровня pH среды произведено с использованием программного обеспечения Hydra, Medusa.

Результаты исследования и их обсуждение

Основными этапами процесса обогащения окисленных и смешанных медных руд по методу «выщелачивание – цементация – флотация» являются:

1. Выщелачивание меди из поступающей на обогащение медной руды.
2. Цементация меди на поверхности железной стружки.
3. Извлечение цементной и сульфидной меди, а также благородных металлов с применением метода флотации и отправка полученного продукта на дальнейшую металлургическую переработку.

Процесс выщелачивания меди из смешанных и окисленных медных руд

Наиболее распространенным реагентом для выщелачивания меди является серная кислота, поскольку она обеспечивает высокую степень растворения оксидов меди при относительно низких концентрациях (0,5–3 %), является доступным и экономичным реагентом, также процесс может проходить в щелочных [14], аммиачных [15] растворах. Для интенсификации процесса выщелачивания возможно добавление различных окислителей: перекиси водорода [16], нитрат-ионов [17], ионов трехвалентного железа [18] и др. В окислительных условиях минералы подвергаются растворению в разбавленных растворах серной кислоты с концентрацией 0,5–3 %. Присутствующие в руде сульфидные минералы практически не растворяются. Расход кислоты при выщелачивании варьируется в широких пределах – от 5 до 15 (в некоторых случаях до 40) кг на одну тонну перерабатываемой руды – и определяется минеральным и химическим составом исходного сырья.

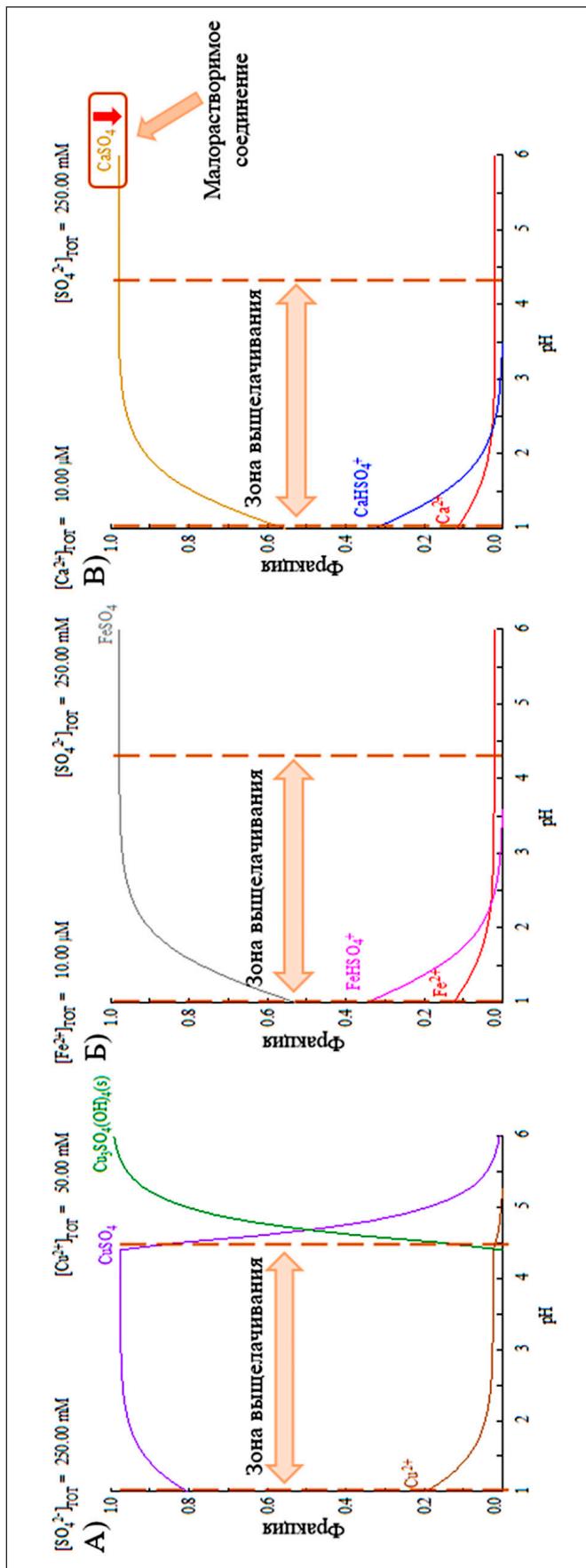


Рис. 1. Зависимость распределения форм элементов при сернокислотном выщелачивании в зависимости от pH для А – меди; Б – железа; В – цинка
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На рис. 1 представлены результаты термодинамического моделирования распределения форм меди, железа и кальция в зависимости от pH в присутствии серной кислоты.

Анализ данных, представленных на рис. 1, позволил установить, что:

- при высокой концентрации сульфат-ионов и изменении уровня pH до 4,5 (рис. 1, А) возможно образование твердого зеленого осадка – антлерита, что снижает эффективность выщелачивания, а также может затруднить дальнейший процесс цементации меди;

- наличие в рудах минералов, в состав которых входят ионы железа, таких как халькопирит, борнит, магнетит, пирит, гетит, ильменит и др., приводит к необходимости значительного увеличения расхода подаваемой в процесс серной кислоты, в связи с тем, что железо при сернокислотном выщелачивании активно взаимодействует с сульфат-ионами (рис. 1, Б);

- ионы кальция, входящие в состав большого количества минералов, слагающих значительную часть вмещающих пород большой части месторождений, при контакте с серной кислотой в процессе выщелачивания образуют малорастворимое соединение – сульфат кальция (рис. 1, В), который выпадает в осадок и затрудняет дальнейшее протекание процесса. Наличие таких минералов также требует значительного увеличения расхода серной кислоты.

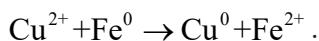
Эффективность выщелачивания определяется множеством взаимосвязанных параметров, среди которых ключевую роль играют физико-химические характеристики среды и материала. Также на эффективность выщелачивания могут повлиять применение ультразвукового [19] или сверхвысокочастотного излучения [20]. Для интенсификации процесса выщелачивания труднообогатимых (упорных) руд и достижения более высоких концентраций металлов в продуктивном растворе, возможен нагрев пульпы до диапазона температур 45–70 °C, при котором скорость основных окислительно-восстановительных превращений существенно возрастает. Такое тепловое воздействие может быть достигнуто, например, путем подачи пара в реакционную среду [11].

Таким образом, протекание процесса выщелачивания меди из окисленных и смешанных медных руд зависит от используемых реагентов, наличия окислителей, ультразвукового или сверхвысокочастотного излучений, увеличивающих скорость протекания реакций. Наиболее распространенным реагентом для выщелачивания является сер-

ная кислота. В зависимости от минерального состава поступающей на обогащение руды, наличия в ней большого количества минералов, в состав которых входят такие элементы, как железо, кальций и др., способные к взаимодействию с серной кислотой, ее расход и концентрация могут изменяться в значительных диапазонах.

Процесс цементации меди

Для выделения меди из растворов выщелачивания могут применяться различные методы: жидкостная экстракция с последующим осаждением, электролиз, сорбция на ионообменных смолах, цементация железом и др. [21]. Ключевым ограничивающим фактором при выборе технологии выделения меди является достигнутая в процессе выщелачивания концентрация металла в продуктивном растворе. Жидкостная экстракция с применением органических реагентов и электрохимическое осаждение экономически эффективны, когда содержание меди в растворе более 15 г/л [22]. Цементация меди на железной стружке – это гетерогенный процесс, представляющий собой реакцию ионного обмена, в процессе которого ионы меди восстанавливаются до металлической формы на поверхности железа с одновременным ее окислением и выделением в раствор ионов железа, который описывается уравнением



Возможность самопроизвольного протекания данной реакции определяется положением металлов в электрохимическом ряду напряжений.

Процесс восстановления медьсодержащих ионов при взаимодействии с поверхностью железа происходит в четыре последовательных стадии [23]:

- Диффузионная стадия: переход ионов Cu^{2+} сквозь пограничный диффузионный слой жидкости к активной поверхности металлического железа и одновременный отвод образованных ионов Fe^{2+} в объем раствора. При этом интенсивность процесса зависит от коэффициента диффузии и концентрационного градиента.

- Электрохимическая стадия: восстановление катионов меди на участках пониженного потенциала поверхности железа и ионизация (окисление) атомов железа на анодных участках.

- Образование электрокристаллических слоев: осаждение меди в виде гендритных или дендритных структур [24], растущих

из ранее образованных медных частиц, прилипших к поверхности железа. Характер и морфология образуемого осадка определяются анионным составом раствора и параметрами процесса.

– Кристаллизация и консолидация: образование сплошного медного слоя с определенной морфологией осадка.

Для осаждения меди могут применяться различные источники железа, однако наиболее распространенными являются железная стружка, скрап или губчатое железо крупностью около 0,1 мм [25]. Теоретически необходимое соотношение между железом и медью $\text{Fe:Cu} = 56:64 = 7:8$, но в связи с протеканием в процессе цементации побочных реакций расход железа на 1 кг извлекаемой меди может варьироваться в широких диапазонах – от 1,2–1,3 до 4 кг, а в некоторых случаях до 10 кг. Время проведения процесса цементации обычно составляет 10–60 мин.

Осажденная при цементации медь может окисляться при взаимодействии с ионами трехвалентного железа и кислорода, находящегося в продуктивном растворе. В связи с этим важным параметром, который необходимо контролировать в процессе цементации, является перемешивание без аэрации. Поскольку процесс цементации является диффузионным [26], увеличить скорость его протекания возможно при повышении температуры раствора или интенсивности перемешивания, повышении концентрации ионов меди и частиц железа.

При протекании процесса цементации помимо основной реакции также можно отметить реакции, протекающие параллельно:

окисление железа серной кислотой, восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} , растворение образующейся цементной меди. С целью оценки термодинамической вероятности самопроизвольного протекания описываемых процессов составлены сокращенные ионные уравнения реакций, а также рассчитаны изменения энергии Гиббса, данные приведены в табл. 1.

Обработка данных, представленных в табл. 1, и их последующий анализ позволил установить, что наиболее отрицательное значение изменения энергии Гиббса отмечено в реакциях окисления железа до двухвалентного иона в присутствии растворенного кислорода, а также перехода образующейся цементной меди в ионную форму; изменение энергии Гиббса для реакции цементации более чем в 2 раза ниже упомянутых выше уравнений. Остальные реакции также имеют отрицательное изменение энергии Гиббса, что говорит о возможности их самопроизвольного протекания. На основании этого можно сделать вывод о том, что контроль подаваемого в процесс количества как железной стружки, так и серной кислоты является одним из основных условий для успешного протекания цементации.

Исходя из представленных данных, метод цементации применим для продуктивных растворов с концентрацией металла до 15 г/л. Термодинамический анализ реакций и диффузионная природа процесса позволяют сделать вывод о том, что для максимизации доли осажденной меди следует контролировать интенсивность перемешивания пульпы, объемы подаваемых в процесс серной кислоты и железной стружки.

Таблица 1

Изменение энергии Гиббса реакций, протекающих в процессе цементации меди

№	Уравнение	ΔG , кДж/моль
1	$\text{Cu}^{2+} + \text{Fe}^0 \rightarrow \text{Cu}^0 + \text{Fe}^{2+}$	-148,587
2	$\text{Fe}^0 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 \uparrow$	-84,906
3	$4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-177,532
4	$2\text{Fe}^0 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-644,519
5	$\text{Fe}^0 + 2\text{Fe}^{3+} \rightarrow 3\text{Fe}^{2+}$	-233,493
6	$2\text{Cu}^0 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-343,486
7	$\text{Cu}^0 + 2\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{Fe}^{2+}$	-82,977

Примечание: составлена авторами на основе расчетов в ходе проведения исследования.

Флотация цементной меди

Для флотационного обогащения цементной меди возможно применение реагентов, используемых при флотации сульфидных медных минералов или переработке медного шлака, так как металлическая и сульфидная медь принадлежат к одной группе по флотируемости, что обусловливает схожее взаимодействие с сульфидильными собирателями. Основные типы используемых реагентов представлены на рис. 2.

На основании анализа научно-технической литературы была составлена табл. 2 для применяемых в современной промышленности и синтезируемых реагентов для флотационного обогащения медных руд.

Основываясь на анализе данных, представленных в табл. 2, можно выделить три основных направления исследований, проводимых в области флотационного обогащения сульфидных медных минералов: изучение возможности повышения извлечения меди с применением традиционных реагентов-собирателей за счет варьирования условий протекания процесса, исследование и оптимизация соотношений собирателей в их комбинациях и разработка и синтез новых селективных флотационных реагентов.

Исследования, относящиеся к первому направлению, нацелены на повышение эффективности флотационного обогащения при применении наиболее широко распространенных сульфидильных собирателей – чаще всего дитиофосфатов (аэрофлот) и ксантогенатов. В рамках этого направления ученые изучают влияние физико-химических параметров пульпы на извлечение меди в пенный продукт флотации. Одним из таких параметров является температура:

в работе [32] показано, что при повышении температуры до 65 °C при применении амилового ксантогената, краевой угол смачивания поверхности халькопирита изменился с 77 до 96°, это позволяет сделать вывод о том, что эффективность действия ксантогената с нагревом увеличивается. Также значительное влияние на процесс флотации оказывает pH пульпы. Так, при варьировании уровня pH с 8 до 10 [33] извлечение меди изменяется более чем на 10%.

Значительный объем научных публикаций, посвященных повышению извлечения меди при флотационном обогащении сульфидных и смешанных медных руд, сосредоточен на исследовании возможности применения различных комбинаций реагентов и выявления их синергетического эффекта. Так, в работе [28] добавление к аэрофлоту более селективного по отношению к меди реагента Z-200 позволило достичь прироста в извлечении более чем на 8% при одновременном снижении суммарного расхода реагентов. В работах [27, 31] авторы рассматривают влияние комбинаций собирателей, состоящих из трех реагентов. Например, показано, что добавление в систему из сульфидильных собирателей неионогенных собирателей [31] позволяет повысить гидрофобность поверхности минерала и достичь извлечения, равного 83,58 %.

Третьим направлением исследований является разработка новых [37], селективных по отношению к меди и медным минералам реагентов. Современные технологии позволяют производить синтез сложных соединений, структура которых адаптирована к особенностям кристаллических решеток конкретных минералов (халькопирита, борнита и т.д.).

