



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 9 2024



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 9 2024



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

Технический редактор

Доронкина Е.Н.

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

Корректор

Галенкина Е.С.,

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

ISSN 1681-7494

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

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

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,775

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,368

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.09.2024

Дата выхода номера

31.10.2024

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

7,0

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2024/9

Распространяется по свободной цене

Подписной индекс в электронном каталоге «Почта России»: П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

Technical editor

Doronkina E.N.

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Corrector

Galenkina E.S.,

Dudkina N.A.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

EDITORIAL BOARD

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

ISSN 1681-7494

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

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

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

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

Periodicity	12 issues per year
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47
Editorial and publisher address	440026, Penza, st. Lermontov, 3
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5
E-mail	edition@rae.ru
Signed for print	30.09.2024
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	31.10.2024
Conditionally printed sheets	7,0
Order	YCE 2024/9

Distribution at a free price

Subscription index in the Russian Post electronic catalog: P7816

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА В РАЙОНЕ СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВОВ

Баклагин В.Н., Лукина Ю.Н. 6

ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ В АГРОЛАНДШАФТАХ НА ЮГО- ВОСТОКЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Гальченко А.С. 11

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В УСТЬЕВУЮ ОБЛАСТЬ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ (МОДЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

Котова Е.И., Лохов А.С., Коробов В.Б. 19

РЕГИОНАЛЬНЫЕ НОРМАТИВЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН)

Крылов П.М. 26

ОЦЕНКА ШУМОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАБЕРЕЖНЫХ КАЗАНИ И ПЕРМИ

Сулимов А.Д. 31

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

СТАТЬЯ

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД МАЛЫХ РЕК ПРИИШИМЬЯ

Шуплецова П.А., Белоусова Ю.О., Ларин С.И., Ларина Н.С. 37

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

СТАТЬИ

К КОРРЕКТНОСТИ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В РУСЛОВЫХ ПОТОКАХ

Лепихин А.П., Синцова Т.Н. 45

ПРОБЛЕМЫ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСПЛОШНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Розенберг В.В., Гунар А.Ю. 51

CONTENTS

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

LONG-TERM VARIABILITY OF ICE CONCENTRATION
IN THE SOLOVETSKY ISLANDS AREA

Baklagin V.N., Lukina Yu.N. 6

WIND EROSION OF SOIL IN AGROLANDSCAPES
IN THE SOUTHEAST OF THE TOMSK REGION:
INTENSITY AND ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL ASPECTS

Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Galchenko A.S. 11

SPATIAL VARIABILITY OF HEAVY METAL INPUT
THROUGH THE ATMOSPHERE TO THE NORTHERN
DVINA ESTUARY (MODEL DATA)

Kotova E.I., Lokhov A.S., Korobov V.B. 19

REGIONAL NORMS OF TOWN-PLANNING DESIGN
IN TRANSPORT-GEOGRAPHICAL STUDIES
(ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

Krylov P.M. 26

ASSESSMENT OF NOISE POLLUTION OF KAZAN AND
PERM EMBANKMENTS

Sulimov A.D. 31

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

ARTICLE

FEATURES OF THE PRIISHIMYE SMALL RIVERS
WATERS HYDROCHEMICAL COMPOSITION

Shupletsova P.A., Belousova Yu.O., Larin S.I., Larina N.S. 37

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

ARTICLES

TO THE CORRECTNESS OF ESTIMATING THE SIZES
OF SUSPENDED PARTICLES IN CHANNEL FLOWS

Lepikhin A.P., Sintsova T.N. 45

PROBLEMS OF PIPELINE CONSTRUCTION IN SPORADIC
PERMAFROST

Rozenberg V.V., Gunar A.Yu. 51

СТАТЬИ

УДК 551.467

DOI 10.17513/use.38303

**МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА
В РАЙОНЕ СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВОВ****Баклагин В.Н., Лукина Ю.Н.***Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение
ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр
Российской академии наук», Петрозаводск, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Целью исследования является исследование ледового режима акватории Белого моря в районе Соловецких островов (Онежский залив), которое заключается в анализе данных спутниковых наблюдений за ледовой обстановкой за 1979–2021 гг. Информация о протекании ледового режима в районе Онежского залива Белого моря имеет весьма значимый прикладной характер – может служить информационной основой при организации туристического периода. Это в существенной мере повысит экономический эффект от туризма в регионе и позволит значительно увеличить туристический трафик на Соловки благодаря оптимизации морских перевозок. В качестве информационной основы для анализа многолетней динамики протекания ледового режима в районе Соловецких островов были использованы спутниковые наблюдения микроволновых датчиков. Эти данные фиксируются спутниками с ноября 1978 г. Национальный центр данных по льду и снегу США NSIDC выполняет обработку и дешифрирование этих данных и предоставляет их пользователям в виде набора G02135, содержащего файлы-NETCDF, содержащие информацию о ледовой обстановке в пространственно-временном разрешении. Также в качестве альтернативы данным NSIDC использованы схожие данные о сплоченности льда, полученные в университете в Бремене, – набор AMSR-E/AMSR2. Результаты показали, что за рассматриваемый период 1979–2021 гг. многолетние изменения сплоченности льда имеют статистически значимый (при уровне значимости 0,05) отрицательный тренд $-0,22 \pm 0,11\%$ год⁻¹. Формирование ледяного покрова в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября и заканчивается в середине июня. Установлено, что безледоставный период рассматриваемого района меньше (на 10–20 дней), чем для других районов Белого моря. Также определено, что результаты сравнительного анализа данных микроволновых датчиков, объединенных в наборе G02135 NSIDC, и микроволновых датчиков AMSR-E/AMSR2 в значительной степени согласуются между собой.

Ключевые слова: Соловецкие острова, Онежский залив, Белое море, ледовый режим, сплоченность льда, спутниковые данные

Работа выполнена в рамках государственного задания FMEN-2024-0016.

**LONG-TERM VARIABILITY OF ICE CONCENTRATION
IN THE SOLOVETSKY ISLANDS AREA****Baklagin V.N., Lukina Yu.N.***Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

The aim of the work is to study the ice regime of the White Sea waters in the Solovetsky Islands area (Onega Bay), which consists in the analysis of satellite observations of the ice situation for 1979–2021. Information on the ice regime in the Onega Bay area of the White Sea is of significant applied nature and can serve as an information basis for organizing the tourist period. This will significantly increase the economic effect of tourism in the region and will significantly increase tourist traffic to Solovki due to the optimization of sea transportation. Satellite observations of microwave sensors were used as an information basis for the analysis of long-term dynamics of the ice regime in the Solovetsky Islands area. These data have been recorded by satellites since November 1978. The National Ice and Snow Data Center NSIDC USA processes and deciphers these data and provides them to users as a set of G02135 containing NETCDF files containing information on the ice situation in spatio-temporal resolution. Also, as an alternative to the NSIDC data, similar data on ice concentration obtained at the University of Bremen – the AMSR-E/AMSR2 were used. The results showed that for the considered period of 1979–2021, long-term changes in ice concentration have a statistically significant (at a significance level of 0.05) negative trend of $-0,22 \pm 0,11\%$ year⁻¹. The formation of ice cover in the Solovetsky Islands area begins already in late September and ends in mid-June. It was found that the ice-free period in the considered area is shorter (by 10–20 days) than for other areas of the White Sea. It was also determined that the results of a comparative analysis of the microwave sensor data, combined in the G02135 NSIDC set, and the AMSR-E/AMSR2 microwave sensors are largely consistent with each other.

Keywords: Solovetsky Islands, Onega Bay, White Sea, ice regime, ice concentration, satellite data

The work was carried out within the framework of the state assignment FMEN-2024-0016.

Введение

В данной работе объектом исследования являются Соловецкие острова (Соловки). Они расположены в Онежском заливе Белого моря. Архипелаг состоит из шести

крупных и около ста мелких островов. Площадь всего архипелага составляет более чем 300 км². В настоящее время территория Соловецкого архипелага является заповедным участком. Начиная с 1992 г. Соловец-

кие острова включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, а в 1995 г. отнесены к особо ценным объектам природного и исторического наследия России [1].

С 2001 по 2009 г. общий объем туристического потока на Соловецкие острова стабильно возрастал – с 17 тыс. до 50 тыс. туристов в год. Однако в 2011 г. количество туристов резко сократилось до 30 тыс. чел. [2], это связано прежде всего с проблемой организации морского транспорта. Кроме того, кораблекрушение теплохода «Булгария» в 2011 г. способствовало ряду барьеров при планировании транспортировки людей и грузов судами. Это вызвало определенные неудобства при посещении острова туристами, что отразилось и на посещаемости. Следует отметить, что продолжительность туристического сезона на Соловках составляет четыре месяца, и сроки сезона неизбежно связаны с навигационным периодом, планирование которого напрямую зависит от протекания ледового режима в районе Онежского залива Белого моря. Поэтому следует отметить, что информация о протекании ледового режима в районе Онежского залива Белого моря имеет весьма значимый прикладной характер – может служить информационной основой при организации туристического периода. Это в существенной мере повысит экономический эффект от туризма в регионе и позволит значительно увеличить туристический трафик на Соловки благодаря оптимизации морских перевозок.

Ввиду того, что Белое море является объектом промышленно-производственного, торгового и туристического назначения, ледовая обстановка на акватории моря всегда представляла особый интерес для исследователей [3, с. 45; 4, с. 10; 5, с. 121]. Наиболее полные результаты о ледовой ситуации, собранные с береговых станций и исследовательских судов, представлены в фундаментальной работе [3, с. 12], которая опубликована издательством государственного Океанографического института СССР. Помимо контактных методов наблюдений в работе [3, с. 33] частично использованы и дистанционные методы наблюдения – авиаразведки. Позже, в 2005 г., в монографии [4, с. 88] были опубликованы результаты анализа спутниковых данных о ледовой ситуации на Белом море за многолетний период – 21 год и получены общие тенденции к изменчивости среднегодовой сплоченности льда на Белом море. Авторы указывают на то, что для всех пяти районов

Белого моря, а также в целом для всей акватории обнаружены снижения сплоченности льда на $8,1\% \times \text{декада}^{-1}$ [4, с. 88]. Однако за последние 7 лет (1992–1999) выявлено незначительное увеличение площадей ледяного покрова.

Вышеперечисленные исследования демонстрируют, что протекание ледового режима на Белом море терпит значительные изменения в последние десятилетия, что также оказывает влияние на формирование сроков навигационного периода, это же относится и к акватории Онежского залива, который представляет особый интерес, поскольку имеет туристическое значение.

Таким образом, **целью исследования** является получение статистических данных и закономерностей многолетней изменчивости сплоченности льда Белого моря в районе Соловецких островов (Онежского залива) с помощью анализа данных о ледовой ситуации, полученных спутниковыми наблюдениями за 1979–2021 гг.

Материалы и методы исследования

Для получения данных о ледовом режиме водоемов могут использоваться различные методы: визуальный (с постов ГМС), аэрофотосъемки, спутниковые наблюдения, дроны и др. Однако в настоящее время наиболее полную и регулярную информацию о ледовом состоянии водоемов могут дать только спутниковые методы. В связи с этим в работе использованы именно данные спутниковых наблюдений, в частности датчиков микроволнового пассивного зондирования. Эти данные собраны, дешифрованы и структурированы Национальным центром данных по снегу и льду США NSIDC и представлены в виде набора данных G02135 с пространственным разрешением 25 км, который распространяется свободно и находится в открытом доступе. Преимущества данных набора G02135 заключаются в охвате наиболее продолжительного временного периода относительно других аналогичных данных – с 1978 г. по настоящее время. Поэтому в работах [6; 7] отмечается целесообразность применимости данных набора G02135 для оценки многолетних тенденций изменчивости протекания ледового режима на морях арктической зоны. Однако следует отметить, что последние исследования [8–10] по критическому анализу использования различных наборов спутниковых данных показали, что в некоторых случаях алгоритмы, которые используются для дешифрования получен-

ной с датчиков информации, могут давать значительные ошибки (вплоть до 45%). Особенно большие ошибки возникают, когда происходят значительные изменения (динамичные) площадей ледовых образований – в периоды осеннего формирования льда и весеннего таяния. Авторы выполнили анализ нескольких алгоритмов дешифрирования (4 группы алгоритмов, всего 10 алгоритмов) и сделали вывод о том, что датчики микроволнового пассивного зондирования допускают ошибки при определении сплоченности льда в случае, когда вода в процессе таяния льда располагается на его поверхности.

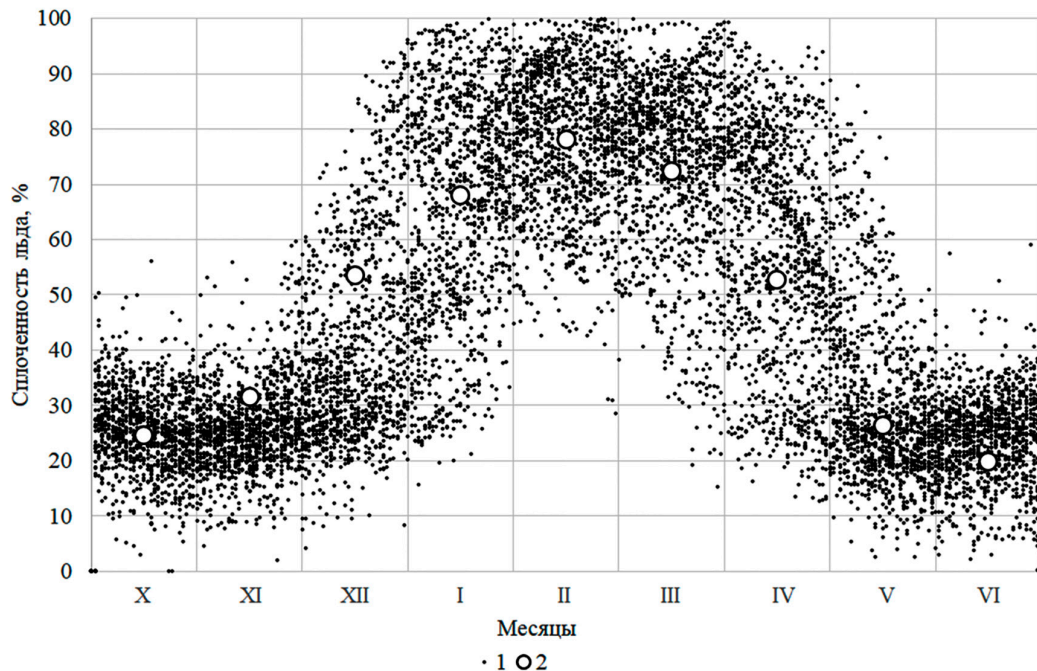
В связи с этим следует отметить, что хорошей альтернативой набору данных G02135, представленных NSIDC, является набор данных AMSR-E/AMSR2 – данные микроволновых радиометров AMSR-E/AMSR2, используемых в разные периоды времени на бортах различных спутников (Aqua, GCOM-W1 JAXA) для формирования общего ряда данных. Данные AMSR-E/AMSR2 имеют пространственное разрешение 3,125 км и охват временного периода с 2002 г. по настоящее время. При этом в качестве алгоритма дешифрирования для данных AMSR-E/AMSR2 использован усовершенствованный алгоритм ASI [11], который в сравнении с натурными данными, полученными в ходе экспедиционных ис-

следований, показал незначительные расхождения в результатах (7,5–25%). Для данных G02135 использовался алгоритм NASA Team. Набор данных AMSR-E/AMSR2 сформирован в университете в Бремене.

Таким образом, в работе использованы два набора данных (G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2) для получения пространственно-временных характеристик ледового режима на Белом море в районе Соловецких островов (Онежский залив). При этом набор данных AMSR-E/AMSR2 использован в качестве контролирующего (более достоверного) временного ряда для сравнения и оценки достоверности набора данных G02135.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно спутниковым данным формирование ледовых образований на Белом море в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября, а полное очищение ото льда происходит в середине июня. По данным NSIDC G02135 установлено, что статистически за рассматриваемый период лет максимальное значение сплоченности во время формирования ледяного покрова составляет 0,78 – это значение достигается в середине февраля, в то время когда на акватории Белого моря устанавливается практически полный ледостав (рисунок).



Хронологический ход сплоченности льда в Онежском заливе Белого моря за 1978–2021 гг. по данным G02135: 1 – фактические данные, 2 – осредненные за рассматриваемый период среднемесячные значения

Наибольшая сплоченность льда в районе Онежского залива достигается с января по март (табл. 1). В апреле в результате ветровых явлений ледяной покров начинает разрушаться и частично выносится в открытую часть Белого моря. В мае и в начале июне остатки льда подвергаются таянию, а затем лед полностью разрушается на акватории Онежского залива. Отмечается, что характерные сроки ледового режима на акватории Онежского залива сдвинуты относительно сроков, действующих для всей акватории Белого моря: начало формирования льда – в сторону ранних дат (6–7 дней), а разрушение льда – в сторону поздних дат (5–12 дней). Таким образом продолжительность периода ледовых явлений на акватории Онежского залива больше (на 10–20 дней), чем для других районов Белого моря.

Таблица 1

Среднемесячные значения сплоченности льда в Онежском заливе Белого моря по данным G02135, усредненные за период 1978–2021 гг.

Месяцы	Сплоченность льда
Январь	0,68
Февраль	0,78
Март	0,72
Апрель	0,52
Май	0,26
Июнь	0,19
Июль	–
Август	–
Сентябрь	0,08
Октябрь	0,25
Ноябрь	0,32
Декабрь	0,53

Регрессионный анализ (табл. 2) установил, что значение среднегодовой сплоченности льда на акватории Онежского залива Белого моря испытывает тенденции к сокращению на 2,2% за 10 лет. Это свидетельствует

о том, что с каждым годом площади, занимаемые льдом в период ледовых явлений, сокращаются, что соответствует тенденции глобального потепления. Следует отметить, что аналогичные тенденции выделены и для всей акватории Белого моря [12].

Результаты сравнительного анализа данных двух наборов G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2 показали, что разница (абсолютное отклонение) составляет 6,02% при расчете сплоченности льда на акватории Онежском заливе за 2002–2020 гг.

Наибольшие значения за период ледовых явлений (гидрологический год) абсолютного отклонения наблюдались в 2008 г. (7,35%), наименьшие – в 2016 г. (3,39%). Отклонения в результатах интерпретации спутниковых данных набора G02135 NSIDC, вероятнее всего, объясняются некорректной классификацией однородных участков (вода/лед) алгоритмом NASA Team в тот период времени, когда происходит высокая динамика изменения площадей ледовых образований. Такая ситуация происходит для частей водоема, которые имеют продолговатую узкую форму с изрезанной береговой линией, из-за чего пространственное разрешение данных G02135 NSIDC не позволяет в полной мере описывать морфологию таких участков, как, например, Онежский залив.

При этом большое количество участков на границе раздела вода/суша неверно классифицировано в силу недостаточного пространственного разрешения, откуда и возникают ошибки, связанные с определением льда на спутниковых снимках. Однако сравнительный анализ линейных трендов, полученных по обоим наборам данных, показал незначительные расхождения в их определении (не более 2%), что доказывает тот факт, что данные G02135 NSIDC вполне целесообразно использовать для определения статистических характеристик изменчивости ледового режима, в частности, Онежского залива Белого моря, что также подтверждается в работе [12].

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа данных G02135

Величина тренда, %×год ⁻¹	Доверительный интервал, %×год ⁻¹	Регрессионная и дисперсионная статистика модели				
		Объясненная регрессией сумма квадратов (ESS), % ²	Сумма квадратов остатков (RSS), % ²	Коэффициент детерминации (R ²)	Значимость F	Число наблюдений (n)
-0,22	0,11	289,89	675,11	0,30	0,00017171	42

Заключение

В работе установлено, что по данным NSIDC G02135 в последние десятилетия (1979–2021 гг.) в Онежском заливе ежегодно происходит сокращение площадей ледовых образований со скоростью $-0,22 \pm 0,11\%$ год⁻¹. Данный факт согласуется с общепризнанной тенденцией уменьшения льда на акваториях водоемов в Арктике, что неразрывно связано с последствиями глобально потепления.

Формирование ледяного покрова в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября и заканчивается в середине июня. Вместе с тем установлено, что безледоставный период рассматриваемого района меньше (на 10–20 дней), чем для других частей Белого моря. Эти сведения можно использовать как информационную основу для открытия и закрытия навигационного периода и прокладки путей к Соловецким островам по водам Онежского залива Белого моря.

Сравнение двух наборов, G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2, показало незначительную разницу (абсолютное отклонение 6,02%) при расчетах сплоченности льда на акватории Онежского залива за 2002–2020 гг. И, несмотря на то, что данные G02135 NSIDC имеют значительные ошибки в определении сплоченности льда, особенно продолговатых участков акваторий водоемов с изрезанной береговой линией, доказано, что эти данные целесообразно использовать для определения статистических характеристик ледового режима в долговременном периоде и выполнять оценку изменчивости. Это может служить основой при выборе и использовании данных микроволновых датчиков для оценки закономерностей многолетней изменчивости сплоченности льда на акваториях морей Арктики.

Список литературы

1. Севастьянов Д.В. Арктический туризм в Баренцево-морском регионе: современное состояние и границы возможного // Арктика и Север. 2020. № 39. С. 26–36. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.26.
2. Постановление Правительства Архангельской области от 24.04.2012 № 153 «Об утверждении долгосрочной целевой программы Архангельской области «Развитие инфраструктуры Соловецкого архипелага на 2012–2014 годы» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.regionz.ru/index.php?ds=1708043> (дата обращения: 06.07.2024).
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Вып. 1 / Под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 241 с.
4. Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Pettersson L.H. White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Chichester, UK: Springer-Praxis, 2005. 463 p. DOI: 10.1007/3-540-27695-5.
5. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
6. Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симанина Т.Е. Алгоритм поиска моментов смены тренда во временных рядах метеорологических величин // Вестник ТГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. Вып. 3. С. 74–89. DOI: 10.26456/vtprmk541.
7. Шалина Е.В. Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 201–213.
8. Заболотских Е.В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 128–151. DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
9. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 3261–3307. DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
10. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison for Arctic summer conditions // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 2469–2493. DOI: 10.5194/tc-14-2469-2020.
11. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. C02S03. DOI: 10.1029/2005JC003384.
12. Баклагин В.Н. Многолетняя изменчивость сплоченности льда Белого моря по спутниковым данным // Лёд и снег. 2022. Т. 62 (4). С. 579–590. DOI: 10.31857/S2076673422040153.

УДК 911.2:551.4
DOI 10.17513/use.38304

ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ В АГРОЛАНДШАФТАХ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Гальченко А.С.

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
Томск, e-mail: zojkwas@rambler.ru*

Цель исследования – выявление видов проявления дефляции почв и оценка интенсивности ее развития в агроландшафтах бассейна р. Басандайки, расположенного на юго-востоке зоны подтайги Западной Сибири, а также анализ содержания химических элементов в твердых атмосферных выпадениях. Для оценки интенсивности развития дефляции почв были использованы пассивные пылеуловители, размещенные на различных ключевых участках агроландшафта в бассейне р. Басандайки юго-востока Томской области. Анализ данных полевых наблюдений позволил выявить три вида проявления ветровой эрозии: зимнее выдувание почв, дефляция во время снеготаяния, местная ветровая эрозия – и оценить ее интенсивность за период с 1989 по 2023 г. В зависимости от агрофона и режима ветра дефляция изменялась от 1–2 до 5–8 т/га. Наиболее активно ветровая эрозия почв проявлялась в последнее десятилетие: с 2014 по 2023 г. Наблюдения показали, что дефляция почв в холодный период года активнее развивается на наветренных и выпуклых формах рельефа пашни исследуемого района, где образуются очаги эрозии, достигающие по площади около 4 га. Ветровая эрозия приводит к механической миграции химических элементов. Макро- и микроэлементы, в том числе имеющие первостепенное значение для сельскохозяйственных растений (кальций, магний, фосфор, калий), перемещаются из очагов дефляции на разные расстояния. Основная масса твердого осадка пылеуловителей исследуемой территории имеет местное происхождение, об этом свидетельствует схожесть его гранулометрического и химического состава с почвами пашни. В теплое время года возможен приток атмосферных выпадений регионального переноса.

