УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

№ 6 2020

ISSN 1681-7494

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,778

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,279

Журнал издается с 2001 г.

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

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

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – П7816

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

Чернева Ирина Николаевна, к.с.-х.н.

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Свидетельство – **ПИ № ФС 77-63398.**

Все публикации рецензируются. Доступ к электронной версии журнала бесплатный.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,778.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,279.

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

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

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47
Адрес редакции: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Ответственный секретарь редакции
Бизенкова Мария Николаевна
+7 (499) 705-72-30
E-mail: edition@rae.ru

Подписано в печать – 29.06.2020
Дата выхода номера – 29.07.2020

Формат 60x90 1/8
Типография
ООО «Научно-издательский центр
Академия Естествознания»,
410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

Техническая редакция и верстка
Байгузова Л.М.
Корректор
Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Способ печати – оперативный.
Распространение по свободной цене.
Усл. п.л. 17,88
Тираж – 1000 экз. Заказ. УСЕ/6-2020
Подписной индекс П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (06.01.00, 06.03.00)

СТАТЬИ

РОБИНИЕВАЯ КРАЕВАЯ ГАЛЛИЦА (*OBOLODIPLOSIS ROBINIAE* HALDEMAN) В ЗАЩИТНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Белицкая М.Н., Грибуст И.Р., Блюм К.Я. 7

ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГО-ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОЧАГОВ УСЫХАНИЯ СОСНЫ ОТ КОРНЕВОЙ ГУБКИ

Битяев С.Г., Чураков Б.П. 14

ДИНАМИКА ПОРАЖЕНИЯ ДРЕВОСТОЕВ СОСНЫ СИБИРСКОЙ УЧАСТКА «МАЛЫЙ АБАКАН» ЗАПОВЕДНИКА «ХАКАССКИЙ» ВТОРИЧНЫМ СТВОЛОВЫМ ВРЕДИТЕЛЕМ – КОРОЕДОМ ШЕСТИЗУБЧАТЫМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИЗУАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМОСНИМКОВ

Исаева И.Л., Лебедева С.А. 20

ЗАВИСИМОСТИ ОБЪЕМА ВЫВОЗКИ ДРЕВЕСИНЫ С ЛЕСНОЙ ТЕРРИТОРИИ ОТ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Медведев С.О., Мохирев А.П., Сергеева Е.А. 27

Науки о Земле (25.00.00)

СТАТЬИ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Акатьева Т.Г. 33

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОХРАНЫ ЖИВОТНОГО МИРА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИИ)

Андреев Д.В. 38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖАЮЩИХ ГРАНИЦ ПО СЕЙСМОГРАММАМ ФИКСИРОВАННЫХ ТОЧЕК ОТРАЖЕНИЯ

Бондарев В.И., Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Крылевская А.Н. 43

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ РАССЕЛЕНИЯ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)

Гончиков Ц.Д., Урбанова Ч.Б., Ковалева Н.М., Дымчикова Б.Ц. 49

УРАВНЕНИЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ КВАЗИГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЫ В ЗАДАЧАХ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ

Калажоков Х.Х., Увижева Ф.Х. 57

ПРЕДПОСЫЛКИ И ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В КРИЗИСНЫЕ СИТУАЦИИ С УЧЕТОМ ВОСПРИЯТИЯ И ПОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДОВ И СОЦИАЛЬНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБЩНОСТЕЙ

Копосова Н.Н., Волкова А.В. 62

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ГИДРОУЗЛА БЕЛГОРОДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Коржов И.В., Журавлёв А.А. 67

ЗЕМЕЛЬНЫЕ УГОДЬЯ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИИ

Мазуркин П.М. 75

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ПРОГРАММА ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ЮЖНО-ЛЕБЕДИНСКОЙ ПЛОЩАДИ (ТИМАНО-ПЕЧОРСКИЙ НЕФТЕГАЗОНОСНЫЙ БАССЕЙН)

Маракова И.А. *83*

ЛАНДШАФТЫ НАВОДНЕНИЙ С КРИТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ НЕУСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ

Напрасников А.Т. *90*

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ ПЕРИОДИЧНОСТИ СИГНАЛОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Нерадовский Л.Г., Фёдорова Л.Л. *95*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОИСТОСТИ И СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ НА РАСЧЁТ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ИНВЕРСИИ

Нечаев Г.В., Шестаков Н.В., Такахаши Х. *107*

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КАДМИЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ КАОЛИНОМ

Пимнева Л.А., Искакова А.И., Ларионова К.А. *113*

РАДИАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИДРОБИОНТОВ УСЛОВНО ЧИСТОЙ ТЕРРИТОРИИ НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Пучков А.В., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В. *118*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАЛЕДЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Шеин Н.С., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Ефремов П.В., Слепцов О.И. *123*

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГЕОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Зарубин О.А., Мучкаева Н.С., Юнкман Е.С. *129*

ОБЗОРЫ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ В ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ

Гоппе В.Р., Вохмин С.А., Урбаев Д.А. *138*

CONTENTS

Agricultural sciences (06.01.00, 06.03.00)

ARTICLES

LOCUST GALL MIDGE (*OBOLODIPLOSIS ROBINIAE* HALDEMAN)
IN THE PROTECTIVE PLANTINGS OF THE LOWER VOLGA

Belitskaya M.N., Gribust I.R., Blyum K.Ya. 7

INFLUENCE OF ECOLOGICAL AND FORESTRY FACTORS ON THE SPREAD
OF PINE SHRINKING FOCI FROM THE ROOT SPONGE

Bityaev S.G., Churakov B.P. 14

DYNAMICS OF DESTRUCTION OF FOREST STANDS OF SIBERIAN
PINE AREA «MALY ABAKAN» RESERVE SECONDARY PEST
STEM – BARK SETSUBTOTAL THE RESULTS OF INTERPRETATION
OF VISUAL OBSERVATIONS AND SPACE IMAGES

Isaeva I.L., Lebedeva S.A. 20

DEPENDENCE OF THE VOLUME OF WOOD REMOVAL FROM THE FOREST
TERRITORY ON NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

Medvedev S.O., Mokhirev A.P., Sergeeva E.A. 27

Earth sciences (25.00.00)

ARTICLES

ECOTOXICOLOGICAL EVALUATION OF NATURAL RESERVOIRS
UNDER THE INFLUENCE OF POULTRY COMPLEXES

Akateva T.G. 33

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES FOR THE PROTECTION
OF ANIMAL WORLD OF THE REPUBLIC OF SAKH YAKUTIA

Andreev D.V. 38

DETERMINING THE ANGULAR PARAMETERS OF REFLECTING BORDERS
BY SEISMOGRAMS OF FIXED REFLECTION POINTS

Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Krylatkova N.A., Krylevskaya A.N. 43

REGIONAL FEATURES OF THE SETTLEMENT SYSTEM OF THE EASTERN REGIONS
OF RUSSIA (ON THE EXAMPLE OF THE TRANS-BAIKAL TERRITORY)

Gonchikov Ts.D., Urbanova Ch.B., Kovaleva N.M., Dymchikova B.Ts. 49

EQUATIONS OF THERMOHYDRODYNAMICS OF A QUASI-GEOSTROPHIC
AND HYDROSTATIC ATMOSPHERE IN THE PROBLEMS OF REGIONAL ECOLOGY

Kalazhokov Kh.Kh., Uvizheva F.Kh. 57

BACKGROUND AND FACTORS OF CHANGE OF URBAN PUBLIC SPACES
IN CRISIS SITUATIONS WITH ACCOUNT OF PERCEPTION AND BEHAVIOR
OF INDIVIDUALS AND SOCIO-TERRITORIAL COMMUNITIES

Koposova N.N., Volkova A.V. 62

INFORMATION AND ANALYTICAL TOOLS FOR MANAGING THE OPERATION MODES
OF THE BELGOROD RESERVOIR WATERWORKS

Korzhov I.V., Zhuravlev A.A. 67

LAND AREAS OF THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT OF RUSSIA

Mazurkin P.M. 75

STRUCTURAL STYLE AND EXPLORATION PROGRAM
AT YUZHNO-LEBEDINSKAYA AREA (TIMAN-PECHORA OIL AND GAS BASIN)

Marakova I.A. *83*

FLOOD LANDSCAPES WITH CRITICAL COMPONENTS OF UNSTABLE EQUILIBRIUM

Naprasnikov A.T. *90*

EXPERIENCE IN STUDYING THE NATURE OF PERIODICITY OF GPR SIGNALS
USING SPECTRAL ANALYSIS METHODS

Neradovskiy L.G., Fedorova L.L. *95*

INVESTIGATION OF IMPACT OF THE EARTH MODEL TO COSEISMIC DISPLACEMENTS
CALCULATION AND RESULTS OF THEIR INVERSION

Nechaev G.V., Shestakov N.V., Takakhashi Kh. *107*

EXTRACTION OF CADMIUM FROM AQUEOUS SOLUTIONS WITH MODIFIED KAOLIN

Pimneva L.A., Iskakova A.I., Larionova K.A. *113*

RADIATION PARAMETERS OF HYDROBIONTS OF THE BACKGROUND TERRITORY
OF THE NENETS AUTONOMOUS OKRUG

Puchkov A.V., Yakovlev E.Yu., Druzinin S.V. *118*

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ICING ON THE FUNCTIONING
OF MAIN PIPELINES

Shein N.S., Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Efremov P.V., Sleptsov O.I. *123*

SPATIAL-TEMPORAL PREDICTION OF LANDSLIDE PROCESSES
BASED ON THE GEOSYSTEM APPROACH

Yamashkin A.A., Yamashkin S.A., Zarubin O.A., Muchkaeva N.S., Yunkman E.S. *129*

REVIEWS

PRINCIPLES FOR THE DESIGN OF DEFORMATION SEAMS
IN THE TRANSPORT TUNNELS

Goppe V.R., Vokhmin S.A., Urbaev D.A. *138*

СТАТЬИ

УДК 630:632.7.04.08

РОБИНИЕВАЯ КРАЕВАЯ ГАЛЛИЦА (*OBOLODIPLOSIS ROBINIAE* HALDEMAN) В ЗАЩИТНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Белицкая М.Н., Грибуст И.Р., Блюм К.Я.

ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», Волгоград, e-mail: cheizer9@yandex.ru

С 2007–2008 гг. в кронах древесных растений родового комплекса Robinia, произрастающих в насаждениях в засушливых условиях Нижнего Поволжья, фиксируются инвазивные насекомые филлофаги. Среди выявленных инвайдеров полностью адаптировалась к условиям региона и расселилась повсеместно в различных насаждениях робиниевая краевая, или белоакациевая, листовая галлица Obolodiplosis robiniae Halde-man, 1847 (Diptera, Cecidomyiidae). Представлены современные данные по особенностям заселения краевой галлицей Obolodiplosis robiniae Haldeman деревьев Robinia spp. Приведены результаты наблюдений и учетов за период 2016–2019 гг. Целью настоящих исследований являлись детальное изучение и анализ биотопического распределения O. robiniae в защитных насаждениях разных типов и экологических категорий. Установлено, что робиниевая галлица заселяет разные виды древесных растений родового комплекса Robinia: R. pseudoacacia, R. viscosa и R. neomexicana. На территории Волгоградской области в большинстве биотопов инвайдер заселяет R. viscosa и R. neomexicacana. При этом заселенность R. pseudoacacia галлицей достигает 100%. Выявлено влияние возраста деревьев, категории насаждений, уровня антропогенного воздействия на встречаемость O. robiniae. Обнаружено, что заселенность приспевающих и перестойных деревьев робинии краевой галлицей на 60–70% выше по сравнению с молодыми растениями. По результатам наблюдений показано, что повышение уровня техногенного загрязнения приводит к значительному увеличению (на 56–99%) заселенности Robinia spp. вредителем O. robiniae. Установлена вариабельность плотности галлов галлицы в зависимости от категории насаждений. Выявленные особенности численности, заселения древесных видов и распространения O. robiniae в разных насаждениях обусловливают относительную стабильность популяции рассматриваемого вида в условиях региона. На сегодняшний день O. robiniae укрепилась в насаждениях Нижнего Поволжья. На территории вторичного ареала филлофаг расширяет спектр трофических предпочтений, при этом локальные очаги вредителя приурочены к загущенным посадкам с преобладанием R. pseudoacacia.

Ключевые слова: инвазивный вид, *Obolodiplosis robiniae*, защитные насаждения, экологические особенности, древесные растения родового комплекса Robinia L., заселенность, распространение, галлы

LOCUST GALL MIDGE (*OBOLODIPLOSIS ROBINIAE* HALDEMAN) IN THE PROTECTIVE PLANTINGS OF THE LOWER VOLGA

Belitskaya M.N., Gribust I.R., Blyum K.Ya.

Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, e-mail: cheizer9@yandex.ru

In the arid conditions of the Lower Volga region since 2007–2008, in the crowns of woody plants of the Robinia genus complex are recorded growing the invasive insect phyllophages in the protective forest plantings. Among the identified insiders fully adapted to the conditions of the region and settled everywhere in various plantings phyllophage of the robinia (white acacia) locust gall midge Obolodiplosis robiniae Haldeman, 1847 (Diptera, Cecidomyiidae). Presents recent data on the specifics of the settlement of the population locust gall midge Obolodiplosis robiniae Haldeman trees Robinia spp. The results of observations and surveys for the period 2016–2019 are presented. The purpose of this study was to study and analyze in detail the biotopic distribution of O. robiniae in protective stands of different types and ecological categories. It has been established that the locust gall midge populates different species of woody plants of the generic Robinia complex, growing in the territory of this zone: R. pseudoacacia, R. viscosa, and R. neomexicana. On the territory of the Volgograd region, in most biotopes, the invader inhabits R. viscosa and R. neomexicacana. At the same time, the population locusr gall midge of R. pseudoacacia with reaches 100%. The influence of the age of trees, the category of plantations, and the level of anthropogenic impact on the occurrence of O. robiniae was revealed. It was found that the population of the ripening and overripe Robinia trees by the locust gall midge is 60–70% higher in comparison with young plants. According to the results of observations, it is shown that an increase in the level of technogenic pollution leads to a significant increase (by 56–99%) in the population of Robinia spp. the pest of O. robiniae. The variability of the density of galls of locust gall midges depending on the category of stands was established. The revealed features of the abundance, population of tree species, and the distribution of O. robiniae in different plantings determine the relative stability of the population of the species in question in the region. To date, O. robiniae has been strengthened in the protective plantings of the Lower Volga region. On the site secondary areal at this phillophag expands the range of trophic preferences, at the same time local foci of the pest are confined to thickened plantings with a predominance of R. pseudoacacia.