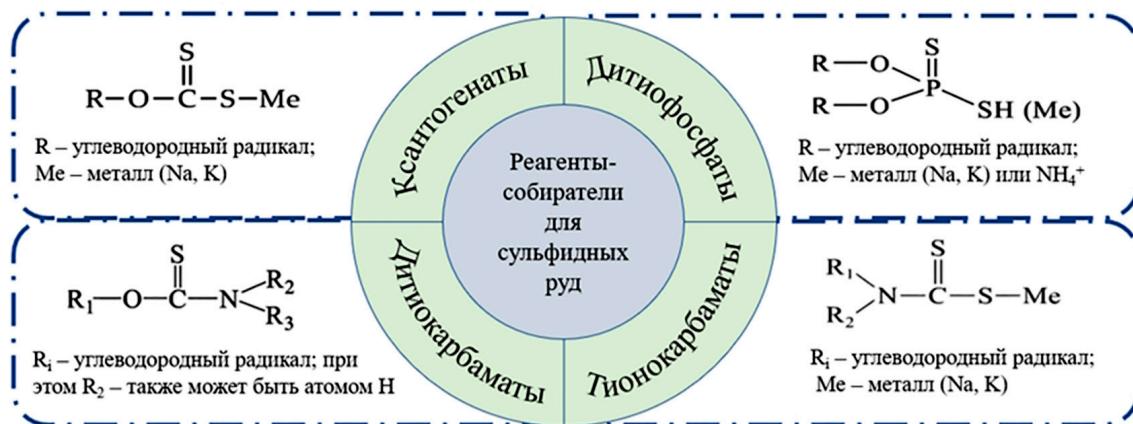


Рис. 2. Основные типы реагентов, применяемых для флотационного обогащения сульфидной и металлической меди
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Сводная таблица реагентов, используемых для флотации сульфидной и металлической меди

Реагент-собиратель	Результаты	Источник
Комбинация дибутилдитиофосфата аммония (дБДА), бутилового (БКК) и этилового (ЭКК) ксанто-гената калия	Достигнуто извлечение меди 20,08 % при ее извлечении 87,73 % при расходе общем расходе 10 г/т и соотношении дБДА:БКК:ЭКК = 1:0,5:0,5	[27]
Комбинация дибутилдитиофосфата аммония (дБДА), Z-200	Достигнут прирост извлечения меди на 8,13 % при применении соотношений расходов собирателей дБДА:Z-200 = 60 г/т:60 г/т	[28]
Комбинация бутилового ксанто-гената калия (БКК) и аэрофлотов	При соотношении БКК:аэрофлот = 65:35 % и суммарном расходе 50 г/т достигнуто извлечение меди 89,45 %	[29]
Комбинация изобутилового ксанто-гената натрия, вторичного дибутилдитиофосфата натрия	Достигнуто извлечение меди 96,3 % и содержание 24,7 % при соотношении ксанто-гената:аэрофлот = 1:3	[30]
Комбинация бутилового ксанто-гената натрия (БКН), тионокарбамата (ТК) и дитиокарбамата (дТК)	При соотношении дТК:ТК:БКН = 1:3:15 получен медно-молибденовый концентрат при извлечении меди 83,58 % и содержании 18,2 %	[31]
Амиловый ксанто-генат калия (АмКК)	Повышение температуры с 25 до 65 °C позволило достичь извлечения меди более 92 %	[32]
Диэтилдитиофосфат натрия (дЭДН)	Извлечение меди 85,22 % при pH 8–10 и расходе собирателя 70 г/т	[33]
О-бутил-S-(1-хлорэтил) карбоно-дитиоат	Достигнуто извлечение халькопирита 96,5 % против извлечения 89,5 % при аналогичном расходе бутилового ксанто-гената натрия	[34]
О-бутоксизопропил-N-этоксикарбонил тионокарбамат (ВИРЕСТС), О-(2-бутокси-1-метилэтокси)изопропил-N-этоксикарбонил тионокарбамат (ВМИРЕСТС)	При расходе собирателей 24 г/т при применении ВИРЕСТС извлечение меди достигло 84,39 %, при применении ВМИРЕСТС – 85,02 %, что доказывает эффективность и селективность разработанных собирателей	[35]
Смесь Z-200, алканов (С6-С12)	При соотношении Z-200:алканы = 3:1 получено извлечение меди до 88,63 %, превышающее показатели, полученные применением чистого Z-200	[36]
М-ТФ (смесь дитиофосфата и тионокарбамата)	Применение частично-селективной схемы флотации позволило достичь извлечения меди более 80 %	[3]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В работе [34] приведены данные по использованию О-бутил-S-(1-хлорэтил) карбоно-дитиоата. В сравнении с бутиловым ксанто-генатом натрия применение нового реагента позволило повысить извлечение халькопирита с 89,5 до 96,5 %. Важным аспектом в этом направлении исследований является возможность снижения расходов реагентов. Авторами в работе [35] показано, что применение собирателей, синтезированных на основе тионокарбаматов, позволило снизить расход реагента до 24 г/т при извлечении меди в пенный продукт около 84–85 %, что указывает на высокую удельную гидрофобизирующую способность синтезированного реагента.

Анализ приведенных исследований и обобщение полученной информации по-

зволили установить, что флотация медных минералов в настоящее время развивается в трех ключевых направлениях: совершенствовании условий применения традиционных сульфидильных собирателей для повышения их эффективности, комбинировании нескольких реагентов, обладающих большей собирательной силой по сравнению с применением монореагентов и синтезе новых селективных реагентов, обеспечивающих высокое извлечение меди при сниженных расходах.

Заключение

Вовлечение в переработку более сложных видов минерального сырья вызвано необходимостью поддержания уровня производства катодной меди и медных концентра-

тов, спрос на которые определяется устойчивым ростом потребления меди в энергетике, машиностроении и других областях промышленности. Эффективная переработка окисленных и смешанных медных руд возможна с применением метода «выщелачивание – цементация – флотация». Установлено, что на стадии выщелачивания ключевое значение имеют режимные параметры, формирующие концентрацию меди в продуктивном растворе при наличии в системе множества сопутствующих катионов. Обоснована необходимость применения термодинамического моделирования для количественной оценки степени взаимодействия кальция и железа с серной кислотой, прогнозирования дополнительного расхода реагента и выбора рациональных областей pH, при которых влияние этих примесей на процесс выщелачивания минимизируется.

Согласно термодинамическим расчетам, наибольшая вероятность самопроизвольного протекания отмечена у реакций окисления железа до двухвалентного иона в присутствии растворенного кислорода, а также перехода образующейся цементной меди в ионную форму, протекающих параллельно основному процессу цементации. Это предопределяет необходимость контроля количества подаваемых железной стружки и серной кислоты. Оптимизация реагентных режимов флотации цементной меди, включая использование селективных собирателей, в том числе класса тионокарбаматов, а также оптимизация соотношений комбинаций собирателей представляет актуальное направление исследований, способствующих повышению полноты извлечения ценных компонентов и улучшения экономических показателей переработки минерально-сырья.

Список литературы

- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A., Skvortsov I., Andreeva I., Vorobeva V. A methodology for forecasting the KPIs of a region's development: Case of the Russian Arctic // Sustainability. 2024. Vol. 16. Is. 15. P. 6597. DOI: 10.3390/su16156597.
- Игнаткина В.А. Селективные реагентные режимы флотации сульфидов цветных и благородных металлов из упорных сульфидных руд // Цветные металлы. 2016. № 11 (887). С. 27–33. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.03.
- Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Кобылянский А.А., Булаев А.Г. Сульфидное выщелачивание медного концентрата с высоким содержанием мышьяка // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 14–20. DOI: 10.17580/or.2022.01.03.
- Aleksandrova T.N., Orlova A.V., Tarannov V.A. Enhancement of copper concentration efficiency in complex ore processing by the reagent regime variation // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. Is. 6. P. 982–989. DOI: 10.1134/S1062739120060101.
- Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 1. С. 52–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_52.
- Афанасова А.В., Абурова В.А., Прохорова Е.О., Лущина Е.А. Исследование влияния депрессоров на флотационные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. Vol. 6. № 2. С. 161–174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.
- Машевский Г.Н., Ушаков Е.К., Яковleva Т.А. Цифровая технология оптимизации дозировки сульфида натрия при флотации медной руды // Обогащение руд. 2021. № 3. С. 18–33. DOI: 10.17580/or.2021.03.04.
- Bulaev A., Melamud V., Boduen A. Bioleaching of non-ferrous metals from arsenic-bearing sulfide concentrate // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 1064. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1064.
- Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. Сорбция золота на модифицированном сапоните // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 49–57. EDN: UOUEJM.
- Самадов А.У., Абдусамиева Л.Н. Кизи. Технология обогащения окисленных руд цветных металлов // ORIENSS. 2024. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-obogashcheniya-okislennyh-rud-tsvetnyh-metallov> (дата обращения: 08.12.2025).
- Vasileva A.A., Boduen A.Y. Mineralogical features and processing of copper zinc-containing concentrates (Uchalinsky mining and processing plant) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. Vol. 334. Is. 3. P. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3956.
- Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин: справочник. 10-е изд., испр. и доп. СПб.: Иван Федоров, 2003. 240 с. ISBN 5-8194-0071-2.
- McDonald R.G. The effects of chloride on the high-temperature pressure oxidation of chalcopyrite: Some insights from batch tests – Part 1: Leach chemistry // Minerals. 2023. Vol. 13. Is. 8. 1065. DOI: 10.3390/min13081065.
- Aracena A., Valencia A., Jerez O. Ammoniacal system mechanisms for leaching copper from converter slag // Metals. 2020. Vol. 10. Is. 6. Art. 712. DOI: 10.3390/met10060712.
- Hao J., Wang X., Wang Y., Wu Y., Guo F. Optimizing the leaching parameters and studying the kinetics of copper recovery from waste printed circuit boards // ACS Omega. 2022. Vol. 7. Is. 4. P. 3689–3699. DOI: 10.1021/acsomega.1c06173.
- Sokić M. et al. Leaching of Polymetallic Cu-Zn-Pb Concentrate with Sodium Nitrate in Sulphuric Acid // Tehnika. 2021. Vol. 72. P. 426–436. DOI: 10.5937/tehnika2104426S.
- Taboada M.E., Hernández P.C., Padilla A.P., Jamett N.E., Gruber T.A. Effects of Fe²⁺ and Fe³⁺ in pretreatment and leaching on a mixed copper ore in chloride media // Metals. 2021. Vol. 11. Is. 6. P. 866. DOI: 10.3390/met11060866.
- Bao S., Chen B., Zhang Y., Ren L., Xin C., Ding W., Yang S., Zhang W. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 98. P. 106525. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106525.
- Chen J., Li X., Gao L., Guo S., He F. Microwave treatment of minerals and ores: Heating behaviors, applications, and future directions // Minerals. 2024. Vol. 14. Is. 3. Art. 219. DOI: 10.3390/min14030219.
- Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Горная книга, 2008. 711 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/3269> (дата обращения: 25.11.2025). ISBN 978-5-7418-0507-7.
- Миронов В.А., Шишкин А.Ю., Поляков А.В., Трейс Ю.К. Извлечение меди из водных растворов с использованием железных порошковых материалов // Журнал Бе-

- порусского государственного университета. Экология. 2018. № 1. С. 97–102. EDN: WADOGT.
23. Fisher W.W., Groves R.D. Physical aspects of copper cementation on iron / Salt Lake City Metallurgy Research Center, Salt Lake City, Utah. Washington: U.S. Bureau of Mines, 1973. 9 р. (U.S. Bureau of Mines. Report of investigations; 7761).
24. Артамонов В.В., Артамонов В.П., Перекопная Е.Ю. Исследование процесса цементационного осаждения медного порошка // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 2. С. 3–7. EDN: QBFFFR.
25. Абрамов А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Кн. 1: Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Московского государственного университета, 2005. 575 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002590110/. (дата обращения: 21.11.2025). ISBN 5-7418-0346-6.
26. Agrawal R.D., Kapoor M.L. Theoretical considerations of the cementation of copper with iron // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1982. Vol. 82. Is. 4. P. 106–111.
27. Geng Q., Han G., Wen S. Flotation of copper sulfide ore using ultra-low dosage of combined collectors // Minerals. 2024. Vol. 14. Is. 10. P. 1026. DOI: 10.3390/min14101026.
28. Yan B., Liu Y., Jia X., Enkhtur O., Tumendelger A., Bian Z. Synergistic recovery of copper, antimony, and silver refractory sulfide minerals using an ADD/Z-200 mixed collector system // Minerals. 2025. Vol. 15. Is. 11. P. 1219. DOI: 10.3390/min15111219.
29. Hu W., Tian K., Zhang Z., Guo J., Liu X., Yu H., Wang H. Flotation and tailing discarding of copper cobalt sulfide ores based on the process mineralogy characteristics // Minerals. 2021. Vol. 11. Is. 10. P. 1078. DOI: 10.3390/min11101078.
30. Dhar P., Thornhill M., Kota H.R. Investigation of copper recovery from a new copper ore deposit (Nussir) in Northern Norway: Dithiophosphates and xanthate-dithiophosphate blend as collectors // Minerals. 2019. Vol. 9. Is. 3. P. 146. DOI: 10.3390/min9030146.
31. Semushkina L., Abdykirova G., Mukhanova A., Mukhamedilova A. Improving the copper-molybdenum ores flotation technology using a combined collecting agent // Minerals. 2022. Vol. 12. Is. 11. P. 1416. DOI: 10.3390/min12111416.
32. An D., Zhang J. A study of temperature effect on the xanthate's performance during chalcopyrite flotation // Minerals. 2020. Vol. 10. Is. 5. P. 426. DOI: 10.3390/min10050426.
33. Azizi A., Masdarian M., Hassanzadeh A., Bahri Z., Niedoba T., Surowiak A. Parametric optimization in rougher flotation performance of a sulfidized mixed copper ore // Minerals. 2020. Vol. 10. Is. 8. P. 660. DOI: 10.3390/min10080660.
34. Chi X., Guo Y., Zhong S., Li G., Lv X. Molecular modelling and synthesis of a new collector O-butyl S-(1-chloroethyl)carbonodithioate for copper sulfide ore and its flotation behavior // RSC Advances. 2020. Vol. 10. Is. 6. P. 3520–3528. DOI: 10.1039/c9ra09648e.
35. Zhao G., Peng J., Zhong H., Wang S., Liu G. Synthesis of novel ether thionocarbamates and study on their flotation performance for chalcopyrite // Minerals. 2016. Vol. 6. Is. 3. P. 97. DOI: 10.3390/min6030097.
36. Liu Z., Feng Y., Tang X., Li Y., Wu D., Chen J., Chen Y. Insight into the physical assembly of alkanes with Z-200 molecules on surface hydrophobicity of chalcopyrite CuFeS₂ // Surfaces and Interfaces. 2025. Vol. 62. P. 106196. DOI: 10.1016/j.surfin.2025.106196.
37. Абрамов А.А. Принципы конструирования селективных реагентов-собирателей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 1. С. 90–104. EDN: NWZPCR.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах» FSRW–2024–0008.

Financing: The work was carried out within the framework of the state task “Study of thermodynamic processes of the Earth from the standpoint of the genesis of hydrocarbons at great depths” FSRW–2024–0008.