Ключевые слова: ветровая эрозия, интенсивность дефляции, агроландшафты, миграция элементов, Томская область

WIND EROSION OF SOIL IN AGROLANDSCAPES IN THE SOUTHEAST OF THE TOMSK REGION: INTENSITY AND ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL ASPECTS

Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Galchenko A.S.

National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: zojkwas@rambler.ru

The purpose of the study is to identify the types of manifestations of soil deflation and assess the intensity of its development in the agricultural landscapes of the river basin. Basandaika, located in the southeast of the subtaiga zone of Western Siberia, as well as analysis of the content of chemical elements in solid atmospheric fallout. To assess the intensity of soil deflation, passive dust collectors were used, located in various key areas of the agricultural landscape in the river basin. Basandaiki of the south-east of the Tomsk region. Analysis of field observation data made it possible to identify three forms of wind erosion: winter soil blowing, deflation during snowmelt, local wind erosion and to estimate its intensity for the period from 1989 to 2023. Depending on the agricultural background and wind conditions, deflation varied from 1–2 t/ha to 5–8 t/ha. Wind soil erosion has been most active in the last decade: from 2014 to 2023. Observations have shown that soil deflation in the cold period of the year develops more actively on windward and convex forms of arable land relief in the study area, where pockets of erosion are formed, reaching an area of about 4 hectares. As a result of wind erosion, mechanical migration of chemical elements occurs. Macroelements and microelements, including those of primary importance for agricultural plants: calcium, magnesium, phosphorus, potassium, move from deflation centers to different distances. The bulk of the solid sediment from dust collectors in the study area is of local origin, as evidenced by the similarity of its granulometric and chemical composition with arable soils. During the warm season, an influx of regional atmospheric fallout is possible.

Keywords: wind erosion, deflation intensity, agricultural landscapes, element migration, Tomsk region

Введение

В условиях современной цивилизации эрозия почв – одна из глобальных проблем окружающей среды и земледельцев многих стран [1, 2]. Водная и ветровая (дефляция) эрозии почв – опасные природные и природно-антропогенные процессы, приводящие к снижению ее плодородия,

осложнению социально-экономических и санитарно-экологических состояний территорий. Исследователи отмечают, что каждый год в России с пахотных угодий из-за водной и ветровой эрозии сносится свыше 500 млн т плодородной части почв, особенно ярко это проявляется там, где пахотные угодья расположены на склонах раз-

личной крутизны. Ежегодный ущерб от водной и ветровой эрозии в стране превышает 9,7 млрд долл. [3]. В докладе ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева отмечено, что на территории нашей страны «более 61 млн га сельскохозяйственных угодий относятся к дефляционно опасным и подверженным ветровой эрозии. Почвы с явным проявлением признаков дефляции занимают около 6%, а дефляционно опасные – 35% пашни страны. Около 7,5% почв естественных кормовых угодий страны также подвержены дефляции» [4, с. 9]. В.В. Звонков отмечал, что «теоретическим исследованиям ветровой эрозии земли (дефляции) до сих пор, за редким исключением, почти не уделялось внимание, хотя ее последствия нередко превосходили результаты водной эрозии» [5, с. 86]. Исследованию водной эрозии почв посвящены работы ряда ученых – М.С. Кузнецова, Г.П. Глазнова [2], В.В. Звонкова [5], М.Н. Заславского [6], Л.Ф. Литвина, В.Н. Голосова [7] и др. Но до настоящего времени география и интенсивность эрозионных процессов почвенного покрова на территории некоторых регионов России, в том числе в Западной Сибири, где дефляции подвержено не менее 25% [8] площади пашни, практически не изучены, поэтому актуальность детальных полевых исследований ветровой эрозии не вызывает сомнений.

Цель исследования – выявление видов проявления дефляции почв в агроландшафтах бассейна р. Басандайки, расположенного в юго-восточной части подтаежной зоны Западной Сибири в пределах Томь-Яйского междуречья, а также оценка интенсивности

развития ветровой эрозии и анализ содержания химических элементов в твердых атмосферных выпадениях из пылеуловителей по данным полевых наблюдений.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – агроландшафты бассейна р. Басандайки (рис. 1). Изучаемая территория характеризуется полого-увалистым рельефом с абсолютными высотами от 100 до 270 м. Сельскохозяйственные угодья расположены в основном на верхних частях склонов междуречья и выровненных участках исследуемого речного бассейна. Депрессии и балки междуречья заняты березово-осиновой растительностью с примесью сосны. Почвенный покров агроландшафтов представлен в основном серыми лесными разностями на лессовидных суглинках.

Ветровую эрозию в настоящее время изучают разными способами. Авторами для фиксирования и анализа аккумуляции выпадений из атмосферы были использованы два метода: атмогеохимический (в холодный период года (ХПГ)) и пылеуловителей (в течение всего года). Отбор проб снега для атмогеохимического анализа осуществлялся в последней декаде марта (на завершающем этапе ХПГ), по линиям опорных профилей ландшафтно-геоморфологических снегосъемок, заложенных с учетом элементов рельефа и ориентированных по направлениям ветропылевого переноса. Пробы снега отбирались не только с открытых участков сельхозугодий (пашни), но и в центре кедрового леса и лесополос исследуемой территории.

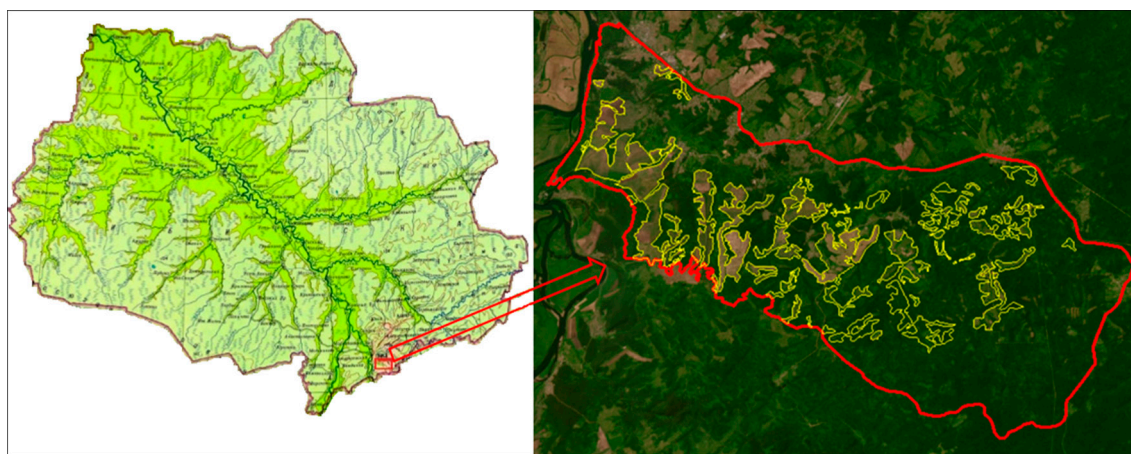


Рис. 1. Местоположение бассейна р. Басандайки в пределах Томь-Яйского междуречья на юго-востоке Томской области (с выделенными на снимке сельскохозяйственными землями)

Наиболее широко при изучении дефляции почв применяют также пылеуловители или пескоуловители различных типов. Для изучения ветровой эрозии в течение всего года авторами был использован простой и удобный метод устройства пылеуловителя, разработанный М.К. Рехейс из Геологической службы США [9]. В соответствии с этим методом в различных урочищах агроландшафтов на высоте 2 м были установлены емкости-пылеуловители. Высота установки пылеуловителей обусловлена тем, что большинство перемещаемых ветром частиц почвы (размерностью с песчинку и более) происходит до высоты 1–2 м, подъем частиц зависит от синоптических условий, скорости ветра, состояния поверхности почвы и растительности, покрывающей почву. В отличие от одноразового отбора снеговых проб, применяемого для атмогеохимического метода, образцы, собранные из пылеуловителей, позволяют анализировать эрозионные процессы как в холодный, так и в теплый периоды года.

Общее количество проб, собранных за многолетний период исследований, более 350, в том числе 149 образцов из толщи снега за период устойчивого залегания, 159 образцов с поверхности снега во время снеготаяния за разные промежутки времени и 50 проб из пылеуловителей. После сбора образцы подвергались тщательной обработке и различным анализам. В данной статье приведен анализ содержания химических элементов в пробах твердого (эолового) осадка пылеуловителей, определенный с помощью количественного ИСП-МС анализа в лаборатории центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета, аккредитованной для данных видов работ.

Необходимым условием развития дефляции почв является ветер, скорости которого достаточны для перемещения частиц. Анализ литературных источников о ветровом режиме исследуемой территории, проведенный авторами в [10, 11], и данных Авиационной метеорологической станции гражданской (АМСГ) Томск за период с 2006 по 2023 г. позволяет отнести южную и юго-восточную части Западно-Сибирской равнины к району сильного ветра. Скорости ветра на изучаемой территории в течение года достигают 25–34 м/с, ветер характеризуется порывистостью (турбулентностью): зимой и в переходные сезоны года порывистый ветер может наблюдаться в течение

10 ч и более, хотя в 30–60% случаев непрерывная продолжительность такого ветра не превышает 1 ч. Кроме того, раз в 6–10 лет возможно образование смерча, а в теплый период года в районе г. Томска отмечаются сухие шквалы. Они возникают при низкой влажности подоблачного слоя (27–42%), например в течение 1991–2003 гг. наблюдался 61 случай со шквалами, в 6,6% случаев из них – сухие шквалы, со скоростью ветра 15 м/с и более [10]. Преобладающие ветры на исследуемой территории – юго-западного и южного направлений. Интенсивная ветровая деятельность наблюдается преимущественно в переходные сезоны, что указывает на сезонную динамику и вариативность ветровой активности. Дефляция почв особенно интенсивно развивается при скоростях ветра, превышающих 10 м/с. Анализ данных по режиму ветра АМСГ Томск за 17-летний период (с 2006 по 2023 г.), проведенный авторами, показал значительные колебания дней с интенсивными ветрами: наименьшее количество дней со скоростью ветра, превышающей 10 м/с, было зафиксировано в 2013 г. – 75 дней, а в 2020 г. количество подобных дней составило 195, что является максимальным показателем. Количество дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с также различно: в 2016 г. наблюдалось 19 подобных дней, а в 2017 г. – 46 дней, что также является максимальным значением. Наибольшая максимальная скорость ветра за исследуемый период была зафиксирована весной (март – апрель) в 2011, 2014, 2015, 2020 гг. и достигала 25 м/с. Осенью такие скорости ветра наблюдаются преимущественно в октябре, особенно показательными были 2014 и 2018 гг.

Кроме размеров эродируемого поля и скоростей ветра на суммарную потерю почвы при дефляции оказывает влияние и гранулометрический состав почв. Изучение авторами гранулометрического состава почв и занимаемых ими пространств, показывает, что около 33% почв пашни региона относится к категории сильноподатливых к ветровой эрозии, а более 57% – среднеподатливые почвы [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Механизмы развития дефляции почв опубликованы в работах М.С. Кузнецова, Г.П. Глазунова [2], Г.А. Ларионова [13] и других исследователей. Виды дефляции зависят от ее внешних признаков таких как интенсивность, продолжительность и масштабы

территории. Многолетние авторские исследования позволили выделить на юго-востоке Томской области три вида дефляции: выдувание почвы зимой вместе со снегом; дефляция почв во время снеготаяния; повседневная или местная дефляция в теплый период года. Развитие каждого из названных видов дефляции имеет свои особенности. Наблюдения за интенсивностью развития дефляции почв проводились в два этапа: с 1988–1989 гг. по 2011–2012 гг., когда исследования осуществлялись только на основе атмогеохимического анализа за период устойчивого залегания снежного покрова и в период снеготаяния; и в период с 2013–2014 по 2023 г., когда изучение дефляции почв дополнилось наблюдениями в пылеуловителях.

Дефляция почв во время залегания устойчивого снежного покрова (СП). Наиболее интенсивное проявление зимней ветровой эрозии наблюдается в те годы, когда зима малоснежная и почва агроландшафтов не защищена от морозного выветривания. В таких условиях она иссушается, становится рыхлой, вплоть до глубины 5 см и более [5]. Под действием ветров снег сдувается с полей и уносит с собой верхние сухие почвенные фракции, перенося их на разные расстояния, в результате чего в сугробах на кромке лесополос исследуемой территории появляются прослойки снега с почвенными частицами (рис. 2, а). Ежегодные исследования авторов толщины СП показали, что

за последние 30 лет отмечалась значительная ее вариация: от 22 см до 85 см, средняя многолетняя – 58 см. Залегание снежного покрова в бассейне р. Басандайки неравномерное и зависит от микрорельефа, наличия участков леса, лесополос, режима ветров. Например, в сугробах у лесополос толщина СП достигает 1,5–2,4 м, на повышениях и наветренных склонах пашни мощность СП мала и составляет всего 30 см и менее, поэтому здесь чаще всего образуются дефляционные очаги (рис. 2, б), размеры которых изменяются от десятков квадратных сантиметров до 3–4 га. Зимнее выдувание почв – пространственно ограниченное явление, чаще всего оно проявляется в масштабах одного поля или двух соседних полей. За период наблюдений установлено, что наиболее интенсивно зимнее выдувание почв отмечается в мало- и среднеснежные зимы, когда агрофон представлен зябью. В такие годы в толще снега накапливалось наибольшее количество эолового наноса – примерно от 4,0 тыс. до 11,6 тыс. кг/га и отмечалось от 1 до 7 прослоек загрязненного снега, толщиной от 1–7 мм до 17 см (рис. 2, а). В случае сложного агрофона: зябь, всходы озимых, стерня, скошенный и не убранный лен – эоловые процессы развивались от слабых до умеренных, в толще снега и скапливалось от 2,0 до 140 г/м² пылеаэрозолей часто без визуально наблюдаемых загрязненных прослоек.

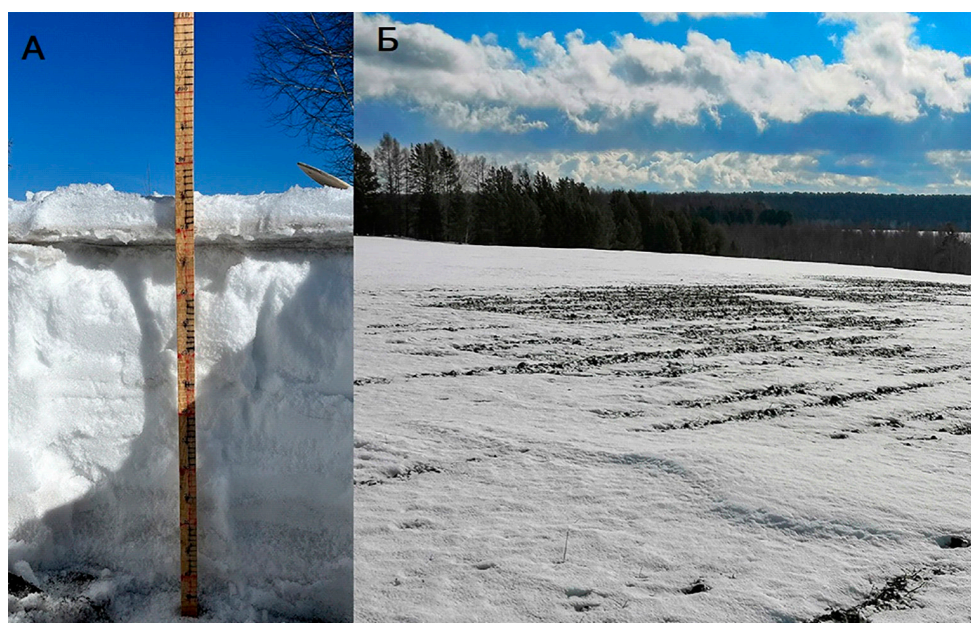


Рис. 2. Аккумулятивные и дефляционные процессы:
а – прослойки снега с частицами почвы (фото А.С. Гальченко, 18.03.2023);
б – очаги дефляции на поверхности пашни (фото М.А. Каширо, 14.03.2019)

Дефляция почв во время снеготаяния. Во время снеготаяния, начинающегося в марте и достигающего максимальной интенсивности в апреле, при положительных температурах воздуха значительные участки пашни освобождаются от снега и подвергаются воздействию сильных ветров, что приводит к быстрому обсыханию верхнего слоя почв и его дефляции. Выдутые частицы почвы переносятся от очага дефляции и осаждаются на поверхность снега с образованием эоловой ряби (рис. 3). При интенсивном развитии процесса выдувания эоловая рябь покрывает до 70–90% поверхности снега, а толщина наноса до 30 мм. Скорости осаждения пыли в холодный период года могут достигать 0,32 г/м² сут. После бурь на поверхности снега может накапливаться значительное количество почвенных частиц – до 23,6 г/м² в сутки. Степень загряз-

нения эоловых волн различна – от долей грамма до 336 г/м².

Повседневная или местная дефляция характерна для теплого периода года, особенно весной после схода снежного покрова, когда наблюдается весенний максимум деятельности ветра, а почвы агроландшафтов незадернованы или слабо задернованы всходами культур. Проявления местной ветровой эрозии различны: это пыльные столбы («микросмерчи»), поземки (рис. 4); во время сухих шквалов на пашне образуются пыльные завесы, по высоте превышающие кроны деревьев (май 2003 г.). Кроме того, перемещение почвенных масс происходит при проведении агротехнических мероприятий, особенно в засушливые годы и при порывах ветра, когда вспашка и/или боронование поднимают частицы почвы на высоту 5–10 м.



Рис. 3. Эоловый материал на поверхности снега у лесополосы в агроландшафтах: а – фото З.Н. Квасниковой (24.04.2015); б – фото А.С. Гальченко (18.03.2023)



Рис. 4. Пыльная поземка на пашне в пределах бассейна р. Басандайки
(фото А.С. Гальченко, 05.05.2023)

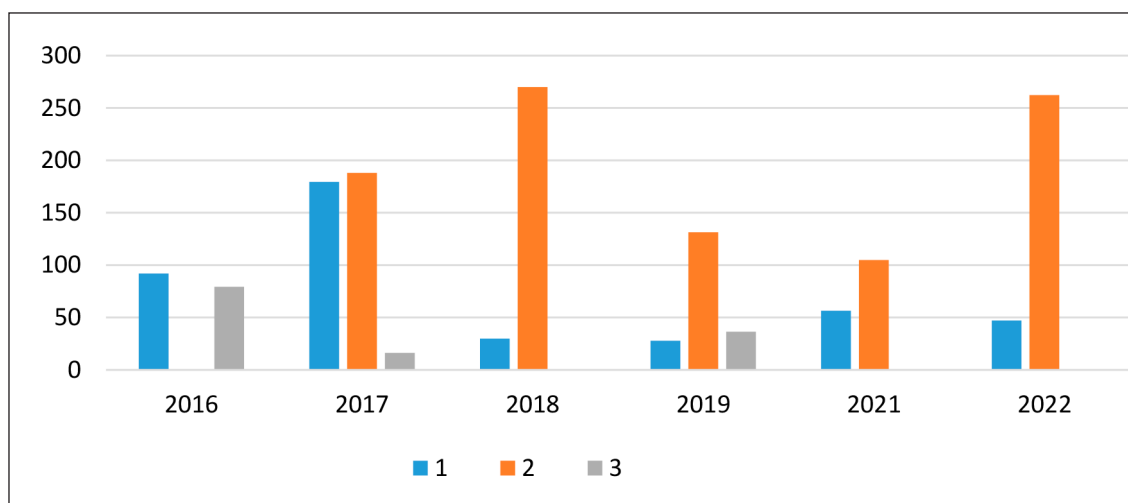


Рис. 5. Примеры накопления пыли в пылеуловителях, расположенных в разных урочищах бассейна р. Басандайки (г/м²): 1 – лесополоса из сосны у с. Лучаново, 2 – лесополоса из березы у с. Плотниково, 3 – кедровый лес

Провести оценку интенсивности этого процесса весьма сложно. Как отмечают М.С. Кузнецов, Г.П. Глазунов (2020), для ветровой эрозии, в отличие от водной, нет простого способа учета суммарных потерь почвы, которые определяют разными методами, в том числе путем измерения переноса почвенных частиц в разных точках исследуемой территории с помощью пылеуловителей [2].

По годам осаждение пыли в пылеуловителях, установленных в лесополосах и кедровом лесу, в теплый период (май – октябрь) происходит неравномерно: интенсивнее оно проявлялось в 2018 и 2022 гг. (рис. 5). В березовой лесополосе у с. Плотниково отмечено наибольшее количество пыли. На аккумуляцию атмосферных выпадений здесь помимо переноса с обрабатыва-

емых полей оказывает влияние и грунтовая дорога (рис. 4). В кедровом лесу, окаймляющем пашню у с. Лучаново, за годы наблюдений в пылеуловителях накапливалось всего от первых граммов до 80 г/м² эолового наноса.

Наши наблюдения за развитием дефляции почв в течение разных сезонов года позволяют сделать предварительную оценку ее интенсивности за год (таблица). В настоящее время нет единого мнения по оценке опасности интенсивности развития дефляции почв в отличие от таковой по водной эрозии. Наши наблюдения за интенсивностью развития ветровой и водной эрозии почв показали, что они сопоставимы с рекомендациями оценки интенсивности эрозии почв, разработанными М.Н. Заславским [6] и СП 115.13330.2016 [14].

Интенсивность развития дефляции почв
по данным полевых исследований разных сезонов года

Годы наблюдений	Агрофон	Аккумуляция пылеаэрозолей, кг/га		
		За холодный период	За теплый период	За год
2013–2014	Посевы сельхозкультур, стерня осенью	1442	28	470
2014–2015	Посевы сельхозкультур, зябь осенью	6599	295	6894
2015–2016	Посевы сельхозкультур, стерня осенью	1491	919	2410
2016–2017	Посевы сельхозкультур, зябь, стерня осенью	2605	1881	4486
2017–2018	Посевы сельхозкультур, зябь, стерня осенью	3149	2700	5849
2018–2019	Посевы сельхозкультур, зябь, стерня осенью	2366	1313	3679
2020–2021	Посевы сельхозкультур, грубая зябь по стерне	1691	1048	2739
2021–2022	Зябь по фацелии, озимые	5003	2622	7625
2022–2023	Посевы сельхозкультур, зябь осенью	5073	1116	6189

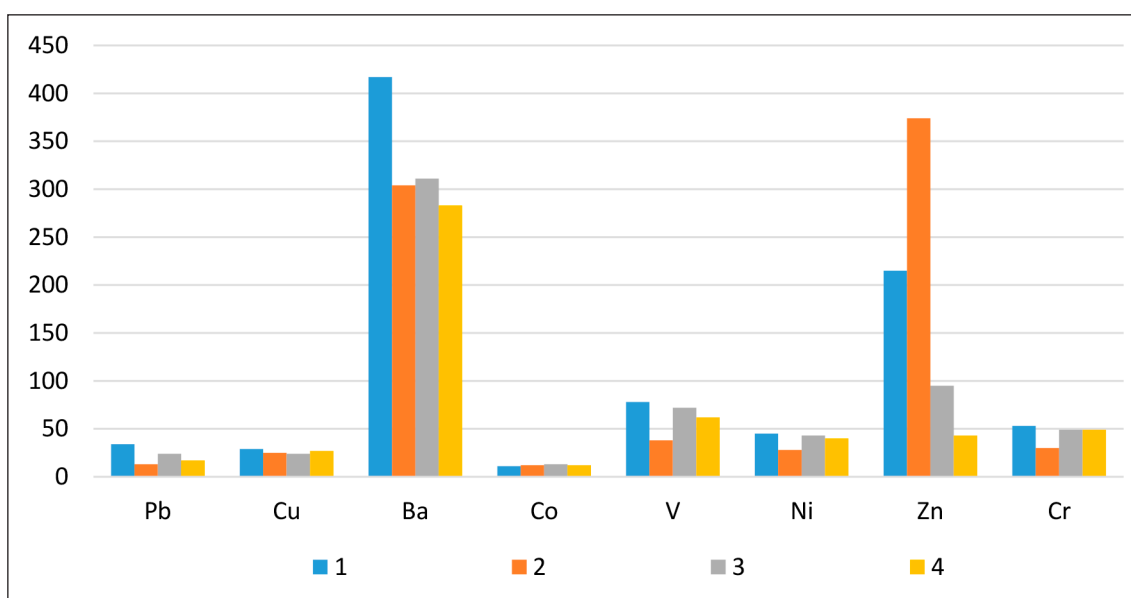


Рис. 6. Среднее содержание химических элементов (мг/кг) за 2015–2022 гг.:
1 – лесополоса из сосны у с. Лучаново, 2 – лесополоса из березы у с. Плотниково,
3 – кедровый лес, 4 – почва верхнего горизонта плакора пашни у с. Лучаново

Ветровая эрозия является ключевым фактором техногенной механической миграции вещества между природными (кедровый лес, разнотравный луг) и антропогенными урочищами (пашня, лесополоса) бассейна р. Басандайки. Дефляция приводит к выносу ценных для сельскохозяйственных растений элементов питания почвы, таких как гумус и макроэлементы. За исследуемый период в зависимости от степени загрязнения снега их содержание изменялось в значительных пределах: например, гумуса – от 1,5 до 5,1%; $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ – от 15,0 до 32 мг/экв. 100 г почвы; P_2O_5 –

от 46 до 66 мг/экв. 100 г почвы и др. Наличие гумуса в эоловом наносе указывает на его происхождение из почв исследуемого региона. Кроме того, для подтверждения локального происхождения эоловых осадков было проанализировано среднее содержание некоторых микроэлементов в верхнем горизонте почвы пашни и в пылеуловителях, установленных в лесополосах и кедровом лесу (рис. 6).