Keywords: invasive species, *Obolodiplosis robiniae*, protective plantings, ecological features, woody plants of the Robinia L. family complex, population, distribution, galls

Одним из основных элементов оптимизации территорий с низкой лесистостью в засушливых регионах становится лесная мелиорация, предусматривающая создание систем полифункциональных защитных насаждений различных типов и категорий,

в состав которых входят хозяйственно ценные виды древесных растений [1]. Важное практическое значение при расширении ассортимента, повышении хозяйственной эффективности насаждений, их декоративности и долговечности имеют деревья и кустарники родового комплекса Robinia L., 1753 [1], естественным ареалом которых является Северная Америка.

Начало интродукции древесных растений рода Robinia в России приходится на конец XVIII – начало XIX вв., популяризация их в посадках начинается с середины XX в. [1]. Устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды (засухе, заморозкам и др.) и отсутствие необходимости в особом агротехническом уходе определили широкое применение Robinia spp. в озеленении населенных пунктов и при создании лесополос разных конструктивных параметров и целевого назначения [1]. До недавнего времени Robinia spp. в границах своего вторичного ареала характеризовалась отсутствием специализированных видов филлофагов [2]. Однако начало XXI в. ознаменовалось пополнением состава населения насекомых чужеземными видами, проникающими сюда на фоне интенсивного развития торгово-экономических связей [3–5].

Среди выявленных инвазивных насекомых наиболее распространена и многочисленна в кронах Robinia spp. робиниевая краевая, или белоакациевая, листовая галлица *Obolodiplosis robiniae* Haldeman, 1847 (Diptera, Cecidomyiidae) [2, 5]. Повреждение галлицей ассимиляционного аппарата деревьев со временем грозит перерасти в серьезную проблему для насаждений Нижнего Поволжья. В связи с этим детальное изучение распространения *O. robiniae*, особенностей заселения ею листвы, выявление ее биотопических предпочтений с учетом экологических условий посадок приобретают особую актуальность и обусловливают необходимость своевременного контроля жизнедеятельности вредителя в регионе.

Цель исследований: детальное изучение и анализ биотопического распределения *O. robiniae* Haldeman. в защитных насаждениях разных типов и экологических категорий Нижневолжского региона.

Материалы и методы исследования

В основу настоящей работы положены результаты учетов и наблюдений, выполненных в вегетационные периоды 2016–2019 гг. Исследование биотопической приуроченности галлицы выполняли в защитных насаждениях ФНЦ агроэкологии РАН и в рекреационно-озеленительных посадках разных категориях с участием древесных видов Robinia spp.

Сбор материала осуществлялся также в насаждениях Ольховского, Камышинского, Дубовского и Октябрьского районов Волгоградской области (рис. 1). Пробные площадки в насаждениях закладывались с учетом видового состава робинии и стадии жизненного цикла растения. Возраст деревьев устанавливался с использованием бурава Пресслера.

Выявление данного филлофага в кронах робинии осуществлялось с применением общепринятых методов обследования насаждений, в том числе предложенных Ю.И. Гниненко и М. Главендекич [2, 3, 6]. В ходе визуального обследования особенно тщательно осматривалась листва на ветвях нижней и средней частей кроны. Встречаемость *O. robiniae* определялась как процентное соотношение заселенных ею деревьев к общему количеству обследованных растений. При учете численности робиниевой краевой галлицы из крон модельных деревьев отбирались ветви, на которых подсчитывались количество сложных листьев и число простых листочков на каждом сложном. Затем согласно методике Ю.И. Гниненко [4] подсчитывали долю заселенных листьев, плотность галлов на листовой пластинке, число личинок в каждом галле. Всего были обследованы 2250 деревьев, 735 сложных и 11 025 простых листочков.

Результаты исследования и их обсуждение

В насаждениях Волгоградской области встречаются следующие виды робинии: псевдоакация, или белая акация (*Robinia pseudoacacia* L.), новомексиканская (*R. neomexicacana* A. Grey.) и клейкая (*R. viscosa* Vent.). Среди них наиболее широко распространен первый вид [1].

R. pseudoacacia (Linnaeus, 1753) – быстрорастущее листопадное дерево высотой 20–25 м (порой до 30–35 м), с ажурной, раскидистой кроной из нескольких ярусов ветвей и глубокой корневой системой. На корнях наличествуют клубеньки с азотофиксирующими бактериями. Ствол имеет толстую трещиноватую кору. Листья очередные непарноперистосложные, состоящие из 7–19 гладких светло-зеленого цвета маленьких листочков округлой формы.

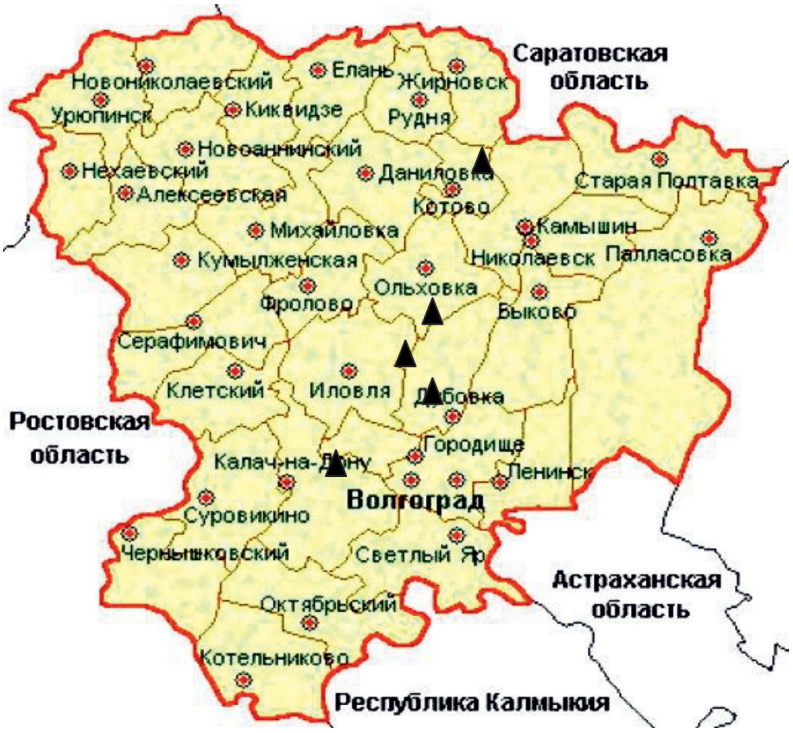


Рис. 1. Стационары и точки сбора фактического материала на территории Волгоградской области

Таблица 1

Заселенность разных видов робинии *Obolodiplosis robiniae*

Виды Robinia	Кол-во обследованных деревьев		Доля простых листьев с галлами, %	Плотность галлов, шт./лист
	шт.	в том числе заселено галлицей, %		
R. pseudoacacia	824	84,4	59,9 ± 3,1	1,7 ± 0,10
R. neomexicacana	658	47,9	31,5 ± 2,4	1,12 ± 0,05
R. viscosa	423	16,2	6,1 ± 0,9	0,19 ± 0,03

O. robiniae Haldeman., проникшая в Европу из Северной Америки в первые годы XXI в. [3, 7], на территории России впервые была обнаружена в 2005 г. на юге Приморского края [3].

Вторжение данного инвазивного вида в экосистемы Нижнего Поволжья произошло несколькими годами позже – в 2007–2008 гг. [2, 3]. При проведении полевых работ в 2009 г. галлица была зафиксирована нами в отдельных категориях рекреационно-озеленительных насаждений Волгограда. К 2016 г. филлофаг полностью адаптировался к условиям региона и расселился повсеместно в защитных насаждениях различного целевого назначения.

Согласно литературным данным *O. robiniae* – монофаг, развивается исключительно на листьях *R. pseudoacacia* и *R. viscosa* [3]. Однако на территории Волгоградской области в большинстве исследованных нами биоценозов инвайдер заселяет *R. viscosa* и *R. neomexicacana*. При этом заселенность *R. pseudoacacia* галлицей может достигать 100 % (табл. 1).

Факторы, влияющие на заселенность деревьев *O. robiniae в* условиях Нижнего Поволжья, ее пространственное распределение и численность, практически не изучены. Однако знание их необходимо, поскольку это позволит в лучшей степени понять механизмы, которые инициируют, регулируют распространение филлофага и роль антропогенных факторов в этом процессе.

При анализе изменений пространственного распространения вредителя выявлено, что экологической основой данного показателя является соотношение с параметрами

окружающей среды. К числу важнейших факторов относятся: возраст деревьев, категория насаждений и уровень техногенного воздействия.

Установлено, что с увеличением возраста растений происходит существенный рост заселенности деревьев *O. robiniae и* количества освоенных ею листьев. К концу первого года жизни, как правило, до 0,6 % сеянцев бывают повреждены данным филлофагом. По мере увеличения возраста растений и смыкания крон, сопровождающихся значительным изменением микроклимата (температуры, влажности, уровня инсоляции), санитарного состояния, неизбежно происходит увеличение числа заселенных галлицей деревьев на 32,6 % в приспевающих и на 49,2 % в перестойных насаждениях (табл. 2). Одновременно наблюдается повышение доли освоенных вредителем простых листочков в кроне на 39,4 % и 58,1 % соответственно. Более высокой плотностью галлов отличаются молодые листочки, расположенные на верхушках побегов.

На обследованной территории робиниевая краевая галлица демонстрирует постоянную встречаемость на *R. pseudoacacia*, культивируемой в разных типах и категориях лесных полос и рекреационно-озеленительных насаждений. При этом встречаемость вида в этих посадках сильно варьирует (рис. 2).

Заселенность деревьев вредителем зависит от особенностей экологических условий местообитаний. Многолетние наблюдения показали, что максимальное количество заселенных галлицей деревьев (97,9–100 %) ежегодно отмечается в биотопах с высоким уровнем техногенного пресса (придорожных лесных полосах, скверах). Аналогичную ситуацию отмечают исследователи в Румынии [7, 8]. Довольно велика доля освоенных филлофагом деревьев во внутриквартальных посадках («закрытых территориях») – 78,2 %. Снижение техногенного загрязнения окружающей среды, несмотря на существенную степень рекреационного пресса, сопровождается значительным уменьшением числа заселенных деревьев (на 56,0–99,0 %). Наиболее ярко это выражено в парках и полезащитных лесополосах. В данном случае важнейшими причинами различий являются также широкий породный состав древесных растений, низкая представленность *R. pseudoacacia* и ее молодой возраст (8–10 лет).

Таблица 2

Особенности изменения заселенности деревьев и обилия простых листочков с галлами *O. robiniae* в насаждениях разного возраста

Возрастные стадии деревьев	Количество обследованных деревьев, шт.	В том числе заселено галлицей, %	Доля простых листочков с галлами, %
Молодые (до 10 лет)	126	29,3 ± 0,67	10,2 ± 0,33
После смыкания крон (11–20 лет)	188	50,8 ± 1,05	31,5 ± 0,75
Приспевающие (31–40 лет)	211	90,4 ± 1,47	83,9 ± 1,53
Перестойные (старше 50 лет)	139	100,0 ± 3,11	89,6 ± 2,82

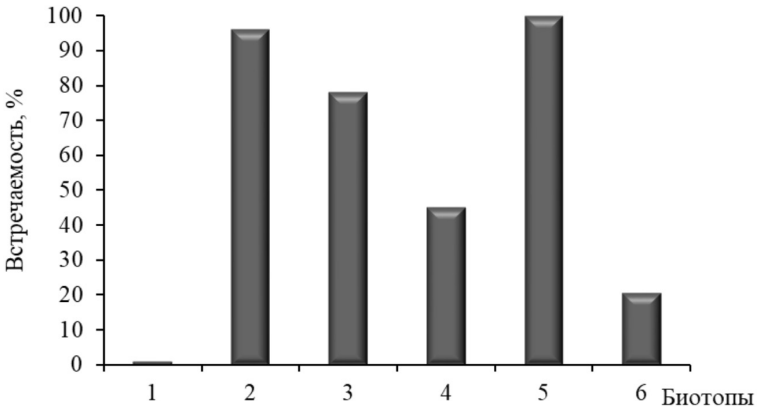


Рис. 2. Встречаемость Obolodiplosis robiniae деревьев в насаждениях разных категорий: 1 – парки; 2 – скверы; 3 – внутриквартальные посадки; 4 – дендрологические коллекции; 5 – придорожные лесополосы; 6 – полезащитные лесополосы

Таблица 3

Биотопическое распределение обилия простых листочков с галлами

Категория насаждения	Санитарное состояние, балл	Проанализировано сложных листьев, шт.	Число простых листочков, шт./сложный лист	Кол-во простых листьев с галлами, %
Дендрологические коллекции	1,08	36	16,07 ± 1,05	4,90 ± 0,12
Парки	1,44	61	14,87 ± 1,10	0,04 ± 0,003
Скверы	2,06	39	14,93 ± 0,96	51,98 ± 2,32
Внутриквартальные посадки	2,94	48	13,67 ± 0,68	29,85 ± 1,30
Придорожные лесополосы	3,52	45	13,27 ± 0,72	75,21 ± 2,09
Полезащитные лесополосы	1,95	41	13,55 ± 0,89	33,21 ± 2,86

Придорожные лесные полосы, расположенные по периметру городов, отличаются максимально плотной заселенностью листвы *O. robiniea*. По всей вероятности, это связано не только с загрязнением выхлопными газами автотранспорта, в том числе автомобилей повышенной грузоподъемности, но и с низким разнообразием дендрофлоры в этих насаждениях, в первую очередь с загущенностью посадок, особенностями их конструктивных параметров и микроклимата.

Подобным образом изменяется обилие заселенных вредителем простых листочков в городских посадках. Максимальное количество листочков с галлами выявлено в насаждениях, подверженных интенсивному загрязнению атмосферного воздуха выхлопными газами автотранспорта и отличающихся ослабленностью: средний балл общего состояния варьирует в пределах 2,06–3,52 (табл. 3).