СТАТЬИ

УДК 528.31/.35:004.9
 DOI 10.17513/use.38470

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ СОПРОВОЖДЕНИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Михайлов А.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва, Российская Федерация, e-mail: artmihailov2000@gmail.com

Работа посвящена проблеме учета перемещений высотных зданий под влиянием внешних факторов, таких как солнечная радиация. Целью работы является исследование возможности применения метода конечных элементов в программном комплексе «ЛИРА-САПФИР» для моделирования температурных деформаций с целью их учета при геодезическом сопровождении строительства. Материалом исследования послужило 23-этажное монолитное железобетонное здание высотой 90 м. Методы исследования включали построение трехмерной конечно-элементной модели здания, проведение натурных геодезических измерений координат контрольных марок электронным тахеометром в различных температурных условиях и последующее сравнение измеренных перемещений с результатами компьютерного моделирования. Результаты показали, что расчетные перемещения, полученные по модели, коррелируют с фактическими измерениями, при этом наибольшие расхождения наблюдались для марок, расположенных на верхних этажах. Анализ позволил установить, что эти расхождения могут быть связаны с постоянно изменяющейся погрешностью геодезических измерений из-за большего угла падения луча на верхние марки и влияния рефракции. В заключение отмечено, что компьютерное моделирование является перспективным инструментом для учета температурных деформаций каркаса высотного здания. Для повышения точности метода требуются доработка модели, применение специальной отражательной аппаратуры и учет рефракционных эффектов при высокоточных натуральных измерениях.

Ключевые слова: температурные деформации, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, высотное здание, геодезический мониторинг, программный комплекс «ЛИРА-САПФИР»

APPLICATION OF COMPUTER MODELING FOR ACCOUNTING FOR THERMAL DEFORMATIONS OF HIGH-RISE BUILDINGS DURING GEODETIC SUPPORT OF CONSTRUCTION

Mikhaylov A.A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 "Moscow State University of Geodesy and Cartography", Moscow,
 Russian Federation, e-mail: artmihailov2000@gmail.com*

The paper addresses the problem of accounting for displacements of high-rise buildings under the influence of external factors such as solar radiation. The aim of the work is to investigate the possibility of applying the finite element method in the "LIRA-SAPR" software complex for modeling thermal deformations to account for them during geodetic support of construction. The research material was a 23-story monolithic reinforced concrete building with an architectural height of 90 meters. Research methods included building a three-dimensional finite element model of the building, conducting field geodetic measurements of control mark coordinates with an electronic total station under different temperature conditions, and subsequent comparison of measured displacements with the results of computer modeling. The results showed that the calculated displacements obtained from the model correlate with actual measurements, with the greatest discrepancies observed for marks located on the upper floors. The analysis established that these discrepancies could be related to the increasing error of geodetic measurements due to the larger angle of incidence of the beam on the upper marks and the influence of refraction. In conclusion, it is noted that computer modeling is a promising tool for accounting for thermal deformations of a high-rise building frame. To improve the accuracy of the method, refinement of the model is required, as well as the use of special reflective equipment and accounting for refraction effects during high-precision field measurements.

Keywords: thermal deformations, computer modeling, finite element method, high-rise building, geodetic monitoring, software complex "LIRA-SAPR"

Введение

На данный момент основным направлением развития крупных городов является строительство высотных и сверхвысотных многофункциональных комплексов. Объекты такого типа требуют особого подхода к геодезическому обеспечению их воз-

ведения [1]. Важнейшей задачей является обеспечение вертикальности сооружения и соосности его несущих элементов. Но высотные здания не остаются неподвижными в течение всего времени строительства. Под действием различных факторов, таких как неравномерный нагрев несущих кон-

структур и ветровая нагрузка, здания могут испытывать значительные вертикальные и горизонтальные перемещения даже в течение суток.

Одним из решений поставленной выше задачи является комплексное использование геотехнических датчиков, спутниковой геодезической аппаратуры и электронных тахеометров¹ [2; 3]. Практическая эффективность такого комплексного подхода, сочетающего ГНСС-наблюдения и высокоточные тахеометрические измерения для мониторинга крена высотных зданий, подтверждена экспериментальными исследованиями [4]. При этом использование GNSS-технологий, интегрированных в системы мониторинга, позволяет обеспечить независимую от высоты точность и постоянный контроль деформаций, что особенно важно для уникальных высотных объектов [5]. Но такое решение требует большого количества аппаратуры, специального программного обеспечения и большого числа высококвалифицированных геодезистов. Кроме того, практика показывает, что даже успешные методики, примененные на знаковых объектах (например, система мониторинга Бурдж-Халифа), не всегда могут быть напрямую адаптированы к другим стройплощадкам из-за уникальных архитектурных, технологических и климатических условий, что требует разработки новых специализированных решений [6]. Также разрабатываются методики, позволяющие определять деформации высотных зданий при помощи анализа спутниковых фотоснимков [7].

Особое внимание уделяется учету температурных деформаций и деформаций, вызванных ветровой нагрузкой [8; 9]. Актуальность этой задачи подчеркивается тем, что в реальных условиях неравномерный нагрев конструкций солнцем приводит к значительным деформациям изгиба, величина которых для высотных зданий может существенно превышать точность, регламентированную нормами на производство геодезических работ [10].

Альтернативным решением может стать компьютерное моделирование деформаций железобетонных конструкций. Работы по моделированию деформаций зданий и работе железобетонных конструкций [11; 12] ведутся достаточно давно.

Основой для моделирования может служить метод конечных элементов (МКЭ), широко применяемый для задач проектирования и расчета несущих конструкций. Данный метод лежит в основе ряда программных комплексов, таких как ПК «ЛИРА-САПФИР», RSTAB 9, SCAD и др. Вопросу о возможности применения подобных программных комплексов для задач моделирования и учета температурных деформаций посвящена данная работа.

Цель исследования – изучение возможности применения компьютерного моделирования и расчетов по методу конечных элементов для задачи учета температурных деформаций высотных железобетонных зданий при геодезическом сопровождении строительства.

Материалы и методы исследования

Прежде всего необходимо определить понятие «моделирование» в соответствии с нормативными документами. Для этого обратимся к ГОСТ Р 57412–2017 [13]. Согласно [13]:

- **модель**: сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира;
- **объект моделирования**: явление, объект или свойство объекта реального мира;
- **моделирование**: изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей;
- **математическая модель**: модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений;
- **компьютерная модель (электронная модель)**: модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

В основе любой модели заложен некоторый математический аппарат. Определить поведение объекта моделирования или его свойства в заданных условиях можно, либо используя формулы, описывающие физику происходящих в нем процессов, либо используя выражения для интерполяции/экстраполяции некоторых величин, основываясь на экспериментальных данных. Подход, основанный на применении формул, описывающих физику процесса теплового расширения высотных зданий и сооружений, применяется для решения геодезических задач довольно давно. Так, в диссертации В.Я. Раинкина «Геодезические работы

¹ CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat). Инжиниринг самого высокого здания в мире: Бурдж Дубай / пер. с англ. [Электронный ресурс]. URL: <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1326-engineering-the-worlds-tallest-burj-bubai.pdf> (дата обращения: 14.11.2025).

при строительстве и эксплуатации высотных сооружений башенного типа: на примере Останкинской телевизионной башни» [14, с. 99–163] рассмотрены основные принципы учета перемещений высотных зданий, вызываемых температурными факторами.

В настоящее время этот метод дополнен и усовершенствован. Сейчас для учета деформаций, вызванных температурными факторами, может применяться метод конечных элементов (МКЭ). Согласно ГОСТ Р 57188-2016 [15] *Метод конечных элементов – сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой*. Опираясь на приведенное определение, можно описать суть МКЭ более просто: *расчетную область* (деталь, конструкцию, объем) разбивают на множество простых мелких частей – «конечных элементов», которые вместе образуют сетку; *искомая сложная функция* (например, поле перемещений, температур или давлений) аппроксимируется внутри каждого такого элемента с помощью простых кусочно-гладких функций (полиномов); затем для всей системы элементов составляется и решается глобальная система алгебраических уравнений. Ее решение дает приближенные значения искомой функции в узлах сетки и внутри элементов.

Для моделирования и дальнейшей проверки работоспособности модели было выбрано каркасное 23-этажное здание из монолитного железобетона, с архитектурной высотой 90 м. В соответствии с СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» данное здание является высотным, так как имеет высоту более 75 м. Таким образом выбор здания соответствует задачам исследования.

Для моделирования выбран программный комплекс «ЛИРА-САПФИР». Данный программный комплекс имеет весь необходимый функционал для создания трехмерной модели здания, преобразования модели в модель с конечными элементами, задания и расчета нагрузок и вычисления перемещения узлов. Также важно отметить удобный и интуитивно понятный (для опытного пользователя САПР) интерфейс, а также наличие свободно распространяемой некоммерческой версии программы. Важным фактором является и наличие статей по верификации

расчетов, выполняемых данным программным комплексом. Данные материалы доступны на официальном сайте программного комплекса. Также применение программного комплекса «ЛИРА» для задач учета температурных деформаций описано в [16]. Возможности современных программных комплексов, включая «ЛИРА-САПФИР», позволяют учитывать поэтапность возведения зданий, что является критически важным для точного моделирования их напряженно-деформированных состояний на всех стадиях жизненного цикла [17].

Для полевых работ использовались следующие приборы:

1. Электронный тахеометр Leica TS06 R500. Основные характеристики:
 - а) точность угловых измерений 5»;
 - б) компенсатор двухосевой, диапазон работы $\pm 4'$;
 - в) дальность измерения на одну призму 1,3–3500 м;
 - г) точность линейных измерений на одну призму $\pm 1,5$ мм + 2 мм/км;
 - д) дальность измерения на отражающую пленку 1,3–400 м;
 - е) точность линейных измерений на отражающую пленку $\pm 1,5$ мм + 2 мм/км;
 - ж) дальность измерений без отражателя 0,3–500 м;
 - и) увеличение зрительной трубы 30x.
2. Пирометр RGK PL-7 MAX.

Использование высокоточных электронных тахеометров серии Leica TS, включая более ранние модели (например, TS09), является стандартной практикой при геодезическом сопровождении строительства уникальных и высотных объектов, что подчеркивает их роль в обеспечении точности разбивочных работ и мониторинга [18].

Результаты исследования и их обсуждение

Как было сказано выше, моделирование будет выполняться в программном комплексе «ЛИРА-САПФИР». Данный комплекс состоит из двух программ: «ЛИРА-САПР» и «САПФИР». Непосредственное создание модели по рабочей документации выполнено в программе «САПФИР». При этом работа ведется с такими элементами, как стена, колонна, балка и плита перекрытия, которые не являются конечными элементами и не подходят для расчетов нагрузок и перемещений. Моделирование велось в следующем порядке:

1. Создание строительных осей здания.

2. Создание нового этажа и отрисовка вертикальных несущих конструкций (стен).
3. Создание горизонтальных несущих конструкций (плит).
4. Создание типового этажа и отрисовка вертикальных несущих конструкций (стен и колонн).
5. Копирование типового этажа и редактирование вертикальных несущих конструкций для нетиповых этажей.

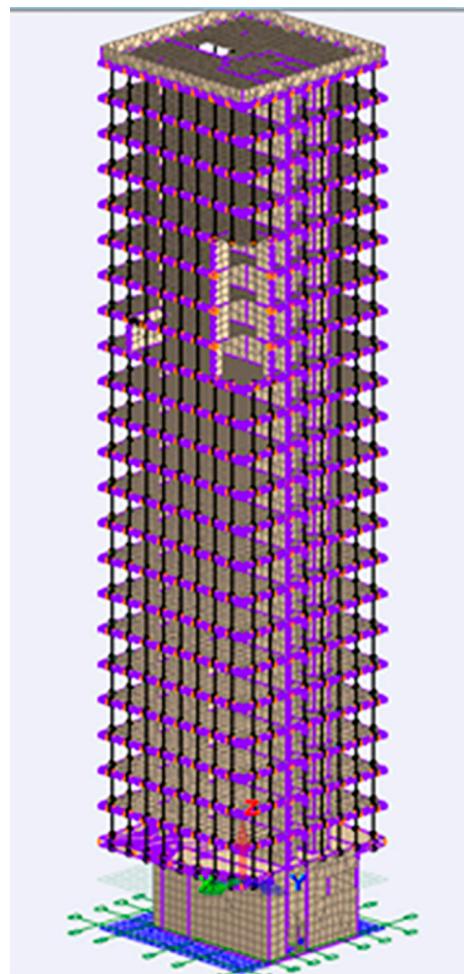
В результате моделирования по данным рабочей документации автором была получена полная модель здания (рис. 1) в программе «САПФИР», которая входит в комплекс «ЛИРА-САПФИР»



*Рис. 1. Полученная модель здания
Примечание: составлен автором
по результатам исследования*

Важно отметить, что в процессе отрисовки несущих конструкций задавались параметры бетона, соответствующие параметрам, указанным в рабочей документации.

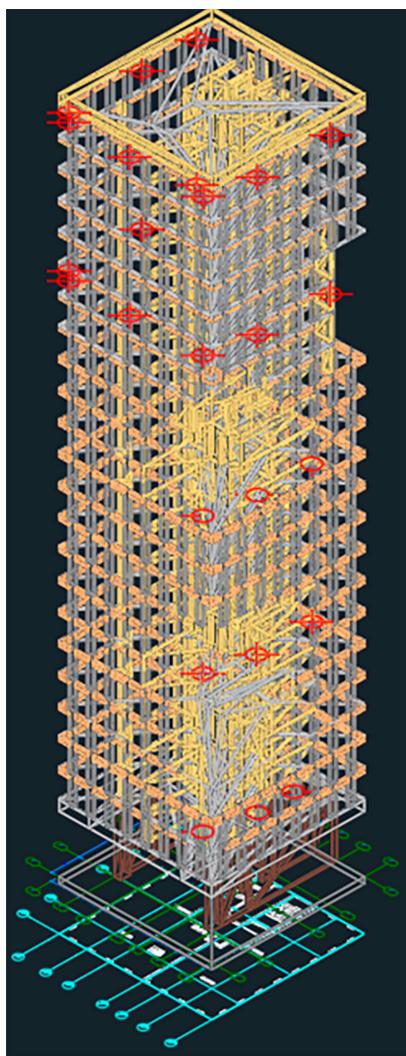
После создания трехмерной модели здания был выполнен ее экспорт в ЛИРА-САПР с преобразованием всех элементов модели в конечные элементы, такие как стержни, узлы и т.п. Модель в конечных элементах представлена на рис. 2.



*Рис. 2. Модель в конечных элементах
Примечание: составлен автором
по результатам исследования*

На этом первая задача исследования была выполнена: получена трехмерная модель здания, подходящая для расчета нагрузок и перемещений. Далее проводились полевые работы по определению фактических перемещений марок-катафотов, закрепленных на здании. Схема расположения марок приведена на рис. 3.