Было установлено, что концентрация химических элементов в твердом осадке из пылеуловителей сопоставима литогенному субстрату почв пашни плакорных место-

положений, что свидетельствует в основном о местном генезисе эоловых выпадений. Исключение составляют цинк и барий, содержание которых может быть обусловлено не только локальным, но и региональным переносом веществ.

Выводы

Многолетние наблюдения за дефляцией почв в агроландшафтах бассейна р. Басандайки юго-востока Томской области позволили сделать следующие выводы:

1. Ветровая эрозия почв в агроландшафтах исследуемой территории развивается ежегодно. Интенсивность дефляции в основном зависит от таких факторов, как состояние агрофона в осенний период, скорость ветра и время появления всходов сельскохозяйственных культур в весенне-летний период.

2. В течение года наблюдается три вида дефляции – выдувание почв во время устойчивого залегания снежного покрова в зимний период; в теплый период года – дефляция во время весеннего снеготаяния и повседневная (местная).

3. Самое большое накопление эоловых осадков в толще снега происходило в годы, когда агрофон пашни с осени был представлен зябью. В такие годы в толще СП накапливалось от 4,0 тыс. до 11,6 тыс. кг/га (зима 2011–2012 гг.). В случаях, когда с осени агрофон пашни – это стерня, всходы озимых, неубранный лен, травы, дефляция развивалась слабо и в толще снега аккумуляровалось от 180 до 3 тыс. кг/га. Значительное накопление эолового материала *на поверхности снега* также происходило в годы с активной ветровой деятельностью и когда агрофон был представлен зябью. На поверхности эоловых волн накапливалось до 336 г/м² (1992; 2003); в случае наличия на пашне стерни, озимых, многолетних трав – от долей грамма до 10 г/м². *В теплый период года* (вторая половина апреля – октябрь) в пылеуловителях в зависимости от их местоположения (лес, поляна в лесу, лесополоса, наветренный склон пашни) осаждалось от долей грамма до 270 г/м². Меньше всего аккумуляция пылеаэрозолей наблюдалась в кедровом лесу и наветренном склоне пашни.

4. Основная масса твердого осадка пылеуловителей исследуемой территории обусловлена результатом местной техноген-

ной механической миграции, об этом свидетельствует схожесть его гранулометрического и химического состава с почвами пашни. В теплое время года возможен приток атмосферных выпадений регионально-го переноса.

Список литературы

1. Munroe J.S. Properties of modern dust accumulating in the Uinta Mountains, Utah, USA, and implications for the regional dust system of the Rocky Mountains // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2014. Vol. 39. P. 1979–1988.
2. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во: МГУ, 2020. 387 с.
3. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Аветян С.А., Шишконова Е.А., Каштанов А.Н. Карта агрогенной эродированности почв России // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2020. Т. 493, № 2. С. 99–102.
4. Иванов А.Л., Кирюшин В.И., Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Столбовой В.С. Анализ земельной реформы и агропромышленного производства за четверть века. Почвенно-экологические, технологические институциональные и инфраструктурные аспекты модернизации. Земельная служба (доклад). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 93 с.
5. Звонков В.В. Водная и ветровая эрозия земли. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 175 с.
6. Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979. 245 с.
7. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока // *Почвоведение*. 2021. № 1. С. 136–148.
8. Романовская А.О., Савин И.Ю. Современные методы мониторинга ветровой эрозии почв // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 104. С. 110–157.
9. Reheis M.S. Dust deposition in Nevada, California, and Utah, 1984–2002. U.S. Geological Survey, Open-File Report 03–138, 2003. 11 p.
10. Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Волкова М.А., Носырева О.В. Ветровой режим юго-востока Западно-Сибирской равнины как фактор риска развития дефляции почв в агроландшафтах (на примере юга Томской области) // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2021. Т. 85, № 4. С. 528–538.
11. Евсеева Н.С., Каширо М.А., Квасникова З.Н., Батманова А.С., Петров А.И., Волкова М.А., Носырева О.В. Снеговетровые процессы в агроландшафтах бассейнов малых рек юго-востока зоны подтайги Западно-Сибирской равнины // *География и природные ресурсы*. 2020. № 1 (160). С. 113–121.
12. Евсеева Н.С., Язиков Е.Г., Квасникова З.Н., Батманова А.С., Бучельников В.С. Современный эоловый морфогенез: изученность, региональные проявления // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331, № 11. С. 96–107.
13. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1992. 200 с.
14. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция. М.: Стандартинформ, 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (дата обращения: 07.04.2024).

УДК 551.513.22
DOI 10.17513/use.38305

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В УСТЬЕВУЮ ОБЛАСТЬ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ (МОДЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

Котова Е.И., Лохов А.С., Коробов В.Б.

ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширишова Российской академии наук, Москва, e-mail: ecopp@yandex.ru

Целью исследования является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, поступающих как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса. Устьевые области больших рек арктических морей характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью характеристик природных условий. Это, в свою очередь, сказывается на неоднородности распределения загрязнения. В работе рассматриваются результаты применения траекторного подхода и метода статистики траекторий переноса воздушных масс для оценки и прогнозирования воздействия атмосферных эмиссий на окружающую среду, в том числе отдаленных территорий. Проведен анализ траекторий переноса воздушных масс и примесей в устьевую область Северной Двины. Расчет обратных траекторий движения воздушных масс проводился с использованием модели HYSPLIT4 и данных реанализа метеорологических элементов NCEP/NCAR. Установлено, что для всех примесей, для которых проводились расчеты – Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu и Ni, за месячный период имеет место весьма заметная пространственная изменчивость атмосферных потоков. При этом направления их наибольших градиентов не всегда совпадают и зависят от расположения источников эмиссии.

Ключевые слова: Северная Двина, устьевая область, метод статистики траекторий, тяжелые металлы, дальний перенос

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда «Атмосферный перенос как источник загрязнения экосистем западного сектора Российской Арктики» № 22-77-10074.

SPATIAL VARIABILITY OF HEAVY METAL INPUT THROUGH THE ATMOSPHERE TO THE NORTHERN DVINA ESTUARY (MODEL DATA)

Kotova E.I., Lokhov A.S., Korobov V.B.

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

The purpose of this work is to analyze the spatial variability of heavy metal fluxes from the atmosphere in the Northern Dvina estuary from both local sources and long-range transport. The estuaries of large rivers of the Arctic seas are characterized by significant spatial and temporal variability in the characteristics of natural conditions. This in turn affects the heterogeneity of pollution distribution. The paper discusses the methodology and results of applying the trajectory approach and the method of air mass transport trajectory statistics to assess and forecast the impact of atmospheric emissions on the environment, including remote areas. The trajectories of air masses and impurities transport to the mouth area of the Northern Dvina River were analyzed. The reverse trajectories of air masses were calculated using the HYSPLIT4 model and NCEP/NCAR meteorological element reanalysis data. It was found that for all the admixtures for which the calculations were performed – Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu and Ni, there is a very noticeable spatial variability of the atmospheric fluxes during the monthly period. The directions of their largest gradients do not always coincide and depend on the location of emission sources.

Keywords: Northern Dvina, estuary area, trajectory statistic method, heavy metals, long-range transport

The study was carried out with funds from the Russian Science Foundation grant “Atmospheric transport as a source of pollution of ecosystems in the western sector of the Russian Arctic” No. 22-77-10074.

Введение

Устьевые области арктических рек – это уникальные экосистемы, характеризующиеся, с одной стороны, значительным разнообразием условия и ресурсов, являющиеся местом сосредоточения населения и промышленности. В то же время их расположение в условиях сурового климата является причиной уязвимости экосистем к антропогенному воздействию. Атмосфера – самая динамичная среда, что усложняет процесс оценки загрязнения атмосферного возду-

ха. В данном случае важным источником информации о загрязнении атмосферного воздуха и воздействии загрязнения на экосистемы являются модельные оценки поступления примесей.

Устьевые области больших рек арктических морей характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью характеристик природных условий. Это главным образом обусловлено неоднородным влиянием подстилающей поверхности – суша – море – острова, и сильными приливными течениями [1]. Наблюдения

на расположенных в этом районе трех гидрометеорологических станциях – в Архангельске, Северодвинске и острове Мудьюгский показывают, что различия в измеряемых характеристиках воздуха и воды весьма существенны. Особенно это касается ветра и скорости течений, которые, в свою очередь, оказывают влияние на характер циркуляции. Неоднородность воздушных потоков оказывает влияние и на экологическую ситуацию, которая хотя и не является острой [1], тем не менее во многом зависит от природных условий.

Принимая во внимание наличие многочисленных источников загрязнения атмосферы и влияние дальнего переноса поллютантов от удаленных загрязнителей атмосферы, следует ожидать, что пространственная изменчивость будет характерна и для содержащихся в воздухе загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы, оказывающих существенное влияние на состояние экосистем. Численный эксперимент, выполненный авторами ранее для отдельных участков дельты Северной Двины, показал, что пространственная изменчивость количества атмосферных выпадений, обусловленных дальним переносом, имеет место и есть необходимость в продолжении этих исследований [2].

Тяжелые металлы являются одними из самых распространенных загрязняющих веществ атмосферного воздуха в устьевой области Северной Двины [3]. Оседая на земную и водную поверхность, они накапливаются в почвах, воде, донных отложениях и в тканях моллюсков [4, 5]. При этом, как показали эти и другие исследования, концентрации тяжелых металлов на некоторых участках превышают фоновые значения. Данное обстоятельство делает целесообразным выделение исследований распространения тяжелых металлов в устьевой области Северной Двины в самостоятельное направление.

Целью настоящей работы является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, концентрации которых формируются как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса. Для этого были рассчитаны модельные концентрации примесей в приземном слое воздуха и потоки примесей для разных участков дельты Северной Двины.

В полной постановке данная задача требует решения сопряженных уравнений переноса и турбулентной диффузии газа

[6], а в районах, в которых значительная часть территории приходится на водную поверхность, необходимо также учитывать и ее влияние на атмосферные процессы [7]. Трудности моделирования усугубляются, как констатировал еще полвека назад нобелевский лауреат С.П. Капица, тем, что нет достаточно полного описания турбулентных процессов [8]. С тех пор в понимании движения турбулентных потоков жидкости и газа фундаментальная наука не сильно продвинулась вперед, и все расчеты по-прежнему строятся на теории подобия, что самым непосредственным образом сказывается на их точности.

На качество моделей оказывают влияние местные явления, такие как бризы и термические циклоны, вносящие локальные возмущения в гидрометеорологические поля, и малое количество пунктов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха и водных объектов. Эти обстоятельства в настоящее время являются практически непреодолимыми для разработки универсальных моделей [9].

Поэтому сейчас, несмотря на колоссальный рост вычислительных мощностей, в моделировании преобладает подход, в основе которого лежит упрощение самих моделей путем снижения числа их параметров [10]. Но это не означает отказа от усложнения моделей путем введения дополнительных характеристик, а то и целых блоков, особенно при прогнозировании загрязнения атмосферы при наличии множества источников загрязнения, что превращает процесс моделирования в набор технологических процедур [11, 12]. Такой подход представляется авторам наиболее перспективным.

Целью исследования является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, поступающих как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса.

Материалы и методы исследования

В основе проведенного исследования лежит пространственный анализ траекторий переноса воздушных масс и примесей к произвольному географическому пункту [13]. Для расчета обратных траекторий используется модель HYSPLIT4 и данные реанализа метеорологических элементов NCEP/NCAR (<https://www.arl.noaa.gov/>). Одновременно с расчетом траектории движения воздушных масс рассчитываются данные о количестве осадков и высоте слоя перемешивания.

вания. Данная методология для подобного рода исследований прошла неоднократную апробацию и успешно применяется в северных и арктических регионах [14].

Итоговый расчетный файл представлен массивом точек в пространстве системы координат, данных о количестве осадков и высоте слоя перемешивания. Учитывая эмиссии металлов в городах и регионах России согласно Ежегоднику выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов РФ, рассчитываются концентрации примеси в воздухе:

$$C_{ij} = (1 - \alpha) \cdot Q_{ij} \cdot Z_{ij},$$

где α – доля примеси, оседающая на поверхность вблизи источника (0,1–0,2 см); Q_{ij} – объем выбросов; Z_{ij} – функция потенциальных источников, характеризующая все атмосферные процессы, влияющие на перенос загрязнителя от ячейки (i, j) к исследуемому объекту.

С учетом полученных значений концентраций в воздухе значения пересчитывались затем в потоки примесей на поверхность:

$$D = C \cdot K \cdot T,$$

где C – концентрация примеси в приземном воздухе; K – скорость осаждения примеси из атмосферы на поверхность; T – длительность периода, для которого вычисляется плотность потока.

Скорости осаждения примеси K , см/с, меняются в зависимости от сезона и территории, для которой проводятся расчеты [15].

Расчет велся для 9 точек, выбранных с учетом географических особенностей местности, на суше в дельтовой части и частично на устьевом взморье реки (рис. 1). С другой стороны, для целей интерполяции точки выбирались таким образом, чтобы расстояния между любыми двумя соседними из них были как можно ближе друг к другу.

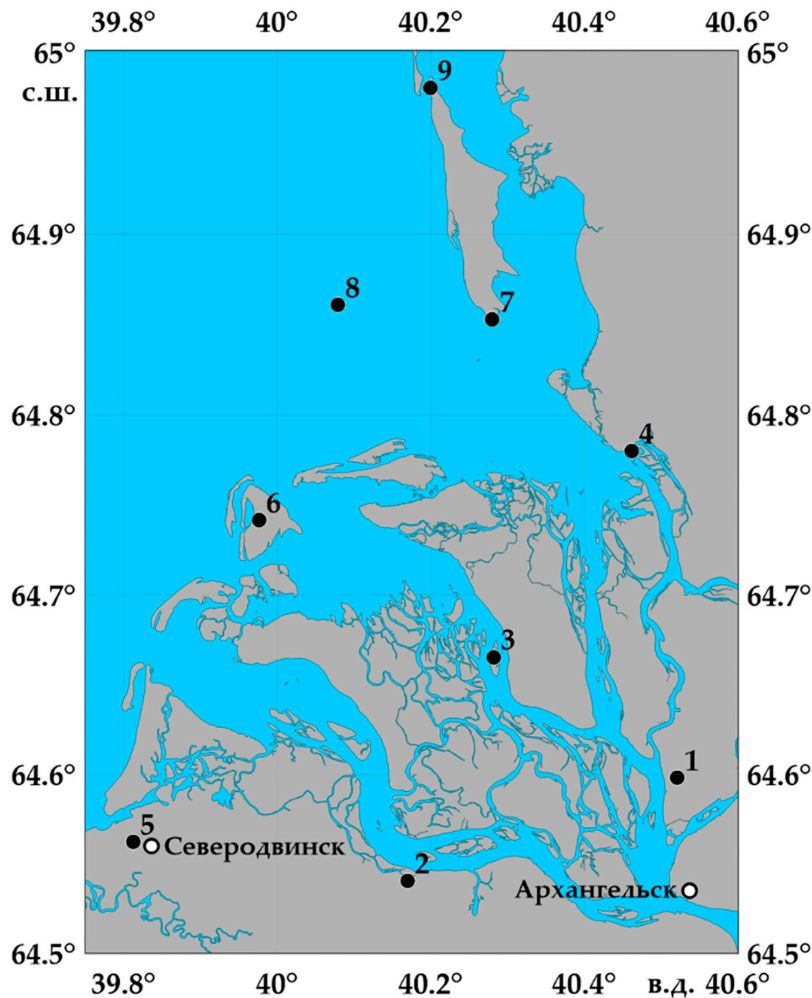


Рис. 1. Карта-схема точек, использованных для моделирования

Таблица 1

Модельные потоки примесей из атмосферы на подстилающую поверхность

	Pb	As	Ni	Cr	Cu	Cd	Zn
	мкг/м ² /месяц					нг/м ² /месяц	
Точка 1	0,24	0,12	0,55	16,28	39,06	0,02	0,00
Точка 2	0,36	0,18	2,39	16,33	51,51	0,12	0,00
Точка 3	0,27	0,14	1,38	13,73	39,99	0,07	0,00
Точка 4	0,25	0,12	0,33	10,81	34,99	0,01	0,00
Точка 5	0,26	0,13	0,51	8,93	34,72	0,02	0,00
Точка 6	0,53	0,27	0,60	8,10	62,05	0,02	0,00
Точка 7	0,32	0,16	0,97	5,90	38,22	0,04	0,00
Точка 8	0,36	0,19	3,19	5,26	43,00	0,16	0,00
Точка 9	0,34	0,18	1,70	1,57	37,67	0,08	0,00

Расчеты выполнены для июля 2019 г. ежечасно с 00 часов 01.07.2019 до 23.00 30.07.2019. Июль был выбран как репрезентативный месяц для летнего сезона. Дискретность в 1 час позволит учесть суточные изменения процессов, происходящих в прибрежной зоне. В результате получены величины потоков элементов из атмосферы на 1 м² поверхности за 1 месяц для 7 элементов: Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu и Ni (табл. 1).

Построение интерполяционных поверхностей выполнено методом Кригинга на основе информации о атмосферных потоках металлов в 9 точках. Для оценки пространственных градиентов потока элементов на интерполяционной поверхности для каждого элемента были выбраны точки максимума и минимума, определяющие вектор максимального градиента. Так как его величина зависит от дискретности сетки, расчет производился путем усреднения изменчивости за весь промежуток вектора, исключая небольшие локальные изменения и пересчета на 1 км расстояния в процентах от суммарной разности потоков элементов на краях вектора. Такой расчет позволяет соотнести величину градиентов для различных элементов, потоки которых могут отличаться на десять порядков.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным модельных расчетов атмосферных потоков примесей на поверхность дельты Северной Двины влияние стационарных источников *цинка* на загрязнение воздуха рассматриваемого региона за расчетный период отсутствовало (табл. 1). Связано это в первую очередь с тем, что источники, по которым имеется информа-

ция о количестве выбросов, расположены южнее 61° с.ш. и восточнее 76° в.д., а за рассматриваемый период воздушные массы с указанных территорий не поступали.

Поступление *кадмия* вследствие атмосферного переноса от промышленных источников практически на порядок ниже, чем других веществ. Это связано с тем, что воздействие оказывают лишь предприятия Кольского полуострова, а объемы выбросов невелики. В то же время наибольшее воздействие приходится на акватории (т. 8 на рис. 1).

Максимальное содержание *мышьяка* в атмосферном воздухе получено для территории о. Кумбыш. Источником данной примеси являются предприятия Мончегорска, которые оказывают воздействие на всю рассматриваемую территорию. Помимо этого источника в отдельных точках (т. 9, 2, 8, 3 на рис. 1), отмечено воздействие выбросов других предприятий Кольского полуострова.

Наибольшие расчетные значения из всех рассматриваемых примесей получены для *меди*. Атмосферные потоки меди, поступающей от антропогенных источников на данную территорию, составили 34,7–62,1 мкг/м² за месяц. Источниками меди являются предприятия Кольского полуострова, а также г. Архангельска. Максимальные потоки меди определены на о. Кумбыш (т. 6 на рис. 1) и в районе пос. Рикасиха (т. 2 на рис. 1).

Потоки из атмосферы *никеля* выше на акватории (т. 8 на рис. 1), вследствие дальнего переноса выбросов в атмосферу от г. Мончегорска.

Как и следовало ожидать, поля атмосферных потоков всех тяжелых металлов оказались неоднородными. На рис. 2 при-

ведены их интерполяционные поверхности, точки в которых был произведен расчет потоков и вектор максимального градиента для всех рассматриваемых в работе элементов, кроме As. Его распределение практически идентично Pb. При этом характер распределения металлов по поверхности, включая акватории реки и моря, оказался различным.

Для определения величины изменчивости потоков из атмосферы на поверхность были рассчитаны векторы наибольших градиентов этой величины (табл. 2). Это позволяет судить о характерных на-

правлениях переноса примесей и величине изменчивости их потока относительно расстояния.

Наибольшие средние их градиенты ($\text{мкг/м}^2/\text{месяц/км}$) отмечаются у Cu и Cr – 0,2967 и 0,1239 соответственно, наименьшие – у Zn и Cd: соответственно $2,63\text{E-}08$ и $1,72\text{E-}06$, то есть самые большие градиенты у элементов, концентрации которых наибольшие, а самые меньшие – у тех, концентрации которых самые малые. Промежточную, и достаточно компактную, группу составляют As, Pb и Ni, значения которых на 1–2 порядка меньше наибольших.

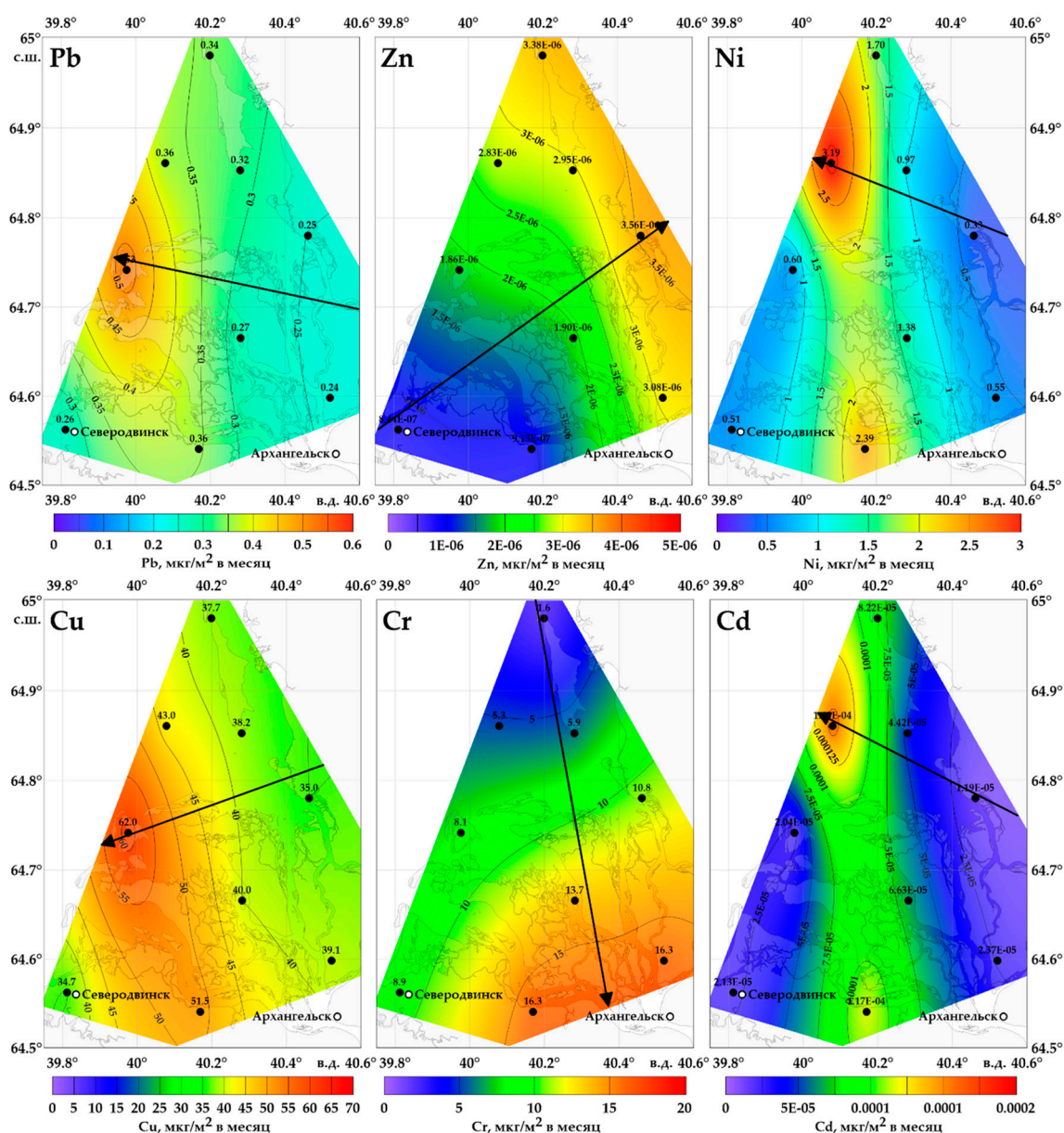


Рис. 2. Потоки веществ в устьевую область реки Северная Двина для различных элементов, стрелкой обозначены векторы максимальных градиентов

Таблица 2

Характеристики максимальных градиентов концентрации тяжелых металлов
в устьевой области реки Северная Двина

Элемент	Направление вектора увеличения концентрации элемента		Значение на начало вектора	Значение на конец вектора	Средний градиент по вектору на 1 км	
	°	румб			мкг/м ² /месяц	мкг/м ² /месяц
Zn	55	с юго-запада на северо-восток	8,67E-07	3,64E-06	2,63E-08	0,95
Cr	170	с севера на юг	1,561	16,433	0,1239	0,83
As	285	с востока на запад	0,118	0,247	0,0017	1,32
Pb	287	с востока на запад	0,241	0,478	0,0031	1,31
Cd	296	с юго-востока на северо-запад	1,16E-05	1,30E-04	1,72E-06	1,45
Cu	251	с востока на запад	34,877	55,536	0,2967	1,44
Ni	292	с востока на запад	0,313	2,605	0,0376	1,64

Однако направления градиентов для различных элементов не совпадают: для As, Pb, Cu и Ni концентрации снижаются с запада на восток, для Zn – с северо-востока на юго-запад, для Cr – с юга на север и для Cd – с северо-запада на юго-восток. Такое расхождение объясняется расположением источников данных элементов.