Уменьшение техногенного пресса сопровождается снижением освоенных галлицей листочков на 45,36–75,17%. Минимальное число поврежденных листьев зафиксировано в кронах деревьев парков, для которых характерны широкий ассортимент древесной растительности и незначительное участие в их составе *R. pseudoacacia*, в том числе молодых (8–10 лет) деревьев.

В процессе питания личинки *O. robiniae* формируют галлы, представляющие собой загнутые вниз утолщения листовой пластинки более бледного цвета. Длина их колеблется от 7 до 15 мм (рис. 3). Галлы располагаются по всему краю листа на разном расстоянии от черешка.

Рис. 3. Повреждения листьев робинии Obolodiplosis robiniae

Количество галлов на простых листочках варьирует от 1 до 7 экземпляров (табл. 4). При этом в рекреационно-озеленительных насаждениях на большинстве листьев (77,5–100%) насчитывается от 1 до 3 галлов. Иная ситуация зафиксирована в защитных лесных насаждениях, преимущественно в придорожных лесополосах. Здесь на 69,5% простых листочков чаще встречается по 4–7 галлов.

При вскрытии галлов не обнаружено ярко выраженной зависимости количественного обилия личинок в них от числа галлов на простом листочке (табл. 5). Анализ полученных данных показал, что в ряде галлов (8,8% от общего количества) личинки отсутствуют. Причина этого явления в данное время пока не установлена.

Таблица 4

Соотношение заселенных *O. robiniae* простых листочков с разным числом галлов

Категория насаждений	Проанализировано листьев, шт.	Доля листьев с числом галлов, %						
		1	2	3	4	5	6	7
Дендрологическая коллекция	2108	27,78	22,22	50,0	–	–	–	–
Парк	157	97,9	5,10	–	–	–	–	–
Сквер	115	26,96	29,57	20,86	13,91	8,70	–	–
Внутриквартальные посадки	255	23,64	29,08	32,73	14,55	–	–	–
Полезащитные лесополосы	173	12,97	17,81	25,44	23,41	13,25	7,12	–
Придорожные лесополосы	181	8,64	9,75	11,10	14,83	16,17	22,22	17,29

Таблица 5

Плотность личинок *O. robiniea* в галле при разном числе галлов на простом листе

Среднее число простых листьев на 1 сложный, шт.	В том числе листьев с галлами		Кол-во галлов, шт./лист	Число личинок в галле, шт.
	шт.	%		
17,8	10,09	61,9	1	1,71 ± 0,67
			2	1,79 ± 0,81
			3	1,68 ± 0,69
			4	1,66 ± 0,51
			5	1,65 ± 0,48
			6	1,68 ± 0,53
			7	1,66 ± 0,49

Плотность галлов *O. robiniea* в насаждениях разных типов сильно варьирует. Более высоким значением данного показателя отличаются лесные полосы (полезащитные, придорожные). Среди озеленительных насаждений робиниевая краевая галлица предпочитает осваивать *R. pseudoacacia* в скверах и внутриквартальных посадках, подвергающихся более высокому рекреационному и техногенному воздействию. В ходе исследований не выявлено сколько-либо заметного изменения числа личинок в галле в зависимости от их количественного обилия на листочке.

Заключение

В настоящее время *O. robiniae* имеет широкое распространение на территории вторичного ареала. Основные тенденции в распространении и заселенности робинии галлицей в сухостепных условиях Нижнего Поволжья обусловлены прежде всего спецификой насаждений (видовым составом и возрастом деревьев рода робиния, категорией насаждений, уровнем антропогенного воздействия и др.). Наиболее предпочтительным кормовым растением для робиниевой краевой галлицы является *R. pseudoacacia*, причем с увеличением возраста деревьев их заселенность и плотность филлофага увеличиваются. Локальные очаги вида приурочены к загущенным придорожным лесополосам с преобладанием *R. pseudoacacia*, подверженным интенсивному воздействию выхлопных газов автотранспорта.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 0713-2019-0004 ФНЦ агроэкологии РАН в градиенте региональных изменений на Приволжской возвышенности.

Список литературы / References

1. Семенютина А.В., Лазарев. С.Е. Диагностические признаки представителей рода Robinia L. по генеративным показателям в интродукционных популяциях // World Ecology Journal. 2019. Т. 9. № 2. P. 64–94. DOI: 10.25726/NM.2019.85.96.003.

Semenyutina A.V., Lazarev. S.E. Diagnostic characters of representatives of the genus Robinia L. according to generative indicators in introduction populations // World Ecology Journal. 2019. Vol. 9. № 2. P. 64–94 (in Russian).

2. Белицкая М.Н., Грибуст И.Р., Блюм К.Я. Инвазивные вредители древесных растений сем. Fabaceae в насаждениях Нижневолжского региона // Научно агрономический журнал. 2019. № 3. С. 19–23. DOI: 10.34736/FNC.2019.106.3.006.

Belitskaya M.N., Gribust I.R., Blum K.Ya. Invasive pests of woody plants Fabaceae in the stands of the Lower Volga region // Nauchno agronomicheskiy zhurnal. 2019. № 3. P. 19–23 (in Russian).

3. Гниненко Ю.И., Главендекич М. Рекомендации по выявлению белоакациевой листовой галлицы *Obolodiplosis robinea* (Haldeman) (Diptera, Cecidomyiidae). Пушкино-Белград: ВПРС МОБЗР, 2010. 25 с.

Gninenko Yu.I., Glavendekich M. Recommendations for the identification of the white acacia leaf gall midge Obolodiplosis robinea (Haldeman) (Diptera, Cecidomyiidae). Pushkino-Belgrade: VPRS MOBZR, 2010. 25 p. (in Russian).

4. Гниненко Ю.И. Белоакациевая листовая галлица *Obolodiplosis robiniea* (Hald., 1847) (Diptera, Cecidomyiidae) – первая находка на Сахалине // Евроазиатский энтомологический журнал. 2013. Т. 12. № 6. С. 551–552.

Gninenko Yu.I. The first record of Obolodiplosis robiniea (Hald., 1847) (Diptera, Cecidomyiidae) from Sakhalin, Russia // Yevroaziatskiy entomologicheskiy zhurnal. 2013. Vol. 12. № 6. P. 551–552 (in Russian).

5. Мартынов В.В., Никулина Т.В., Левченко И.С. Инвазивные вредители робинии ложноакациевой (*Robinia pseudoacacia* L., 1753) в степной зоне Восточного Причерноморья // X Чтения памяти О.А. Катаева: тезисы докладов конференции. СПб., 2018. С. 72.

Martynov V.V., Nikulina T.V., Levchenko I.S. Invasive pests of pseudoacacia L. Robinia pseudoacacia L., 1753 in the steppe zone of the Eastern Black Sea // X Chteniya pamyati O.A. Katayeva: tezisy dokladov konferentsii. SPb., 2018. P. 72 (in Russian).

6. Наставление по организации, и ведению лесопатологического мониторинга в лесах России / Сост. А.Д. Маслов, Е.Г. Мозолевская, Н.А. Лисов и др. М.: ВНИИЛМ, 2001. 86 с.

Manual on the organization and conduct of forest pathological monitoring in the forests of Russia // Sost. A.D. Maslov, E.G. Mozolevskaya, H.A. Lisov i dr. M.: VNIIILM, 2001. 86 p. (in Russian).

7. Bálint J., Neacşu P., Adalbert B., Fail J., Vétek G. First record of the black locust gall midge, *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman) (Diptera: Cecidomyiidae), in Romania. North-Western Journal of Zoology. 2010. Vol. 6 (2). P. 319–322.

8. Bakay L., Kollár J. Influence of urban environment on the population biology of alien insect species: *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman, 1847), *Parectopa robiniella* Clemens, 1863 and *Phyllonorycter robiniella* Clemens, 1859 in conditions of Slovakia. Pensee Journal. 2014. Vol. 76. No. 6. P. 88–94.

9. Белицкая М.Н. Особенности комплекса филлофагов древесных растений семейства бобовые (Fabaceae Lindl.) в защитных насаждениях Волгограда // X Чтения памяти О.А. Катаева: тезисы докладов конференции. СПб., 2018. С. 11.

Belitskaya M.N. Features of the complex of phyllophages of woody plants of the legume family (Fabaceae Lindl.) In the protective stands of Volgograd // X Chteniya pamyati O.A. Katayeva: tezisy dokladov konferentsii. SPb., 2018. P. 11 (in Russian).

10. Есипенко Л.П. Биологические инвазии как глобальная экологическая проблема юга России // Юг России: экология, развитие. 2012. Т. 7. № 4. С. 21–25.

Esipenko L.P. Biological invasions as a global environmental problem in the south of Russia // Yug Rossii: ekologiya, razvitiye. 2012. Vol. 7. № 4. P. 21–25 (in Russian).

11. Мозолевская Е.Г., Куликова Е.Г. Экологические категории городских насаждений. Экология, мониторинг и рациональное природопользование // Научные труды МГУЛ. 2000. № 302–1. С. 5–12.

Mozolevskaya EG, Kulikova EG Ecological categories of urban plantations. Ecology, monitoring and environmental management // Nauchnyye trudy MGUL. 2000. № 302–1. P. 5–12 (in Russian).

12. Синчук О.В., Рогинский А.С., Буга С.В. Первая находка *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman, 1847) (Diptera: Cecidomyiidae) на территории Брянской области // Евроазиатский энтомологический журнал. 2018. Т. 17. № 6. С. 401–402.

Sinchuk O.V., Roginsky A.S., Buga S.V. The first find of *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman, 1847) (Diptera: Cecidomyiidae) in the Bryansk region // Yevroaziatskiy entomologicheskiy zhurnal. 2018. Vol. 17. № 6. P. 401–402 (in Russian).

13. Стручаев В.В. Инвазионные членистоногие филлофаги деревьев Белгородской области // Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. 2013. № 3 (146). С. 50–54.

Struchaev V.V. Invasive arthropod phylophages of trees of the Belgorod region // Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya Yestestvennyye nauki. 2013. № 3 (146). P. 50–54 (in Russian).

14. Kostro-Ambroziak A., Mieczkowska A. The first record of the black locust gall midge *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman, 1847) (Diptera: Cecidomyiidae) from northeastern Poland. Wiadomości entomologiczne. 2017. Vol. 36 (2). P. 126–127.

УДК 630*443.3

ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГО-ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОЧАГОВ УСЫХАНИЯ СОСНЫ ОТ КОРНЕВОЙ ГУБКИ

Битяев С.Г., Чураков Б.П.

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, e-mail: churakovbp@yandex.ru

Изучена зависимость площади очагов усыхания сосны, пораженной корневой губкой, от эколого-лесоводственных факторов: лесорастительных условий, сомкнутости полога, продуктивности, возраста древостоя и степени развития очагов. Результаты исследований показали, что наибольшая площадь очагов корневой губки и очагов усыхания сосны приходится на более богатые местообитания: сосняки орляковые, снытьево-ясменниковые, крупнотравные и мелкотравные. В этих типах леса сосредоточено 74,1% общей площади очагов корневой губки и 73,6% площади очагов усыхания сосны. Распространение очагов усыхания сосны зависит от эколого-лесоводственных факторов. Установлено влияние на распространение очагов усыхания типов леса, лесоводственной полноты, бонитета, возраста и степени развития очагов. Во всех восьми обследованных типах леса повышение лесоводственной полноты и продуктивности древостоев достоверно приводит к увеличению общей площади очагов усыхания сосны от корневой губки. Например, в наиболее продуктивном сосняке орляковом при полноте 0,4 площадь очагов усыхания составляет 5,4% от общей площади очагов, а при полноте 0,8 эта площадь увеличивается до 32,8%; в высокопродуктивных древостоях I класса бонитета площадь очагов – 33,3%, в низкопродуктивном V – всего 4,5%. В то же время с повышением возраста древостоев площадь очагов усыхания достоверно снижается. Например, в I классе возраста в сосняке орляковом площадь очагов составляет 25,5%, а в V – всего 4,2%. Что касается влияния степени развития очагов на распространение корневой губки, то установлено, что наибольшая площадь очагов усыхания сосны сосредоточена в действующих, затухающих и затухших очагах – 85,9%. Причем это характерно для всех обследованных типов леса. Незначительная площадь возникающих и формирующихся очагов усыхания (14,1%) говорит о том, что в обследованных популяциях сосны обыкновенной зараженность деревьев корневой губки идет на спад с последующим зарастанием очагов лиственными породами и кустарниками.

Ключевые слова: очаги усыхания, корневая губка, типы леса, бонитет, полнота, возраст

INFLUENCE OF ECOLOGICAL AND FORESTRY FACTORS ON THE SPREAD OF PINE SHRINKING FOCI FROM THE ROOT SPONGE

Bityaev S.G., Churakov B.P.

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, e-mail: churakovbp@yandex.ru

The dependence of the area of pine shrinking foci affected by root sponge on ecological and forestry factors: forest conditions, canopy closeness, productivity, age of the stand and the degree of development of foci was studied. The results of research have shown that the largest area of root sponge foci and pine shrinking foci falls on richer habitats: eagle pines, snytevo-yasmennikovye, large-grass and small-grass. These types of forests contain 74.1% of the total area of root sponge foci and 73.6% of pine shrinking foci. The distribution of shrinkage of pine depends on the ecological and silvicultural factors. The influence of forest types, forest completeness, bonit, age and degree of development of foci on the distribution of foci of desiccation is established. In all 8 surveyed forest types, the increase in forest completeness and productivity of stands significantly leads to an increase in the total area of pine shrinking centers from the root sponge. For example, in the most productive orlyakov pine with a fullness of 0.4, the area of shrinkage foci is 5.4% of the total area of foci, while with a fullness of 0.8, this area increases to 32.8%; in high – yielding stands of class I Bonita, the area of foci is 33.3%, in low-yielding V-only 4.5%. At the same time, with increasing age of stands, the area of foci of shrinkage significantly decreases. For example, in the first class of age in the orlyakov pine forest, the area of foci is 25.5%, and in the V-only 4.2% . as for the influence of the degree of development of foci on the spread of the root sponge, it was found that the largest area of pine shrinking foci is concentrated in active, fading and faded foci – 85.9%. Moreover, this is typical for all the surveyed forest types. A small area of emerging and forming foci of desiccation (14.1%) indicates that in the surveyed populations of common pine, infestation of root sponge trees is on the decline, followed by overgrowth of foci with hardwoods and shrubs.