Измерения положения геодезических марок, размещенных на здании, выполнялись электронным тахеометром относительно исходных пунктов, закрепленных на несущих стенах первого этажа моделируемого здания.



*Рис. 3. Схема расположения марок на здании
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

Для определения исходного положения пунктов измерения проводились в пасмурную погоду, когда температура всех элементов здания была одинакова и составляла +6 °C. Для определения деформаций измерения проводились в ясную погоду, когда часть здания была освещена солнцем. Также

в этот момент выполнялись измерения температуры несущих элементов здания при помощи пиromетра. Для более детального и непрерывного контроля температурного поля конструкции, являющегося ключевым фактором ее деформаций, перспективно применение беспроводных сенсорных систем мониторинга, позволяющих отслеживать распределение температуры в реальном времени [19].

После этого выполнялось моделирование по данным измерения температуры, вычислялись координаты марок в деформированном состоянии, путем сложения координат в недеформированном состоянии и величин перенесений из таблицы перенесений. Моделирование выполняется путем задания соответствующих нагрузок. В данном случае, помимо стандартных нагрузок от собственного веса здания, была задана нагрузка на стержни, называемая в программе «Неравномерный нагрев».

После этого выполнялся расчет при помощи соответствующей команды. После расчета формируются стандартные таблицы отчета, среди которых для данной работы необходима только таблица перенесений.

Марки были размещены на колоннах, которые после экспорта в ЛИРА-САПР были преобразованы в стержни. Места примыкания колон и плит перекрытий преобразованы в узлы. В результате расчета программа позволяет сформировать таблицу перенесений узлов по каждой оси координат. Но так как марки расположены не в узлах, а между ними, то для того, чтобы получить перенесение марки, необходимо выполнить интерполяцию величины перенесения по каждой оси между двумя узлами. После этого, прибавив к исходным координатам вычисленные перенесения, были получены координаты марок в деформированном состоянии.

Также рассмотрим структуру таблицы «Перенесения», полученной в результате моделирования (таблица).

Структура таблицы «Перенесения»

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	ЗАГР	УЗЕЛ	X, мм	Y, мм	Z, мм	UX, RD*1000	UY, RD*1000	UZ, RD*1000
2	1 -dT							
3	1	3765	1,12345	0,22235	2,55461	-0,04885	0,22144	-0,66511

Примечание: составлена автором на основе таблицы «Перенесения» программного комплекса «ЛИРА-САПФИР».

Столбец 1 – номер загружения, обозначает тип нагрузки, вызывающей указанные в следующих столбцах перемещения; 2 – номер узла модели; 3, 4, 5 – перемещения узла из столбца 2 по соответствующим координатам (линейные перемещения в мм), 6, 7, 8 – угловая составляющая перемещения в данном узле.

Для определения перемещений геодезического знака, закрепленного на колонне, необходимо выполнить линейную интерполяцию.

$$X_a = \frac{x_{1a} + x_{2a}}{2}, \quad (1)$$

где X_a – перемещение отражателя по одной из координат, x_{1a} – перемещение первого узла по соответствующей координате, x_{2a} – перемещение второго узла по той же координате. Важно отметить, что формула (1) справедлива только для случая, когда геодезический знак закреплен в середине колонны. Система координат – локальная система программного комплекса, оси координат параллельны строительным осям здания. Для вычисления полных перемещений геодезического знака с учетом угловых величин необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$Ux_C = \frac{(Ux_A + Ux_B)}{2}, \quad (2)$$

$$Uy_C = \frac{Uy_A + Uy_B}{2} + \left(\frac{L}{8} \right) \cdot (\theta z_A - \theta z_B), \quad (3)$$

$$Uz_C = \frac{Uz_A + Uz_B}{2} + \left(\frac{L}{8} \right) \cdot (\theta y_B - \theta y_A), \quad (4)$$

где Ux_C , Uy_C , Uz_C – полные перемещения середины стержня, Ux_A , Uy_A , Uz_A – линейные перемещения узла начала стержня (по таблице) Ux_B , Uy_B , Uz_B – линейные перемещения узла конца стержня (по таблице), L – длина стержня, θz_A , θz_B , θy_B , θy_A – величины угловых перемещений вдоль соответствующих осей (по таблице). Для первичной проверки модели угловые величины перемещений в узлах не учитывались.

Также важным моментом является оценка точности измерений, выполненных для проверки модели. Положение марок, размещенных на здании, определялось относительно базиса, закрепленного на несущих конструкциях первого этажа того же здания. Этот подход выбран, так как несущие конструкции первого этажа наименее подвержены неравномерному нагреву ввиду расположения здания, а также на их положение не влияют ветровая нагрузка и колебания, вызываемые подъемными механизмами. Также для данной задачи нельзя закреплять точки базиса вне исследуемого здания, так как осадки здания и другие виды деформаций в этом случае будут значительно влиять на качество измерений.

Прибор ориентируется относительно базиса методом обратной линейно-угловой засечки, который широко исследуется и применяется для задач деформационного мониторинга [20]. Схема засечки представлена на рис. 4.

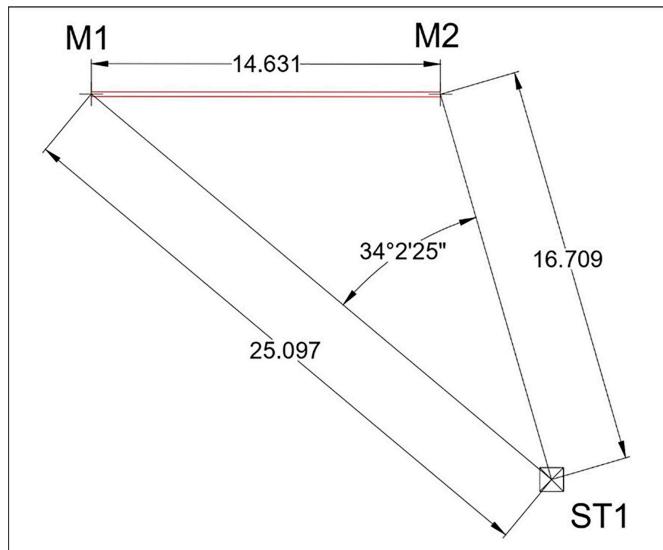


Рис. 4. Схема засечки
Примечание: составлен автором по результатам исследования

На схеме ST1 – станция, место установки электронного тахеометра, M1 и M2 – точки базиса. Далее, можно принять координаты базиса безошибочными. Для оценки точности планового положения пункта ST1 воспользуемся формулой [21, с. 208–213]:

$$m_{st} = \frac{1}{\sin\gamma} \sqrt{\left(\frac{m_\beta}{(\rho'')} \times \left(\sqrt{(S_1^2 + S_2^2)} \right)^2 + \frac{(m_{s1}^2 + m_{s2}^2)}{2} \right)}, \quad (5)$$

где $\sin\gamma$ – измеренный угол между направлениями ST1-M1 и ST1-M2, m_β – СКП измерения угла, $\rho'' = 206265''$, S_1, S_2 – расстояния ST1-M1 и ST1-M2 соответственно, m_{s1}, m_{s2} – СКП измерения расстояний ST1-M1 и ST1-M2 соответственно.

СКП измерения угла принята из технических характеристик прибора, она составляет $5''$. СКП измерения расстояний также указана в технических характеристиках прибора, с учетом длин измеряемых линий получено следующее значение: $m_{s1} = m_{s2} = 1,5$ мм. Измеренные величины указаны на рис. 4. Тогда, подставив все имеющиеся значения в формулу (5), $m_{st} = 3$ мм.

Также нужно оценить точность определения высоты прибора относительно базиса методом тригонометрического нивелирования. Для этого была использована следующая формула [22, с. 752]:

$$\begin{aligned} m_{Hst}^2 &= \frac{1}{2} \cdot (m_l^2 + m_i^2) + \frac{1}{4} \cdot (\sin_{(v1)}^2 \cdot m_{s1}^2 + \sin_{(v2)}^2 \cdot m_{s2}^2) + \\ &+ \frac{1}{4} \cdot \left(\left(\frac{S_1}{\cos_{(v1)}} \right)^2 + \left(\frac{S_2}{\cos_{(v2)}} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \cdot (m_{h1}^2 + m_{h2}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

где m_l – погрешность измерения высоты отражателя, m_i – погрешность измерения высоты прибора, v_1, v_2 – измеренные вертикальные углы, m_v – СКП измерения вертикального угла, m_{h1}, m_{h2} – СКП высотных отметок исходных точек. Развитие методик высокоточного тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров позволяет достигать точности, сопоставимой с геометрическим нивелированием II–IV классов, что подтверждает обоснованность его применения для оценки высотных отметок в деформационном мониторинге [23]. Для рассматриваемой ситуации примем m_l и m_i равными нулю, так как исходные пункты представляют собой геодезические марки, а высота прибора совпадает с высотой определяемой точки, $m_v = m_\beta$, S_1, S_2 указаны на рис. 4, $v_1 = 4^\circ 30' 08''$, $v_2 = 7^\circ 6' 9''$, m_{h1}, m_{h2} примем равными 1 мм. Тогда $m_{Hst} = 1$ мм.

Далее была рассчитана точность измерения координат определяемой точки, по следующим формулам [21, с. 214–215]:

$$m_{Xp}^2 = m_{Xst}^2 + (\cos v \cdot \cos \beta)^2 \cdot m_s^2 + (-S_p \cdot \cos v \cdot \sin \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_\beta}{\rho} \right)^2 + (-S_p \cdot \sin v \cdot \cos \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2, \quad (7)$$

$$m_{Yp}^2 = m_{Yst}^2 + (\cos v \cdot \sin \beta)^2 \cdot m_s^2 + (S_p \cdot \cos v \cdot \cos \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_\beta}{\rho} \right)^2 + (S_p \cdot \sin v \cdot \sin \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2, \quad (8)$$

$$m_{Hp}^2 = m_{Hst}^2 + \sin^2 v \cdot m_s^2 + (S_p \cdot \cos v)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2 + m_l^2 + m_i^2, \quad (9)$$

где $m_{Xst}, m_{Yst}, m_{Hst}$ – СКП определения координат станции, S_p – расстояние от станции до определяемой точки, β – дирекционный угол направления на точку P, v – измеренный вертикальный угол. Для точки, расположенной на 18 этаже, примем: $S_p = 81,943$ м., $\beta = 355^\circ 37' 39''$, $v = 67^\circ 27' 05''$, $m_{Xst} = m_{Yst} = 3$ мм., $m_{Hst} = 1$ мм. Подставив указанные значения в формулы (7)–(8), после извлечения корня получены следующие значения: $m_{Xp} = 3$ мм, $m_{Yp} = 3$ мм., $m_{Hp} = 2$ мм.



Рис. 5. Диаграмма перемещений по оси X
Примечание: составлен автором по результатам исследования



Рис. 6. Диаграмма перемещений по оси Y
Примечание: составлен автором по результатам исследования



Рис. 7. Диаграмма перемещений по высоте
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Наиболее удобным для анализа форматом представления данных является диаграмма. Ниже представлены линейные диаграммы величин перемещения марок по каждой оси (рис. 5–7). На каждой обозначены как фактические перемещения, так и перемещения, рассчитанные по модели. Величины перемещений на диаграммах указаны в мм.

Результаты показали, что расчетные перемещения, полученные по модели, коррелируют с фактическими измерениями, при этом наибольшие расхождения наблюдались для марок, расположенных на верхних этажах. Подобные исследования, сочетающие непрерывный мониторинг деформаций в процессе строительства с верификацией конечно-элементных моделей, учитывающих реологические свойства бетона и условия строительства, также подтверждают хорошую корреляцию между расчетом и экспериментом для сверхвысоких зданий [24]. Увеличение расхождения данных модели и измерений может быть связано с тем, что марки с большим порядковым номером расположены на более высоких этажах. С учетом того, что все измерения проводились с земли, а марки расположены вертикально на колонах, можно предположить, что большое расхождение фактических данных и данных модели связано с большими погрешностями измерений более высоких марок, так как угол падения визирного луча на марки разных этажей различный, что, в свою очередь, вызывает дополнительные погрешности [25]. Экспериментальные исследования подтверждают, что при измерении расстояний в безотражательном режиме на больших углах падения луча (более 40–50°) может возникать систематическая ошибка, что особенно актуально для высоко расположенных марок [26]. Кроме того, при дальнейшей работе над темой необходимо учитывать влияние вертикальной рефракции по алгоритму, предложенному в [27].

Однако, несмотря на большие расхождения перемещений для более высоких марок, для марок нижних этажей расхождения небольшие. С учетом вышесказанного можно сказать, что модель является работоспособной, хоть и требует некоторой доработки, а также необходимо провести эксперимент, который позволит уменьшить погрешности измерения марок на верхних этажах. Перспективным направлением для повышения достоверности геодезического мониторинга высотных зданий является интеграция данных конечно-элементного моделирования

с показаниями автоматизированных стационарных систем контроля, например, на основе волоконно-оптических датчиков [28].

Выводы

– Данные компьютерного моделирования позволяют получать информацию о деформациях железобетонного каркаса здания, вызванных тепловым расширением.

– Построенная модель требует доработки, для улучшения моделирования вертикальной составляющей деформаций.

– Для получения более надежных данных измерений, на высоких этажах необходимо разместить угловые пленочные отражатели или призменные отражатели.

Список литературы

- Жидков А.А., Васютинский И.Ю., Васютинская С.И. Современные технологии геодезического обеспечения высотного строительства // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 6. С. 10–16. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-972-6-10-16. EDN: OMFCJV.
- Ященко А.И., Евстафьев О.В., Брынь М.Я. Геоинформационное обеспечение возведения башни «Бурж Дубай» // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 25–28. EDN: LLSRZZ. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geoinformacionnoe-obeyspechenie-vozvedeniya-bashni-burzh-dubay> (дата обращения: 28.12.2025).
- Иксанов Р.Р., Ермолаева Т.Н. Проблемы геодезического сопровождения строительства высотных сооружений с применением современных технологий // Избранные доклады 67-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых: Доклады конференции студентов и молодых ученых (Томск, 19–23 апреля 2021 г.). Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 913–914. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46642129> (дата обращения: 21.11.2025). EDN: BEQMRR.
- Шульц Р.В., Анненков А.А., Белоус Н.В., Ковтун В.Я. Комплексный геодезический мониторинг высотных зданий // Интерэкско Гео-Сибирь. 2015. № S. С. 109–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-geodezicheskiy-monitoring-vysotnyh-zdaniy> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: TPNIIZT.
- Bochko O., Rii I., Bida O. Geodesic support of construction of high-rise buildings using GPS // InterConf. 2021. № 67. P. 486–492. DOI: 10.51582/interconf.19-20.07.2021.049.
- Khatib K. Surveying engineering challenges in the construction of skyscrapers. High rise Tower survey and monitoring on Lamar twins building in Jeddah, KSA // Интерэкско Гео-Сибирь. 2016. Vol. S. P. 79–89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/surveying-engineering-challenges-in-the-construction-of-skyscrapers-high-rise-tower-survey-and-monitoring-on-lamar-twins-building-in-jeddah> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: VXKQYZ.
- Zhou Yu., Chen J., Hao G., Zhu Sh. Deformation Monitoring of High-Rise Building Clusters: Acquiring Deformation Coefficients by Combining Satellite Imagery and Persistent Scatterer Interferometry // Structural Control and Health Monitoring. 2024. Vol. 2024. Is. 1. DOI: 10.1155/2024/2326106. EDN: XN-QAKS.
- Рубцов И.В., Назаров И.А., Лавриненко Е.Д., Савушкина В.П. Учет температурных деформаций при геодезическом сопровождении строительства высотных монолитных зданий // Вестник МГСУ. 2010. № 4–5. С. 329–334. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21102432> (дата обращения: 30.12.2025). EDN: RTUKDZ.