Заключение

Распределение концентраций всех тяжелых металлов в приземном слое атмосферы над устьевой областью Северной Двины характеризуется заметной пространственной изменчивостью, следствием чего является их неравномерное осаждение на водную и земную поверхность. Направления максимальных градиентов потоков не совпадают: оси ориентированы относительно различных румбов: для As, Pb, Cu и Ni ось имеет направление восток – запад, для Zn юго-запад – северо-восток, для Cr север – юг и для Cd юго-восток – северо-запад. Характер распространения обусловлен в первую очередь расположением источника примеси. Циркуляция атмосферы и характер осаждения примесей влияют в большей степени на количественные характеристики атмосферных потоков.

Отсюда следует вывод, что существующая система отбора проб в воздухе, воде и почве в устьевой области Северной Двины на содержание тяжелых металлов нуждается по меньшей мере в корректировке.

Результаты проведенного исследования могут представлять интерес для специалистов в области изучения геохимии устьевой области Северной Двины. Результаты

исследования следует учитывать при выборе точек мониторинга загрязнения окружающей среды рассматриваемого района.

Список литературы

- Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129. DOI: 10.17513/use.37402.
- Котова Е.И., Коробов В.Б. Исследование пространственной неоднородности дальнего переноса в юго-западной части Двинского залива Белого моря // LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования. Материалы Международной научно-практической конференции. СПб., 2023. С. 138–143.
- Обзор загрязнения окружающей среды на территории деятельности Северного УГМС за 2015 год. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/monitoring/reviews> (дата обращения: 04.06.2024).
- Зимовец А.А., Федоров Ю.А. Тяжелые металлы в почвах устьевой области реки Северная Двина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2013. № 5. С. 70–74.
- Неверова Н.В., Чупаков А.В. Оценка загрязнения устьевой области реки Северной Двины методом расчета фоновых концентраций (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni) // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 4. С. 51–67. DOI: 10.21072/mbj.2021.06.4.05.
- Хаширова Т.Ю., Акбашева Г.А., Шакова О.А., Акбашева Е.А. Моделирование загрязненности атмосферного воздуха // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2017. № 8. С. 325–330.
- Гавриков А.В., Гулев С.К. Высокорастворимое климатическое моделирование атмосферы над Северной Атлантикой для исследования атмосферы и океана // Океанология. 2020. Т. 60, № 6. С. 831–834. DOI: 10.31857/S0030157420060052.
- Капица П.Л. Энергия и физика // Вестник АН СССР. 1976. № 1. С. 34–43.
- Крупнова Т.Г., Буланова А.В., Макаровских Т.А., Геренштейн А.В. Моделирование загрязнения воздуха в городской среде: критический обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 27–33. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-027-033.

10. Генихович Е.Л., Грачева И.Г., Ионин В.А., Оникул Р.И., Румянцева Д.Ю., Филатова Е.Н., Яковлева Е.А. Моделирование характеристик загрязнения воздуха атмосферными аэрозолями для практических приложений // Труды ГГО. 2012. № 565. С. 49–78.
11. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологического прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERT и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147–170.
12. Ткачева Ю.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 161–177. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-3-161-177.
13. Vinogradova A.A. Distant evaluation of the influence of air pollution on remote areas // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. Vol. 51. P. 712–722. DOI: 10.1134/S0001433815070099.
14. Виноградова А.А., Котова Е.И. Вклады источников Европы в загрязнение свинцом и кадмием северных районов Европейской России // Живые и биокосные системы. 2018. № 23. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-23/article-2DOI:10.18522/2308-9709-2018-23-2> (дата обращения: 15.06.2024).
15. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 5–20.

УДК 911.3:332.14

DOI 10.17513/use.38306

РЕГИОНАЛЬНЫЕ НОРМАТИВЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН)

Крылов П.М.

*ФГАОУ ВО «Государственный университет просвещения», Москва;
АО «Гипрогор», Москва, e-mail: pmkrylov@yandex.ru*

Цель настоящего исследования – анализ размещения отдельных социально-экономических объектов Республики Башкортостан в соответствии с новой редакцией региональных нормативов градостроительного проектирования. Акционерное общество «Гипрогор» совместно с Российским университетом транспорта в 2023–2024 гг. выполняло работу по корректировке Схемы территориального планирования Республики Башкортостан, включая создание концепции пространственного развития республики. Использована математическая модель транспортной системы Республики Башкортостан, разработанная Российским университетом транспорта. Также использованы статистические данные федерального агентства по статистике. Одним из этапов работы была апробация новой редакции нормативов к пространственным социально-экономическим условиям Республики Башкортостан. Значительная часть муниципальных образований не достигает минимально допустимого уровня обеспеченности вне зависимости от вида транспорта, как на начало 2024 г., так и на расчетный период. Выявлено, что исследуемые нормативы показывают существенное отставание региона от целевых показателей. Одновременно некоторые из значений нормативов нуждаются в корректировке. Применимость нормативов на перспективу во многом зависит от реализации прогнозов социально-экономического развития республики, в частности реализации программы капитального строительства и реконструкции объектов регионального значения. В стратегических документах Республики Башкортостан на 2024 г. представлено недостаточное количество мероприятий в области развития транспортной инфраструктуры для того, чтобы нормативы были реализованы (достигнуты) на перспективу. Полученные результаты могут быть использованы в транспортно-географических исследованиях для анализа территориальной дифференциации муниципальных образований в области транспортной доступности, транспортной связности и транспортной дискриминации населения.

Ключевые слова: региональные нормативы градостроительного проектирования, Схема территориального планирования, Республика Башкортостан

REGIONAL NORMS OF TOWN-PLANNING DESIGN IN TRANSPORT-GEOGRAPHICAL STUDIES (ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

Krylov P.M.

*State University of Education, Moscow;
JSC «Giprogor», Moscow, e-mail: pmkrylov@yandex.ru*

The purpose of this study is to analyse the location of some socio-economic objects of the Republic of Bashkortostan in accordance with the new version of regional norms of town-planning. «Giprogor» together with the Russian University of Transport in 2023-2024 carried out work on the adjustment of the Territorial Planning Scheme of the Republic of Bashkortostan, including the creation of the concept of spatial development of the republic. A mathematical model of the transport system of the Republic of Bashkortostan developed by the Russian University of Transport was used. Statistical data of the Federal Agency for Statistics were also used. One of the stages of the work was the approbation of the new edition of norms to the spatial socio-economic conditions of the Republic of Bashkortostan. A significant part of municipalities does not reach the minimum acceptable level of provision, regardless of the type of transport, both at the beginning of 2024 and for the estimated period. It has been revealed that the norms under study show a significant lag of the region from the target indicators. At the same time, some of the normative values need to be adjusted. The applicability of the standards for the future depends largely on the implementation of forecasts of socio-economic development of the republic, in particular, the implementation of the programme of capital construction and reconstruction of objects of regional significance. In the strategic documents of the Republic of Bashkortostan for 2024, an insufficient number of measures in the field of transport infrastructure development are presented for the norms to be implemented (achieved) in the future. The obtained results can be used in transport-geographical studies to analyse the territorial differentiation of municipalities in the field of transport accessibility, transport connectivity and transport discrimination of the population.

Keywords: regional norms of town-planning design, Scheme of territorial planning, Republic of Bashkortostan

Введение

Улучшение транспортной доступности населенных пунктов является одним из приоритетов государственной (в том числе ре-

гиональной) политики России [1–3]. Повышение уровня жизни населения и развитие всех отраслей экономики во многом зависят от состояния транспортной системы терри-

тории, являющейся важнейшей составляющей современных городов и регионов [3, 4].

Региональные нормативы градостроительного проектирования устанавливают совокупность расчетных показателей минимально допустимого уровня обеспеченности объектами регионального значения, относящимися к областям: транспорта (железнодорожного, водного, воздушного), автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения; предупреждения чрезвычайных ситуаций межмуниципального и регионального характера, стихийных бедствий, эпидемий и ликвидации их последствий; образования; здравоохранения; физической культуры и спорта; энергетики [5–7]. Наличие нормативов предусматривается Градостроительным кодексом РФ.

Цель настоящего исследования – проанализировать размещение отдельных социально-экономических объектов Республики Башкортостан в соответствии с новой редакцией региональных нормативов градостроительного проектирования (РНГП) с учетом транспортно-географического фактора.

Материалы и методы исследования

Оценка нормативов, приведенных в проекте региональных нормативов градостроительного проектирования (далее – РНГП) Республики Башкортостан, выполнялась коллективом Российского университета транспорта с использованием программного обеспечения для математического моделирования транспортных потоков, а также геоинформационной системы. В части математического моделирования транспортных потоков использовалось программное обеспечение PTV Vision Visum. Данный комплекс позволяет осуществлять расчет существующих условий дорожного движения, в том числе расчет средней скорости движения транспортного потока в целом по сети и для каждого отрезка в частности. В рамках изучения РНГП Республики Башкортостан была использована математическая модель транспортной системы Республики Башкортостан, разработанная Российским университетом транспорта в 2023 г. при подготовке программы комплексного развития транспортной инфраструктуры (ПКРТИ) Республики Башкортостан. Актуальность создания новой редакции РНГП обусловлена необходимостью решения множества проблем, ограничивающих инвестиционный ресурс территорий, тормозящих региональное развитие и снижающих качество

жизни. Основная цель разработки РНГП – обоснование предлагаемых градостроительных решений, обеспечивающих условия для устойчивого комплексного и сбалансированного пространственного и социально-экономического развития территории Республики Башкортостан, дальнейшего развития ее градостроительного потенциала (с учетом развития агломераций) и инфраструктурных каркасов, повышения эффективности использования территории, улучшения качества жизни населения, устранения диспропорций в обеспеченности и доступности жителей республики объектами услуг. В основе проведенного исследования использованы два основных источника: 1) НИР «Создание условий для эффективного и устойчивого развития территории Республики Башкортостан посредством разработки республиканских нормативов градостроительного проектирования и подготовки с их использованием Схемы территориального планирования Республики Башкортостан с учетом развития агломераций» ГК № 9/23 от 18 сентября 2023 г. М.: Гипрогор, 2023 г., 56 с.; 2) отчет о научно-исследовательской работе «выполнение раздела научно-исследовательской работы по транспорту в составе Схемы территориального планирования Республики Башкортостан» этап I (промежуточный). М.: РУТ, 2024 г., 58 с.

Общая характеристика транспортной системы и расселения Башкортостана

Транспортная инфраструктура является важнейшей подсистемой хозяйственного комплекса республики и рассматривается в настоящей работе как территориальная организация единой транспортной системы, как совокупность всех взаимосвязанных видов транспорта, обеспечивающих экономические и социальные потребности республики в перевозках. Территория республики характеризуется существенными контрастами в уровне транспортной обеспеченности территории. Более чем в трети муниципальных образований нет железных дорог общего пользования с регулярным пассажирским сообщением.

Обзор современного пространственно-территориального использования республики, ее расселенческой составляющей выявил развитие и концентрацию поселенческих систем в местах сосредоточения основного социально-экономического и градостроительного потенциала, расположен-

ного первоначально в долине р. Белой и ее притоков, а затем преимущественно в зонах влияния основных транспортных магистралей. Система расселения республики представлена двумя основными урбанизированными полосами расселения, в составе которых развиваются урбанизированные ареалы, представленные фактически территориями городских пространств. Первая субмеридиональная полоса расселения проходит в направлении: Удмуртская Республика – Нефтекамск – Дюртюли – Бирск – Благовещенск – Уфа – Стерлитамак – Салават – Мелеуз – Кумертау – Оренбургская область. В данной полосе расселения располагаются основные центры расселения, здесь сосредоточены значительный демографический и почти весь социально-экономический потенциалы республики. Вторая широтная полоса расселения проходит в направлении: Республика Татарстан – Октябрьский – Туймазы – Чишмы – Уфа – Иглино – Челябинская область. В этой полосе расселения также развиваются центры расселения и сконцентрированы существенные по своему значению демографический и социально-экономический потенциалы республики. Эти две основные урбанизированные полосы расселения являются основой существующих Уфимской моноцентрической и Южно-Башкортостанской полицентрической агломераций. Особенности урбанизационных процессов в республике привели к неравномерности развития урбанизированных территорий. В республике активно проходит процесс урбанизации территории. В настоящее время происходит «стягивание демографического пространства» или перетекание населения из сел в города с сопутствующим формированием сети локальных урбанизированных систем расселения (агломераций), в связи с чем назрел вопрос нового взгляда на расселение населения Республики Башкортостан. Благоприятные природные условия для проживания и осуществления хозяйственной деятельности, территориальное расположение выявленных месторождений минерально-сырьевых ресурсов, значительная сеть транспортных путей, привели к формированию городских населенных пунктов преимущественно в западной и центральной части территории. Здесь в настоящее время расположены 18 из 23 городских населенных пунктов республики, наиболее развит инфраструктурный каркас. Эти урбанизированные территории отличаются сравнительно высокой плотностью населения, высокой концен-

трацией объектов различного назначения – жилых, производственных, рекреационных, инфраструктурных и пр., разнообразием видов экономической деятельности, высоким уровнем внедрения современных информационно-коммуникационных систем и инноваций и т.д. Данные процессы и явления осуществляются на ограниченной урбанизированной территории, преобразуясь в агломерационные образования. Восточная часть республики слабо урбанизирована, здесь расположено 5 городских населенных пунктов, инфраструктурные объекты недостаточно развиты. В настоящее время в республике развиваются около восьми ареалов территорий различной степени урбанизации.

Результаты исследования и их обсуждение

АО «Гипрогор» (включая автора настоящей статьи) совместно с Российским университетом транспорта в 2023–2024 гг. выполнял работу по корректировке Схемы территориального планирования (СТП) Республики Башкортостан, включая создание концепции пространственного развития республики. Целью данного исследования являлось определение системы долгосрочных приоритетов, целей и задач пространственно-территориального развития Республики Башкортостан, исходя из стартовых условий развития республики, конкурентных преимуществ, рисков и ограничений, базируясь на стратегических и программных документах федерального и регионального уровня, с учетом долгосрочных трендов социально-экономического развития и требований времени, позволяющих повысить качество жизни населения республики. Концепция территориального (пространственного) развития Республики Башкортостан (далее Концепция) является отдельным исследованием, предваряющим подготовку СТП республики, учитывающим результаты выполненного ранее научного исследования по анализу трансформации пространственной организации территории республики и определяющим в конечном итоге основные стратегические направления и приоритеты социально-экономического и пространственного развития территории Башкортостана на период до 2044 г.

Одним из элементов работы была апробация новой редакции РНГП к пространственным социально-экономическим условиям Республики Башкортостан. Показатели минимально допустимого уровня

обеспеченности характеризуют количественные характеристики объектов нормирования в области транспорта. Расчетные показатели минимально допустимого уровня обеспеченности и максимально допустимого уровня территориальной доступности для объектов регионального и местного значения устанавливаются с учетом следующих факторов и особенностей развития территорий муниципальных образований республики: 1) неравномерное социально-экономическое развитие муниципальных образований Республики Башкортостан; 2) вхождение муниципальных образований в состав агломерации и, как следствие, повышенная градостроительная нагрузка на территорию; 3) территориально-пространственное положение (ТПП) и территориально-пространственная организация (ТПО) муниципальных образований; 4) различное градостроительное развитие территории с выделением зон нового строительства, реконструкции и стабилизированных зон; 5) плотность населения отдельных планировочных структур населенных пунктов на территории муниципальных образований; 6) демографический состав населения муниципального образования; 7) развитие системы здравоохранения в муниципальных образованиях, территория которых подвержена повышенному техногенному воздействию, связанному с развитием промышленного комплекса; 8) наличие на территории муниципальных образований зон, подверженных риску затопления и подтопления.

В новой редакции РНГП республики (2023 г.) вводится ранжирование муниципальных образований Республики Башкортостан по внутренней территориально-пространственной организации, а также поправочные коэффициенты, учитывающие уровень социально-экономического развития и положение относительно ядра агломерации соответственно. При анализе РНГП применительно к условиям Башкортостана были получены следующие нижеприведенные выводы.

1. В части показателей обеспеченности автомобильными дорогами: 31 из 63 муниципальное образование не обеспечено в достаточной степени, 23 муниципальных образования обеспечены, тогда как по территории 18 муниципальных образований региональные и межмуниципальные автомобильные дороги не проходят.

2. В части обеспеченности автомобильных дорог все муниципальные образования,

за исключением муниципальных образований, по территории которых не проходят региональные и межмуниципальные дороги, достигают показателя обеспеченности.

3. В части обеспеченности личным легковым транспортом 46 муниципальных образований обеспечены им в должной мере, жители 26 муниципальных образований не обеспечены.

4. Все населенные пункты, для которых существует потребность в автовокзалах или автостанциях, обеспечены ими; к муниципальным образованиям, обеспеченным причалами пригородного и межмуниципального сообщения, можно отнести только г. Уфу (из 10 муниципальных образований, по территории которых протекает р. Белая).

5. Только 4 из 20 муниципальных образований обеспечены вертолетными площадками (из числа муниципальных образований, где они должны быть в соответствии с нормативами).

6. Территориальная доступность автовокзалов и автостанций для населения муниципальных образований, в которых они расположены, является достаточно высокой. В городских округах, а также Белебеевском, Бирском и Дюртюлинском муниципальных районах значение показателя достигает 100%. Для территорий Баймакского, Учалинского и Янаульского муниципальных районов значение показателя превышает 90%. Сравнительно высокое значение показателя территориальной доступности, более 80%, наблюдается на территориях Белорецкого, Дуванского, Ишимбайского и Туймазинского муниципальных районов.

7. Доля площади территории муниципальных образований, находящейся в зоне транспортного обслуживания автовокзалов и автостанций, также высока. Относительно других выделяются Белорецкий, Дуванский и Ишимбайский муниципальные районы с низкой долей охвата территории, что в большей степени связано с эксцентриситетом административных центров указанных муниципальных образований, где и находятся объекты обслуживания.

8. Территориальная доступность объектов здравоохранения является достаточно высокой. В среднем доля площади, находящейся в зоне транспортной доступности объектов здравоохранения, составляет 84,4%.

9. Вместе с тем транспортная доступность ряда объектов здравоохранения как в муниципальных районах, так и в городских округах, в том числе в г. Уфа, достаточно низкая и составляет не более 40%.

10. Транспортная доступность республиканских больниц достаточно высокая. В среднем охват составляет 95,1%, при этом минимальное значение составляет 59,2% (Зианчуринский район).

11. Транспортная доступность городских больниц также высока. Доля охваченной площади транспортом общего пользования составляет преимущественно 97–100% и не опускается ниже 84% (г. Нефтекамск). В то же время транспортная доступность личным транспортом близка к 100%, за исключением г. Нефтекамска, для объектов которого значение составляет 89,8%. Транспортная доступность поликлиник в зависимости от вида транспорта крайне неоднородна. В то время как доступность на личном транспорте составляет 93–99,7%, доступность транспортом общего пользования может составлять 37–57%, а доступность при передвижении пешком не превышает 29%.

Таким образом, в области минимально допустимого уровня транспортной обеспеченности муниципальных образований объектами транспортной инфраструктуры: значительная часть муниципальных образований не достигает минимально допустимого уровня обеспеченности вне зависимости от вида транспорта, как на начало 2024 г., так и на расчетный период. Иные показатели можно считать достаточными и допустимыми к применению. Необходимо отметить, что применимость РНГП на перспективу во многом зависит от реализации прогнозов социально-экономического развития республики, в частности реализации программы капитального строительства и реконструкции объектов регионального значения. Следует отметить, что в стратегических документах республики представлено недостаточное количество мероприятий в области развития транспортной инфраструктуры для того, чтобы РНГП были реализованы (достигнуты) в полной мере.

Заключение

В целом показатели территориальной доступности объектов в области здравоохранения, установленных РНГП, можно считать приемлемыми. Сравнительно невысокие значения показателей транспортной доступности объектов транспортной инфраструктуры в отдельных муниципальных образованиях диктуют необходимость развития соответствующей инфраструктуры в муниципальных образованиях. Невыполнение нормативов даже при относительно благоприятных условиях транспортной

доступности территории связано в том числе с эксцентриситетом – расположением ключевых транспортных магистралей и административных центров муниципальных образований на периферии территории того или иного муниципального района или городского округа. При этом показатели транспортной доступности и в целом показатели достижения РНГП для городских округов в силу их компактности и более высокой плотности населения и транспортных коммуникаций существенно выше, чем соответствующие показатели для муниципальных районов. Выявлен недостаточный уровень развития общественного и личного транспорта в более чем трети муниципальных образований, что приводит к невыполнению РНГП в части транспортной доступности поликлиник (из числа рассматриваемых объектов здравоохранения) и объектов транспортной инфраструктуры (включая транспортно-пересадочные узлы и автовокзалы). Проведенное исследование АО «Гипрогор» и Российского университета транспорта показало, что ряд показателей, используемых в нормативах, следует изменить, так как в настоящее время их использование приводит к противоречивым выводам.

Рассмотренные показатели нормативов могут быть использованы в транспортно-географических исследованиях широкого профиля, в том числе в других регионах России.

Список литературы

1. Требушкова И.Е., Полякова Н.О. Географический анализ государственной политики на железнодорожном транспорте России // Географическая среда и живые системы. 2021. № 1. С. 110–130. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-110-130.
2. Сидоров В.П. Проблемы отечественной географии транспорта // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2012. № 4. С. 149–151.
3. Крылов П.М. Концепция выделения Владивостокской агломерации с позиций регионального развития и территориального планирования // Вопросы географии. 2016. № 141. С. 619–634.
4. Крылов П.М. К вопросу совершенствования территориального планирования внегородского транспорта в России (транспортно-географические аспекты) // Современные проблемы территориального развития. 2018. № 4. С. 4.
5. Киль Ю.Э., Потапов Е.А. Решение о комплексном развитии территории нормативы градостроительного проектирования // Уральский журнал правовых исследований. 2024. № 1 (26). С. 30–38.
6. Вардадян А.Д. Нормативы градостроительного проектирования размещения линейных объектов транспортной инфраструктуры на землях населенных пунктов // Право и государство: теория и практика. 2024. № 1 (229). С. 117–120. DOI: 10.47643/1815-1337_2024_1_117.
7. Креймер М.А. Принципы построения региональных нормативов градостроительного проектирования // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. 2013. № 3 (23). С. 60–76.