Keywords: foci of desiccation, root sponge, forest types, bonitet, completeness, age

Основными эколого-лесоводственными факторами, влияющими на структуру и функционирование лесных экосистем, являются лесорастительные условия, тип леса, лесоводственная полнота, продуктивность и возраст древостоев. Лесорастительные условия и тип леса, зависящие от почвенно-климатических условий, являются не только существенными лесоводственными, но и важными экологическими факторами в лесных биогеоценозах. С изменением степени сомкнутости древесного полога (полноты) в лесном фитоценозе меняются и такие экологические условия, как осве-

щенность, влажность, температурный и ветровой режимы. Продуктивность древостоев зависит от почвенно-климатических факторов и тесно связана с сохранением биологической и экологической устойчивости лесных экосистем [1, с. 341–344; 2, с. 61–67; 3, с. 38].

Одним из важнейших биологических факторов, влияющих на устойчивость лесных экосистем, является патологический фактор. В сосновых фитоценозах функцию основного патологического фактора выполняет корневая губка *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref [4, с. 24; 5, с. 159–163; 6, с. 172]. Отличительной особенностью поражённых корневой губкой насаждений является куртинный и очаговый характер заболевания. По В.Г. Стороженко [7, с. 180], под очагом инфекции понимается участок леса (культур), где возбудитель обладает патогенностью, позволяющей ему поражать живые деревья. В.Г. Стороженко [6, с. 172] отмечает, что в древостоях сосны до возраста приспевания встречаемость корневой губки может достигать 100%, особенно при очаговом поражении деревьев.

По С.Ф. Негруцкому [8, с. 196], очаг корневой губки – это групповое поражение деревьев с явно выраженным патологическим ослаблением и усыханием деревьев, сопровождающимся ветровалом. В соответствии с «Рекомендациями по защите хвойных пород от корневой губки в лесах европейской части России» [9, с. 12] под очагом корневой губки понимается весь таксационный выдел, в котором обнаружены пораженные деревья в количестве, достаточном для отнесения его к одной из степеней пораженности болезнью: слабая, средняя, сильная, Очаг усыхания – это площадь, занятая группой (куртиной) ослабленных, усыхающих и усохших деревьев а также площадь прогалины, возникшей вследствие ветровала и вырубки пораженных деревьев.

Наиболее типичный очаговый характер болезни характерен для сосны, так как усыхание её наступает быстрее, чем у других пород. Появление очагов усыхания начинается обычно с первых рубок ухода, когда свежие пни служат кормовой базой паразита, а затем источником инфекции. По этой причине особенно сильно способствуют поражению корневой губкой древостои, часто подвергающиеся малоинтенсивным рубкам.

Цель исследования – изучение характера влияния основных эколого-лесоводственных факторов (лесорастительных условий, лесоводственной полноты, бонитета, возраста, степени развития очагов усыхания) на распространение очагов усыхания сосны от корневой губки.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования послужили сосновые древостои Ульяновской области, в которых обнаружены очаги корневой губки. Фитопатологическое обследование сосновых насаждений на предмет выявления очагов корневой губки и очагов усыхания проводилось в полевой период наземным способом по маршрутным ходам в соответствии с «Рекомендациями по защите хвойных пород от корневой губки в лесах европейской части России» и «Руководством по планированию, организации и ведению лесопатологических обследований» [9, с. 12; 10, с. 15]. Статистическая обработка полученных данных осуществлялась с использованием прикладной программы Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

В Ульяновской области очаги корневой губки в сосновых лесах занимают площадь 3422 га, или 1,0% от общей площади сосновых насаждений. Очаги усыхания сосны от корневой губки занимают 830 га, или 24,3% от общей площади очагов корневой губки. В табл. 1 представлены данные по результатам учета очагов корневой губки и очагов усыхания сосны в основных типах сосняков.

Тип сосняков определяется по преобладающим в живом напочвенном покрове растениям, например в СНЯС в покрове преобладают сныть и ясменник, Л – лишайники из рода кладония и т.д.

Анализ данных табл. 1 показывает, что наибольшая площадь очагов корневой губки и очагов усыхания сосны приходится на сосняки с наилучшими лесорастительными условиями: ОРЛ, СНЯС, КРТ и МТР. Для этих типов леса характерны наиболее благоприятные для произрастания сосны типы лесных почв – слабоподзолистые супесчаные и серые лесные легкосупесчаные или слабосуглинистые с достаточным увлажнением корнеобитаемого слоя. В этих типах леса сосредоточено 74,1% общей площади очагов корневой губки и 73,6% площади очагов усыхания сосны. Необходимо также отметить, что в сосняках лишайниковых с наихудшими показателями плодородия (почва среднеподзолистая

песчаная) и влажности почвы наблюдается сравнительно низкая зараженность сосняков корневой губкой. Площадь очагов корневой губки составляет всего 1,2%, а очагов усыхания сосны – 0,4% от общей площади очагов.

Изучено влияние эколого-лесоводственных факторов на распределение очагов усыхания сосны от корневой губки в различных типах леса. С этой целью был проведен двухфакторный дисперсионный анализ полученных результатов с использованием прикладной программы Excel 2010.

Важным эколого-лесоводственным фактором, влияющим на формирование и функционирование лесного фитоценоза, является полнота древостоя, регулирующая тепловой, влажностный и световой режимы в лесу. Поэтому представляет практический интерес выявление влияния лесоводственной полноты на распространение очагов усыхания сосны, пораженной корневой губкой, в различных типах леса (табл. 2).

Полученные результаты дают основание говорить о том, что по мере повышения лесоводственной полноты древостоев во всех обследованных типах сосняков увеличивается площадь усыхания деревьев, что подтверждается результатами дисперсионного анализа ($F_{прак.} = 19,6 > F_{теор.} = 2,7$). Например, если при полноте 0,4 в среднем по всем типам сосняков площадь очагов усыхания составляла 5,9%, то при полноте 0,8 она увеличилась до 34,2% от общей площади очагов, т.е. увеличение почти в 6 раз. Увеличение полноты древостоя приводит к снижению солнечной инсоляции, к повышению режима влажности почвы и атмосферы, что способствует созданию более благоприятных условий для развития корневой губки и увеличению площади очагов усыхания сосны. Кроме того, установлено, что в древостоях всех изученных полнот достоверно увеличивается площадь очагов усыхания по мере улучшения лесорастительных условий ($F_{прак.} = 10,7 > F_{теор.} = 2,4$).

Таблица 1

Распределение очагов корневой губки и очагов усыхания по типам леса

№ п/п	Тип леса	Площадь			
		Очаги корневой губки		Очаги усыхания	
		га	%	га	%
1	Сосняк ОРЛ	765	22,4	204	26,6
2	Сосняк СНЯС	674	19,7	158	23,3
3	Сосняк КРТ	564	16,5	137	24,3
4	Сосняк МТР	533	15,6	112	21,0
5	Сосняк ЗЛРК	349	10,3	87	24,8
6	Сосняк Ч	253	7,4	62	24,5
7	Сосняк БРЗМ	241	7,1	58	24,1
8	Сосняк Л	43	1,0	12	27,8
	Итого	3422	100	830	24,3

Примечание. Сосняки: ОРЛ – орляковый, СНЯС – снытьево-ясменниковый, КРТ – крупнотравный, МТР – мелкотравный, ЗЛРК – злаково-ракитниковый, Ч – черничный, БРЗМ – бруснично-зеленомошниковый, Л – лишайниковый.

Таблица 2

Распределение очагов усыхания сосны от корневой губки по полнотам

Тип сосняков	Площадь по полнотам											
	0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		Всего	
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
ОРЛ	11	5,4	19	9,3	46	22,6	61	29,9	67	32,8	204	100
СНЯС	9	5,7	16	10,1	21	13,3	57	36,1	55	34,7	158	100
КРТ	8	5,8	12	8,8	35	25,5	39	28,5	43	31,4	137	100
МТР	7	6,2	11	9,8	24	21,5	32	28,6	38	33,9	112	100
ЗЛРК	6	6,9	8	9,3	11	12,6	27	31,0	35	40,2	87	100
Ч	4	6,5	6	9,6	10	16,1	22	35,5	20	32,3	62	100
БРЗМ	3	5,2	4	6,9	8	13,8	21	36,2	22	37,9	58	100
Л	1	8,3	2	16,6	2	16,7	3	25,0	4	33,4	12	100
Итого	49	5,9	78	9,4	157	18,9	262	31,6	284	34,2	830	100

Продуктивность древостоев является одним из существенных эколого-лесоводственных характеристик лесного фитоценоза, зависящим от таких экологических факторов, как плодородие и влажность почвы [11, с. 92–95]. Поэтому очень важно выявить зависимость площади распространения очагов усыхания сосны, пораженной корневой губкой, от продуктивности древостоев (табл. 3).

Анализ данных табл. 3 показывает, что наибольшая площадь очагов усыхания сосны приходится на высокопродуктивные древостои I и II классов бонитета (62,3 %), в древостоях IV и V классов бонитета площадь очагов усыхания составляет всего 14,4 % от общей площади. Дисперсионный анализ подтверждает достоверность увеличения площади очагов усыхания по мере повышения продуктивности древостоев ($F_{прак.} = 18,8 \succ F_{теор.} = 2,7$). В древостоях всех бонитетов достоверно увеличивается площадь очагов усыхания по мере улучшения лесорастительных условий ($F_{прак.} = 10,9 \succ F_{теор.} = 2,3$). Следовательно, более благоприятные почвенно-грунтовые условия способствуют не только повышению продуктивности древостоев, но и увеличению площади очагов усыхания.

Одной из важных морфологических характеристик лесного фитоценоза является возраст древостоев. Изучено влияние возрастных ступеней развития сосновых древостоев (классов возраста) на распределение площади очагов усыхания от корневой губки в различных типах леса (табл. 4).

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что возрастные этапы развития древостоев оказывают влияние на распространение корневой губки. Наибольшая площадь очагов усыхания древостоев от корневой губки приходится на молодняки I–II классов и средневозрастные древостои III класса возраста, что в сумме составляет 84,2 % от общей площади очагов. Причем наиболее сильное увеличение площади усыхания древостоев характерно для высокопродуктивных местообитаний сосны – сосняков ОРЛ, СНЯС и КРТ. В сосняках ОРЛ площадь очагов усыхания в первых трех классах возраста составляет 85,2 %, в сосняках СНЯС – 86,7 %, в сосняках КРТ – 86,9 %. Уменьшение площади очагов усыхания по мере увеличения возраста древостоев достоверно подтверждается результатами дисперсионного анализа ($F_{прак.} = 14,4 \succ F_{теор.} = 2,7$). Для древостоев всех классов возраста отмечено достоверное уменьшение площади очагов усыхания по мере ухудшения лесорастительных условий ($F_{прак.} = 9,2 \succ F_{теор.} = 2,4$). Следовательно, поражая наиболее жизнеспособную и быстро развивающуюся часть популяции сосны, корневая губка вызывает не только гибель и распад части древостоя, но и приводит к снижению устойчивости лесной экосистемы в целом.

С практической точки зрения важно выявить характер распределения площади усыхания сосны в зависимости от степени развития очагов: формирующиеся, возникающие, действующие, затухающие и затухшие. Это важно не только для понимания существующего санитарного состояния сосновых древостоев, но и для прогнозирования лесопатологической ситуации на будущее, поскольку от характера развития патологического процесса в очагах корневой губки будет зависеть судьба популяции сосны в патологически нарушенных лесных экосистемах.

Таблица 3

Распределение очагов усыхания сосны от корневой губки по классам бонитета

Тип сосняков	Площадь по классам бонитета											
	I		II		III		IV		V		Всего	
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
ОРЛ	68	33,3	57	27,9	49	24,0	21	10,3	9	4,5	204	100
СНЯС	48	30,4	57	36,1	32	20,2	16	10,1	5	3,2	158	100
КРТ	42	30,7	38	27,7	37	27,0	14	10,2	6	4,4	137	100
МТР	34	30,3	36	32,2	28	25,0	9	8,1	5	4,4	112	100
ЗЛРК	28	32,2	31	35,6	16	18,4	8	9,2	4	4,6	87	100
Ч	19	30,6	20	32,3	14	22,6	6	9,7	3	4,8	62	100
БРЗМ	18	31,0	16	27,6	14	24,1	7	12,1	3	5,2	58	100
Л	4	33,3	3	25,0	2	16,7	2	16,7	1	8,3	12	100
Итого	261	31,2	258	31,1	192	23,3	83	10,0	36	4,4	830	100

Таблица 4

Распределение очагов усыхания сосны от корневой губки по классам возраста

Тип сосняков	Площадь по классам возраста											
	I		II		III		IV		V		Всего	
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
ОРЛ	52	25,5	50	24,2	73	35,9	20	9,7	9	4,2	204	100
СНЯС	40	25,4	40	25,4	55	34,7	18	11,4	5	3,1	158	100
КРТ	37	27,0	33	24,1	49	35,8	14	10,2	4	2,9	137	100
МТР	30	26,8	27	24,1	38	33,9	15	13,4	2	1,8	112	100
ЗЛРК	22	25,3	28	32,2	21	24,1	13	14,9	3	3,5	87	100
Ч	17	27,4	19	30,6	15	24,2	9	14,4	2	3,2	62	100
БРЗМ	15	25,9	16	27,6	14	24,1	11	18,9	2	3,5	58	100
Л	3	25,0	3	25,0	2	16,7	2	16,7	2	16,6	12	100
Итого	216	26,0	216	26,0	267	32,2	102	12,3	29	3,5	830	100

Таблица 5

Распределение очагов усыхания по степени их развития

Тип сосняков	Площадь очагов усыхания											
	$О_в$		$О_ф$		$О_д$		$О_з$		$О_т$		Всего	
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
ОРЛ	2	1,0	21	10,3	58	28,4	69	33,8	54	26,5	204	100
СНЯС	2	1,3	20	12,7	46	29,1	49	31,0	41	25,9	158	100
КРТ	1	0,7	19	13,9	30	21,9	49	35,8	38	27,7	137	100
МТР	1	0,9	16	14,3	31	27,7	31	27,7	33	29,4	112	100
ЗЛРК	1	1,2	13	14,9	26	29,9	29	33,3	18	20,7	87	100
Ч	0	0	12	19,4	17	27,4	18	29,0	15	24,2	62	100
БРЗМ	0	0	8	13,8	18	31,0	22	37,9	10	17,3	58	100
Л	0	0	1	8,3	3	25,0	6	50,0	2	16,7	12	100
Итого	7	0,8	110	13,3	229	27,6	273	32,9	211	25,4	830	100

Примечание: $О_в$ – очаг возникающий, $О_ф$ – очаг формирующийся, $О_д$ – очаг действующий, $О_з$ – очаг затухающий, $О_т$ – очаг затухший.