9. Gao K., Deng D., Zhu H. et al. Static and Dynamic Deformation Monitoring of Super High-Rise Buildings During the Construction Stage // Industrial Construction. 2024. Vol. 54. Is. 1. P. 130–139. DOI: 10.3724/j.gyjzg23081112. EDN: UHBXDK.
10. Demianenko R., Annenkov A., Bondar S. et al. Analysis of the influence of external factors on the deformation of high-rise buildings in the process of their construction and operation // Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. Vol. 112. P. 222–228. DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.222-228. EDN: UTUQTC.
11. Банах В.А. Моделирование работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при передаче динамических воздействий через грунтовый массив // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2011. № 39. С. 18–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21771476> (дата обращения: 23.11.2025). EDN: SILBGP.
12. Новиков Ю.А., Хорошилов В.С., Мальцева Т.В. Прогноз деформационного процесса по геодезическим наблюдениям на основе кинематической модели // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2025. Т. 30. № 2. С. 36–46. DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-2-36-46. EDN: NVUVVN.
13. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2017.
14. Раинкин В.Я. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации высотных сооружений башенного типа: на примере Останкинской телевизионной башни: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1972. 203 с. Шифр хранения: ОД Дк 73-5/3979.
15. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.
16. Сивец Б.О. Влияние температурных воздействий на монолитные железобетонные плиты / науч. рук. В.В. Гринев // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 70-й студенческой научно-технической конференции (г. Минск, 12 мая 2014 г.). Минск: БНТУ, 2015. С. 127–130. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/532402339.pdf> (дата обращения: 29.12.2025).
17. Уткина В.Н., Безрукова Е.С. Моделирование процесса возведения высотного каркасно-монолитного здания // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4 (7). С. 82–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovaniye-protsessa-vozvedeniya-vysotnogo-karkasno-monolitnogo-zdaniya> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10040. EDN: OKYDCA.
18. Поленников Д.П. Применение электронного тахеометра Leica TS09 plus при строительстве уникальных объектов // Вестник магистратуры. 2016. № 12–4 (63). С. 17–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-elektronnogo-tahometra-leica-ts09-plus-pri-stroitelstve-unikalnyh-obektov> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: XSHKGP.
19. Wang T., Li D., Zhou J., Zhang J. Temperature Monitoring of Mass Concrete Structure Using Wireless Sensing System // Structural Control and Health Monitoring. 2025. Vol. 2025. Article ID 7847074. DOI: 10.1155/stc/7847074.
20. Горянинов И.В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018. Т. 23. № 1. С. 28–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-primeneniya-obratnoy-lineyno-uglovoy-zascheki-dlya-otsenki-stabilnosti-punktov-planovoy> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: YWRBRQ.
21. Инженерная геодезия: учеб. для студентов вузов / Ключин Е.Б., Климов М.И., Михелев Д.Ш., Фельдман В.Д.; Под ред. Д.Ш. Михелева. 4-е изд., испр. М.: Академия, 2004. 478 с. ISBN 5-7695-1524-4.
22. Справочник геодезиста: в 2 книгах. Кн. 2 / под ред. В.Д. Больщакова, Г.П. Левчука. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1975. 1056 с.
23. Береговой Д.В. Исследование и разработка методики тригонометрического нивелирования повышенной точности // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12–1 (54). С. 77–79. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-i-razrabotka-metodiki-trigonometricheskogo-nivelirovaniya-povyshennoy-tochnosti> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.014. EDN: XENZPT.
24. Gao F., Zhou H., Liang H. et al. Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. P. 110033. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110033. EDN: TXFOOP.
25. Швидкий В.Я., Сумин М.Н., Яндров И.А., Алламырадов Э.М. Влияние неперпендикулярности визирного луча электронного тахеометра к светоотражательной плоскости марки на точность измерения расстояний // Транспортное строительство. 2017. № 4. С. 19–21. EDN: ZHYYJR.
26. Никонов А.В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. 2015. № 1 (29). С. 43–53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-izmereniya-rass-toyaniiye-elektronnymi-tahometrami-v-bezotrazhatelnom-rezhime> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: UJYBKF.
27. Вшивкова О.В., Решетило С.Ю. Комбинированный способ учета влияния вертикальной рефракции в электронной тахеометрии // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 11. С. 15–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-953-11-15-21.
28. Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnye-sistemy-diagnostiki-i-monitoringa-tehnicheskogo-sostoyaniya-unikalnyh-zdanii-i-sooruzheniy> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2. EDN: YLXHCD.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

УДК 528.4
DOI 10.17513/use.38471

**ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА КРАЮ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН
С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
НА ПРИМЕРЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОБЬ**

Яковлев В.Г.

*Общество с ограниченной ответственностью «Мостовое бюро», Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: vasiliiyakovlev@mail.ru*

Целью исследования является разработка методики устранения влияния масштабного коэффициента при развитии геодезической разбивочной основы для строительства. Масштабный коэффициент (или коэффициент масштаба) – это отношение длины линии на карте (проекции) к ее истинной длине на местности, учитывающее искажения, возникающие при переходе от кривизны Земли к плоской проекции, и зависящие от конкретной проекции (например, Гаусса – Крюгера) и расстояния от осевого меридиана. Масштабный коэффициент может иметь негативное влияние в процессе строительства мостов большой протяженности, так как он вносит искажения в длины линий, полученные спутниковыми методами определения координат. Произведен расчет предельного значения масштабного коэффициента для территории Российской Федерации, на основании требований нормативной документации определена необходимость устранения его влияния на геодезическую разбивочную основу для строительства. На примере моста через р. Обь в районе г. Сургута рассчитано теоретическое значение масштабного коэффициента для данного района строительства и произведено сравнение его значения с фактически полученным коэффициентом по материалам полевых наблюдений спутниковой аппаратурой и электронным тахеометром. Определена методика устранения данного влияния на геодезическую разбивочную основу для строительства мостов, произведен анализ возможного искажения высотных отметок в результате примененного метода. Выполнен анализ необходимости использования данной методики для мостов различной протяженности. Результаты исследования позволили разработать методику, дающую возможность исключить влияние масштабного коэффициента в случаях, когда выполнены геодезические изыскания на краю картографической зоны и по этим материалам произведено проектирование большого мостового сооружения, для дальнейшей реализации проекта на местности без возможных ошибок, связанных с искажением длин линий из-за влияния масштабного коэффициента на геодезическую разбивочную основу.

Ключевые слова: масштабный коэффициент, геодезическая разбивочная основа для строительства, измеренная длина линии, мостовой переход, мост, геодезическое обеспечение строительства мостов

**GEODETIC SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF BRIDGE
STRUCTURES AT THE EDGE OF CARTOGRAPHIC ZONES,
TAKING INTO ACCOUNT THE SCALE FACTOR USING
THE EXAMPLE OF A BRIDGE CROSSING ACROSS THE OB RIVER**

Yakovlev V.G.

*Limited Liability Company “Bridge Bureau”, Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: vasiliiyakovlev@mail.ru*

The aim of the work is to develop a methodology for eliminating the influence of the scale factor in the development of a geodetic survey basis for construction. A scale factor (or scale factor) is the ratio of the length of a line on a map (projection) to its true length on the ground, taking into account the distortions that occur during the transition from the curvature of the Earth to a flat projection, and depending on the specific projection (e.g. Gauss-Krüger) and the distance from the central meridian. The scale factor can have a negative impact on the construction of long bridges, as it introduces distortions into the line lengths obtained using satellite coordinate determination methods. The maximum value of the scale factor for the territory of the Russian Federation was calculated, and the need to eliminate its impact on the geodetic survey basis for construction was determined based on the requirements of regulatory documentation. Using the example of a bridge across the Ob River near the city of Surgut, the theoretical value of the scale factor for this construction area was calculated and compared with the actual coefficient obtained based on field observations using satellite equipment and an electronic tacheometer. A method for eliminating this influence on the geodetic survey basis for bridge construction has been determined, and an analysis of the possible distortion of elevation marks as a result of the method applied has been carried out. An analysis of the need to use this method for bridges of varying lengths was carried out. The results of the study made it possible to develop a methodology that makes it possible to exclude the influence of the scale factor in cases where geodetic surveys have been carried out at the edge of a cartographic zone and a large bridge structure has been designed based on these materials. To further implement the project on the ground without possible errors associated with the distortion of line lengths due to the influence of the scale factor on the geodetic survey basis.

Keywords: scale factor, geodetic survey basis for construction, measured length of line, bridge crossing, bridge, geodetic support for bridge construction

Введение

Масштабный коэффициент (или коэффициент масштаба) – это отношение длины линии на карте (проекции) к ее истинной длине на местности, учитывающее искажения, возникающие при переходе от кривизны Земли к плоской проекции, и зависящее от конкретной проекции (например, Гаусса – Крюгера) и расстояния от осевого меридиана. В геодезической практике неоднократно встречаются ситуации, когда на стадии изысканий под строительство линейных объектов (автомобильных дорог) производится картографирование земной поверхности с учетом масштабного коэффициента. В последующем на основании полученных топографических планов проектируются автомобильные дороги с искусственными сооружениями на них. Для реализации проекта производится развитие геодезической разбивочной основы для строительства, которая будет строиться с учетом того же масштабного коэффициента.

Наличие масштабных искажений может оказывать негативное влияние на процесс строительства мостов большой протяженности.

В основу исследования данной проблематики были положены материалы геодезических наблюдений во время строительства мостового перехода через р. Обь в районе г. Сургута.

Сургутский мост построен вблизи г. Сургута в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре.

Характеристики моста:

- схема сооружения: $(84,0 + 105,0 + 126,0 + 6 \times 153 + 126 + 105 + 84) + (3 \times 63)$ м;
- длина моста – 1758,22 м;
- категория автомобильной дороги – II.

Пролетные строения раздельные под каждое направление движения – неразрезные металлические балочные сплошностенчатые с ортотропной плитой проезжей части;

– опоры – сборно-монолитные, нижняя часть опоры единая на оба направления, из контурных блоков с заполнением железобетоном, верхняя часть опоры – раздельная монолитная железобетонная;

– подмостовой габарит русловой части моста $2 \times (140 \times 17)$ м.

Данное мостовое сооружение относится к внеклассным мостам. Ширина р. Обь в районе мостового перехода достигает более 1 км, что является основной причиной увеличенного расстояния между пунктами геодезической разбивочной основы на разных берегах. Для увеличенных расстояний

масштабный коэффициент вносит значительные искажения в длину линии, следовательно, существует необходимость в устранении его влияния на создаваемую геодезическую сеть.

Цель исследования – разработка метода устранения влияния масштабного коэффициента при развитии геодезической разбивочной основы для строительства мостового сооружения.

Материалы и методы исследования

В Российской Федерации при картографировании (создании топографических планов) широко применяются местные зональные плоские прямоугольные координаты X и Y в проекции Гаусса – Крюгера.

«Местная система координат устанавливается в отношении ограниченной территории, не превышающей территорию субъекта Российской Федерации, и устанавливается в 3-градусной или 6-градусной зонах картографической проекции общего земного эллипсоида, применяемого в государственной геодезической системе координат 2011 г. (ГСК-2011)» [1; 2].

На осевом меридиане зоны (меридиане, принятом за ось какой-либо местной системы координат на поверхности [3, п. 60], в которой выполнена съемка) значение масштабного коэффициента равно единице, что означает отсутствие искажений длин вдоль осевого меридиана.

По мере удаления от осевого меридиана зоны происходит нарастание масштаба, вследствие чего длины линий искажаются. Величину искажения длины линии характеризует масштабный коэффициент.

Масштабный коэффициент m_y можно вычислить по приближенной формуле [4, с. 97]:

$$m_y = 1 + \frac{Y^2}{2R^2}, \quad (1).$$

где Y – ордината, эквивалентная удаленности середины редуцируемой линии от осевого меридиана, км;

R – средний радиус кривизны эллипсоида, 6371 км.

Для проекции Гаусса с зонами величиной 6° и значением большой полуоси a – 6378,1365 км [5], можно получить ширину зоны l на экваторе по формуле

$$l = \frac{2\pi a}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6378,1365}{60} = 667,6 \text{ км.} \quad (2)$$

Тогда расстояние от осевого меридиана до края зоны на экваторе составит половину

полученного значения 333,8 км. Наибольшее удаление от осевого меридиана для Российской Федерации будет находиться на широте $B = 41^{\circ}11'$, для этой широты удаление края зоны от осевого меридиана можно найти по формуле

$$\frac{l}{2} \cos B = 333,8 \cdot \cos 41^{\circ}11' = 251 \text{ км. (3)}$$

Используя формулу (1), найдем значение масштабного коэффициента при удалении точки от осевого меридиана на 251 км. Оно составит 1,0000776, то есть при измерении длины линии в 1 км искажение составит 776 мм. Полученное значение будет максимальным при картографировании на территории Российской Федерации.

При этом в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59865-2022 п. 8.17 «Мостовую геодезическую разбивочную основу (МГРО) необходимо создавать с применением масштабного коэффициента, равного 1,0000000, с целью исключения влияния редукции» [6, с. 12]. Отметим, что данное требование не распространяется на пункты геодезической разбивочной основы (ГРО) для строительства автомобильной дороги.

При этом расстояния между осями опирания фактически собранных мостовых опор должны строго совпадать с осями опирания надвигаемого пролетного строения, собранного на берегу, иначе будет невозможно установить надвинутое пролетное строение на опорные части, которые,

в свою очередь, установлены на подферменники мостовых опор. Отметим, что несовпадение осей опирания на опоре с осями опирания на пролетном строении может привести к необходимости переустройства подферменных площадок и изменения конструкции деформационных швов на устоях. Следовательно, измеренные длины линий должны быть свободны от редукционного влияния масштабного коэффициента.

Приведем вычисление масштабного коэффициента на примере строительства мостового перехода через р. Обь в районе г. Сургута. На подготовительном этапе строительства подрядной организацией была создана геодезическая разбивочная основа для строительства моста (рис. 1, 2).