УДК 625.714.36
DOI 10.17513/use.38307

ОЦЕНКА ШУМОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАБЕРЕЖНЫХ КАЗАНИ И ПЕРМИ

Сулимов А.Д.

*ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
Пермь, e-mail: seg@psu.ru*

Целью исследования является оценка и анализ шумового загрязнения на набережных городов Казани и Перми с использованием мобильного приложения. Автором проведен анализ данных в сравнении с общеизвестными данными по теме шумового загрязнения. Разработана методика измерения шума на набережных, которая включала использование мобильного шумомера для сбора данных. Собранные данные о шумовом загрязнении на набережных были подвергнуты детальному анализу с целью выявления основных закономерностей и зависимостей. Эти результаты могут послужить основой для разработки эффективных мер по снижению шума на набережных городов, что способствует улучшению качества жизни горожан и созданию более комфортной обстановки для отдыха и прогулок. На набережной Казанки уровень шума равен 59 дБ в точке 7, что находится в пределах нормы, установленной в 60 дБ. На набережной Камы в т. 5 и 8 уровни шума составили 55,5 дБ и 59 дБ соответственно, также находясь в норме. Полученные результаты исследования показали, что на набережной р. Казанка в Казани уровень шумового загрязнения достигает 87,5%. Это означает, что подавляющее большинство точек на этой территории испытывают высокий уровень шума, в то же время лишь 12,5% точек имеют низкий уровень шумового загрязнения. На набережной р. Кама в г. Пермь 70% точек подвержены шумовому загрязнению, в то время как только 25% точек имеют низкий уровень шума. Эти данные являются важным индикатором текущей обстановки на набережных Казани и Перми и могут послужить основой для разработки рекомендаций по снижению уровня шумового загрязнения и улучшению акустического комфорта на набережных, что, в свою очередь, будет способствовать повышению их рекреационной привлекательности и общего качества городской среды.

Ключевые слова: набережные, шумовое загрязнение, благоустройство, городская среда, качество жизни

ASSESSMENT OF NOISE POLLUTION OF KAZAN AND PERM EMBANKMENTS

Sulimov A.D.

Perm State National Research University, Perm, e-mail: seg@psu.ru

The purpose of the study is to assess and analyze noise pollution on the embankments of the cities of Kazan and Perm using a mobile application. The author analyzes the data in comparison with well-known data on the topic of noise pollution. A method for measuring noise on embankments has been developed, which included the use of a mobile noise meter to collect data. The collected data on noise pollution on the embankments were subjected to a detailed analysis in order to identify the main patterns and dependencies. These results can serve as a basis for the development of effective measures to reduce noise on city embankments, which contributes to improving the quality of life of citizens and creating a more comfortable environment for recreation and walking. On the Kazanka embankment, the noise level is 59 dB at point 7, which is within the norm set at 60 dB. On the Kama embankment at points 5 and 8, noise levels were 55.5 dB and 59 dB, respectively, also being normal. The results of the study showed that on the embankment of the Kazanka River in Kazan, the noise pollution level reaches 87.5%. This means that the vast majority of points in this area experience high noise levels. At the same time, only 12.5% of points have a low level of noise pollution. On the embankment of the Kama River in Perm, 70% of points are subject to noise pollution, while only 25% of points have a low noise level. These data are an important indicator of the current situation on the embankments of the cities of Kazan and Perm and can serve as a basis for developing recommendations to reduce noise pollution and improve acoustic comfort on the embankments, which in turn will contribute to increasing their recreational attractiveness and the overall quality of the urban environment.

Keywords: embankments, noise pollution, landscaping, urban environment, quality of life

Введение

В контексте современной урбанистики и экологии городской среды набережные представляют собой многофункциональные пространства, играющие ключевую роль в формировании городского ландшафта и социальной инфраструктуры. Эти линейные объекты, располагающиеся вдоль водных артерий, служат не только транс-

портными коридорами, но и выполняют важнейшие рекреационные, эстетические и экологические функции в урбанизированной среде. Однако в условиях интенсивной антропогенной нагрузки, характерной для современных мегаполисов, набережные зоны подвергаются различным видам негативного воздействия, среди которых шумовое загрязнение занимает особое место.

Акустическая экология урбанизированных территорий в последние десятилетия привлекает все большее внимание исследователей в связи с растущим осознанием влияния шумового загрязнения на здоровье населения и качество городской среды. В этом контексте набережные, как пространства, предназначенные для рекреации и восстановления психофизиологического состояния горожан, требуют особого внимания с точки зрения акустического комфорта.

Цель исследования – проведение комплексной оценки и детального анализа уровня шумового загрязнения на территории набережных двух крупных российских городов – Казани и Перми.

Методологическая база исследования основана на использовании инновационных технологий, а именно мобильного приложения для измерения уровня шума [1], что позволяет получить репрезентативные данные с высокой степенью пространственного и временного разрешения. Полученные эмпирические данные подвергаются сравнительному анализу с нормативными показателями, установленными в соответствующих регламентирующих документах.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных подходов к оптимизации акустической среды городских набережных, что является неотъемлемым компонентом в контексте повышения качества жизни городской среды и реализации концепции устойчивого развития городов. Результаты исследования могут послужить основой для разработки рекомендаций по снижению уровня шумового загрязнения и улучшению акустического комфорта на набережных, что, в свою очередь, будет способствовать повышению их рекреационной привлекательности и общего качества городской среды.

Согласно нормативно-правовым документам шумовым загрязнением называют «шум в определенной ситуации в определенное время и в определенном месте, обычно состоящий из шума различных источников как подвижных (средства дорожного, рельсового, водного и воздушного транспорта), так и расположенных стационарно (промышленные предприятия, энергетические и прочие установки, а также инженерно-техническое и прочее оборудование в жилых и общественных зданиях)» [2]. В качестве объекта исследования авто-

ром были взяты набережные городов Казани и Перми. Сравнительный анализ уровня шумового загрязнения на набережных Перми и Казани поможет оценить реальную ситуацию с шумовым фоном на этих территориях и выявить потенциальные проблемные зоны, где необходимо предпринять меры для снижения уровня шума. Проведение сравнительного анализа позволит оценить эффективность принятых мер по снижению шумового загрязнения на набережных данных городов. Такое исследование поможет определить наиболее эффективные методы и технологии, которые могут быть применены для улучшения ситуации с уровнем шума на подобных территориях в будущем.

Вопросами изучения шумового загрязнения занимались такие авторы, как М.В. Черных [3], Г.Т. Армишева, А.А. Бутуева [4], П.А. Суханов, С.А. Куролап, Т.А. Прожорина [5, 6], А.Ю. Вериженко, О.П. Моисеенко, Т.И. Тихомирова [7], Т.В. Бобра, М.Ю. Каменева [8].

Нормативная база документов, устанавливающих требования к защите от шума в жилых зонах и помещениях жилых и общественных зданий в Российской Федерации, широкая и содержит ГОСТ 23337-2014 и СП 51.13330.2011 в качестве обязательных документов. Методы акустического расчета представлены в СП 51.13330.2011, ГОСТ 31295.2-2005 и МУК 4.3.2194-07. Однако документы содержат похожие требования, но несогласованность в формулировках может привести к проблемам, включая проблему определения источника шума как точечного или протяженного. Отсутствие критериев в документах также может привести к завышению результатов расчетов на границе жилой зоны предприятия, находящегося на удалении от источника шума. Это требует от предприятий принятия избыточных мер по шумозащите и отвлекает их ресурсы от природоохранной деятельности. Актуальным вопросом является организация шумового мониторинга согласно ГОСТ 53187-2008. Проведение мониторинга позволяет составить оперативную шумовую карту, на которую заносятся данные о шуме на территории. Карта помогает оценить воздействие шума от источников и планировать мероприятия по снижению его уровня до нормативных значений. Однако проведение непрерывных измерений в течение суток усложняет процедуру мониторинга. ГОСТ также регламентирует проведение мониторинга

отдельных источников шума, но в плотной городской застройке это может быть затруднительно. В большинстве случаев расположение контрольных точек на границе санитарно-защитных зон (СЗЗ) предприятия не позволяет оценить влияние его шума на окружающую среду из-за высокого уровня шума от транспорта или других соседних предприятий [9].

Материалы и методы исследования

Для оценки шумового загрязнения автором составлена методика. Измерения шума проводились в густонаселенных точках на набережных, равноудаленных друг от друга, при помощи мобильного шумомера. Замеры были выполнены следующим образом:

1. Подготовительный этап – убедиться в работоспособности мобильного шумомера, провести контрольные измерения.

2. Основной этап – определить равноудаленные густонаселенные точки на набережных, где будет проводиться измерение шума, начать измерения шума в первой точке, активировав мобильное приложение и запустив процесс измерения, проводить измерение шума в течение одной минуты, по окончании измерения записать высокий и низкий показатели шума, отображаемые в мобильном приложении, повторить измерение шума в той же точке еще 9 раз, чтобы получить набор из 10 измерений, дальше переход к следующей точке и повторение процедуры измерения.

3. Анализ результатов – для каждой точки выполнить анализ. Сложить все 10 измерений для каждого створа и вычислить средний уровень шума, разделив сумму на число измерений, записать средний показатель шума для каждой точки и сравнить их между собой.

Таблица 1

Итоговые данные по шуму на набережной р. Казанки в г. Казань

Номер створа	Минимальный показатель, дБ	Максимальный показатель, дБ	Средний показатель, дБ
1	64	73	68,5
2	60	71	65,5
3	52	73	62,5
4	57	76	66,5
5	65	72	68,5
6	63	73	68
7	57	61	59
8	64	76	70

Примечание: составлено автором.

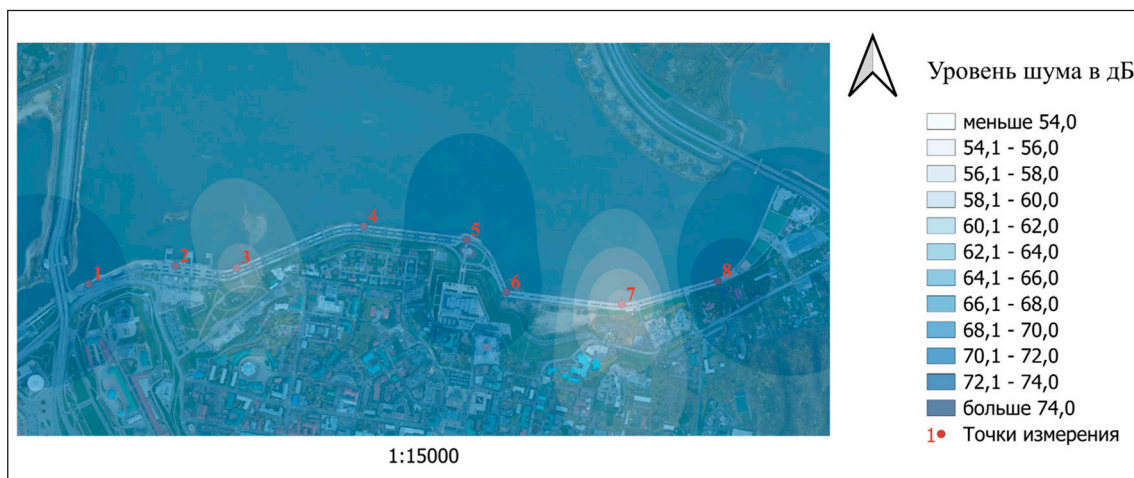


Рис. 1. Интерполяция средних значений измерения шума на набережной р. Казанки

Таблица 2

Итоговые данные по шуму на набережной р. Камы в г. Пермь

Номер створа	Минимальный показатель, дБ	Максимальный показатель, дБ	Средний показатель, дБ
1	51	87	69
2	54	85	69,5
3	57	84	70,5
4	59	87	73
5	50	61	55,5
6	59	78	68,5
7	56	73	67
8	53	65	59

Примечание: составлено автором.

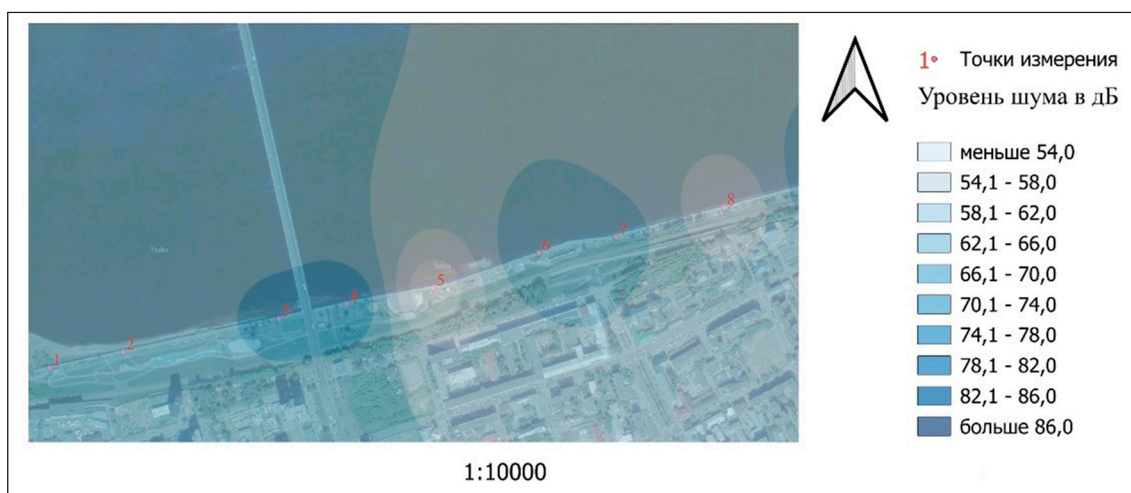


Рис. 2. Интерполяция средних значений измерения шума на набережной р. Камы

После сбора данных высокий и низкий показатели шума фиксируются, а затем вычисляется средний показатель. Эта методика позволяет получить представление об уровне шума в разных точках набережных и проанализировать его распространение на окружающую среду.

Итоговые данные для Казани отображены в табл. 1 и на рис. 1, для Перми – в табл. 2 и на рис. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного акустического мониторинга набережных Казанки и Камы были получены эмпирические данные, характеризующие уровень шумового загрязнения исследуемых территорий. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: на набережной

р. Казанки минимальный зафиксированный уровень шума составил 52 дБ, максимальный зафиксированный уровень шума достиг 76 дБ, среднее арифметическое значение уровня шума равно 66,09 дБ.

На набережной р. Камы минимальный зафиксированный уровень шума составил 50 дБ, максимальный зафиксированный уровень шума достиг 87 дБ, среднее арифметическое значение уровня шума равно 66,5 дБ.

Для оценки полученных результатов в контексте нормативных требований был использован СанПиН 1.2.3685-21 [10], в частности раздел, регламентирующий допустимые уровни шума для «Площадок отдыха, функционально выделенных на территории микрорайонов и групп жилых домов, домов отдыха, пансионатов, стационарных организаций социального обслуживания,

организаций для детей-сирот и детей, оставшихся без попечения родителей, площадок дошкольных образовательных организаций и других образовательных организаций». Согласно данному нормативу, максимально допустимый уровень шума на указанных территориях не должен превышать 60 дБ.

Сравнительный анализ полученных данных с нормативными значениями показал, что на набережной р. Казанки только в одной точке измерения (т. 7) уровень шума соответствовал нормативным требованиям, составив 59 дБ, доля точек с превышением допустимого уровня шума составила 87,5%, доля точек с уровнем шума в пределах нормы составила 12,5%.

На набережной р. Камы в двух точках измерения (створы 5 и 8) уровень шума соответствовал нормативным требованиям, составив 55,5 и 59 дБ соответственно, доля точек с превышением допустимого уровня шума составила 70%, доля точек с уровнем шума в пределах нормы составила 25%.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном превышении допустимых уровней шумового загрязнения на обеих исследуемых набережных. Это указывает на наличие серьезной экологической проблемы, требующей разработки и внедрения комплекса мероприятий по снижению уровня акустического загрязнения в данных рекреационных зонах.

Следует отметить, что, несмотря на схожие средние значения уровня шума на обеих набережных (66,09 дБ для Казанки и 66,5 дБ для Камы), на набережной Камы наблюдается более высокий максимальный уровень шума (87 дБ против 76 дБ на Казанке) и более низкий минимальный уровень (50 дБ против 52 дБ на Казанке). Это указывает на большую изменчивость акустической обстановки на набережной Камы, что может быть обусловлено различиями в интенсивности и характере антропогенной нагрузки на исследуемой территории.

Заключение

В заключение проведенного исследования можно констатировать, что полученные результаты вносят существенный вклад в понимание акустической экологии урбанизированных прибрежных зон на примере набережных городов Казани и Перми. Эмпирические данные, собранные с использованием мобильного приложения для измерения уровня шума, позволили провести компаративный анализ фактических показателей акустического

загрязнения с нормативными значениями, установленными в соответствующих регулятивных документах.

Результаты исследования демонстрируют статистически значимое превышение допустимых уровней шумового загрязнения на исследуемых территориях, что свидетельствует о наличии серьезной экологической проблемы, потенциально негативно влияющей на психофизиологическое состояние и качество жизни резидентов и посетителей данных рекреационных зон. Выявленная акустическая ситуация требует разработки и имплементации комплекса мер по минимизации антропогенного шумового воздействия.

На основании полученных данных предлагается ряд рекомендаций по оптимизации акустической среды набережных, включающих внедрение инновационных технологий шумоподавления, таких как установка звукоизоляционных экранов с учетом специфики городского ландшафта, а также интенсификацию озеленения территорий с использованием видов растений, обладающих повышенными шумопоглощающими свойствами. Реализация предложенных мероприятий позволит значительно повысить экологическую устойчивость и рекреационную привлекательность исследуемых объектов городской инфраструктуры.

Настоящее исследование открывает перспективы для дальнейшего изучения проблематики акустической экологии урбанизированных прибрежных территорий и разработки инновационных подходов к созданию комфортной городской среды с учетом современных экологических вызовов. Полученные результаты могут служить основой для формирования научно обоснованных стратегий управления городскими территориями и разработки нормативно-правовых актов в области охраны окружающей среды и градостроительства.

Список литературы

1. Шумомер [Электронный ресурс]. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.binghuo.soundmeter> (дата обращения: 20.05.2024).
2. ГОСТ 23337-2014. ШУМ. Методы измерения шума на территориях жилой застройки и в помещениях жилых и общественных зданий. 2019. 6 с.
3. Черных М.В. Оценка шумового загрязнения г. Перми от транспорта // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2020. Т. 1. С. 242–245.
4. Армишева Г.Т., Бутузова А.А. Защита урбанизированных территорий от транспортного шума // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2017. Т. 1. С. 86–89.

5. Суханов П.А., Куролап С.А., Прожорина Т.И. Оценка зоны акустического дискомфорта на примагистральных территориях окрестностей города Воронежа (на примере жилищного комплекса «Задонье Парк») // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2023. № 1. С. 88–96.
6. Суханов П.А. Оценка шумового воздействия от автотранспорта в новых микрорайонах города Воронежа (на примере жилищного комплекса «Задонье Парк») // Экологическая оценка факторов риска загрязнения воздушно-го бассейна крупных промышленных центров Черноземья: сборник научных статей. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2023. С. 105–108.
7. Вериженко А.Ю., Моисеенко О.П., Тихомирова Т.И. Влияние шумового загрязнения на окружающую среду и человека // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1 (5). С. 120–123.
8. Бобра Т.В., Каменева М.Ю. Геоэкологический анализ и картографирование шумового загрязнения урбанизированных территорий (на примере г. Симферополь) // Геополитика и экогеодинамика регионов. Секция: Науки о Земле и смежные экологические науки 2022. № 4. С. 121–131.
9. Новикова С.А., Мартынов Д.Н. Влияние зеленых насаждений на снижение уровня шума от автотранспортных потоков в Иркутске // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 4. С. 16–25.
10. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» / Постановление Роспотребнадзора от 28.01.2021 г. № 2. URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения: 15.06.2024).

СТАТЬЯ

УДК 550.461:543.3
DOI 10.17513/use.38308

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ВОД МАЛЫХ РЕК ПРИИШИМЬЯ**

¹Шуплецова П.А., ¹Белюсова Ю.О., ²Ларин С.И., ¹Ларина Н.С.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень,
e-mail: polina.a.shupletsova@gmail.com;

²Институт криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменского научного центра
Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, e-mail: silarin@yandex.ru

Целью данного исследования являлось изучение особенностей гидрохимического состава вод малой реки Ик на всей ее протяженности. Пробы воды отбирались вблизи населенных пунктов на всей протяженности реки для учета влияния природных и антропогенных факторов на формирование химического состава вод. В пробах воды были определены интегральные показатели (рН, удельная электропроводность, взвешенные вещества, цветность, перманганатная окисляемость, растворенный кислород), определено содержание главных ионов и биогенных веществ. В ходе мониторинга были зафиксированы изменения химического состава и качества вод реки за последние 55 лет (по исследованиям 1965, 1991, 2020 гг.). Установлено, что минерализация вод р. Ик значительно снижается от истока к устью. В настоящее время воды реки относятся к слабощелочным, наблюдается тенденция к их защелачиванию. Гидрохимическая классификация со временем изменилась принципиально (гидрокарбонатно-кальциевые), но содержание ионов натрия значительно возросло. Органические вещества и соединения азота содержатся в пределах установленной нормы. В 2020 г., по сравнению с более ранними исследованиями, проблема повышенного содержания фосфатов значительно усугубилась (увеличилась на порядок), в связи с различными источниками антропогенного поступления в речную систему и обмелением реки. Это увеличивает процесс эвтрофикации реки, что может вызвать развитие цианобактерий и увеличение степени токсичности воды. Увеличение количества растворенного кислорода и снижение содержания взвешенных веществ может привести к усилению процессов самоочищения рек.

Ключевые слова: малые реки, мониторинг, гидрохимический состав вод, динамика, антропогенное влияние

Исследование выполнено в рамках госзадания № FWRZ-2021-0012 с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тюменского государственного университета «Рациональное природопользование и физико-химические исследования».

**FEATURES OF THE PRIISHIMYE SMALL RIVERS
WATERS HYDROCHEMICAL COMPOSITION**

¹Shupletsova P.A., ¹Belousova Yu.O., ²Larin S.I., ¹Larina N.S.

¹Tyumen State University, Tyumen, e-mail: polina.a.shupletsova@gmail.com;

²Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, e-mail: silarin@yandex.ru

The purpose of this work was to study the characteristics of the small Ik river waters hydrochemical composition along its entire length. Water samples were taken near settlements to consider the influence of natural and anthropogenic factors on the formation of waters chemical composition. Integral indicators, the content of major ions and biogenic substances were determined in the water samples. Changes in the chemical composition and quality of river waters had been recorded over the past 55 years (according to studies in 1965, 1991, 2020). It had been established that the mineralization of the Ik river waters decreases significantly from source to mouth. Over time, the water becomes alkalized. Currently they are classified as slightly alkaline. The hydrochemical classification does not change fundamentally over time (bicarbonate-calcium), but the content of sodium ions has increased significantly. Organic substances and nitrogen compounds are contained within the established norm. In 2020, compared to earlier research, the problem of high phosphate levels has worsened. The reasons are anthropogenic pollution of the river system and swallowing of the river. This increases the process of the river eutrophication, which can cause the development of cyanobacteria and an increase in the degree of toxicity of the water. An increase in the amount of dissolved oxygen and a decrease in the content of suspended solids can lead to increased self-purification processes of the river.

Keywords: small rivers, monitoring, hydrochemical composition of waters, dynamics, anthropogenic influence

The study was carried out within the framework of the state task no. FWRZ-2021-0012 using the equipment of the Center for Collective Use of Tyumen State University "Rational Environmental Management and physico-chemical research".