В табл. 5 представлены данные по распределению площади очагов усыхания в зависимости от степени их развития в различных лесорастительных условиях.

Данные табл. 5 указывают на то, что наибольшая площадь очагов усыхания сосны сосредоточена в действующих, затухающих и затухших очагах – 85,9%. Причем это характерно для всех исследованных типов леса. Незначительная площадь возникающих и формирующихся очагов усыхания (14,1%) говорит о том, что в обследованных популяциях сосны обыкновенной зараженность деревьев корневой губкой идет на спад. По нашему мнению, это связано с тем, что в лесном фонде за последние 30 лет резко сократилась площадь искусственно созданных лесных насаждений – лесных культур. По данным большинства специалистов по корневой губке, этот возбудитель болезни в наибольшей степени поражает сосновые насаждения, созданные искусственным путем, т.е. посадкой.

Таким образом, можно констатировать, что эколого-лесоводственные факторы оказывают влияние как на распространение очагов корневой губки, так и на распределение очагов усыхания сосны от этого возбудителя болезни.

Список литературы / References

1. Арефьев Ю.Ф. Энтропия как мера биоразнообразия в лесных экосистемах // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 5. С. 341–344.

Arefev Yu.F. Entropy as a measure of biodiversity in forest ecosystems // Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2013. № 5. P. 341–344 (in Russian).

2. Арефьев Ю.А., Мамедов М.М. Прогноз и контроль патогенеза в лесных экосистемах // ИВУЗ Лесной журнал. 2017. № 3. С. 61–69. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.61.

Arefev Yu.A., Mamedov M.M. Prediction and Control of Pathogenesis in Forest Ecosystems // IVUZ. Lesnoy Zhurnal. 2017. № 3. P. 61–69 (in Russian).

3. Татаринцев А.И. Эколого-фитопатологические особенности антропогенно нарушенных дендроценозов Средней Сибири: автореф. дис. … докт. биол. наук. Иркутск, 2018. 38 с.

Tatarintsev A.I. Ecological and phytopathological features of anthropogenically disturbed dendrocenoses of Central

Siberia: avtoref. diss. … doc. biol. nauk. Irkutsk, 2018. 38 p. (in Russian).

4. Волченкова Г.А. Биоэкологические особенности развития фитопатогенного базидиомицета *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. и обоснование контроля пестрой ситовой гнили корней сосны: автореф. дис. … канд. биол. наук. Минск, 2017. 24 с.

Volchenkova G.A. Bioecological features of the development of phytopathogenic basidiomycete Heterobasidion annosum (Fr.) Bref. and substantiation of the control of mottled screen rot of pine roots: avtoref. dis. … kand. biol. nauk. Minsk, 2017. 24 p. (in Russian).

5. Павлов И.Н. Значение корневых патогенов в процессах массового усыхания хвойных лесов Сибири и Дальнего Востока // Проблемы лесной фитопатологии и микологии. Материалы IX международной конференции Минск – Москва – Петрозаводск, 2015. С. 159–163.

Pavlov I.N. Significance of root pathogens in the processes of mass drying of coniferous forests of Siberia and the Far East // Problems of forest Phytopathology and Mycology. Materials of the IX international conference Minsk – Moscow – Petrozavodsk, 2015. P. 159–163 (in Russian).

6. Стороженко В.Г. Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценотических исследований. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 172 с.

Storozhenko V.G. Sustainable forests. Theory and practice of biogeocenotic research. M.: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2018. 172 p. (in Russian).

7. Стороженко В.Г. Микоценоз и микоценология. М.: Гриф и К, 2011. 180 с.

Storozhenko V.G. Milanos and milanovia. M.: Grif and K, 2011. 180 p. (in Russian).

8. Негруцкий С.Ф. Корневая губка. М.: Агропромиздат, 1986. 196 с.

Negrutskii S.F. Root a sponge. M.: Agropromizdat, 1986. 196 p. (in Russian).

9. Рекомендации по защите хвойных пород от корневой губки в лесах европейской части России. Пушкино: ВНИИЛМ, 2001. 12 с.

Recommendations for protecting coniferous species from root sponges in the forests of the European part of Russia. Pushkino: VNIILM, 2001. 12 p. (in Russian).

10. Руководство по планированию, организации и ведению лесопатологических обследований. М.: ВНИИЛМ, 2008. 15 с.

Guidelines for planning, organizing and conducting forest pathology surveys. M.: VNIILM, 2008. 15 p. (in Russian).

11. Чураков Б.П., Битяев С.Г. Дифференциация и продуктивность древостоев в очагах усыхания сосны от корневой губки // Материалы XX международной научно-практической конференции «Fundamental and applied sciences today XX». North Chaleston, USA, 2019. С. 92–95.

Churakov B.P., Bityaev S.G. Differentiation and productivity of stands in the centers of pine drying from the root sponge // Proceedings of the XX international scientific and practical conference «Fundamental and applied sciences today XX». North Chaleston, USA, 2019. P. 92–95 (in Russian).

УДК 630*4:632.7

ДИНАМИКА ПОРАЖЕНИЯ ДРЕВОСТОЕВ СОСНЫ СИБИРСКОЙ УЧАСТКА «МАЛЫЙ АБАКАН» ЗАПОВЕДНИКА «ХАКАССКИЙ» ВТОРИЧНЫМ СТВОЛОВЫМ ВРЕДИТЕЛЕМ – КОРОЕДОМ ШЕСТИЗУБЧАТЫМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИЗУАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМОСНИМКОВ

[1]Исаева И.Л., [1,2]Лебедева С.А.

[1]Государственный природный заповедник «Хакасский», Абакан, e-mail: inna_maymanakova@mail.ru;
[2]Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан,
e-mail: lebedeva-1411@yandex.ru

В данной статье приводятся результаты мониторинговых исследований на территории государственного природного заповедника «Хакасский», проводимых в высокогорной кедровой тайге, в месте вспышки размножения вторичного стволового вредителя короеда шестизубчатого. В частности, говорится о том, что начало поражения всегда идёт от водоразделов и спускается со временем к поймам рек, очаги поражения возникают в районе наивысших точек водораздела и двигаются в обе стороны от него вдоль хребтов и к речным поймам, которые повреждаются в последнюю очередь. Основным направлением движения очага размножения вредителя внутри заповедного участка является северо-западное, в южном же направлении очаг практически не распространяется. Посредством визуальных мониторинговых наблюдений дана характеристика современного состояния древостоев на территории заповедного участка, приведены данные о том, что в эпицентрах локальных очагов до 90% древостоя является сухостойным, остальная часть усыхает и здоровые деревья отсутствуют. Во фронтальных частях очагов усыхает до 30% древостоя и до 30% деревьев являются уже усохшими. В зонах предочагов древостои относительно здоровы, но таких древостоев становится всё меньше за счёт смыкания границ локальных очагов размножения вредителя и, как следствие, увеличения скорости поражения и усыхания деревьев кедра. На участках леса, не подвергшихся воздействию короеда шестизубчатого, в травяном ярусе доминируют низкорослые теневыносливые виды. При увеличении освещенности растёт количество видов подлеска и их обилие, повышается густота травостоя. На участках с почти полностью выпавшей материнской древесной породой увеличивается проективное покрытие травяного яруса и его высота. Смена доминантов выражается в уменьшении обилия низкорослых, тенелюбивых видов, а доля светолюбивых видов возрастает.

Ключевые слова: заповедник «Хакасский», короед шестизубчатый, вторичный стволовой вредитель, вспышка размножения, территория распространения очага поражения, мониторинг вспышки размножения

DYNAMICS OF DESTRUCTION OF FOREST STANDS OF SIBERIAN PINE AREA «MALY ABAKAN» RESERVE SECONDARY PEST STEM – BARK SETSUBTOTAL THE RESULTS OF INTERPRETATION OF VISUAL OBSERVATIONS AND SPACE IMAGES

[1]Isaeva I.L., [1,2]Lebedeva S.A.

[1]Khakassкy State Nature Reserve, Abakan, e-mail: inna_maymanakova@mail.ru;
[2]Khakass State University named after N.F. Katanov, Abakan, e-mail: lebedeva-1411@yandex.ru

This article presents the results of monitoring studies on the territory of the state nature reserve «Khakassky», conducted in the high-mountain cedar taiga, at the location of the outbreak of reproduction of the secondary stem pest of the six-tooth bark beetle. In particular, says that the beginning of defeat always comes from the watershed down to the alluvial plains, the lesions occur near the highest points of the watershed and moving to both sides from it along the ridges to river floodplains, which become damaged in the least. The main direction of movement of the pest breeding center within the protected area is North-West, while in the southern direction the center practically does not spread. By means of visual monitoring observations, the characteristic of the current state of stands on the territory of the protected area is given, data is given that in the epicenters of local foci, up to 90% of the stand is dry, the rest is shrinking and there are no healthy trees. In the frontal parts of the lesions dries to 30% forest and 30% are already shrunken, and in areas predation a relatively healthy forest stands, but such stands are becoming smaller due to the closing of boundaries local centers of reproduction of the pest and, as a consequence, increase the speed of the destruction and shrinkage of the cedar trees. In areas of the forest that have not been exposed to the six-tooth bark beetle, the grass tier is dominated by low-growing shade-tolerant species. With increasing light, the number of species of undergrowth and their abundance increases, and the density of the herbage increases. In areas with almost completely fallen parent tree species, the projective coverage of the grass tier and its height increase. The change of dominants is expressed in a decrease in the abundance of low-growing, shadow-loving species, and the share of light-loving species increases.

Keywords: Khakassky nature reserve, six-toothed bark beetle, secondary stem pest, breeding outbreak, distribution area of the lesion, monitoring of the breeding outbreak

Сосна сибирская является основной средообразующей породой в подавляющей части древостоев среднегорных ландшафтов Алтае-Саянского экорегиона [1, 2] и в подавляющей части древостоев горно-таёжной группы участков заповедника «Хакасский». Масштабный выпад деревьев кедра в пределах заповедной тайги неизменно приведёт

к смене типа растительных сообществ и, как следствие, резкому изменению микроклиматических условий внутри экосистем. Последствия таких изменений могут стать угнетающими и даже губительными для отдельных видов животных и растений, и масштабы негативного влияния на текущий момент предположить крайне сложно. Подобные явления, вызванные агрессивными видами насекомых, описаны в литературе [3–5], где состояние биологического разнообразия лесных экосистем становится объектом экологического мониторинга.

Короед шестизубчатый является одним из самых агрессивных видов стволовых вредителей для лесов всего евразийского континента, и его биология и экология подробно изучались и изучаются учёными многих стран [6]. Тем не менее на текущий момент не разработано эффективных мер борьбы с данным видом вредителей и остаются неясными основные факторы ослабления древостоев, ведущие к дальнейшему заселению их короедом.

Территория поражения древостоя кедра в пределах заповедного участка, выявленная авторами в 2018 г. [7], оказалась весьма значительной, обозначив необходимость проведения тотального исследования территорий участка на предмет распространения вспышки размножения вредителя.

Целью исследования является оценка современного состояния древостоев кедра сибирского на территории участка «Малый Абакан» заповедника «Хакасский» – в месте вспышки размножения вторичного стволового вредителя короеда шестизубчатого – *Ips sexdentatus* Boern.

Поставленной цели соответствовали следующие задачи:

1. Оценить степень повреждения древостоев вторичным стволовым вредителем – короедом шестизубчатым на момент лета 2019 г.

2. Проследить многолетнюю динамику распространения очага размножения вредителя на участке «Малый Абакан» заповедника по снимкам из космоса.

3. Проследить изменение флористического состава травяного яруса на постоянных пробных площадях под воздействием короеда шестизубчатого.

4. Сформулировать прогнозы по дальнейшему развитию вспышки размножения короеда шестизубчатого на территории заповедного участка и в непосредственной близости от него.

Материалы и методы исследования

Исследования древостоев на предмет флористического состава травяного яруса, степени повреждённости и усыхания деревьев кедра сибирского проводили в очагах массового размножения короеда шестизубчатого на постоянных пробных площадях, на территории заповедника «Хакасский» (участок «Малый Абакан») в 2018–2019 гг. На двух участках было заложено по три пробные площади. Участок № 1 располагается в окрестностях кордона «Нижний», участок № 2 – устье реки Откыл [8]. Общая характеристика пробных площадей представлена в таблице.

Для выявления изменений, происходящих в растительных сообществах в очагах короеда шестизубчатого, были сделаны геоботанические описания на пробных площадях на поврежденных участках и в нетронутых вредителем кедровниках (контрольные) размером 20х20 м (400 м^2), по общепринятой методике [9]. Латинские названия растений приведены по сводке «Конспект флоры Сибири: Сосудистые растения» [10].

При визуальной оценке степени усыхания древостоев в пределах пробных площадей производился осмотр каждого дерева и оценивалось их состояние по шестибалльной шкале состояний: К1 – здоровые деревья, К2 – ослабленные деревья, К3 – сильно ослабленные деревья, К4 – усыхающие деревья, К5 – свежий сухостой, К6 – старый сухостой (отработанные стволовым вредителям).

Общая характеристика пробных площадей

Пробные площади	Состав древостоя		Кол-во усохших деревьев, %		ОПП** травяного яруса, %		Кол-во видов травяного яруса, шт.	
	I*	II	I	II	I	II	I	II
Усохший короедник	6К3П1Е	6К3П1Е	87	85	85	90	13	13
Переходная зона	7К2П1Е	6К3П1Е	27	11	75	70	17	15
Зона «предочага» (контроль)	6К3П1Е	5К4П1Е	0	0	55	30	11	13

Примечания: *I – Участок № 1 (окрестности кордона «Нижний»).
II – Участок № 2 (устье реки Откыл).
**Общее проективное покрытие (далее ОПП).