Определение плановых координат пунктов ГРО для строительства автомобильной дороги и мостового перехода выполнялось с применением спутниковой аппаратуры в режиме статика, от пунктов государственной геодезической сети (ГГС), в местной системе координат МСК-86 зона 3 Таймырский (Долгано-Ненецкий) автономный округ [7, с. 25]. Средняя ордината для пунктов мостового ГРО имела значение $y = 3\ 581\ 000$ м, где первая цифра (3) – номер зоны. Тогда удаленность средней точки сети от осевого меридиана составит $581\ 000$ м – $500\ 000$ м = $81\ 000$ м = 81 км.

Используя формулу (1), получим значение масштабного коэффициента, равное 1,0000080.



*Рис. 1. Схема автомобильной дороги с мостовым переходом
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

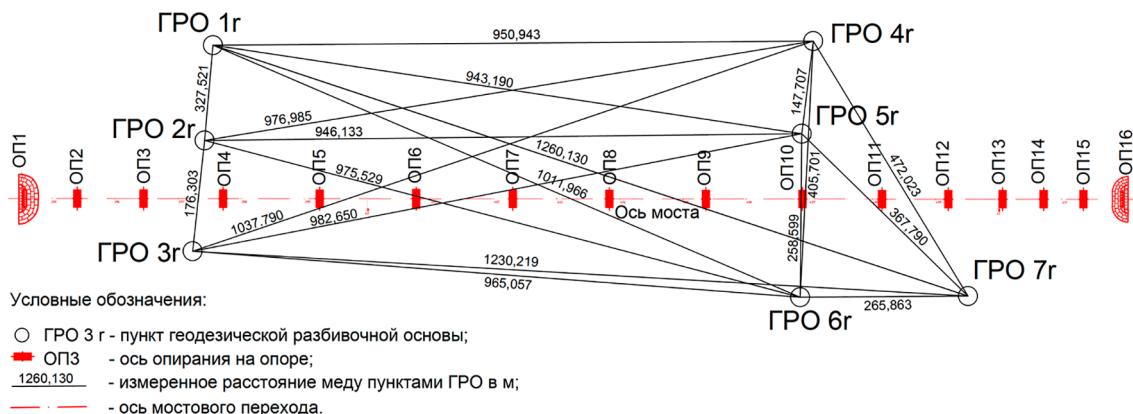


Рис. 2. Схема геодезической сети для строительства моста
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Таблица 1

Материалы контрольных измерений

Пункт стояния	Пункт наблюдения	Измеренное горизонтальное проложение, м	Горизонтальное проложение из отчета, м	Разность длин, м	Масштабный коэффициент
GRO-1r	GRO-7r	1260,130	1260,224	0,094	1,0000746
	GRO-6r	1011,966	1012,038	0,072	1,0000711
	GRO-2r	151,231	151,239	0,008	1,0000529
	GRO-3r	327,521	327,549	0,028	1,0000855
	GRO-4r	950,943	951,010	0,067	1,0000705
	GRO-5r	943,190	943,256	0,066	1,0000700
GRO-2r	GRO-3r	176,303	176,324	0,021	1,0001191
	GRO-5r	946,133	946,203	0,070	1,0000740
	GRO-4r	976,985	977,058	0,073	1,0000747
	GRO-6r	975,529	975,602	0,073	1,0000748
GRO-3r	GRO-4r	1037,790	1037,871	0,081	1,0000780
	GRO-5r	982,650	982,726	0,076	1,0000773
	GRO-6r	965,057	965,130	0,073	1,0000756
	GRO-7r	1230,219	1230,315	0,096	1,0000780
GRO-4r	GRO-5r	147,707	147,718	0,011	1,0000745
GRO-6r	GRO-4r	405,701	405,737	0,036	1,0000887
	GRO-5r	258,599	258,623	0,024	1,0000928
	GRO-7r	265,863	265,886	0,023	1,0000865
GRO-7r	GRO-4r	472,023	472,065	0,042	1,0000890
	GRO-5r	367,790	367,824	0,034	1,0000924
					Среднее
					1,0000800

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

В результате выполненных работ был составлен каталог координат пунктов ГРО, координаты которых были определены с учетом данного масштабного коэффициента. При этом в самом отчете о наличии масштабного

коэффициента не упоминалось. Этот коэффициент был выявлен в процессе проведения контрольных измерений на пунктах мостового ГРО с применением электронного тахеометра, данные о которых представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что расчетный масштабный коэффициент совпал с фактическим. При схеме надвигаемого пролетного строения мостового перехода $84,0 + 105,0 + 126,0 + 6 \times 153,0 + 126,0 + 105,0 + 84,0$ м его длина составит $1548 \text{ м} = 1548\,000 \text{ мм}$. С учетом масштабного коэффициента расстояние между собранными крайними опорами, построенными от пунктов ГРО, редуцированных на плоскость в проекции Гаусса, составило бы $1548\,000 * 1,0000800 = 1548\,123 \text{ мм}$, то есть было бы на 123 мм длиннее, чем само собранное пролетное строение, что является недопустимым.

Основной причиной влияния масштабного коэффициента на координаты пунктов ГРО для строительства моста явилась совместная обработка спутниковых наблюдений, которые были выполнены на пунктах для строительства моста и автомобильной дороги, с последующим приведением координат на плоскость в проекции Гаусса.

Из описанного выше видно, что при возведении протяженных мостовых переходов возникает необходимость создания отдельной геодезической сети для строительства больших мостов, причем создана она должна быть так, чтобы данная сеть могла сопрягаться с геодезической сетью для строительства автомобильной дороги.

Методика устранения влияния масштабного коэффициента на геодезическую сеть

Для решения этой задачи при проектировании и дальнейшем создании геодезической разбивочной основы для линейного

объекта необходимо производить построение такой сети отдельно для искусственных сооружений и отдельно для автомобильной дороги.

При этом необходимо, чтобы:

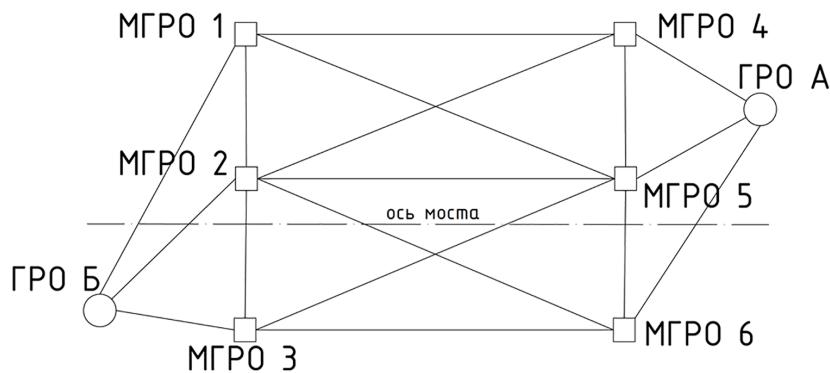
- разбивочные точки, полученные путем выноса с пунктов ГРО для строительства автомобильной дороги, имели минимальные отличия с одноименными точками, полученными с пунктов мостового ГРО;

- поперечное смещение оси моста дороги отсутствовало, то есть продольная ось моста и автомобильной дороги должны однозначно определяться как с пунктов мостового ГРО, так и с автодорожных пунктов ГРО;

- продольное смещение оси (нахождение пикетов) при работе с обеими сетями ГРО было минимальным и не оказывало существенного влияния на продольный профиль дороги.

Поставленная выше задача может быть решена с применением следующей методики:

- Проектирование геодезической сети для строительства мостового перехода должно выполняться таким образом, чтобы хотя бы пара пунктов размещалась вдоль оси мостового перехода или с одинаковым удалением от нее. В такую геодезическую сеть желательно включить минимум два пункта ГРО для строительства автомобильной дороги. На стадии проектирования необходимо определиться с методами геодезических построений, точностными характеристиками используемого оборудования, методами уравнивания. Пример сети мостовой ГРО приведен на рис. 3.



Условные обозначения:

- МГРО 3 – пункт мостового ГРО;
- ГРО А – пункт автодорожного ГРО;
- измеренное расстояние.

Рис. 3. Пример схемы мостовой геодезической разбивочной основы
Примечание: составлен автором по результатам исследования

2. Геодезические измерения для плавного определения пунктов МГРО и ГРО должны производиться одним из способов, используемых для построения таких сетей (спутниковые определения в режиме «Статика», линейно-угловые построения или трилатерация). В случае использования спутниковых методов в процессе обработки материалов наблюдений получаемые векторы должны быть свободны от влияния масштабного коэффициента.

3. После измерений, так как полученная сеть является геодезической сетью специального назначения, необходимо произвести свободное уравнивание полученной сети и выполнить оценку точности по материалам уравнивания [8; 9]. Среднеквадратическая погрешность взаимного определения координат пунктов МГРО не должна превышать значения в 6 мм [6, с. 12; 10, табл. 1].

4. Затем из решения обратной геодезической задачи [11, с. 23] нужно дважды определить длины линии между пунктами ГРО А и ГРО Б: используя из каталогов координат пунктов сети ГРО для строительства автомобильной дороги (получим длину D_a) и длину линии, полученную по координатам свободного уравнивания мостовой сети (получим длину D_m).

Формула для расчета длины линии имеет вид

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}. \quad (4)$$

Формула для расчета дирекционного угла имеет вид

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (5)$$

5. Следующим действием рассчитывается разница длин линий D_a и D_m по формуле

$$\Delta = D_a - D_m. \quad (6)$$

6. Далее, необходимо, используя решение прямой геодезической задачи [11, с. 23], произвести пересчет координат пункта ГРО Б по направлению к пункту ГРО А на величину $\Delta/2$.

Вычисление новых координат пункта ГРО Б производится по формулам

$$X'_A = X_A + \frac{\Delta}{2} \cos \alpha, \quad (7)$$

$$Y'_A = Y_A + \frac{\Delta}{2} \sin \alpha. \quad (8)$$

7. Используя расстояние, полученное из свободного уравнивания D_m , рассчитывается значение новых координат пункта ГРО А по формулам

$$X'_A = X_A + D_m \cos \alpha, \quad (9)$$

$$Y'_A = Y_A + D_m \sin \alpha. \quad (10)$$

8. Наконец, необходимо произвести пересчет координат всех пунктов МГРО, подставив полученные при выполнении п. 6 и 7 значения координат в материалы уравнивания сети в качестве исходных данных.

Данная методика позволяет при выполнении геодезических разбивочных работ как от пунктов мостового, так и от пунктов автодорожного ГРО получать на местности выносимую проектную ось автомобильной дороги, которая будет удовлетворять требованиям по точности взаимного положения смежных осей в 2 мм [12, табл. 11].

Оценим максимальное влияние величины продольного смещения пикетажа. Так как при удаленности объекта строительства от осевого меридиана зоны на 251 км масштабное искажение длины линии составит 776 мм, после редуцирования системы координат расхождение пикетных значений составит половину этого значения, то есть 388 мм. Максимальный продольный уклон, согласно нормативной документации, составляет не более 30 % [13; 14], тогда расхождение высот из-за пикетажа при применении ГРО автодороги и МГРО на 388 мм составит 12 мм.

В соответствии с ГОСТ Р 59120-2021 «Не более 10 % результатов определений высотных отметок по оси оснований и покрытий дорожных одежд должны иметь отклонения от проектных значений не более ± 20 мм» [15, п. 8.10.2].

Рассчитанное расхождение в 12 мм укладывается в допустимое значение, при этом необходимо учесть, что расчет произведен для самого неблагоприятного (удаленного от осевого меридиана) участка картографической зоны, полученного применительно к территории Российской Федерации. Следовательно, при всех остальных положениях измеряемых длин линий на картографической проекции в пределах зоны расхождение будет еще меньше, а это значит, что данными несходимостями можно пренебречь и считать получаемый продольный сдвиг для значений отметок высот не оказывающим влияния на продольный профиль всего мостового перехода.

Таблица 2

Расчет значений поправок в длины линий
в зависимости от удаления от осевого меридиана зоны

Удаленность от осевого меридиана, км	Масштабный коэффициент	Длина моста, м							
		3000	1500	1000	500	400	300	200	100
10	1,000001232	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
20	1,000004927	0,015	0,007	0,005	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000
30	1,000011087	0,033	0,017	0,011	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001
40	1,000019709	0,059	0,030	0,020	0,010	0,008	0,006	0,004	0,002
50	1,000030796	0,092	0,046	0,031	0,015	0,012	0,009	0,006	0,003
60	1,000044346	0,133	0,067	0,044	0,022	0,018	0,013	0,009	0,004
70	1,00006036	0,181	0,091	0,060	0,030	0,024	0,018	0,012	0,006
80	1,000078838	0,237	0,118	0,079	0,039	0,032	0,024	0,016	0,008
90	1,000099779	0,299	0,150	0,100	0,050	0,040	0,030	0,020	0,010
100	1,000123184	0,370	0,185	0,123	0,062	0,049	0,037	0,025	0,012
...									
251	1,000776	2,327	1,164	0,776	0,388	0,310	0,233	0,155	0,078

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика позволяет уменьшить влияние масштабного коэффициента, устанавливается новая система координат для строительства искусственного сооружения (моста), при этом ось моста в попечнике будет совпадать с осью автомобильной дороги на подходах. Различие пикетажа у автомобильной дороги и мостового сооружения на 388 мм (данное значение является максимально возможным для территории России) не окажет весомого значения на перепады высот в продольном профиле дороги.

Рассмотрим, при каких случаях данная методика может не использоваться.

Необходимость использования данного способа редуцирования геодезической сети зависит от длины моста, удаленности объекта от осевого меридиана зоны. В табл. 2 представлен расчет значений поправок в длины линий в зависимости от удаления их от осевого меридиана зоны.

Анализ табл. 2 показывает, что:

- при длине моста не более 3000 м и удалении объекта строительства от осевого меридиана зоны менее, чем на 10 км;

- при длине моста не более 1000 м и удалении объекта строительства от осевого меридиана зоны менее, чем на 20 км;

- при длине моста не более 400 м и удалении объекта строительства от осевого

меридиана зоны менее, чем на 30 км, при длине моста не более 200 м при удалении объекта строительства от осевого меридиана зоны менее, чем на 40 км;

- при длине моста не более 100 м и удалении объекта строительства от осевого меридиана зоны менее, чем на 60 км – масштабный коэффициент не вносит значительных искажений в геодезическую сеть. Поэтому для таких мостов сеть МГРО может развиваться с учетом масштабного коэффициента. Во всех остальных случаях необходимо устранять влияние масштабного коэффициента.

Заключение

Данная методика исключения влияния масштабного коэффициента применима в случаях, когда выполнены геодезические изыскания на краю картографической зоны и по этим материалам выполнено проектирование большого мостового сооружения, для дальнейшей реализации проекта на местности без возможных ошибок, связанных с искажением длин линий из-за влияния масштабного коэффициента на геодезическую разбивочную основу.