Введение

Актуальность проблемы загрязнения речных экосистем существенно возросла в связи с нарастающим дефицитом пре-

сных вод [1; 2], связанным в том числе с изменением климата, обмелением рек, изменением их гидрохимического состава. Решение проблемы загрязнения рек требу-

ет комплексного подхода к их мониторингу в связи с увеличением числа факторов, влияющих на состав вод [3; 4]. Малые реки являются формирующим звеном более крупных речных экосистем, поэтому их изучение является актуальным направлением гидрохимических исследований [5–7]. Антропогенное воздействие на малые реки, увеличение количества неочищаемых стоков, строительство плотин и изменение русел приводит к серьезным изменениям в гидрологическом и гидрохимическом режиме рек, качестве вод, возможности их использования для питьевых и технических целей [8]. Низкая способность к самоочищению, связанная, в частности, с относительно небольшой площадью малых рек, низкой скоростью движения водных масс, а на некоторых участках – ее отсутствие делает их более уязвимыми к загрязнениям, приводит к преждевременному переходу рек в фазу старения: снижению водности, интенсификации эвтрофирования и т.п. [9]. Эти факторы приводят к распространению в воде опасных патогенов и поллютантов, многие речные воды невозможно использовать в связи с риском для здоровья человека, значительно снижается качество растительной, животной и рыбной продукции.

На юге Западной Сибири имеется большое количество рек разного масштаба, играющих важную роль в водообеспечении региона. Гидрологическая сеть региона широка и разнообразна и включает в том числе большое количество малых рек, формирующих водный ресурс более крупных рек. Например, одним из левых притоков р. Ишим является малая река Ик (длина реки 118 км) и ее приток (р. Черемшанка), бассейн которой расположен на границе лесостепной и подтаежной зон Западно-Сибирской равнины. Водосборная площадь (2830 км²) реки имеет довольно высокую заболоченность (10–15%). На берегах реки расположено значительное количество небольших поселений, вблизи которых открытые участки используются под пашни, сенокос и выгон. Грунты бассейна суглинистые и торфяные. Стационарные наблюдения на р. Ик по ограниченному числу гидрохимических показателей проводились в 1964–1967 гг. у с. Готопутово [10, с. 326–327], которые в 1967 г. были закрыты в связи с возведением плотин на реке. В 1991 г. авторами [11] проведено гидрологическое описание реки, потенциальных источников загрязнения, определен гидрохимический состав вод (у д. Боково), которая расположена несколько

ниже с. Готопутово. Проведение мониторинга реки, даже малой, в одной точке не позволяет получить информацию о динамике изменения состава вод реки на всей ее протяженности, установить источники загрязнения рек и оценить способность реки к самоочищению. Кроме того, отбор проб в различных точках также может привести к невозможности сопоставления результатов, полученных в разное время, что затрудняет мониторинг рек в связи с отсутствием стационарных пунктов наблюдений. Однако наличие даже столь скудных данных позволит оценить характер происходящих изменений в качестве вод малых рек данного региона в течение последних 60 лет.

Целью данного исследования являлось изучение особенностей гидрохимического состава вод малой реки Ик на всей ее протяженности, что позволит подойти к мониторингу реки и оценке качества вод и источников ее загрязнения и эвтрофирования за относительно большой промежуток времени.

Для этого пробы воды анализировались на содержание главных ионов и биогенных веществ вблизи населенных пунктов на всем протяжении реки. Определены интегральные показатели качества вод. Проведено сопоставление полученных результатов с полученными ранее [10, с. 325–327, 410–416; 11].

Материалы и методы исследования

Отбор проб воды в р. Ик (т. 1–11) и р. Черемшанка (т. 12) проводился в соответствии с нормативными документами [12, с. 6–127] в 2020 г. вблизи основных населенных пунктов (рис. 1). Пробы были профильтрованы через фильтр «синяя лента». При определении фосфора отдельно проводился анализ воды и взвешенных веществ.

Определение рН проводилось потенциометрически, удельной электропроводности (УЭП) – кондуктометрически, остальные интегральные показатели – методом титрования. Главные ионы, биогенные вещества определяли на установке «Капель-105», фосфаты – фотометрически.

Результаты исследования и их обсуждение

Интегральные показатели качества вод

По течению р. Ик рН воды изменяется незначительно и в среднем составляет $8,37 \pm 0,06$ (рис. 2, а), то есть воды относятся к классу слабощелочных.

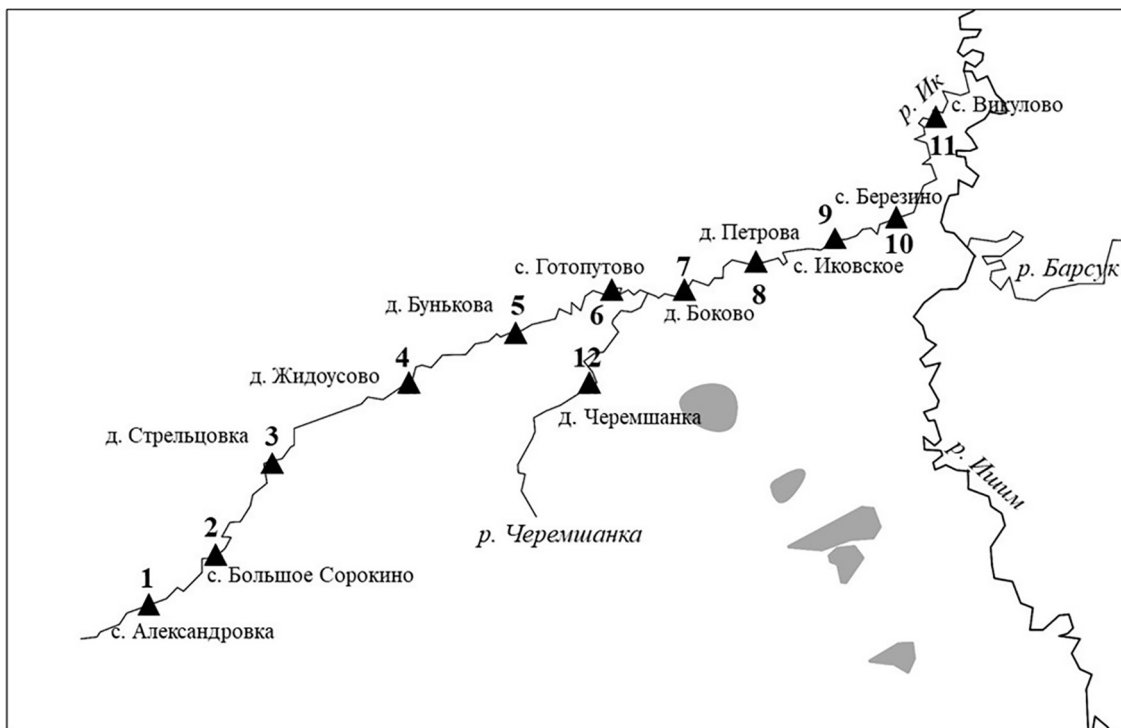


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды на р. Ик и ее притоке (р. Черемшанка)

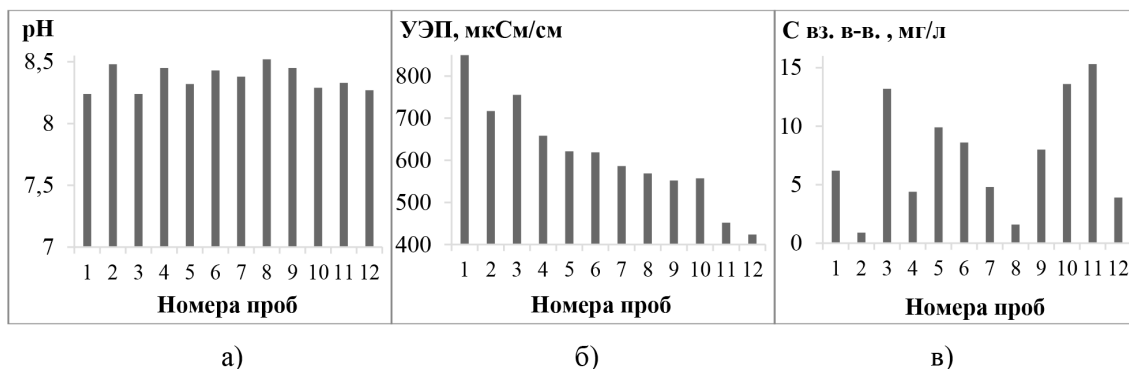


Рис. 2. Распределение значений рН (а), удельной электропроводности УЭП (б) и концентрации взвешенных веществ (в) в р. Ик и Черемшанка

В 1964–1967 гг. значения рН по этой реке отсутствуют, а в 1991 г. у с. Боково [11] рН составляло $7,63 \pm 0,20$, что свидетельствует о смещении рН в щелочную область в период наблюдений. В р. Ишим рН воды ниже (8,10) [14], то есть вода р. Ик может оказывать влияние на кислотность вод принимающей реки.

Минерализация вод реки Ик (УЭП) изменяется от 850 (у истока) до 450 мкСм/см и в среднем составляет 613 ± 80 мкСм/см (рис. 2, б), то есть уменьшается почти в 2 раза от истока к устью. В этом наблюдается некоторое сходство изменения данного показателя в другом притоке р. Ишим –

р. Барсук [9]. На всей протяженности реки вода относится к пресным (до 1 г/л). В притоке р. Ик (т. 12, р. Черемшанка) зафиксировано минимальное значение минерализации – 424 мг/л. Река Черемшанка впадает в р. Ик между т. 6 и т. 7, что несколько понижает ее минерализацию. Однако более значительное снижение УЭП наблюдается после т. 10 (с. Березино), где река меняет направление, и к т. 11 (с. Викулово) УЭП уменьшается на 100 мкСм/см. При исследовании вод р. Ик в 1965 г. [10, с. 411] (т. 6, с. Готопутово) минерализация составляла 720 мг/л, сейчас – 620 мг/л, в 1991 г. (т. 7, с. Боково) минерализация вод была почти

в 2 раза ниже (400 мг/л), в 2020 г. минерализация снова увеличилась почти в 1,5 раза (590 мг/л), хотя осталась несколько ниже, чем в 1965 г. По данным [13], минерализация вод р. Ишим составляет 690 мг/л, что значительно выше, чем в устье р. Ик.

Содержание *взвешенных веществ* (ВВ) на всей протяженности реки не превышает установленную норму для поверхностных вод (30 мг/л), но изменяется в широких пределах – от 0,9 до 15,3 мг/л (рис. 2, в). Максимальное содержание взвешенных веществ наблюдается в устье реки – т. 10 и 11, минимальное в т. 2 и 8, а также в р. Черемшанка (т. 12). В 1991 г. содержание ВВ у с. Боково (т. 7) составляло 58 мг/л [11], что превышало норму почти в 2 раза. Столь существенное снижение содержания ВВ за последние 30 лет может быть связано с понижением уровня реки в межень в связи с климатическими факторами и снижением размыва плотин со временем.

Показатель цветности на протяжении реки (рис. 3, а) варьируется в пределах 10 градусов цветности (от 25 до 35) и в среднем составляет 34 ± 4 град. цв. Исключения составляют т. 2 (с. Большое Сорокино) и 12 (р. Черемшанка). В т. 2 это может быть связано с болотным питанием реки на этом участке или антропогенным воздействием, что более вероятно. Причиной может быть резкое изменение формы долины в этой части реки, здесь она перекрыта земляной долиной с отводом воды через две трубы, ее пересекает грунтовая дорога. На этом участке реки наблюдается зарастание, засоренность остатками растительности, отходами с ферм, что также может влиять на цветность и мутность вод. Плотина, расположенная на р. Черемшанка (т. 12), приводит

к размыванию берегов в период половодья и приводит к отсутствию стока. Воды малой реки Ик имеют относительно невысокие значения показателя цветности, но для большинства проб она значительно выше значений, характерных для р. Ишим (5 град. цв.) [13], что представляет некоторую опасность загрязнения вод основной реки.

Перманганатная окисляемость (ПО), характеризующая содержание легко окисляемых органических веществ, распределена неравномерно по течению реки (рис. 3, б). В среднем по реке ПО составляет $4,6 \pm 1,0$ мгО/л, что соответствует нормальным значениям для поверхностных вод (5–12 мгО/л), а в половине точек отбора – ниже 5 мгО/л. Исключением является т. 2 (с. Б. Сорокино), где окисляемость выше средней более чем в 2 раза, что согласуется с величиной цветности.

Содержание *растворенного кислорода* в р. Ик изменяется от 10 до 15 мг О₂/л, среднее значение по реке – $12,7 \pm 0,9$ мг О₂/л (рис. 3, в). Содержание растворенного кислорода в т. 7 (д. Боково) в 1991 г. [11] составляло $8,6 \pm 0,9$ мг О₂/л, к 2020 г. оно увеличилось до 13,1 мг О₂/л (почти в 2 раза). Относительно малая цветность воды и величина перманганатной окисляемости, а также высокое содержание растворенного кислорода на протяжении всей р. Ик свидетельствует о незначительном влиянии болотного питания на качество вод или высокой самоочищающей способности реки. В частности, увеличение количества растворенного О₂ и снижение концентрации ВВ по сравнению с данными 1991 г. [11] может свидетельствовать о некотором улучшении состояния реки и повышении ее самоочищающей способности.

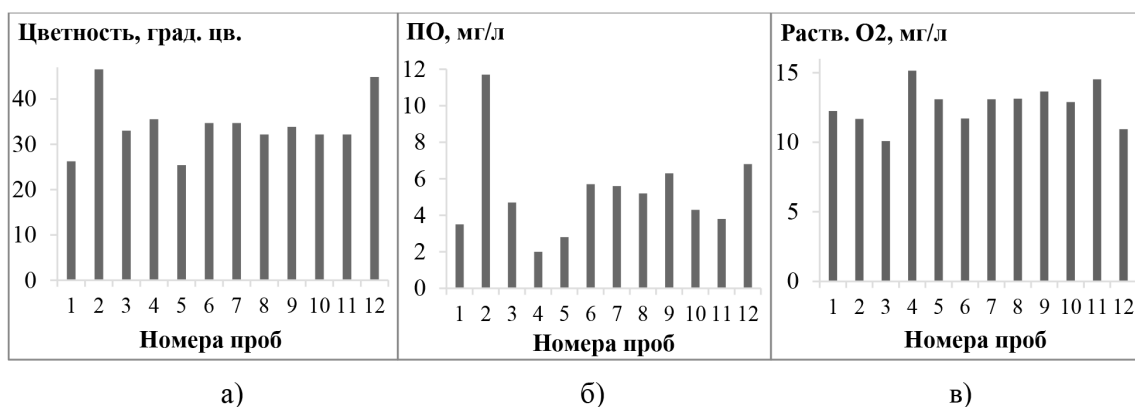


Рис. 3. Распределение показателя цветности (а), взвешенного вещества (б) и растворенного кислорода (в) в пробах р. Ик и ее притоке

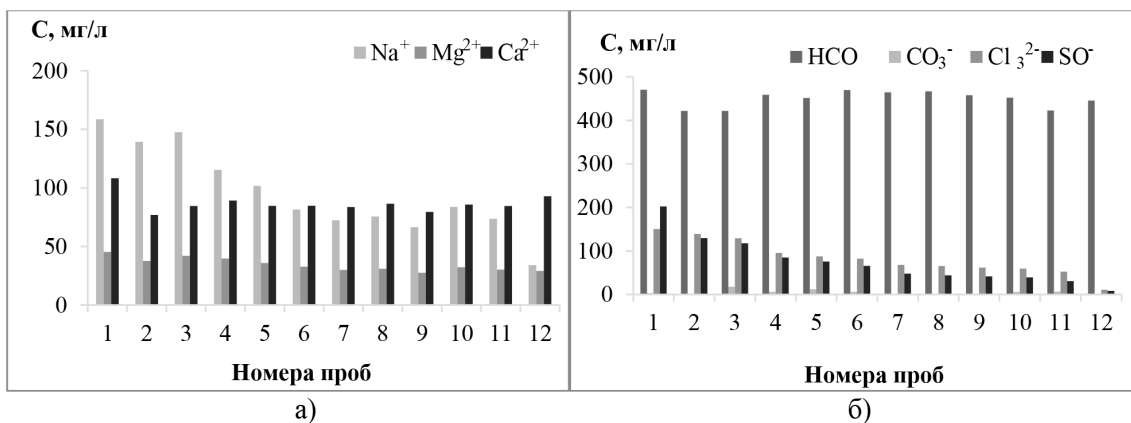


Рис. 4. Распределение содержания главных ионов: (а) катионов, (б) анионов – в пробах р. Ик и Черемшанка

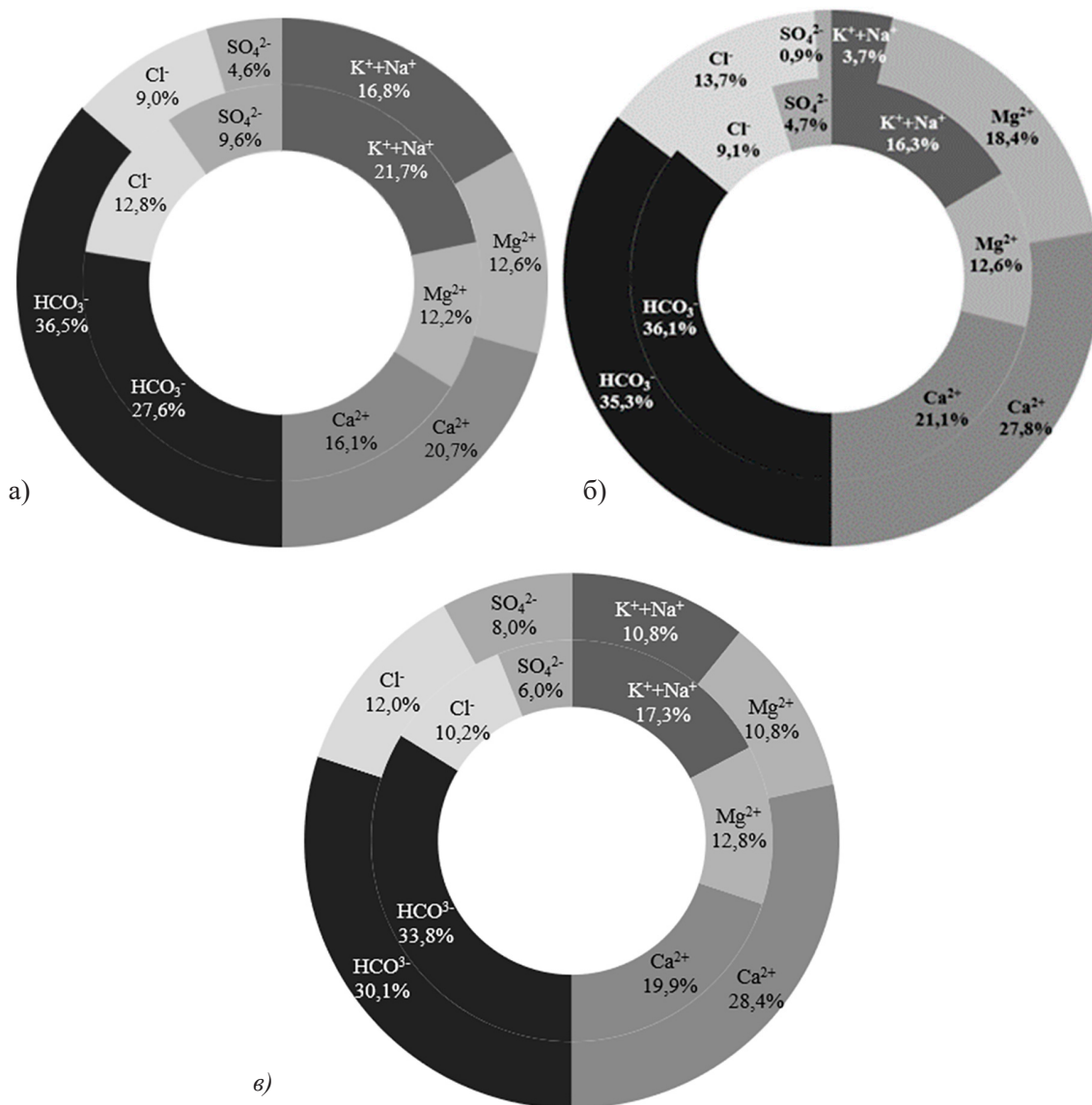


Рис. 5. Диаграммы Толстихина: (а) – в верховье (т. 1–5, внутреннее кольцо) и низовье (т. 6–11) р. Ик в 2020 г.; (б) – у д. Боково (внешнее – 1991 г.; внутреннее – 2020 г.); (в) – у с. Гопотутово (внешнее – 1965 г.; внутреннее – 2020 г.)

Гидрохимический состав вод характеризуется содержанием главных ионов (рис. 4). Концентрация ионов натрия (рис. 4, а) в верховье реки до т. 6 довольно высока и находится в пределах от 100 до 160 мг/л. В нижней части реки $C(\text{Na}^+)$ изменяется незначительно и составляет около 70 мг/л. Минимальное содержание ионов (34,04 мг/л) зафиксировано в р. Черемшанка (т. 12). Это более чем в 2 раза ниже среднего содержания ионов в р. Ик (95,87 мг/л). Содержание ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} изменяется по течению реки незначительно, однако максимальные содержания ионов (45,4 и 108,3 мг/л соответственно) также зафиксированы у истока, в т. 1 (с. Александровка).

В анионном составе (рис. 4, б) преобладают HCO_3^- -ионы, содержание которых изменяется незначительно и в среднем составляет 450 ± 12 мг/л. Карбонат-ионы были обнаружены в точках отбора 1, 3, 4, 5, 6, 11 и 12. Максимальное содержание (18 мг/л) установлено в т. 3 (д. Стрельцовка). Концентрация Cl^- и SO_4^{2-} снижается, особенно в верховье р. Ик: снижение Cl^- – в 3 раза, SO_4^{2-} – более чем в 6 раз. Аномально низкие значения данных показателей зафиксированы в р. Черемшанка.

Различие в гидрохимическом составе в верховье и низовье р. Ик более наглядно проявляется при построении диаграмм Толстихина для средних значений на этих участках (рис. 5, а). Тип воды на обоих участках гидрокарбонатный натриево-кальциевый, но в низовье гидрокарбонат-ионы абсолютно преобладают (37%), а в верховье их содержание снижается до 28%, при этом концентрация Cl^- и SO_4^{2-} увеличивается.

Наличие литературных данных по гидрохимическому составу вод реки в 1991 [11] и 1965 гг. [10, с. 326–327] в средней части (д. Боково и с. Готопутово соответственно) позволило проследить многолетнюю динамику его изменения (рис. 5, б, в). В катионном составе т. 7 (у д. Боково) к 2020 г. значительно увеличилось (в 4 раза) содержание ионов Na^+ (рис. 5, б), а Mg^{2+} и Ca^{2+} снизилось примерно на 9%. А в анионном составе изменения не столь значительны, можно отметить значительный рост SO_4^{2-} . В 1991 г. воды (у д. Боково) относятся к гидрокарбонатно-кальциевым, с высоким содержанием магния. В 2020 г. класс воды не изменился (гидрокарбонатно-кальциевый), но наблюдается высокое содержание ионов Na^+ . Сопоставление данных 1965 и 2020 гг. было проведено в т. 6 (у с. Готопутово), так как в прошлом изучение состава воды проводилось только в этой точке. В настоящее время состав вод в т. 6 и 7 по ряду показателей различается значительно, что потребовало использования различных данных 2020 г. Наиболее значительные изменения произошли в катионном составе: содержание Na^+ увеличилось, а Ca^{2+} – снизилось более чем в 1,5 раза. В анионном составе изменения незначительны, наблюдается небольшое снижение содержания SO_4^{2-} и Cl^- за счет увеличения доли HCO_3^- . В 1965 г. воды р. Ик были отнесены к гидрокарбонатно-кальциевым. В 2020 г. тип воды аналогичен, но отмечается высокое содержание ионов Na^+ (18%), соизмеримое с долей кальция (20%) в катионном составе, то есть в данном случае можно говорить о гидрокарбонатно-кальциево-натриевом типе.