При перечете деревьев по шестибалльной шкале категорий состояния помимо общей оценки состояния кроны, ствола, корневых лап, отмечается (путем их осмотра) заселенность стволовыми вредителями с указанием вида насекомого.

Анализ поврежденности древостоев производился так же для всей территории участка «Малый Абакан» заповедника по данным дистанционного зондирования Земли спутником Sentinel-2 путём дешифрирования и дальнейшей обработки рядом специализированных спектральных (вегетационных) индексов и методом классификации с результатами достоверной верификации по наземным данным [11]. Результаты дешифрирования проходили обработку при помощи ГИС-технологий с составлением карт повреждения [11].

Работа по дешифрированию космоснимков и построению карт осуществлялась ФБУ «Центр защиты леса Красноярского края».

Динамика развития очага вредителя и его современное состояние

Наблюдаемый нами с 2015 г. повторный резкий всплеск размножения вредителя – как следствие благоприятности погодных условий и, предположительно, накопления критической массы вредителя в уже поврежденных древостоях – наблюдается по текущее время. Последствием нового витка вспышки размножения вредителя становится резкое увеличение числа повреждаемых деревьев внутри уже освоенных вредителем древостоев, а также захват новых территорий.

Результаты пробного картирования части участка заповедника, проводимого нами в 2018 г., показавшие, что заражение древостоев началось приблизительно в 1997–1998 гг. и имело не одиночно-точечную локализацию, а достаточную протяженность и несколько мест образования, подтвердились исследованиями этого года, проведёнными для всей территории участка «Малый Абакан» заповедника.

Согласно данным картирования, местами возникновения очагов поражения стали междуречья Тарташа, Откыла и Нижней Кайлы. Максимально глубоко поражение древостоев продвинулось до истоков рек Откыл и Кабансуг с их основными притоками, откуда далее не продвинулось до текущего момента (рис. 1).

Начало поражения всегда идёт от водоразделов и спускается со временем к поймам рек. Очаги поражения возникают в районе наивысших точек водораздела и двигаются в обе стороны от него вдоль хребтов и к речным поймам, которые повреждаются в последнюю очередь.

Возникнув на северной границе, дальнейшее распространение очаг поражения получил по годам вглубь заповедного участка в северо-западном (максимально быстро) и юго-восточном направлениях, почти не распространяясь на юг. Но значительным расширение границ поражения было не за счёт движения границ поражения вовне, а за счёт развития очага вовнутрь уже освоенных территорий упомянутых выше междуречий (рис. 2).

Максимальное развитие очаг размножения вредителя получил в 2000, 2010, 2015 и 2019 гг. Динамика очагов выражалась в заметном увеличении площади поражённых древостоев и количестве усыхающих деревьев внутри древостоев, появлении новых эпицентров внутри очагов. Кроме того, при новых витках развития зона поражения продвигалась всё выше по течению реки Малый Абакан и внутрь участка заповедника, в древостои, ранее не охваченные вредителем.

Летом 2019 г. на участке «Малый Абакан» заповедника по-прежнему наблюдалась активная деятельность вредителя внутри кедровников, приводящая к значительной степени повреждения и усыхания древостоев и увеличению площади очага. В пределах непосредственно заповедной территории наиболее сильно древостои кедра повреждены вредителем по водораздельным гривам в междуречьях Кизаса и Тарташа, Тарташа и Откыла, Откыла и Нижнего Откыла, Нижнего Откыла и Средней Кайлы.

Современное состояние древостоев в месте локализации вспышки вторичного стволового вредителя короеда шестизубчатого

При визуальных обследованиях пробных площадей выявлено следующее. В эпицентрах очагов 75–90% древостоя являются старым или свежим сухостоем, остальной древостой находится на различных стадиях усыхания. В таких участках древостоя здоровые деревья кедра либо не встречаются, либо единичны.

Во фронтальных частях очагов усыхает порядка 25–30% древостоя. Старый сухостой в таких участках леса занимает примерно 50% древостоя, остальная часть деревьев либо незначительно ослаблена, либо здорова (чаще всего это молодые деревья).

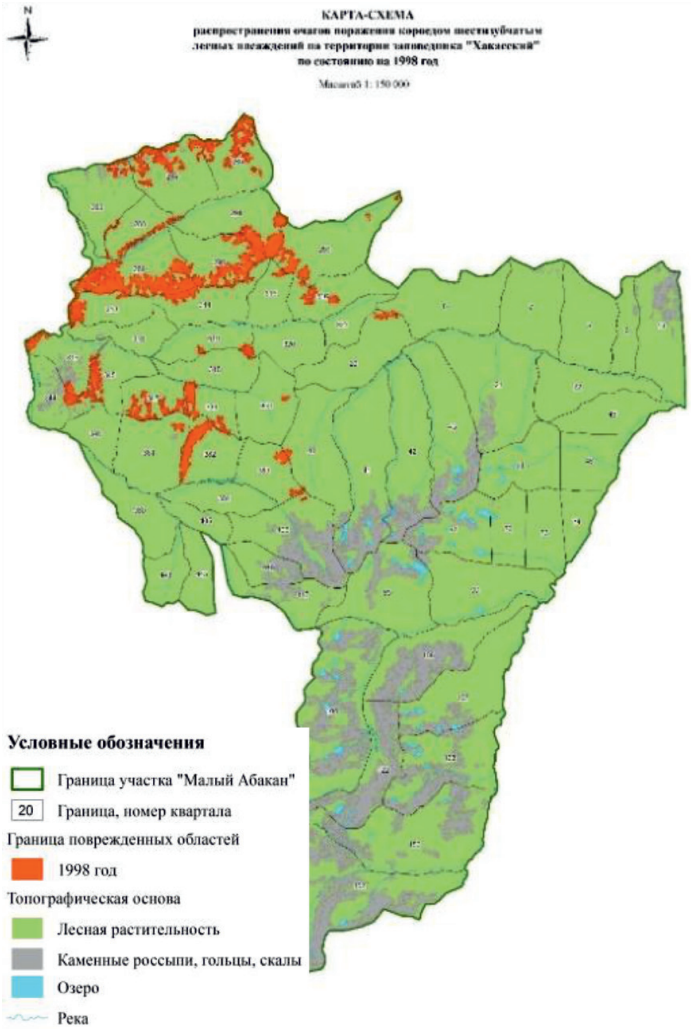


Рис. 1. Распространение очагов поражения древостоев сосны сибирской короедом шестизубчатым в пределах заповедного участка «Малый Абакан» по состоянию на лето 1998 г.

В зонах предочагов древостои выглядят здоровыми, ослабленные или усыхающие деревья единичны или отсутствуют, сухостоя нет.

Повсеместно наблюдается смыкание границ локальных очагов и их фронтальных зон. Следствием смыкания становится резкое нарастание скорости заражения и выпада деревьев и исчезновение здорового древостоя.

Изучение напочвенного покрова

Растительные сообщества исследуемой территории – это кедрово-пихтовые мохово-разнотравные леса, которые представлены на территории Северной Азии реликтовыми сообществами темнохвойных субнеморальных черневых лесов. Произрастание данных растительных сообществ на территории Южной Сибири обусловлено локальными мезоклиматическими условиями предгорий Алтая и Саян, характеризующимися умеренной континентальностью, высокой влажностью и высокой теплообеспеченностью [12].

Древостой на пробных площадях представлен *Pinus sibirica* Du Tour (с разной степенью деградации), *Abies sibirica* Ledeb. и *Picea obovata* Ledeb. Высота сосны сибирской достигает 25–30 м, диаметр 50–70 см; высота пихты 12–15 м, диаметр 30–35 см. Кустарниковый ярус несомкнутый (покрытие 7–20%), представлен разновысокими экземплярами различных видов кустарников. Постоянными видами являются *Sorbus sibirica* Hedl., *Lonicera altaica* Pall. exDC, *Ribesa tropurpureum* C.A. Mey., *Spiraea chamaedryfolia*L., *Rubus sachalinensis* H. Lev. и *Padus avium* Mill.

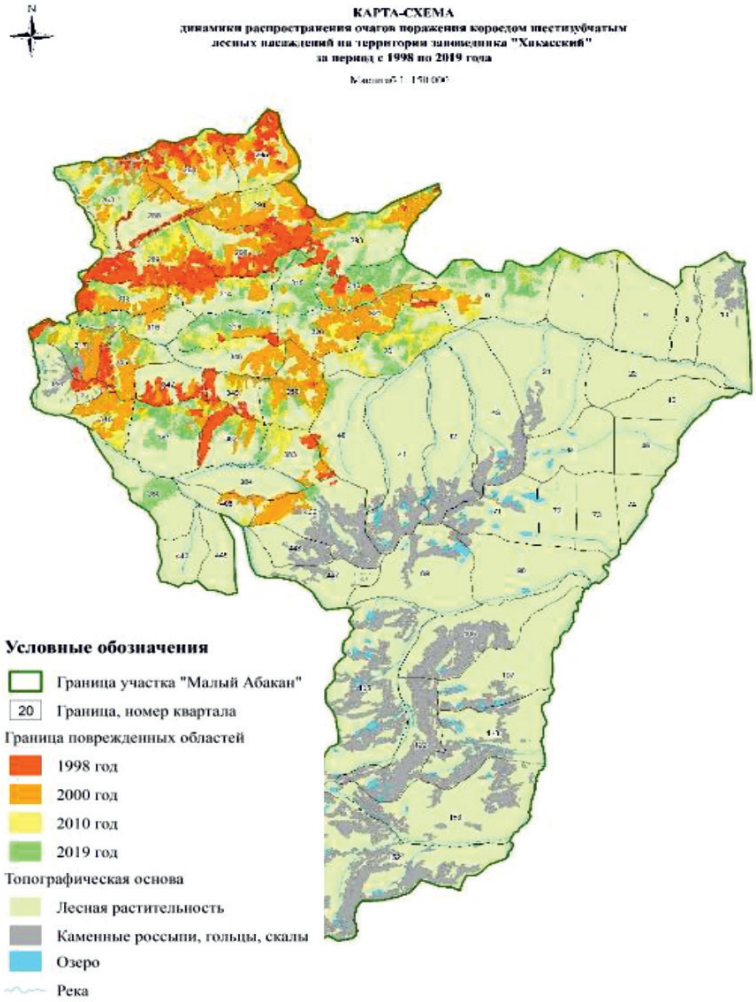


Рис. 2. Динамика распространения очагов поражения древостоев сосны сибирской короедом шестизубчатым в пределах заповедного участка «Малый Абакан» с 1998 по 2019 г.

Хорошо развит травяной ярус, состоящий из двух подъярусов. Первый подъярус высотой 35–50 см представлен *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Calamagrostis obtusata* Trin., *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenkins et A. Jermy, *Diplazium sibiricum* (Turcz. ex G. Kunze) Kurata, *Equisetum pretense* Ehrh.; присутствует представитель высокотравья – *Aconitum septentrionale* Koelle. Второй подъярус (высота 5–27 см) выполняет основную роль, и в нем сосредоточена большая часть видов, среди которых доминируют *Vaccinium myrtillus* L., *Carex macroura* Meinsh. s. str., *Linnaea borealis* L., *Cruciata krylovii* (Iljin) Pobed., *Cerastium pauciflorum* Stev. ex Ser., *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt, *Stellaria bungeana* Fenzl s. str., *Trientalis europaea* L. Проективное покрытие мохового яруса 40–60 %.

На контрольных участках произрастают кедровые таежные леса с мелкотравными и мелкотравно-зеленомошными сообществами. В их травяном ярусе доминируют теневыносливые виды, находящиеся в нижнем подъярусе: *Cruciata krylovii*, *Oxalis acetosella* L., *Maianthemum bifolium*, *Trientalis europaea*. Крупнотравные виды (1 подъярус) представлены менее обильно (*Calamagrostis obtusata* Trin., *Dryopteris carthusiana* Vill. H.P. Fuchs, 1959), проективное покрытие злаков составляет 2–5 %.

После повреждения кедровых лесов короедом шестизубчатым происходит целый ряд изменений нижних ярусов растительных сообществ. В слабо деградированных сообществах при увеличении освещенности увеличивается количество видов подлеска и их обилие, повышается густота травостоя

(общее проективное покрытие травяного яруса достигает 70–75 %) по сравнению с контролем. Увеличение проективного покрытия подлеска сдерживает бурное развитие светолюбивых видов, в том числе злаков, и поэтому основу травяного яруса, так же как и на контрольных участках, составляют тенелюбивые виды таежного мелкотравья: *Maianthemum bifolium*, *Linnaea borealis*, *Trientalis europaea* и др. – которые сохраняются на участках, находящихся под тенью здоровых и ослабленных деревьев, где еще сохраняется зеленомошный покров.

На участках с почти полностью выпавшей материнской древесной породой увеличивается ОПП травяного яруса (85–90 %) и его высота достигает 150–160 см. Смена доминантов выражается в уменьшении обилия низкорослых, тенелюбивых видов, а доля светолюбивых видов (крупнотравья) возрастает. Особенно сильно увеличивается проективное покрытие злаков, достигающее 10–15 % (по сравнению с контролем 2–5 %). Стоит отметить, что если в слабо деградированных растительных сообществах моховой ярус достигает 50–80 %, то в деградированных он может полностью исчезать, сохраняясь только в затененных местах.

Прогнозы по развитию очага размножения вредителя

Общая площадь, покрытая лесами с преобладанием хвойных пород, в горно-таёжной части заповедника, составляет 102 706 га, с преобладанием кедра – 98 675 га. На конец 2019 г. площадь повреждённых кедровых древостоев равна 18 314,86 га, что составляет 17,8 % от общего лесного фонда и 18,6 % от фонда лесов с преобладанием сосны сибирской.

В настоящее время необходимо констатировать, что внутри древостоев накоплена настолько значительная масса вредителя, что угасание вспышки размножения возможно лишь при возникновении каких-либо катастрофических явлений (либо для леса, следствием чего станет гибель значительной части древостоев, и это задержит продвижение вредителя, либо для самого вредителя, что приведёт к массовой его гибели). Но даже при условии резкого затухания вспышки, что крайне маловероятно, в процессе её угасания будут повреждены ещё значительные площади древостоя.