Список литературы

1. Российской Федерации. Законы. О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. (с изм. на 31 июня 2025 г.) ст. 30, п. 4., п. 5: Федер. закон

- № 431-ФЗ от 30 декабря 2015 г.: принят Государственной думой 22 декабря 2015 г.; одобрен Советом Федерации 25 декабря 2015 г.; внесены изменения 31 июня 2025 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <https://boyard.kodeks.ru/docs/> (дата обращения: 19.11.2025).
2. Российская Федерация. Нормативный правовой акт. Об утверждении порядка установления местных систем координат. Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (с изм. на 20 июня 2022 г.) п. 3: Приказ Росреестра № П/0387 от 20 октября 2020 г.: принят Росреестр 20 октября 2020 г.; внесены изменения 30 июня 2022 г. // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <https://boyard.kodeks.ru/docs/> (дата обращения: 19.11.2025).
3. ГОСТ 22268-76. Геодезия. Термины и определения. Официальное издание. М.: Издательство стандартов, 1981. п. 60.
4. Граур А.В. Математическая картография. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1956. 372 с.
5. Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации № 1240 от 24 ноября 2016 г. «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы» // Электронный фонд правовых и нормативных документов. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201611280018> (дата обращения: 19.11.2025).
6. ГОСТ Р 59865-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Сети геодезические для строительства и проектирования. Общие требования. Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2022.
7. Герасимов А.П., Назаров В.Г. Местные системы координат. 2-е изд. М.: Проспект, 2010. 64 с. ISBN 978-5-98597-168-2.
8. СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. п. 5.2.9. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2018.
9. СП47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. п. 5.1.5.
10. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы. Официальное издание. М.: Минрегион России, 2011.
11. Чугреев И.Г., Усова Н.В., Владимирова М.Р. Основы геодезии. М.: МИИГАиК, 2017. 146 с.
12. ГОСТ 32869-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению топографо-геодезических изысканий. Официальное издание М.: Стандартинформ, 2016.
13. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. Таб. 11.2а.
14. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. (с Изменением 1) Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2025. п. 5.3.
15. ГОСТ Р 59120-2021. Автомобильные дороги общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2021.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

УДК 528.44
DOI 10.17513/use.38472

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ И ПАРАМЕТРАМ 3D-КАДАСТРОВОЙ СЪЕМКИ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Яковлева Н.Д.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: natashayakovleva24@gmail.com*

Актуальность исследования связана с развитием 3D-технологий в кадастровой деятельности. Цель работы – обоснование требований к точности и параметрам 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях с применением наземного лазерного сканирования. В статье были определены рекомендуемые параметры наземного лазерного сканирования для 3D-кадастровой съемки: дальность сканирования не более 30 м, угловое разрешение $\leq 0,02^\circ$, плотность облака точек ≥ 1500 точек/ m^2 и средняя квадратическая ошибка регистрации координат точек между стоянками не более 0,006 м. Экспериментальные исследования показали, что при указанных параметрах достигается точность пространственного положения характерных точек на уровне 0,002 м. Была выявлена зависимость между параметрами съемки и точностью построения 3D-модели объекта недвижимости. Были предложены показатели качества: A – метрологические характеристики облака/регистрации, B – качество геометрических примитивов (плоскости, ребра, оси), C – качество пространственных данных объекта (контуры, модели помещений/этажей, объемы). А также был произведен предрасчет точности для показателей качества. По результатам исследования были сформулированы научно обоснованные требования к точности и параметрам выполнения 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях. Были обоснованы требования применения наземного лазерного сканирования с оптимизированными параметрами измерений и строгими критериями оценки достоверности пространственных данных.

Ключевые слова: 3D-кадастр, наземное лазерное сканирование, 3D-модель, параметры съемки, средняя квадратическая ошибка

SUBSTANTIATION OF ACCURACY REQUIREMENTS AND PARAMETERS FOR 3D-CADASTRAL SURVEYING IN URBAN AREAS USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Yakovleva N.D.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Saint Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I”,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: natashayakovleva24@gmail.com*

The relevance of the study is associated with the development of 3D technologies in cadastral activities. The aim of the work is to substantiate accuracy requirements and parameters for 3D cadastral surveying in urbanized areas using terrestrial laser scanning. The article defines recommended parameters for terrestrial laser scanning in 3D cadastral surveying: scanning range not exceeding 30 m, angular resolution $\leq 0,02^\circ$, point cloud density ≥ 1500 points/ m^2 , and a root mean square error of point coordinate registration between scan stations not exceeding 0.006 m. Experimental studies have shown that, with the specified parameters, the accuracy of the spatial position of characteristic points reaches 0.002 m. A relationship between survey parameters and the accuracy of constructing a 3D model of a real estate object was identified. Quality indicators were proposed: A – metrological characteristics of the point cloud/registration, B – quality of geometric primitives (planes, edges, axes), and C – quality of the object's spatial data (contours, room/floor models, volumes). A preliminary accuracy estimation for these quality indicators was also performed. Based on the results of the study, scientifically substantiated requirements for accuracy and parameters of 3D cadastral surveying in urbanized areas were formulated. The requirements for using terrestrial laser scanning with optimized measurement parameters and strict criteria for assessing the reliability of spatial data were justified.

Keywords: 3D-cadastre, terrestrial laser scanning, 3D-model, survey parameters, root mean square error

Введение

На сегодняшний день урбанизированные территории характеризуются высокой плотностью застройки, многоуровневой организацией пространства, активным использованием подземных и надземных сооружений. В таких условиях традиционный двумерный кадастр не обеспечивает полного и достоверного учета объектов,

что приводит к ошибкам при регистрации прав, налогообложении и управлении имущественным комплексом. Решением данной проблемы является переход к трехмерному (3D) кадастру, где объекты недвижимости будут представлены в виде трехмерных моделей. Пространственные данные для создания трехмерных моделей будут получены на основе применения современных геоде-

зических методов, включая спутниковые технологии, наземное и воздушное лазерное сканирование, фотограмметрические методы и геоинформационные системы.

При этом одной из главных задач становится разработка методик геодезического обеспечения 3D-кадастра, обеспечивающих требуемую точность съемки и определение объемно-площадных характеристик объектов недвижимости. Проблема особенно актуальна для городов, где высока стоимость земель и объектов капитального строительства и ошибки пространственных данных приводят к негативным экономическим и социальным последствиям.

Вопросы применения наземного лазерного сканирования (далее – НЛС) для кадастровых и геодезических задач активно рассматриваются в научных исследованиях последних десятилетий. Анализ российской и зарубежной литературы последних лет показал, что НЛС обеспечивает сплошной сбор геометрических характеристик зданий и сооружений с точностью до 0,1 м и с высокой производительностью, что делает актуальной технологию для получения 3D-моделей объектов недвижимости и внедрения 3D-кадастра [1–3].

В работах М.Я. Брыня [4; 5] была рассмотрена необходимость повышения точности исходной геодезической основы и рационального проектирования геодезических ходов и сетей. Вопросы содержания геодезического обеспечения также были рассмотрены в работах В.В. Озnamца [6; 7]. Полученные авторами выводы, хотя и не ориентированы исключительно на применение НЛС, являются актуальными для регистрации облаков точек НЛС и трансформации 3D-моделей в кадастровые системы координат.

В работах Е.И. Аврунева [8; 9] и в монографии [10, с. 45–52] были рассмотрены вопросы геоинформационного сопровождения кадастровых работ. Автором было показано, что применение наземного лазерного сканирования позволяет формировать высокоточные трехмерные модели зданий, необходимые для постановки на кадастровый учет в условиях плотной городской застройки.

В исследованиях А.В. Чернова [11–13] было акцентировано внимание на алгоритмах регистрации и объединения облаков точек. Показано, что качествостыковки сканов является определяющим фактором при получении реалистичной 3D-модели объекта недвижимости.

В международной практике применение лазерного сканирования для геодезического обеспечения кадастра регламентируется стандартами ISO 19152 (Land Administration Domain Model – LADM) и инициативой INSPIRE Европейского Союза [14; 15]. Эти документы закладывают концептуальные основы для перехода от 2D-кадастра к полному 3Dпредставлению объектов недвижимости.

В России нормативная база пока не полностью учитывает возможности НЛС для создания 3D-моделей для целей кадастра. Федеральный закон № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» [16] закрепляет необходимость точного определения границ объектов для двумерного кадастра, однако методики 3D-учета находятся на стадии апробации. ГОСТ Р 70689-2023 [17] регламентирует применение лазерного сканирования в инженерных изысканиях, что может служить основой для формирования нормативно-правовых актов в сфере 3D-кадастрового учета. Однако требуется углубление и детализация технического регулирования в области лазерного сканирования, поскольку существующие документы долгое время не охватывали все аспекты применения наземных и воздушных систем [18].

Цель исследования – обоснование требований к точности и параметрам 3D-кадастровой съемки на городских территориях с использованием наземного лазерного сканирования.

Материалы и методы исследования

Точность НЛС определяется несколькими составляющими: точностью измерения дальности σ_R и угловой точностью сканера $\sigma_\theta, \sigma_\phi$.

Была рассмотрена теоретическая модель погрешностей НЛС для 3D-кадастра.

В сферической системе координат сканера измеряются дальность R , горизонтальный угол θ и угол наклона ϕ . Пусть их средние квадратические ошибки (далее – СКО): $\sigma_R, \sigma_\theta, \sigma_\phi$. Декартовы координаты точки в системе координат сканера [19]:

$$x = R \cos \phi \cos \theta,$$

$$y = R \cos \phi \sin \theta,$$

$$z = R \sin \phi.$$

Было принято, что результаты измерений независимы, в связи с чем ковариационная матрица $K_{x,y,z}$ координат была определена следующим образом:

$$K_{x,y,z} = JK_{R,\theta,\varphi} J^T,$$

где $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial z}{\partial R} & \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} \end{bmatrix}$,

$$K_{R,\theta,\varphi} = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 \end{bmatrix}.$$

В развернутом виде (для малых σ_θ , σ_φ в радианах) были получены

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \sigma_R^2 + (R \cos \varphi)^2 \sigma_\theta^2 + (R \sin \varphi)^2 \sigma_\varphi^2, \\ \sigma_y^2 &= \sigma_R^2 + (R \cos \varphi)^2 \sigma_\theta^2 + (R \sin \varphi)^2 \sigma_\varphi^2, \\ \sigma_z^2 &= \sigma_R^2 (R \sigma_\varphi)^2. \end{aligned}$$

Тем самым ошибки измерения горизонтальных углов возрастают пропорционально $R \sigma_\theta$, радиальная – σ_R , вертикальная – $R \sigma_\varphi$. Типичные величины составляют $\sigma_R \sim 1-3$ мм, $\sigma_\theta, \sigma_\varphi \sim 10-60''$. При $R = 30$ м вклад угловых ошибок дает $\approx 1,5-9$ мм в плане/по высоте, что сопоставимо с σ_R [15].

Для углового шага сканирования $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ шаг между соседними лучами на расстоянии R :

$$s_\theta = R \Delta\theta, \quad s_\varphi = R \Delta\varphi$$

а средняя точечная плотность p на фронтальной поверхности составит

$$p \approx \frac{1}{s_\theta s_\varphi} \approx \frac{1}{R^2 \Delta\theta \Delta\varphi}.$$

Эта зависимость определяет минимально допустимые $\Delta\theta$, $\Delta\varphi$ для обеспечения, например, двукратной избыточности точек на характерных линиях/кромках фасада заданной толщины [20].

Пусть требуется минимальная дискретизация деталей δ (например, кромка наличника шириной 0,02 м) с двукратной избыточностью точек (по критерию Найквиста для детектирования/обобщения). Тогда

$$s_\theta \leq \frac{\delta}{2}, \quad s_\varphi \leq \frac{\delta}{2} \Rightarrow \Delta\theta \leq \frac{\delta}{2R}, \quad \Delta\varphi \leq \frac{\delta}{2R}.$$

Например, при $R = 25$ м и $\delta = 0,002$ м, и получаем $\Delta\theta, \Delta\varphi \leq 0,0004$ рад $\approx 0,023''$. Это соответствует «средне-плотным» нормативным значениям многих НЛС [21, с. 120–135].

Величина σ_{plane} – это среднеквадратическая ошибка ортогональных отклонений точек от аппроксимирующей плоскости, то есть она показывает, насколько «ровно» облако точек ложится на плоскость. На практике σ_{plane} служит операционным показателем для нормирования результатов НЛС на фасадах и внутренних стенах [22].

Для плоскости, аппроксимируемой методом наименьших квадратов по n точкам, СКО:

$$\sigma_{plane} = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь d_i – ортогональное расстояние от i -й точки до плоскости, n – количество точек в облаке, 3 – число оцениваемых параметров плоскости, по методу наименьших квадратов.

Регистрация (сшивка) двух или более облаков точек приводит к дополнительным ошибкам трансформации (поворот r и сдвиг t). Любые ошибки в оценке параметров трансформации дает систематическое смещение всех точек локального облака.

Модель жесткого преобразования точки $p(x,y,z)$:

$$p' = t + rp,$$

где t – вектор сдвига, r – ортогональная матрица поворота.

Для анализа ошибок удобно перейти к малым приращениям параметров трансформации (малые углы поворота). Пусть параметры трансформирования представлены вектором:

$$q = [t_x \quad t_y \quad t_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T,$$

где $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – малые углы поворота.

При малых углах:

$$p' = p + t + \omega p.$$

Малое приращение параметров δq дает малое приращение координат точки $\delta p'$:

$$\delta p' = J_p \delta q,$$

где J_p – якобиан для точки $p(x,y,z)^T$:

$$J_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & -y \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & y & -x & 0 \end{bmatrix}.$$

Пусть ковариационная матрица параметров трансформации равна K_q , тогда вклад погрешности трансформации в ковариацию координат отдельно взятой точки равен

$$K_{p,trans} = J_p K_q J_p^T.$$

Если исходная ковариация координат точки в локальной системе равна K_p , то итоговая ковариационная матрица преобразованной точки:

$$K_{p'} = r K_p r^T + J_p K_q J_p^T.$$

Первое слагаемое, перенос шумов изменения самой точки, описывает перенос собственных погрешностей измерения точки (шум дальности и углов); второе, «глобальная» ошибка регистрации, отражает влияние неточности параметров трансформации (смещений и углов поворота), возникающих при регистрации облаков точек. Данная формула описывает, как меняется неопределенность координат точки при переходе из локальной системы сканера в общую систему координат после регистрации (сшивки) облака.

Опираясь на исследования в области трехмерного моделирования [23] и анализ точности НЛС, было предложено разделить показатели качества на три уровня: *A* – метрологические характеристики облака/регистрации, *B* – качество геометрических примитивов (плоскости, ребра, оси), *C* – качество пространственных данных объекта (контуры, модели помещений/этажей, объемы). Был выполнен предрасчет точности для показателей качества.