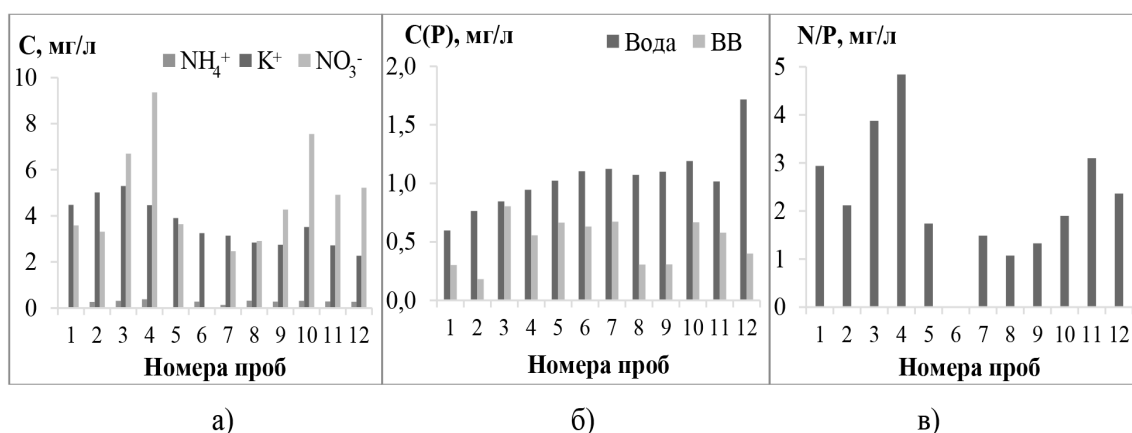


Рис. 6. Распределение содержания: (а) – калия, нитрат-ионов и ионов аммония в воде; (б) – фосфора в пробах воды и взвешенного вещества; (в) – соотношение $[N]:[P]$ в воде

Биогенные элементы определяют, с одной стороны, наличие питательных элементов в воде, с другой, степень эвтрофированности водотока. Средняя концентрация K^+ в воде составляет $3,7 \pm 0,6$ мг/л, но изменяется по течению реки неравномерно (рис. 6, а). Нитрит-ионы в воде не обнаружены. Концентрация ионов аммония не превышает ПДК и в среднем по реке составляет $0,23 \pm 0,07$ мг/л. Средняя концентрация NO_3^- в реке составила $4,49 \pm 1,41$ мг/л. Распределение ионов калия и нитрат-ионов имеет сходный характер. Тренды изменяются по реке трижды: рост – в верховье, относительная стабильность – в средней части реки и уменьшение в низовье. Наиболее ярко эти тренды проявляются для нитратов, что может свидетельствовать о загрязнении реки в т. 3, 4, 10 сельскохозяйственными, бытовыми или животноводческими стоками. Содержание фосфора определялось отдельно в воде и во взвешенном веществе (рис. 6, б). Среднее содержание в воде – $1,04 \pm 0,17$ мг/л, во взвешенном веществе – $0,51 \pm 0,13$ мг/л, то есть фосфор мигрирует преимущественно в растворенном виде. Превышение ПДК_{р-х} ($0,20$ мг/л) в 3–8 раз наблюдалось во всех точках отбора, что значительно выше содержания элемента в 1991 г. – $0,12$ мг/л ($1,2$ ПДК), то есть за последние 30 лет эвтрофирование вод прогрессирует.

Для оценки влияния азота и фосфора на эвтрофирование водного объекта часто используют соотношение N/P, поскольку баланс этих элементов в воде влияет на развитие фитопланктона [14]. Для развития зеленых водорослей требуется преобладание соединений азота, а для сине-зеленых (более токсичных водорослей) – фосфора. Оптимальным считается N/P равное 16, отклонение от которого связывают с развитием соответствующих видов водорослей. В р. Ик данный показатель изменяется от 1 до 5 (рис. 6, в), что существенно ниже оптимального и указывает на преобладающее влияние фосфора в продуцировании биомассы и в процессах эвтрофирования водного объекта. Это при высоком хроническом загрязнении реки вызывает ее зарастание, продуцирование цианобактерий, приводящих к отравлению людей и животных токсинами, а также к гибели рыбы.

Заключение

Вода р. Ик в настоящее время относится к слабощелочным, ее минерализация изменяется от 850 мг/л (у истока) до 450 мг/л (в устье реки). Сопоставление данных 1965,

1991 и 2020 гг. свидетельствует о ритмичности в изменении данного показателя со временем, что может быть связано с климатическими изменениями. Снижение содержания взвешенных веществ в р. Ик в 2020 г., по сравнению с 1991 г., может быть обусловлено значительным обмелением рек в 2020 г., уменьшением скорости водного потока. Увеличение количества растворенного кислорода и снижение концентрации взвешенных веществ по сравнению с данными 1991 г. может свидетельствовать о некотором улучшении состояния реки и повышении ее самоочищающей способности. В реке наблюдается значительное концентрирование фосфора в водорастворимой форме и во взвешенном веществе, которое превышает ПДК_{р-х} во всех точках отбора в 10–25 раз. За последние 30 лет содержание фосфора возросло более чем на порядок, что свидетельствует о резко возрастающей эвтрофированности реки. Азот представлен преимущественно нитратной формой, и его содержание не превышает ПДК_{р-х}. Соотношения азота и фосфора значительно ниже оптимального, что указывает на преобладающее влияние фосфора в продуцировании биомассы, это может привести к развитию цианобактерий и увеличению степени токсичности воды.

Список литературы

1. Ali M.M., Rahman S., Islam M.S., Rakib M.R.J., Hossen S., Rahman M.Z., Kormoker T., Idris A.M., Phoungthong K. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: a probabilistic risk assessment // International journal of sediment research. 2022. Vol. 37, Is. 2. P. 173–187. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2021.09.002.
2. Zhang X., Zhang Y., Shi P., Bi Z., Shan Z., Ren L. The deep challenge of nitrate pollution in river water of China // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 770. P. 144674. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144674.
3. Md Anwar H., Chowdhury R. Remediation of polluted river water by biological, chemical, ecological and engineering processes // Sustainability. 2020. Vol. 12, Is. 17. P. 7017. DOI: 10.3390/su12177017.
4. Jia Z., Li S., Liu Q., Jiang F., Hu J. Distribution and partitioning of heavy metals in water and sediments of a typical estuary (Modaomen, South China): The effect of water density stratification associated with salinity // Environmental Pollution. 2021. Vol. 287. P. 117277. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117277.
5. Соромотин А.В., Кудрявцев А.А., Ефимова А.А., Гертер О.В., Фефилов Н.Н. Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского междуречья // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 48–55. DOI: 10.31857/S0869-78092019248-55.
6. Тарасюк Н.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Факторы формирования гидрохимического состава поверхностных вод бассейна реки Куды (Иркутская область) // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 86–103. DOI: 10.17223/25421379/29/6.
7. Окрут С.В., Зеленская Т.Г., Степаненко Е.Е., Корвин А.А., Халикова В.А. Оценка влияния малых водотоков на гидрохимические и гидробиологические показатели

реки Подкумок // Успехи современного естествознания. 2023. № 2. С. 58–64.

8. Рыков Р.А., Урбанова О.Н., Горшкова А.Т., Бортникова Н.В. Характеристика качественного состава вод малых рек Нижнекамского муниципального района Республики Татарстан // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 69–74. DOI: 10.17513/use.37910.

9. Белоусова Ю.О., Ларин С.И., Шуплецова П.А., Ларина Н.С. Динамика изменения гидрохимического состава вод реки Барсук под влиянием природных и антропогенных факторов // Вода: химия и экология. 2023. № 11. С. 48–55.

10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. Т. 15, Вып. 3. 270 с.

11. Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М. Малые реки в условиях антропогенного воздействия (на примере Восточного Зауралья). Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 1998. С. 35–48.

12. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство: Ч. 2 / О.А. Алешина, Л.А. Волкова, С.С. Волкова, С.Н. Гашев и др. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2012. 304 с.

13. Протокол лабораторных испытаний № 6267 и № 6268 от 30 ноября 2020 г. // Официальный портал органов государственной власти Тюменской области [Электронный ресурс]. URL: <https://abatsk.admtymen.ru/> (дата обращения: 01.06.2024).

14. Кашулин Н.А., Беккелунд А.К., Даувальтер В.А. Особенности летнего пространственного распределения фосфора, азота и хлорофилла-а в крупном эвтрофируемом арктическом озере Имандра (Мурманская область) в связи с массовым развитием фотосинтезирующих микроорганизмов // Биосфера. 2020. Т. 12, № 3. С. 63–92. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V12I3.547.

СТАТЬИ

УДК 556

DOI 10.17513/use.38309

**К КОРРЕКТНОСТИ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ
ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В РУСЛОВЫХ ПОТОКАХ****Лепихин А.П., Синцова Т.Н.***ФГБУН Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru*

Цель исследования – провести оценку эффективности расчетных зависимостей транспортирующей способности русловых потоков. В данной работе рассмотрены причины высокой погрешности расчетных соотношений, используемых для оценки транспорта наносов в русловых потоках. Показано, что данные погрешности связаны в первую очередь с особенностью задания размеров транспортируемых частиц. В экспериментальных лотках, где вариация размеров частиц минимальна, соответственно, и погрешность расчетных соотношений минимальна. В то же время естественные водотоки, как правило, характеризуются значительной неоднородностью размеров частиц, при этом, что принципиально важно, размеры транспортируемых частиц входят в знаменатель расчетных соотношений. Включение случайных параметров в знаменатель расчетных соотношений, как показано в работе, принципиально изменяет характер статических распределений рассматриваемых соотношений. При достаточно высоких значениях коэффициентов вариации размеров транспортируемых частиц $C_v \geq 1$, статистические функции распределения приобретают «тяжелые хвосты», принципиально влияющие на их статистическую оценку. При этом традиционные параметрические методы оценки становятся совершенно неэффективными. Предложено для повышения эффективности расчетных зависимостей транспортирующей способности русловых потоков использование более корректных оценок характерных размеров транспортируемых частиц.

Ключевые слова: транспорт, взвешенные наносы, распределения с «тяжелыми хвостами», транспортирующая способность русловых потоков

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).

**TO THE CORRECTNESS OF ESTIMATING THE SIZES
OF SUSPENDED PARTICLES IN CHANNEL FLOWS****Lepikhin A.P., Sintsova T.N.***Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru*

The aim of the study was to evaluate the effectiveness of the calculated dependencies of the transport capacity of channel flows. The reasons for the high error in the calculated ratios used to estimate the transport of sediments in channel flows are considered. It is shown that these errors are associated, first of all, with the peculiarity of setting the sizes of transported particles. In experimental trays, where the particle size variation is minimal, respectively, and the error in the calculated ratios is minimal. At the same time, natural watercourses, as a rule, are characterized by a significant heterogeneity of particle sizes, while, which is of fundamental importance, the sizes of transported particles are included in the denominator of the calculated ratios. The inclusion of random parameters in the denominator of the calculated ratios, as shown in the work, fundamentally changes the nature of the static distributions of the ratios under consideration. At sufficiently high values of the coefficients of variation of the sizes of transported particles $C_v \geq 1$, the distributions acquire “heavy tails”, which fundamentally affect their statistical evaluation. At the same time, traditional parametric estimation methods become completely ineffective. It is proposed to increase the efficiency of the calculated dependences of the transporting capacity of channel flows to use more correct estimates of the characteristic sizes of transported particles.

Keywords: transport, suspended sediments, “heavy tails” distributions, transport capacity of channel flows

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state assignment (reg. number: 124020500053-6).

Введение

При решении широкого круга задач, связанных как с использованием и охраной поверхностных водотоков, так и с минимизацией вредного влияния вод, требуется оценка их транспортирующей способности по отношению как к взвешенным, так и влекомым наносам. В настоящее время прилагаются значительные усилия в иссле-

довании этого вопроса, предлагается значительное количество различных аналитических расчетных соотношений. В то же время в монографии 1990 г. [1]. К.В. Гришанин писал: «Сегодня при применении формул расхода влекомых наносов к естественным потокам приходится встречаться с ошибками, исчисляемыми десятками, а иногда и сотнями процентов». Более того,

в настоящее время все больше появляется работ, в которых авторы утверждают, что расчетные соотношения, полученные и отработанные на отдельных реках, тем более на экспериментальных лотках, очень трудно переносятся на другие водотоки, дают при таком переносе неприемлемо высокие погрешности [2–4] и др. В связи с этим стали появляться технологии, не включающие в себя такой, казалось бы, определяющий параметр, как размер транспортируемых частиц d [4].

В то же время при построении большинства расчетных соотношений, как правило, принимается, что исходные определяющие параметры задаются с достаточно высокой надежностью, погрешность их задания меньше, чем погрешность определения расчетных значений. К сожалению, данное условие нередко не выполняется, и исходные параметры задаются со значительной погрешностью. Состав транспортируемых частиц также характеризуется весьма существенной неравномерностью. Данные факторы могут очень существенно влиять на точность, надежность предлагаемых расчетных соотношений.

Материалы и методы исследования

При решении очень широкого круга гидрологических и водохозяйственных задач очень часто возникает задача оценки рассматриваемого параметра $x(t)$ по его ограниченной выборке. При решении практических задач, как правило, в первом приближении принимается, что $x(t)$ описывается нормальным распределением, а сами оценки являются робастными. В этом случае наилучшей оценкой определяющего параметра является среднее арифметическое

значение, имеющее при данном объеме выборки минимальную погрешность. Однако в очень многих задачах $x(t)$ входит в знаменатель расчетных соотношений, то есть $1/x(t)$. В то же время хорошо известно, что

$$\frac{1}{x(t)} \neq \frac{1}{x(t)}, \quad (1)$$

при этом величина $1/x(t)$ описывается обратным нормальным распределением [5, 6], для которого не существует первого, второго и более высоких моментов. В данной работе в качестве такого параметра рассматривается размер транспортируемых наносов d . При эйлеровом подходе в любой фиксируемой точке потока изменение размеров транспортируемых наносов будет представлять собой случайный процесс с определенным статистическим описанием. В то же время сами размеры частиц являются определяющим параметром, характеризующим транспортирующую способность водотока.

Аналитические расчетные зависимости являются основным рабочим инструментом в большинстве прикладных, инженерных областей знаний. От корректности данных соотношений зависят все последующие управленческие решения. При этом принципиальное значение приобретает оценка погрешностей рассматриваемой расчетной зависимости, исходя из погрешностей задания исходных параметров.

При этом, если расчетный показатель P , определяемый через N непосредственно измеряемых параметров, то есть $P = f(X_1, \dots, X_N)$, а погрешности их определения характеризуются нормальным распределением, то дисперсия оцениваемого показателя будет составлять

$$\sigma_p^2(N) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{M_i}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 + 2R_{i,j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{M_i} \sigma_{M_j}. \quad (2)$$

Так как

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial \ln f}{\partial x}, \quad (3)$$

то относительная погрешность оценки будет, соответственно,

$$C_{vp}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{vM_i}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 + 2R_{i,j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} C_{vM_i} C_{vM_j}. \quad (4)$$

При этом расчетные соотношения (3) и (4) являются неэффективными при $\sigma_p^2 \geq \sigma_{np}^2$, где σ_p^2 – приемлемая дисперсия для при-

ятия управленческих решений, σ_{np}^2 – погрешность рассматриваемой зависимости. При этом возникает задача найти такое со-

отношение определяющих параметров, чтобы σ_p^2 было бы минимально и удовлетворяло требованию

$$\sigma_p^2 < \sigma_{пр}^2. \quad (5)$$

Поэтому в первую очередь необходима оптимизация выбора определяющих параметров.

Как следует из соотношения (2), для уменьшения дисперсии оцениваемого параметра в расчетных соотношениях должны иметь место статистически независимые параметры. В установившихся прямолинейных водотоках основные морфометрические и динамические параметры потока тесно связаны, что приводит к существенному снижению количества определяющих параметров. Так, наиболее известное соотношение для оценки концентрации взвешенных наносов, $г/м^3$ [7], имеет вид

$$S_{вз} = k_{вз} \frac{V^3}{g \cdot \omega(d) \cdot H}. \quad (6)$$

При использовании соотношения Шези для оценки средней скорости потока V и уравнения Штриклера – Маннинга для параметризации коэффициента Шези, а для гидравлической крупности частиц – квадратичного закона сопротивления имеем

$$\omega(d) \sim \sqrt{g \cdot d}. \quad (7)$$

При данных допущениях расчетное соотношение (6) существенно преобразуется и принимает следующий вид

$$S_{вз} \sim A / d, \text{ где } A = k_{вз1} \cdot H \cdot I^{3/2}, \quad (8)$$

где I – уклон водной поверхности, б/р; $k_{вз1}$ – параметр, $г/м^3$.

При этом уклон водной поверхности является значительно более инерционным показателем динамики потока в отличие от значений локальных скоростей потока. В большинстве расчетных соотношений для оценки расхода влекомых наносов также используют в качестве определяющих параметров скорость и глубину потока, а также размеры транспортируемых частиц [3, 4, 8]. Современные обзоры расчетных соотношений по оценке влекомых наносов даются в работах [9, 10].

Следует заметить, что, вне зависимости от конкретной рассматриваемой модели переноса, интенсивность транспорта частиц должна определяться двумя группами факторов – гидравлических, определяемых динамикой потока, и дисперсионным составом частиц. Соответственно, дисперсия расчет-

ных соотношений также будет определяться особенностями задания этих параметров.

В связи с этим возникает принципиальный вопрос, что является определяющим фактором в формировании повышенной дисперсии при оценке потока наносов? Если перемещение, транспорт наносов определяется из соотношений действующих на частицу силы тяжести и подъемной динамической силы, то зависимость расхода наносов от размера транспортируемых частиц должна иметь в первом приближении следующий вид

$$q_s = \frac{q_0}{d^\alpha}, \quad (9)$$

при этом $1 \leq \alpha \leq 2$. В достаточно общем случае гидравлическая крупность частиц представляет собой скейлинг от размера частиц

$$\omega(d) \sim A_1 \cdot d^{-\alpha(D)}. \quad (10)$$

В зависимости от режима осаждения частиц определяемого числом Бонителли D возможен как квадратичный режим турбулентного осаждения $\alpha(D) = 1/2$ (при $D \gg 1$), так и ламинарного осаждения $\alpha(D) = 2$ (при $D \ll 1$). Таким образом, определяющий параметр для транспорта наносов – размер частиц – входит в знаменатель расчетных соотношений, и при этом размер частиц наносов представляют собой случайную величину, распределение которой существенно отличается от нормального. При этом наличие случайного параметра в знаменателе расчетных соотношений принципиально влияет на характер статистических функций распределения: $S_{тр}(d), q_{вз}(d), q_{влк}$.

Для описания функций распределения скорости осаждения частиц, описываемых соотношением (10), следует воспользоваться соотношением для нелинейного преобразования случайного процесса [5], функция распределения будет описываться как

$$P_z(z) = P_x(f^{-1}(z)) \left| \frac{d(f^{-1}(z))}{dz} \right|, \quad (11)$$

где $f(z)$ – нелинейная функция преобразования случайного процесса z .

Соответственно, учитывая (8), (9), для статистической функции распределения $S_{тр}(d)$ будем иметь

$$P_{S_{тр}}(S_{тр}) = P_d \left(\frac{\Gamma_{вз}}{S_{тр}} \right)^\alpha \left| \frac{\Gamma_{вз}^{\frac{1}{\alpha}} S_{тр}^{1-\frac{1}{\alpha}}}{1 - \frac{1}{\alpha}} \right|. \quad (12)$$

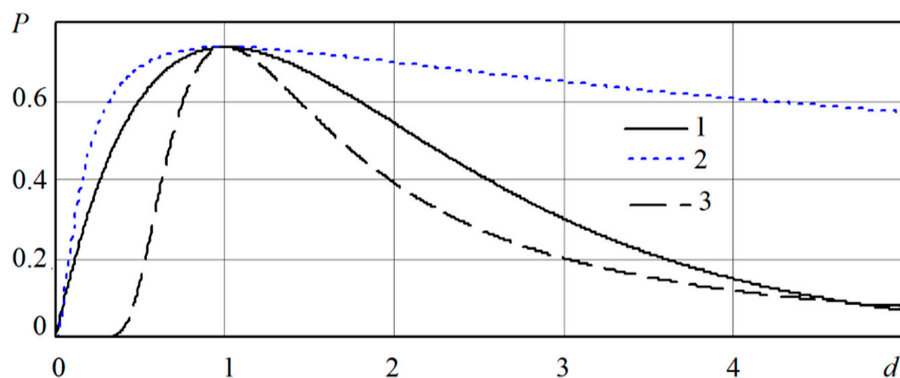


Рис. 1. Сопоставление функции плотности распределения при различных значениях α (1 – $P(x)$ при $\alpha = -1$; 2 – $P_2(x)$ при $\alpha = 0.5$; 3 – $P_3(x)$ при $\alpha = -2$)

Нелинейное преобразование с переходом аргумента в знаменатель очень существенно изменяет поведение статических функций распределения в области значительных отклонений от средних значений (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при $\alpha < 0$ значительно повышается вероятность наблюдения экстремальных значений, что принципиально меняет характер оценки статистических параметров. При этом значения плотности распределения характеризуются очень медленным снижением вероятностей при $d \rightarrow \infty$. Эти распределения в математической статистике получили наименования распределения с «тяжелыми хвостами». Наличие данных «тяжелых хвостов» принципиально влияет на оценку статистических параметров рассматриваемых распределений.

Результаты исследования и их обсуждение

Базовым положением при оценке статистических параметров является априорное допущение их состоятельности, то есть $\sigma_{x_{cp}} \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$, где $\sigma_{x_{cp}}$ – средняя квадратичная погрешность оцениваемого параметра, N – объем рассматриваемой выборки. Выполнимость данной гипотезы относительно первых статистических моментов не вызывает каких-либо сомнений при использовании традиционных для гидрологии распределений: нормального, гамма-распределения, логнормального и т.д. Однако в ряде случаев, когда статистические функции были получены в результате нелинейного преобразования данных распределений, ситуация усложняется, интенсивность снижения $P(S)$ при увеличении S существенно снижается и распределения приобретают свойства распределения с «тяжелыми хвостами».

Так как d в расчетных соотношениях (8, 9) является случайной величиной, то появляется задача оценки среднеквадратичной погрешности $\sigma_{S_{тр}}$ следующей величины:

$$S_{тр} = \frac{A}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^\alpha}, \quad (13)$$

где N – количество выделяемых фракций.

В настоящее время в стохастической гидрологии достаточно хорошо отработана технология моделирования случайных процессов по схеме Монте-Карло [11]. Пример оценки среднеквадратичной погрешности $S_{тр}$ для среднего и медианы для логнормального распределения представлен на рис. 2.

Как следует из рис. 2, величина σ_x очень существенно зависит в первую очередь от однородности размеров частиц в исходных выборках. При коэффициенте вариации $C_v < 1$ рассматриваемые среднеарифметические оценки $S_{тр}$, как показали результаты статистического моделирования при $N \sim 100\,000$, вполне состоятельны и эффективны, а $\sigma_x \sim 0$.

В то же время при $C_v > 1-1,5$ эти оценки являются неустойчивыми. Таким образом, при $C_v > 1-1,5$ они практически не зависят от характера распределения размера частиц, среднеарифметические оценки становятся несостоятельными и неэффективными, поэтому они не могут быть использованы при оценке транспорта наносов. Установленная неэффективность среднеарифметических значений при $C_v > 1-1,5$ наглядно объясняет, почему расчетные схемы, отработанные на лотках с достаточно однородными размерами транспортируемых частиц, оказываются в ряде случаев совершенно неэффективными в естественных водотоках с широким диапазоном размеров транспортируемых наносов.