С увеличением площади поврежденных древостоев, снижением сомкнутости крон будут продолжаться изменения в живом напочвенном покрове. В частности, будут формироваться растительные сообщества с представителями разнотравья и крупнотравья, с зарослями кустарников, что буден негативно сказываться на естественном возобновлении кедра (сосны сибирской).

Заключение

Очаг размножения короеда шестизубчатого на территории заповедника «Хакасский» является действующим и хроническим. Повсеместно наблюдаются возобновляющиеся и новообразующиеся очаги размножения вредителя в районах отработанных древостоев и ранее незатронутых биоценозов.

В эпицентрах очагов усохшими являются до 90 % деревьев кедра, во фронтальных частях – до 80 %. Повсеместно наблюдается слияние границ локальных очагов с последующим резким увеличением количества повреждаемых и усыхающих деревьев.

Данные по изменению видового состава растений напочвенного покрова на разных стадиях поражения кедровых лесов, полученные в ходе работ, могут быть использованы в качестве одного из критериев, которые положены в основу оценки эколого-экономического ущерба, вызванного инвазией короеда шестизубчатого в кедровых лесах.

В настоящий момент угасание вспышки размножения вредителя возможно лишь при возникновении каких-либо катастрофических явлений. Но даже при условии резкого затухания вспышки, что крайне маловероятно, в процессе её угасания будут повреждены ещё значительные площади древостоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-44-190004р_а «Оценка состояния кедровых лесов республики Хакасия в месте локализации вспышки размножения вторичного стволового вредителя короеда шестизубчатого (на примере урочища Малый Абакан заповедника Хакасский)».

Список литературы / References

1. Овчинникова Н.Ф. Динамика видового состава и фитомассы напочвенного покрова в производных фитоценозах черневого пояса Западного Саяна // Флора и растительность Западной Сибири и Дальнего Востока. Чтения им. Л.М. Черепнина и материалы Шестой Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 110 лет со дня рождения Л.М. Черепнина и 80 лет Гербария им. Л.М. Черепнина (KRAS) / Под. ред. Е.М. Антипова. Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет имени В.П. Астафьева, 2016. С. 206–211.

Ovchinnicova N.F. Species composition and biomass of above-ground plants dynamics under canopy in after-growth cenosis of West Sayan chern belt // Flora and vegetation of Western Siberia and the Far East. Readings named after L.M. Cherepnin and materials of the Sixth all-Russian

conference with international participation, dedicated to the 110th anniversary of the birth of L.M. Cherepnin and the 80th anniversary Of the herbarium named after L.M. Cherepnin (KRAS) / pod. red. Ye.M. Antipova. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet imeni V.P. Astaf'yeva, 2016. P. 206–211 (in Russian).

2. Бочарников М.В. Ботаническое разнообразие высотно-поясного спектра северного макросклона Западного Саяна // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1 (4). С. 974–977.

Bocharnikov M.V. Botanical diversity of the altitude-belt spectrum of the Northern macroslope of the Western Sayan // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. V. 13. № 1 (4). P. 974–977 (in Russian).

3. Кривец С.А., Бисирова Э.М., Чернова Н.А., Пац Е.Н., Керчев И.А. Комплексная характеристика биологического разнообразия кедровых лесов на южном пределе их распространения в Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 2 (26). С. 130–150.

Krivets S.A., Bisirova E.M., Chernova N.A., Pats E.N., Kerchev I.A. A complex description of Siberian stone pine forests biodiversity at the southern border of their outreach in West Siberia // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2014. № 2 (26). P. 130–150 (in Russian).

4. Кривец С.А., Басирова Э.М., Керчев И.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Трансформация таёжных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий. 2015. Т. 8. № 1. С. 41–63.

Krivets S.A., Basirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Transformation of taiga ecosystems in the Western Siberian invasion focus of foureyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2015. V. 8. № 1. P. 41–63 (in Russian).

5. Евсеева Н.А., Никулина Н.А. Оценка очагов карантинных вредителей в Иркутской области // Вестник КрасГАУ. 2016. № 9 (120). С. 40–44.

Yevseeva N.A., Nikulina N.A. Assessment of the centers of quarantine pests in the Irkutsk region // Vestnik KrasGAU. 2016. № 9 (120). P. 40–44 (in Russian).

6. Власов Р.В., Давыдова И.А. Современное состояние исследований короедов в России и за рубежом // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 187. С. 70–80.

Vlasov R.V., Davydova I.A. Current state of research bark beetles in Russia and abroad // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2009. № 187. P. 70–80 (in Russian).

7. Исаева И.Л. Мониторинг вспышки размножения короеда шестизубчатого – *Ips sexdentatus* Boern. на сосне сибирской (участок «Малый Абакан» заповедника «Хакасский») // Успехи современного естествознания. 2018. № 12–1. С. 50–56.

Isaeva I.L. Monitoring of the outbreak of reproduction of the six-toothed bark beetle-Ipssexdentatus Boern. on the Siberian pine (Small Abakan section of the Khakassky reserve) // Advances in current natural sciences. 2018. № 12–1. P. 50–56 (in Russian).

8. Лебедева С.А. Изменение флористического состава нижних ярусов фитоценозов кедровых лесов под влиянием короеда шестизубчатого – *Ips sexdentatus* Boern. (участок «Малый Абакан» заповедника «Хакасский») // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2019. Т. 11. № 1. С. 35–46. DOI: 10.12731/2658-6649-2019-11-1-35-46.

Lebedeva S.A. Changing the floral composition of the lower tiers of phytocenoses of cedar forests under the influence of the six-tooth bark beetle-Ips sexdentatus Boern. (Small Abakan section of the Khakassky nature reserve») // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2019. V. 11. № 1. P. 35–46 (in Russian).

9. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. 2-е изд. М.: Изд. АН СССР, 1961. 144 с.

Sukachev V.N., Sonn S.V. Methodological guidelines for the study of forest types. 2-nd ed. M.: Izd. AN SSSR, 1961. 144 p. (in Russian).

10. Конспект Флоры Сибири: Сосудистые растения / Отв. ред. Байков К.С. Новосибирск: Наука, 2005. 362 с.

Conspectus florae Sibiriae: Planta vasculares. / Otv. red. Baykov K.S. Novosibirsk: Nauka, 2005. 362 p. (in Russian).

11. Быкова-Сашко Е.В., Голубев Д.В., Кнорре А.А., Исаева И.Л. Дешифрирование лесных насаждений, поврежденных стволовыми вредителями на примере территорий заповедника «Хакасский» и «Столбы» с применением материалов космической съемки и ГИС-технологий // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26–31 августа 2019 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2019. С. 66–69.

Bykova-Sashko E.V., Golubev D.V., Knorre A.A., Isaeva I.L. Decoding of forest plantations damaged by stem pests on the example of the territories of the Khakassky and Stolby nature reserve using space survey materials and GIS technologies // Forest ecosystems of the boreal zone: biodiversity, bioeconomics, environmental risks. Materials of the all-Russian conference with international participation. Krasnoyarsk. August 26–31, 2019. Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2019. P. 66–69 (in Russian).

12. Ермаков Н.Б. Разнообразие бореальной растительности Северной Азии. Гемибореальные леса. Классификация и ординация. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2003. 232 с.

Ermakov N.B. Diversity of boreal vegetation in Northern Asia. Hemiboreal forests. Classification and ordination. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2003. 232 p. (in Russian).

УДК 630*31

ЗАВИСИМОСТИ ОБЪЕМА ВЫВОЗКИ ДРЕВЕСИНЫ С ЛЕСНОЙ ТЕРРИТОРИИ ОТ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Медведев С.О., Мохирев А.П., Сергеева Е.А.

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Лесосибирский филиал, Лесосибирск, e-mail: sergeeva.e.a@mail.ru

Лесозаготовительные предприятия в процессе своей деятельности зачастую осуществляют три ключевых взаимосвязанных технологических процесса: непосредственно лесозаготовка, перегрузочно-складские операции и транспортировка (вывозка) древесины. На каждый из них в значительной степени оказывают воздействие многие факторы. При этом на последний, помимо производственных и организационно-экономических, в значительной мере воздействуют природно-климатические условия. Природно-климатические условия в значительной мере оказывают воздействие на скорость движения лесовозов и на объемы вывозки древесины. Целью данного исследования является оценка данных зависимостей и составление соответствующих регрессионных моделей. Статья посвящена исследованию зависимостей вывозки древесины (деятельности лесозаготовителей) от природно-климатических условий. Для данных зависимостей получены математические модели. Моделирование проведено для различных лесозаготовительных периодов. Полученные результаты указывают на значительную дифференциацию факторов, влияющих на вывозку древесины в зависимости от периода лесозаготовительных работ. Объектом исследования выступили лесозаготовительные районы Красноярского края, являющегося одним из крупнейших регионов Сибири. Концентрация рабочих параметров вывозки древесины на нижний склад наблюдается при температурах в диапазоне от -8 до -31 °С. В ходе исследования установлены регрессионные зависимости влияния на вывозку древесины с лесной территории комплекса природно-климатических факторов. Также установлено, что очевидной зависимости между температурой воздуха и объемами вывозки не наблюдается. Вместе с тем присутствует общая тенденция к снижению объемов вывозимых грузов при падении температуры. Полученные модели и подход к оценке могут быть использованы и в других лесозаготовительных регионах страны.

Ключевые слова: моделирование, лесозаготовка, вывозка древесины, природно-климатические условия, регрессионные модели

DEPENDENCE OF THE VOLUME OF WOOD REMOVAL FROM THE FOREST TERRITORY ON NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

Medvedev S.O., Mokhirev A.P., Sergeeva E.A.

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Lesosibirsk, e-mail: sergeeva.e.a@mail.ru

Logging companies in the course of their activities often carry out three key interrelated technological processes: directly logging, transshipment and storage operations and transportation (removal) of wood. Each of them is significantly influenced by many factors. At the same time, the latter, in addition to production and organizational and economic, is significantly affected by natural and climatic conditions. Natural and climatic conditions have a significant impact on the speed of movement of timber carriers and on the volume of wood removal. The purpose of this study is to evaluate these dependencies and compile appropriate regression models. The article is devoted to the study of the dependence of wood removal (logging activities) on natural and climatic conditions. Mathematical models are obtained for these dependencies. The simulation was performed for various logging periods. The obtained results indicate a significant differentiation of factors affecting the removal of wood depending on the period of logging operations. The object of the study was the logging areas of the Krasnoyarsk territory, which is one of the largest regions of Siberia. The concentration of working parameters of wood removal to the lower warehouse is observed at temperatures in the range from -8 to-31 °C. In the course of the study, regression dependences of the influence of natural and climatic factors on the removal of wood from the forest territory were established. It is also found that there is no obvious relationship between the air temperature and the volume of export. However, there is a General trend to reduce the volume of exported goods when the temperature drops. The obtained models and the approach to estimation can be used in other logging regions of the country.

Keyword: modeling, logging, timber carting out, climatic conditions, regression models

Лесозаготовительная отрасль является одной из важнейших в лесной промышленности страны. Древесные ресурсы, поступающие с лесозаготовок, в дальнейшем перерабатываются во многие ценные продукты. При этом от объема и качества поступающего первоначального сырья зависят различные дальнейшие процессы – от формирования цен на продукцию до качества получаемых товаров и объема вторичных древесных ресурсов [1].

Лесозаготовительные предприятия в процессе своей деятельности зачастую осуществляют три ключевых взаимосвязанных технологических процесса: непосредственно лесозаготовка, перегрузочно-складские операции и транспортировка (вывозка) древесины. На каждый из них

в значительной степени оказывают воздействие многие факторы [2]. При этом на последний, помимо производственных и организационно-экономических, в значительной мере воздействуют природно-климатические условия [3]. Действительно, вывозка древесины из леса осуществляется по протяженным маршрутам (в Сибири до 200–300 км) с изменчивыми рельефами, почвами, дорожными покрытиями. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на вывозку древесины, являются климатические условия [4]. Очевидно, что движение (скорость) автолесовозов в ясный холодный день зимой и дождливый день осенью будет серьезно варьироваться [5]. Таким образом, природно-климатические условия в значительной мере оказывают воздействие на скорость движения лесовозов и на объемы вывозки древесины. Целью данного исследования является оценка данных зависимостей и составление соответствующих регрессионных моделей.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступили автомобильные лесовозные дороги, находящиеся на территории различных лесозаготовительных районов Красноярского края (Богучанский, Енисейский, Мотыгинский). Территории различаются природно-климатическими условиями. В ходе исследования использованы данные о лесозаготовках и вывозке древесины с лесной территории на береговые нижние склады за 2017–2019 гг. В качестве природно-климатических факторов анализировались сведения за аналогичные периоды времени, находящиеся в архивных сведениях о погоде на электронном ресурсе rp5.ru по соответствующим метеорологическим постам (Богучанский, Назимовский, Енисейский, Мотыгинский).

Вследствие неоднородности природно-климатических и производственных условий в различные временные интервалы, а также возможности их классификации по наиболее близким характеристикам, весь лесозаготовительный (в том числе учитывающий вывозку древесины с лесной территории) процесс разделен на пять периодов [6]: зимний (11 ноября – 20 марта); зимне-весенний (21 марта – 20 апреля); весенний (21 апреля – 30 июня); летний (1 июля – 31 августа); осенний (1 сентября – 10 ноября). Основной метод математической обработки данных – корреляционно-регрессионный анализ, осуществляемый с применением статистического продукта Statistica 10.0 [7, 8]. Полученные ранее авторами результаты о значительной зависимости вывозки древесины с лесной территории в каждом из данных районов от природно-климатических факторов [3] выявили потребность проведения исследований и составления моделей, отражающих зависимости для всего региона.

Результаты исследования и их обсуждение

Одним из тезисов, регулярно заявляемых сообществом лесопромышленников и лесозаготовителей, является зависимость объема вывозки древесины от температуры воздуха. При этом основной акцент делается на зимнем периоде времени [9, 10].

В ходе исследования установлено, что очевидной зависимости между температурой воздуха и объемами вывозки не наблюдается. Разброс данных по вывозке на нижний склад слишком велик, чтобы сформировать как модель, так и отдельные зависимости. Вместе с тем на рис. 1 видно, что присутствует общая тенденция к снижению объемов вывозимых грузов при падении температуры.