Показатель качества *A* (метрология облака/регистрации):

1. σ_{plane} для фасадов/помещений $\leq 0,003 - 0,005$ м при $R \leq 30$ м.

2. СКО регистрации координат точек между стоянками: $\leq 0,006$ м.

3. Максимальный локальный перекос на длинных коридорах/фасадах: $\leq 0,01$ м на 30 м (контролируется привязкой к опорной сети).

Показатель качества *B* (качество геометрических примитивов):

1. СКО положения плоскости стен/межквартирных перегородок: $\leq 0,005$ м.

2. СКО положения кромок фасада после детектирования и обобщения: $\leq 0,01$ м.

3. СКО положения характерных точек (углы, откосы, простенки): $\leq 0,01$ м.

Показатель качества *C* (качество пространственных данных объекта):

1. Погрешность контура помещения $\leq 0,01$ м.

2. Погрешность высотных отметок (например, уровни перекрытий, подоконники, парапеты) $\leq 0,002$ м.

3. СКО объема 3D-модели, $\leq 2-3\%$.

Такие нормы обеспечивают требуемую точность для последующей регистрации прав и ограничений в 3D-кадастре [10–12]. Аналогичные выводы приведены в работе [13].

Интеграция НЛС в трехмерный кадастр была представлена в виде следующих процессов:

1. Получение пространственных данных для построения 3D-моделей с применением НЛС.

2. Формализация «пространственных характеристик» 3D-объектов (иерархия «здание – часть здания – помещение – технический объем»).

3. Хранение/отображение 3D-моделей в системе кадастра (НСПД) и их правовых характеристик.

Был рассмотрен пример расчета параметров НЛС для 3D-кадастровой съемки на урбанизированной территории. Объект – жилой дом, 9 этажей, длина фасада – 42 м, высота – 27 м, глубина двора – 18 м. Требуется создать 3D-модель фасадов и внутренних помещений первого этажа для целей трехмерного кадастрового учета. В рамках исследования было предложено использовать лазерный сканер средней точности (погрешность дальности $\sigma_r = 0,002$ м, угловая точность $\sigma_\theta = 60''$).

Фасад длиной 42 м и высотой 27 м покрывается при расстоянии сканирования $R = 25$ м. Чтобы обеспечить перекрытие не менее 40%, требуется не менее четырех стоянок на фасад (с базисом 12 м). Внутри двора достаточно трех стоянок на продольный ряд с перекрытием 30%. Итого 7 стоянок для фасада и 4 для помещений, 11 стоянок. Схема размещения (рисунок) стоянок S1–S4 вдоль главного фасада через 12 м, S5–S7 во дворе, S8–S11 внутри помещений.

Минимальная деталь – толщина пропстенка/наличника $\delta = 0,0015$ м. На расстоянии $R = 25$ м шаг между соседними лучами:

$$s = R \cdot \Delta\theta.$$

Критерий Найквиста:

$$\Delta\theta \leq \frac{0,0015}{2 \cdot 25} = 0,0003 \text{ рад} = 0,017^\circ$$

Был принят режим сканирования с угловым шагом $0,02^\circ$, что соответствует «среднеплотной» съемке.

Был рассмотрен случай, когда угол наклона $\varphi = 0$.

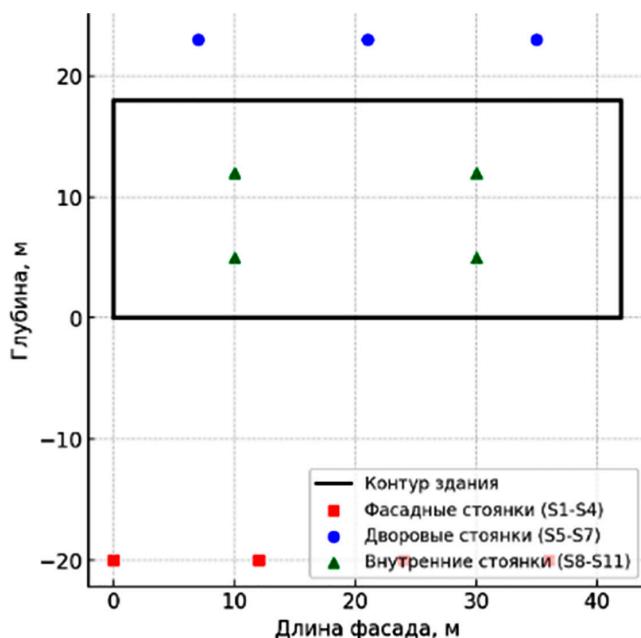


Схема размещения стоянок сканера для фасада, двора и помещений здания
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Оценка точности пространственных координат:

$$\sigma_x^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2,$$

$$\sigma_x = 0,0021 \text{ м.}$$

$$\sigma_y^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2,$$

$$\sigma_y = 0,0021 \text{ м.}$$

$$\sigma_z^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2,$$

$$\sigma_z = 0,0021 \text{ м.}$$

Таким образом, ожидаемая точность положения единичной точки – $\leq 0,003$ м.

Для проверки качества после обработки выполнено следующее:

- Рассчитана $\sigma_{plane} = 0,004$ мм на шести участках фасада.

- Рассчитана СКО трансформации по пяти целям: 0,006 м.

- Выполнено сравнение результатов тахеометрической съемки на 12 контрольных точках по фасаду, среднее расхождение составило 0,007 м, максимальное – 0,009 м.

Таким образом, исходя из проведенного анализа и ранних выводах о необходимости повышения точности исходной геодезической основы урбанизированных территорий был предложен следующий регламент (для городских объектов при расстояниях до 30 м и приборах средней точности/высокоточных):

При планировании съемки НЛС для целей трехмерного кадастра было рекомендовано устанавливать следующие нормативные значения:

- Дальность $R \leq 0,03$ м на фасадах; $R \leq 20$ м в помещениях.

- Угловой шаг $\Delta\theta = 0,02^\circ$, при наименьшей детали съемки 0,0015 м.

- Перекрытия между стоянками: $\geq 30\%$ (в помещении) и $\geq 40\%$ (фасады со сложной архитектурой).

Для контроля качества съемки, следующие нормативные значения:

- $\sigma_{plane} \leq 0,005$ м на контрольных плоскостях.

- СКО регистрации трансформации между станциями $\leq 0,006$ м.

- СКО положения точек $\leq 0,01$ м.

При обработке полученных данных и подготовке модели объекта было рекомендовано выполнять топологическую проверку 3D-объектов (замкнутость, отсутствие самопересечений).

Результаты исследования и их обсуждение

Для обеспечения достоверности трехмерных кадастровых данных было предложено установить следующие предельные нормативные значения точности в зависимости от пространственного положения и функционального типа объекта недвижимости.

Таблица 1

Рекомендуемые значения средних квадратических ошибок координат конструктивных элементов объектов недвижимости

Категория объекта	Средняя квадратическая ошибка планового положения, м	Средняя квадратическая ошибка высотного положения, м
Здания и сооружения (надземная часть)	$\leq 0,03$	$\leq 0,02$
Подземные сооружения, тоннели, подвалы	$\leq 0,05$	$\leq 0,03$
Помещения и этажные контуры	$\leq 0,02$	$\leq 0,01$
Архитектурные элементы (балконы, козырьки и др.)	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Рекомендуемые параметры выполнения НЛС

Параметры	Рекомендуемое значение
Максимальная рабочая дальность сканирования	≤ 30 м
Угловое разрешение сканирования	$\leq 0,02^\circ$
Точность измерения дальности (σ)	$\leq 0,003$ м
Средняя плотность облака точек на объекте	≥ 1500 точек/ m^2
Средняя погрешность регистрации (стыковки) облаков	$\leq 0,006$ м
Количество станций сканирования для одного здания	не менее 6

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Данное разделение обусловлено особенностями геометрии объектов и их функциональной ролью в кадастре. Для объектов, характеризующихся сложной пространственной структурой, приоритетное значение приобретает точность высотного положения, поскольку даже незначительные ошибки по высоте (более 0,2–0,3 м) приводят к наложению трехмерных границ помещений и инженерных коммуникаций при формировании единого кадастрового слоя (табл. 1).

Для реализации вышеуказанных требований к точности было предложено устанавливать следующие параметры НЛС при проведении 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях (табл. 2).

Заключение

Проведенные исследования позволили сформировать научно обоснованные требования к точности и параметрам выполнения 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях. Обоснованы требования применения наземного лазерного сканирования с оптимизированными параметрами измерений и строгими критериями оценки достоверности пространственных данных.

По результатам эксперимента были сделаны выводы, что при дальности сканирования не более 30 м, угловом разрешении $\leq 0,02^\circ$, плотности облака точек ≥ 1500 точек/ m^2 и средней квадратической ошибки регистрации не более 0,006 м достигается пространственная точность положения точек $\sigma_{x,y,z} \leq 0,021$ м.

Были обоснованы количественные зависимости между параметрами съемки (дальностью, угловым шагом, плотностью точек) и точностью 3D-моделей.

Список литературы

1. Алтынов А.Е., Снежко И.И. Экономическое обоснование необходимой точности моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. 2014. № 1. С. 38–41. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2014_1_38-41 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2014-883-1-38-41.
2. Пархоменко Д.В., Пархоменко И.В. Лазерное сканирование в государственном кадастре недвижимости: технологические и правовые аспекты // Вестник СГУГиТ. 2016. Вып. 1 (33). С. 114–124. URL: https://vestnik.sgugit.ru/upload/vestnik/sborniki/2016/331_2016_rus.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
3. Горобцов С.Р. Применение 3D-технологий для корректного учета объектов недвижимости // Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»,

- «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015». Новосибирск: СГУГиТ, Т. 3. С. 127–133. URL: <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2015/Недропользование.-Горное-дело.-Направлени-я-и-технологии-поиска-Т.3.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
4. Шарафутдинова А.А., Брынь М.Я. Требования к точности наземного лазерного сканирования для решения инженерно-геодезических задач с помощью цифрового информационного моделирования // Геодезия и картография. 2021. № 8. С. 2–12. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2021_8_2-12 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2021-974-8-2-12.
5. Афонин Д.А., Брынь М.Я., Толстов Е.Г. Проектирование геометрических параметров наземного лазерного сканирования при контроле деформаций зданий и сооружений в условиях плотной застройки // Геодезия и картография. 2013. № 2. С. 2–7. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2013_2_2-7 (дата обращения: 18.12.2025).
6. Ознамец В.В. Ситуационное решение задачи пространственного размещения // Геодезия и картография. 2018. № 9. С. 45–51. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2018_9_45-51 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-45-51.
7. Ознамец В.В. Содержание геодезического обеспечения // Геодезия и картография. 2020. № 1. С. 2–6. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2020_1_2-6 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2020-955-1-2-6.
8. Аврунин Е.И., Гиннитов А.И. Концептуальный подход к геодезическому обеспечению 3D-кадастра // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25. № 34. С. 152–158. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-152-158. EDN: OJLOXM.
9. Аврунин Е.И., Гиннитов А.И. Технологическая схема создания геодезического обеспечения для целей трехмерного кадастра недвижимости // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. URL: <https://sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2022/tom-3/049-055.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
10. Аврунин Е.И. Разработка системы нормативных допусков при создании геодезического обоснования для выполнения кадастровых работ в формате 3D // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2023. Т. 67. № 3. С. 16–26. URL: https://www.miigaik.ru/journal/archive/2023/2023_67_3_RU/GiA-2023-020.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
11. Алтынцев М.А., Чернов А.В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. 2018. № 9. С. 52–63. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2018_9_52-63?ysclid=mjhe2mrzt6490669849 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63.
12. Чернов А.В., Горобцов С.Р., Алтынцев М.А., Харазян А.А., Гоголев Д.В. Анализ методов получения и обработки данных для формирования 3D-модели генерального плана объекта недвижимости // Геодезия и картография. 2024. № 4. С. 30–40. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2024_4_30-40 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1006-4-30-40.
13. Харазян А.А., Чернов А.В. Место BIM-модели генерального плана объекта недвижимости в информационной структуре Единого государственного реестра недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28. № 6. URL: <https://vestnik.sgugit.ru/arkhiv/mesto-bim-modeli-generalnogo-plana-obekta-nedvizhimosti-v-informatsionnoy-strukture-edinogo-gosudars/> (дата обращения: 18.12.2025).
14. ISO 19152:2024 Land Administration Domain Model (LADM). Geneva, 2024. 56 p. URL: <https://www.iso.org/standard/81263.html> (дата обращения: 18.12.2025).
15. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council (14 March 2007) establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union, 2007. L108: 1–14. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj/eng> (дата обращения: 18.12.2025).
16. Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182661/ (дата обращения: 18.12.2025).
17. ГОСТ Р 70689-2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Общие требования к проведению работ. М.: ФАУ «РОСДОРНИЙ», 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302590894> (дата обращения: 18.12.2025).
18. Нехин С.С., Рубенок А.Н., Бабашкин Н.М., Ковров А.А. Техническое регулирование процессов лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2025. № 10. С. 45–54. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2025_10_45-54?ysclid=mjhe5qg7am600420819 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1024-10-45-54.
19. Шокер Х.М., Мустафин М.Г. Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия // Геодезия и картография. 2021. № 2. С. 2–10. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2021_2_2-10?ysclid=mjhe6z0eu4287769882 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.
20. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Самарин С.В., Беспятчук Д.А. Методика использования воздушного лазерного сканирования и нейросетевых технологий для обеспечения достоверными пространственными данными кадастра недвижимости // Геодезия и картография. 2025. № 6. С. 54–63. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2025_6_54-63?ysclid=mjhe7y0f7k792932874 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1020-6-54-63.
21. Luhmann T., Robson S. Laser Scanning for 3D Surveying. Berlin: Wichmann, 2011. 421 p. URL: https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/oldenburg_2004_2.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
22. Гура Д.А., Ващенко Д.А., Беспятчук Д.А., Самарин С.В., Пшицаток С.К. Перспективы применения воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для обеспечения пространственными данными 3D-кадастра // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 3. С. 179–183. URL: <https://panor.ru/articles/perspektivy-primeneniya-vozdushnogo-lazernogo-skanirovaniya-i-aerofotosemki-dlya-obespecheniya-prostranstvennymi-dannymi-3d-kadastra/91400.html#> (дата обращения: 18.12.2025).
23. Медведев В.И., Райкова Л.С. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 2 (9). С. 10–31. URL: [https://cadgis.ru/2017/9/CADGIS-2017-2\(9\)-02.Medvedev-Raijkova\(LIDAR-processing-apps\).pdf](https://cadgis.ru/2017/9/CADGIS-2017-2(9)-02.Medvedev-Raijkova(LIDAR-processing-apps).pdf) (дата обращения: 18.12.2025).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.