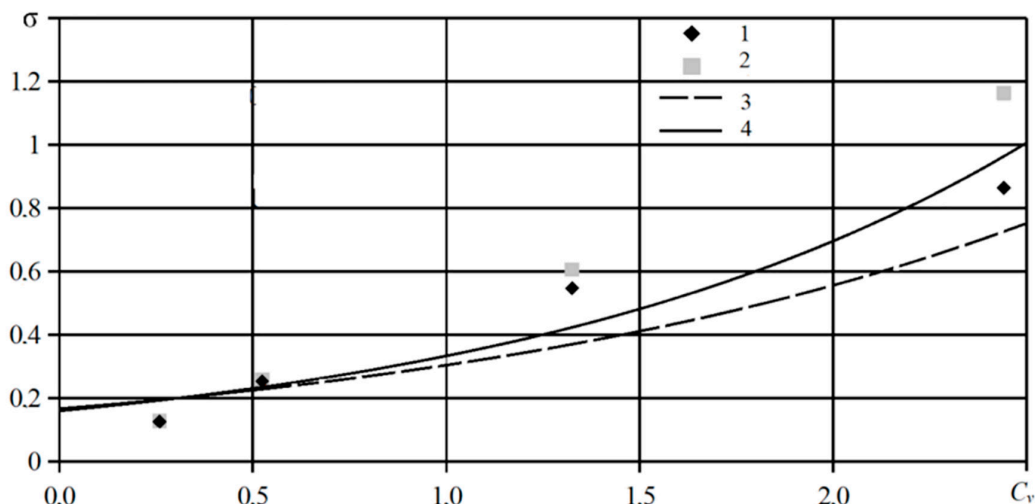


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной относительной погрешности (σ_x) средних значений S и медианы (σ_M) при $S = 1/d^{1/2}$ от коэффициента вариации крупности частиц C_v для логнормального распределения d ($1 - \sigma_x$; $2 - \sigma_M$; $3 -$ аппроксимация $\sigma_x = f(C_v)$; $4 -$ аппроксимация $\sigma_M = f(C_v)$)

В настоящее время выполнено большое количество исследований по оценке параметров распределений с «тяжелыми хвостами» [12, 13] и др., для которых не существует не только вторых статистических моментов, но и первых. В простейшем случае предлагается использование в качестве характерных значений не средних арифметических значений, а медианы. Для ухода от «тяжелых хвостов», как правило, используется нелинейное преобразование исходной выборки с использованием некоторых монотонных возрастающих, взаимно-однозначных функций [13].

Выводы

1. Большинство расчетных соотношений по оценке транспорта наносов включает в качестве определяющего параметра размер транспортируемых частиц наносов. При этом, исходя из физики рассматриваемых процессов, они входят в знаменатель этих расчетных зависимостей. В то же время само распределение крупности этих частиц характеризуется существенной изменчивостью. В этом случае суммарные потоки наносов всех фракций будут иметь статистические распределения с очень «тяжелыми хвостами», для оценки которых использование параметрических оценок совершенно неэффективно.

2. Неэффективность использования параметрических оценок для оценки потоков наносов объясняет ситуацию, когда многочисленные расчетные соотношения, полу-

ченные на модельных лотках, каналах при переносе на естественные водотоки теряют свою эффективность. Более того, расчетные зависимости, полученные для одного естественного водотока, очень сложно переносятся на другой.

3. Для повышения эффективности расчетных зависимостей для оценки транспортирующей способности русловых потоков необходимо использовать более адекватные, более корректные оценки характерных размеров транспортируемых частиц.

Список литературы

1. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
2. Лепихин А.П., Возняк А.А. К проблеме оценки транспорта наносов // Географический вестник. 2020. № 4 (55). С. 125–136. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136.
3. Самохвалова О.А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19772> (дата обращения: 12.07.2024).
4. Shmakova M. Sediment Transport in River Flows: New Approaches and Formulas: in Modeling of Sediment Transport // London, United Kingdom: IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.103942.
5. Springer M.D. The Algebra of Random Variables. Wiley, 1979. 492 p.
6. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions. Wiley, 1994. Vol. 1. 171 p.
7. Bogardi J. Sediment transport in alluvial streams. Akademiai Kiado Budapest, 1974. 826 с.
8. Ходзинская А.Г., Вербицкий В.С. Определение расхода донных наносов в руслах, сложенных разнородным грунтом // Гидротехническое строительство. 2018. № 10. С. 53–58.

9. Lepasqueur J., Hostache R., Martínez-Carreras N., Montargès-Pelletier E., Hissler C. Sediment transport modelling in riverine environments: On the importance of grain-size distribution, sediment density, and suspended sediment concentrations at the upstream boundary // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019. Vol. 23. P. 3901–3915. DOI: 10.5194/HESS-23-3901-2019.
10. Dorrell R.M., Amy L.A., Peakall J., McCaffrey W.D. Particle Size Distribution Controls the Threshold Between Net Sediment Erosion and Deposition in Suspended Load Dominated Flows // *Geoph. Res. Let.* 2018. Vol. 45, Is. 3. P. 1443–1452. DOI: 10.1002/2017gl076489.
11. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Sintsova T.N. Statistical aspects in assessment of chemical loads upon water bodies // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022. Vol. 979, Is. 1. P. 1–11.
12. Лепихин А.П., Синцова Т.Н. К статистике показателей качества отводимых сточных вод // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление.* 2023. № 2. С. 23–46. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_2.
13. Markovich M., Rodionov I. Maxima and sums of non-stationary random length sequences // *Extremes.* 2020. P. 1–14. DOI: 10.1007/s10687-020-00372-5.

УДК 624.139
DOI 10.17513/use.38310

ПРОБЛЕМЫ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСПЛОШНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Розенберг В.В., Гунар А.Ю.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва,
e-mail: Liisarozen@gmail.com, gunar_91@mail.ru

Целью данного исследования является всесторонний анализ наиболее опасных процессов и явлений, возникающих при прокладке трубопроводов в районах с прерывистым распространением многолетне-мерзлых пород. В ходе работы использовались методы ретроспективного анализа и обработки результатов инженерных изысканий, а также оценочные методики для проведения районирования участков трассы трубопровода. По итогам исследования были подробно описаны наиболее опасные и сложные для теплового моделирования и проектирования процессы и явления. Результаты работы включают как описательную часть вскрытого геологического строения исследуемой территории, так и систематизированную ландшафтную характеристику участка в соответствии с трудностью проектирования и эксплуатации трубопровода. По ландшафтному районированию выделено 5 крупных районов и 15 участков вдоль трассы исследуемого трубопровода. Были определены критерии для оценки опасных геологических процессов с использованием балльного метода и проведена оценка по выделенным ключевым участкам. Кроме того, проведено ранжирование участков до уровня подрайонов, что позволяет более точно оценить риски и разработать стратегии для минимизации потенциальных угроз при строительстве и эксплуатации трубопроводов в этих сложных условиях.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, принципы строительства на многолетнемерзлых грунтах, геокриологические процессы и явления, районирование, техногенное воздействие, талики, тепловое взаимодействие

PROBLEMS OF PIPELINE CONSTRUCTION IN SPORADIC PERMAFROST

Rozenberg V.V., Gunar A.Yu.

Lomonosov Moscow State University, Moscow,
e-mail: Liisarozen@gmail.com, gunar_91@mail.ru

The objective of this study is a comprehensive analysis of the most hazardous processes and phenomena occurring during pipeline construction in areas with discontinuous permafrost. The work involved retrospective analysis and processing of engineering survey results, as well as assessment techniques for zoning pipeline route sections. Based on the study results, the most hazardous and complex processes and phenomena for thermal modeling and design were described in detail. The results of the work include both a descriptive part of the exposed geological structure of the study area and a systematized landscape characteristic of the site in accordance with the complexity of pipeline design and operation. According to the landscape zoning, 5 large areas and 15 sections along the route of the studied pipeline were identified. Criteria for assessing hazardous geological processes using the point method were defined, and an assessment was made for the identified key sections. In addition, the sections were ranked to the sub-area level, which allows for a more accurate assessment of the risks and the development of strategies to minimize potential threats during pipeline construction and operation in these difficult conditions.

Keywords: permafrost soils, principles of construction on permafrost soils, geocryological processes and phenomena, zoning, anthropogenic impact, taliks, thermal interaction

Введение

Область распространения вечной мерзлоты наблюдается в основном на Дальнем Востоке, в Восточной Сибири, а также на северных окраинах Западной Сибири и европейской части России [1, с. 3–9]. Зона островной мерзлоты находится за пределами таликовой зоны и простирается от горных районов Дальнего Востока и Восточной Сибири до северных участков Западно-Сибирской низменности, а также до Беломорской горловины и северных побережий Кольского полуострова. Между тем псевдоталиковые участки находятся за пределами островной зоны и представляют собой участки с вечной

мерзлотой, проникающей глубже, чем сезонное промерзание почвы. Отдельные районы, такие как северная половина Кольского полуострова и некоторые участки бассейна р. Печоры, характеризуются вечной мерзлотой только в торфяниках. Острова и группы островов с вечномерзлым грунтом представляют отдельные пространственные единицы, удаленные от основных массивов.

В связи с отсутствием актуализированной мерзлотной съемки в пределах России предлагается условно объединить зоны распространения островной мерзлоты и таликовых зон, так как при устройстве линейных объектов так или иначе ведется работа с границей мерзлого и талого массива грунта.

На сегодняшний день, как показывает большинство исследований, территория распространения несплошной мерзлоты значительно больше, чем считалось ранее, что наблюдается вблизи р. Енисей, Таз, Надым, Лена и др., в связи с чем крупные компании применяют [2, 3] III принцип строительства трубопроводов – «принцип минимального вторжения в грунт», который заключается в наименьшем изменении параметров окружающей среды и создании природного талика вокруг трубопровода с течением времени.

Следует отметить, что за последние 80 лет, когда произошло активное освоение северных регионов, таликовые зоны приурочены не только к природным условиям, а еще и к участкам антропогенного воздействия [4, 5]. Тепловое загрязнение является не одноразовым выбросом, а продолжительным воздействием сооружения на грунтовый массив, которое с каждым годом увеличивает зону активного взаимодействия, что, как правило, приводит к деградации мерзлых толщ [6].

Цель исследования – обзор наиболее опасных процессов и явлений при прокладке трубопроводов в зоне несплошного развития многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы исследования

Исследуемый участок расположен на северо-восточной окраине Западно-Сибирской низменности, в пределах Приенисейской равнины, в нижнем течении р. Енисей. Долина реки имеет ассиметричное строение, на правом берегу узкая полоса низкой поймы переходит в крутой склон долины, тогда как на левом берегу низкая пойма переходит в высокую пойму и занимает около 1,5 км. Абсолютные отметки на изучаемой территории изменяются от -38,60 до +28,73 м.

Средняя годовая температура воздуха составляет -9,5 °С; среднемесячная температура воздуха самого холодного зимнего месяца (января) -28,1 °С; средняя месячная температура самого теплого месяца (июля) составляет +14,2 °С. Средняя декадная высота снежного покрова по постоянной рейке равна 42 см. Средняя глубина оттаивания почвы 117 см.

В рамках проведения исследования были выполнены следующие виды работ:

- анализ архивных материалов;
- анализ маршрутных наблюдений;
- анализ материалов бурения;
- анализ термометрических измерений;

– анализ лабораторных исследований.

Обработка графических материалов проводилась с помощью программного комплекса «SASPlanet», обработка термометрических измерений и статистическая обработка лабораторных данных были произведены в программе «Microsoft Excel».

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно нормативной документации применяют два типа прокладки трубопроводов: открытый и закрытый, в данном случае рассматривается открытый способ прокладки трубопровода.

При открытом способе прокладки трубопровода, а именно при разработке траншеи, необходимо учитывать сложное геокриологическое строение верхней толщи массива грунтов. При проектировании важно обращать внимание не только на физико-механические свойства пород, но и на геометрию распространения талых и мерзлых зон.

Наибольшей проблемой при проведении инженерно-геологических изысканий является определение геометрических параметров таликов и скрытых повторно-жильных льдов [7].

Талики представляют наибольшую опасность, так как это не просто талый массив грунта, а целая геосистема, которая существует в определенном напряженно-деформированном состоянии, отличном от напряженного состояния исследуемого массива в целом, в связи с чем возникает вопрос о возможности прогнозирования его поведения при «вскрытии».

Глобально считается, что талики будут устойчивы на период оборудования траншеи, что не подтверждается практикой, именно для этого необходимо прогнозировать свод обрушения таликовой зоны. При прогнозировании обрушения таликовой зоны необходимо учитывать следующие факторы: время после проходки траншеи, уровень грунтовых вод, физико-механические характеристики грунтов.

Проблемой выявления таликовых зон является недостаточная дискретность и точность измерения температуры грунтов при термометрии и недостаточное изменение напряженно-деформированного состояния массива при проходке скважин, так, например, далеко не в каждом талике будет обнаружена вода при бурении скважин, в то время как при фактическом его вскрытии будет происходить активное отжатие воды (рис. 1).



Рис. 1. Вскрытый талик

Механизм формирования таликов в пределах речных долин, как правило, однотипный и имеет следующий вид: в пойменной части после схода воды образуются озера и озера в пониженных частях рельефа, далее скопившаяся вода оказывает отепляющее влияние на нижележащие мерзлые грунты, формируя талую зону, которая расширяется с каждым годом существования водоема [8]. Бывают случаи, когда такие озера заболачиваются, происходят процессы осадконакопления и через некоторое время озеро пропадает, но талик остается, и тогда прогнозирование таликовых зон является весьма трудной задачей.

Присутствие таликовых зон также осложняет расчеты проектируемого трубопровода на устойчивость к морозному пучению грунтов. Так, для периферийной зоны талика будут характерны большие деформации пучения, чем для центральной части талика. Это связано с тем, что вода мигрирует к фронту промерзания, обводняя периферийные части талых зон. Также в таликовой зоне касательные силы морозного пучения имеют векторно не менее 2 направлений: система поверхность – грунт, система грунт – талик. Соответственно, следует учитывать данные силы при расчетах растяжения трубопровода.

Кроме того, при расчетах глубины оттаивания и промерзания в местах распространения таликовых зон следует применять метод послойного суммирования.

Также стоит обратить внимание на химический состав: в пробах из скважин вода имеет менее пестрый химический состав,

нежели вода «отжатая», это можно объяснить тем, что при вскрытии таликовой зоны кроме изменения напряженно-деформируемого состояния происходит еще и значительное окисление полученного «обнажения», в связи с чем начинают происходить активные химические реакции. Подтверждением данной гипотезы служат примазки ожелезнения и фторизации пород на стенках обустроенной траншеи, не обнаруженных ранее в керне при бурении скважин (рис. 2).

Интересно, что данные проявления характерны для восстановительной обстановки, которую должно сопровождать торфяные или сильноорганические отложения, которые также фактически не были зафиксированы по данным бурения.

Еще одним фактом, осложняющим строительство и эксплуатацию трубопровода, служат повторно-жильные льды, которые не были заактивированы при рекогносцировочном обследовании ввиду их подземного залегания и относительно малой мощности (рис. 3). Поэтому для работ в зонах с прерывистой мерзлотой предлагается использовать межскважинный каротаж.

Не стоит забывать и о наличии эрозионных процессов, связанных с особенностями течения рек. Для обеспечения сохранности трубопровода необходимо осуществлять прокладку ниже расчетного базиса боковой и донной эрозии. Для северных рек это особенно актуально ввиду их активного меандрирования. Таким образом, геоморфологические факторы также необходимо учитывать при проведении расчетов.

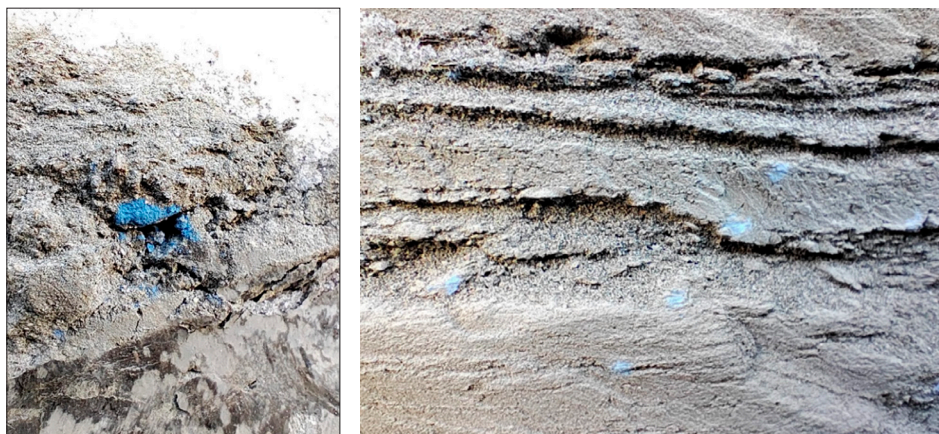


Рис. 2. Примазки вивианита в массиве горных пород

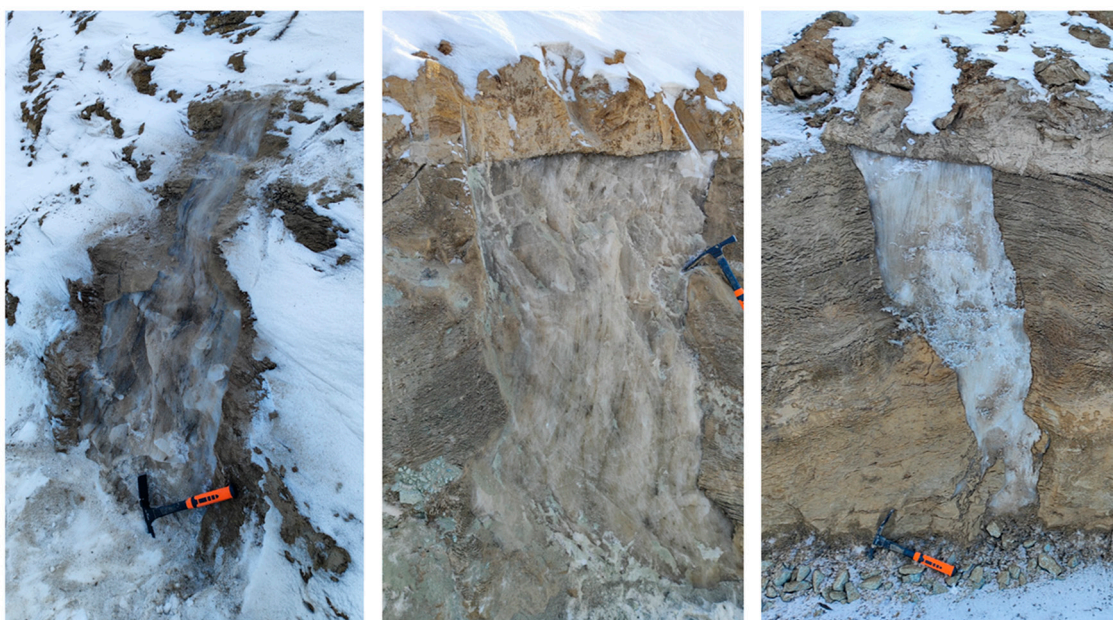


Рис. 3. Повторно-жильные льды в разрезе

Таблица 1

Средняя температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд
на разных элементах рельефа

Геоморфологический элемент	Положение относительно р. Енисей	Средняя температура грунта на глубине 10 м
Надпойменная терраса	Правый берег	-3,51
	Левый берег	-4,5
Склон террасы	Правый берег	-2,63
	Левый берег	-2,5
Высокая пойма	Правый берег	-2,65
	Левый берег	-0,5
Низкая пойма	Правый берег	-0,5
	Левый берег	-0,2
Русло реки	Акватория	+6,4

Таблица 2
Сводный анализ сложности инженерно-геокриологических условий

Индекс	I-A-1	I-A-2	I-B-1	I-B-2	II-B-1	II-B-2	III-Г-1	III-Г-2	III-Г-3	III-Д-1	III-Д-2	III-Д-3	IV-E-1	V-Ж-1	V-Ж-2	
	русло реки			низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки				
Геоморфологический элемент	отсутствуют сквозной талик	ММП до глубины 11-38, м	пески, супеси (ан)	несквозной талик на глубине 0-4,7	пески, суглинки (ан)	пески, суглинки (ан)	супесь, суглинок (ан)	супесь, суглинок (ан)	суглинок (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	суглинок, суглесь (ан)	суглинка, суглесь (ан)	суглинок, суглесь (ан)	
	распространение ММП		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
Тип и возраст грунта на глубине заложения трубопровода	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
Грунтовые воды	0,0		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
Льдистость грунтов (0 – талые, 1 – нельдистые, 2 – слабльдистые, 3 – льдистые, 4 – сильнльдистые)	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
Инженерно-геологические процессы	донная и боковая эрозия		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
	донная и боковая эрозия		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
Балльность сложности территории	2		5		5		5		5		6		4		4	
	2		5		5		5		5		6		4		4	
Геоморфологический элемент	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
Тип и возраст грунта на глубине заложения трубопровода	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
	отсутствуют сквозной талик		русло реки		низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
Грунтовые воды	0,0		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
Льдистость грунтов (0 – талые, 1 – нельдистые, 2 – слабльдистые, 3 – льдистые, 4 – сильнльдистые)	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
	0		2 3		3 4		2 3		3 4		2 3		2 3		2 3	
Инженерно-геологические процессы	донная и боковая эрозия		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
	донная и боковая эрозия		-		0,1-0,2		-		0,2-0,5		9,5-17,0		5-12,5		0,9-3,0	
Балльность сложности территории	2		5		5		5		5		6		4		4	
	2		5		5		5		5		6		4		4	

Геоморфологический фактор следует учитывать и при расчетах промерзания и оттаивания грунта, осадки трубопровода. Как видно из табл. 1, температура грунта напрямую зависит от геоморфологического элемента, в пределах которого он распространен, а именно температура грунта увеличивается от водораздела к руслу реки.

Глубина слоя сезонного протаивания на заболоченных участках достигает 0,4 м, на высоких водораздельных участках – от 0,5 до 1,5 м. На открытых пространствах, лишенных растительности, сложенных песчаными и супесчаными отложениями, глубины сезонно-талого слоя достигают максимальных значений от 2,0 до 2,5 м.

На территории исследований выделяются 5 районов по геоморфологическому признаку и 15 участков (табл. 2).

При оценке сложности участка были использованы следующие критерии (в баллах):

- наличие грунтовых вод (1 балл);
- особенности распространения многолетнемерзлых пород (2 балла);
- льдистость (от 0 для талых грунтов до 4 для сильнольдистых);
- развитие опасных геокриологических процессов (в зависимости от степени пораженности территории от 1 до 4 баллов).

При составлении балльного анализа в табличной форме четко видно, что наиболее сложными условиями обладает участок высокой поймы.

Заключение

В исследовании рассматривается открытый способ прокладки трубопровода, который требует особого внимания к геокриологическому строению верхней части грунтового массива. При проектировании необходимо учитывать не только физико-механические свойства пород, но и геометрию распределения талых и мерзлых зон. Это важно для предотвращения непредвиденных изменений в состоянии и структуре грунта. Вскрытые или вновь образующиеся таликовые зоны представляют значительную опасность ввиду их неоднородного состава и строения. Прогнозирование их поведения при вскрытии траншеи является

сложной задачей и требует учета времени их существования после проходки траншеи, уровня грунтовых вод и физико-механических характеристик грунтов. Присутствие таликовых зон усложняет расчеты устойчивости трубопровода к морозному пучению. Периферийные зоны таликов подвержены большим деформациям, что необходимо учитывать при проектировании. Таким образом очевидно, что необходимо пересмотреть комплекс обязательных инженерно-геологических исследований в зоне распространения несплошной мерзлоты, ввести выполнение трехмерного моделирования теплового взаимодействия трубопровода и грунтового массива, а также производить геокриологический мониторинг среды до начала процесса строительства. Также немаловажным является прогнозирование активизации геокриологических процессов при антропогенном освоении криолитозоны.

Список литературы

1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. М., 1989. 413 с.
2. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 10. С. 110–124.
3. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми методами на линейном объекте. На примере оползневого участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 33, № 7. С. 161–175.
4. Казанцева Л.А., Воробьева С.В. Мониторинг геокриологических условий природных ландшафтов на трассе газопровода Надым – Пунга // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2020. № 1. С. 29–35.
5. Середин В.В., Красильников П.А. Инженерно-геологическое районирование, основанное на многомерной оценке классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. № 2. С. 48–54.
6. Реутских Н.В., Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал Российского газового общества. 2016. № 2. С. 22–26.
7. Егорова Т.Р., Кычкина В.Г., Колесов А.Е. Прогнозирование температурного взаимодействия подземного нефтепровода и многолетнемерзлых грунтов // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 6. С. 124–130.
8. Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Полтев Н.Ф., Смирнов В.В. Развитие инженерно-геологических процессов при строительстве газопроводов в области распространения многолетнемерзлых пород // Мерзлотные исследования. 1997. № XVI. С. 19–26.