Концентрация рабочих параметров вывозки древесины на нижний склад наблюдается при температурах в диапазоне от -8 до -31 °C (рис. 2). При этом наиболее часто встречаемые объемы суточной вывозки составляют 100–800 м^3/сут. Следует отметить, что представленные на рис. 1 и 2 иллюстрации характеризуют вывозку в исследуемых лесозаготовительных районах с использованием идентичного числа лесовозной техники.

В ходе оценки влияния комплекса природно-климатических факторов на вывозку древесины на нижний склад было определено, что регрессионных моделей с высоким коэффициентом ($R > 0,8$) детерминации не существует. Данный факт обусловлен наличием множества производственных параметров, определяющих выработку и влияющих на количество перевозимых грузов в определенные временные интервалы. К данным факторам могут относиться состояние оборудования, наличие свободных площадей (складов), возможность оплаты трудозатрат персонала и арендуемой техники и т.д. Вместе с тем приемлемые модели (при $0,5 < R^2 < 0,7$) зависимости объема вывозки древесины на нижний склад от комплекса природно-климатических факторов могут быть получены.

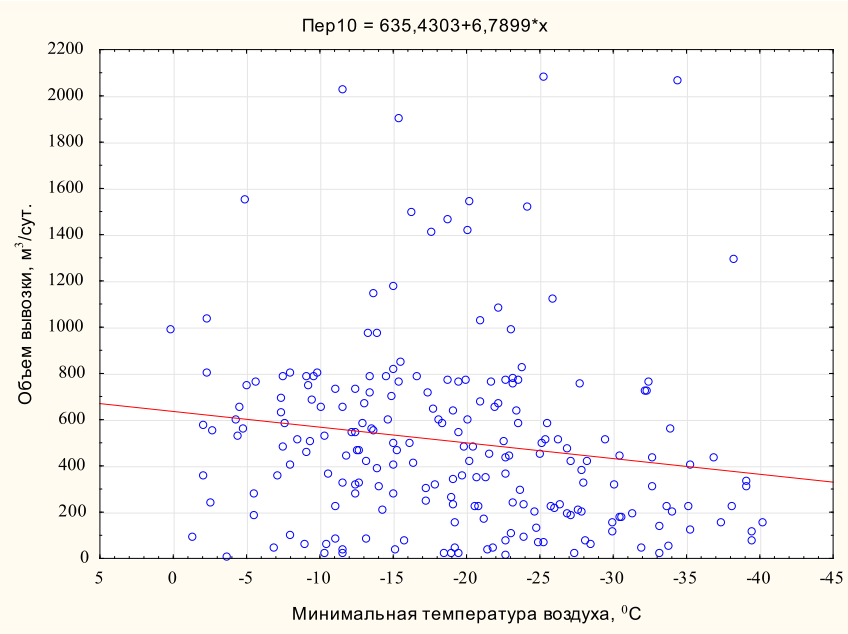


Рис. 1. Зависимость объема вывозки древесины на нижний склад от минимальной суточной температуры воздуха

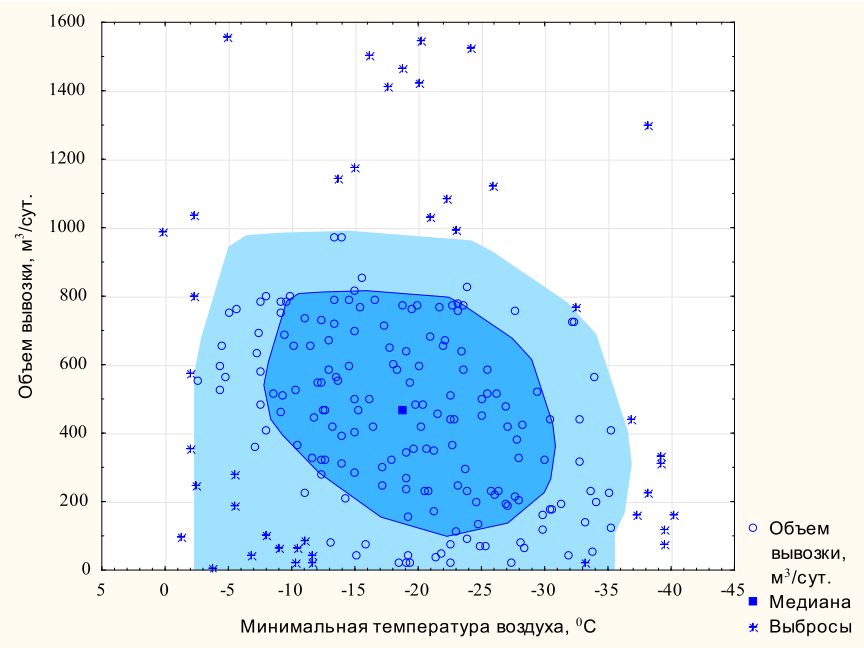
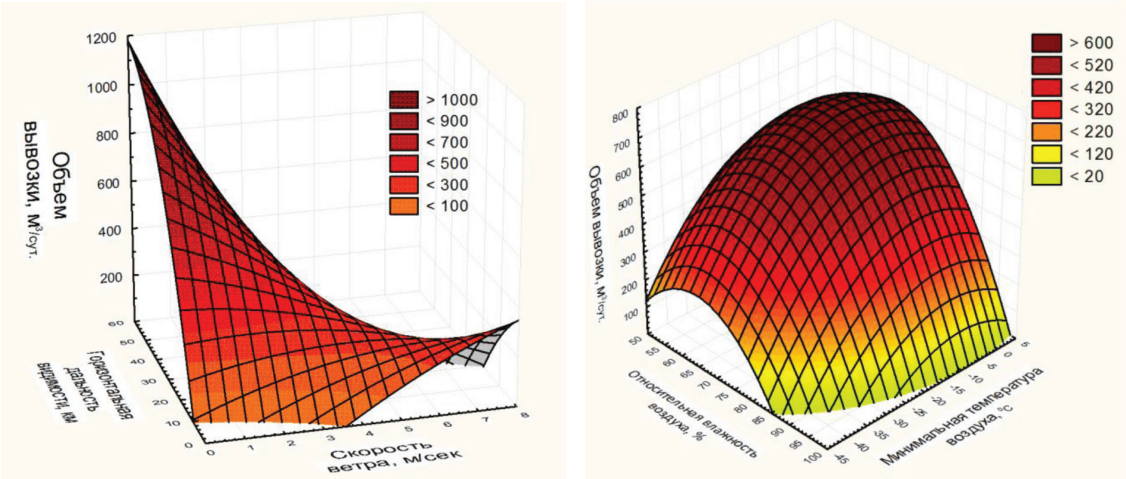


Рис. 2. Диаграмма концентрации объема вывозки древесины на нижний склад в зависимости от минимальной суточной температуры воздуха

Так, для зимнего периода наиболее выражена зависимость от факторов 2 и 7 (рис. 3, а). Наглядно видно, что в зимний период объемы вывозки тем выше, чем больше дальность видимости и меньше скорость ветра. Очевидно, что в сложных погодных условиях (плохая видимость и сильный ветер) водители автолесовозов вынуждены снижать скорость, а объемы вывозки при неизменном количестве лесовозов неуклонно и объективно снижаются.



а) *б)*

Рис. 3. Зависимость объема вывозки древесины на нижний склад:
а – горизонтальной дальности видимости и скорости ветра в зимний период;
б – от относительной влажности воздуха и минимальной температуры воздуха в зимний период

Еще двумя значимыми факторами, влияющими на вывозку древесины на нижний склад, как показал анализ, являются относительная влажность и минимальная температура воздуха (рис. 3, б). Показанная выше (рис. 1) зависимость вывозки от температуры дополняется в данном случае влиянием влажности воздуха. Очевидно, что при слишком высокой влажности воздуха (и низкой температуре) работа техники существенно осложняется – происходит обледенение (как техники, так и дорожного полотна), что приводит к снижению производительности вывозки.

Вследствие невозможности представления в графическом виде зависимостей вывозки от нескольких параметров, в ходе исследования были получены лишь регрессионные зависимости по каждому из исследуемых периодов вывозки. В качестве основы использовалась модель вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i v_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} v_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{n} b_{ij} v_i v_j, \quad (1)$$

где Y – зависимая переменная (объем перевозимой одной машиной древесины на плечо вывозки в сутки, м³·км /маш·сут); b_i – коэффициент при i-й независимой переменной; b_{ii} – коэффициент при i-й независимой переменной в квадрате; b_{ij} – коэффициент при всех возможных попарных произведениях независимых переменных (при $i \neq j$); n – количество независимых переменных; v_i – i-я независимая переменная

В случае четырех независимых переменных (выявленных в ходе исследования) общая модель имеет вид

$$\begin{aligned} Y = {} & b_0 + b_1 v_1 + b_2 v_2 + b_3 v_3 + b_4 v_4 + \\ & + b_{11} v_1^2 + b_{22} v_2^2 + b_{33} v_3^2 + b_{44} v_4^2 + b_{12} v_1 v_2 + \\ & + b_{13} v_1 v_3 + b_{14} v_1 v_4 + b_{23} v_2 v_3 + b_{24} v_2 v_4 + b_{34} v_3 v_4. \end{aligned} \quad (2)$$

В ходе исследования рассматривалось влияние следующих природно-климатических факторов на объемы удельной вывозки древесины единицей техники по маршруту до нижнего склада в условиях Красноярского края: W – относительная влажность воздуха, %, S – скорость ветра, м/с, O – тип осадков. В исследовании установили, что для получения численных значений данного фактора будут использоваться следующие характеристики типа осадков: дождь непрерывный – 1,5; снег непрерывный – 1,5; дымка – 0,5; ливневый снег – 2; ливневый дождь – 2; туман – 1; P – продолжительность осадков. Для наличия численных значений установлено, что продолжительность осадков принимается: ливень – 2; дождь – 1; снег или дождь со снегом – 1,5; туман – 0,5. $T_{мин}$ – минимальная температура воздуха за сутки, °C. $T_{макс}$ – максимальная температура воздуха за сутки, °C. V – горизонтальная дальность видимости, км. R – количество выпавших

осадков, мм. S – высота снежного покрова, см (при наличии). В ходе исследования получены следующие модели зависимостей по лесозаготовительным периодам:

Осенний:

$$Y = 2006{,}06 + 100{,}66*S + 1829{,}70*S^2 - 625{,}09*O + 4119{,}51*O^2 - 5629{,}76*S*O + 1049{,}78*Тмакс + 16{,}63*Тмакс^2 - 276{,}38*S*Тмакс - 444{,}75*O*Тмакс + 3250{,}13*P + 1248{,}67*P^2 - 5768{,}98*P*S + 2616{,}28*O*P - 78{,}06*Тмакс*P.$$

Летний:

$$Y = 98705{,}3 - 1868{,}5*Тмакс - 814{,}4*V - 5{,}8*Тмакс^2 - 13{,}2*V^2 - 31{,}1*Тмакс*V - 40565{,}4*S + 3909{,}6*S^2 + 215{,}8*S*Тмакс + 151{,}5*S*V - 74{,}3*W - 4{,}7*W^2 + 124{,}7*W*S + 6{,}1*W*Тмакс + 9{,}5*W*V.$$

Весенний

$$Y = -7315{,}4 - 11845{,}1*S + 1364{,}3*V + 1658{,}9*S^2 - 9{,}7*V^2 + 12{,}9*S*V + 1242{,}7*Тмакс - 0{,}6*Тмакс^2 - 116{,}6*S*Тмакс - 25{,}9*V*Тмакс + 18596{,}0*P - 11622{,}9*P^2 + 1470{,}5*S*P - 33{,}1*V*P + 20{,}0*Тмакс*P.$$

Зимне-весенний:

$$Y = 21864{,}51 + 407{,}04*Тмин + 95{,}15*V - 14{,}51*Тмин^2 + 2{,}38*V^2 + 8{,}39*Тмин*V + 514{,}38*S + 698{,}82*S^2 - 80{,}82*S*Тмин - 76{,}08*S*V - 521{,}17*W + 4{,}56*W^2 - 68{,}75*W*S - 8{,}18*W*Тмин + 2{,}27*W*V.$$

Зимний:

$$Y = 4304{,}29 - 435{,}75*Тмин + 503{,}55*V - 0{,}25*Тмин^2 - 3{,}50*V^2 - 1{,}42*Тмин*V - 5551{,}48*S + 59{,}71*S^2 - 30{,}80*S*Тмин - 124{,}39*S*V + 78{,}49*W - 2{,}40*W^2 + 93{,}79*W*S + 5{,}29*W*Тмин + 1{,}37*W*V.$$

Полученные регрессионные модели отражают влияние на кубокилометр вывозимой древесины на нижний склад единицей техники в сутки в лесозаготовительных районах Красноярского края.

В рамках оценки влияния на вывозку древесины различных климатических условий невозможно обойти вниманием помимо рассмотренных в данном исследовании и иные факторы: производственные, инфраструктурные, природные (рельеф, почвы и т.д.). В рамках выстраиваемых моделей и регрессионных зависимостей, по авторскому мнению, возможно решение задачи двумя способами: 1. Включение в перечень анализируемых факторов дополнительных параметров и проведение регрессионного анализа с учетом их влияния [5]. 2. Включение дополнительных параметров в качестве коэффициентов (поправочных) в полученные ранее модели в различных вариантах. Очевидно, что первый вариант предпочтительнее, так как позволяет исключать менее значимые факторы на этапе предварительной оценки. Вместе с тем включение дополнительных параметров в полученные модели является сложной дискуссионной задачей.

Заключение

В ходе исследования установлены регрессионные зависимости влияния на вывозку древесины с лесной территории комплекса природно-климатических факторов. Полученные модели и подход к оценке могут быть использованы и в других лесозаготовительных регионах страны. Основная цель подобных исследований – выявление закономерностей изменения объемов транспортируемой древесины под воздействием природно-климатических факторов. Данные сведения важны как с теоретической, так и с практической точки зрения – для планирования деятельности различными предприятиями, вовлеченными в лесозаготовительный процесс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и ООО «Красресурс 24» в рамках научного проекта № 20-410-242901 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Исследование и моделирование процессов развития экономики лесной промышленности региона в контексте природно-климатических условий и ресурсного потенциала», № 18-410-240003.

Список литературы / References

1. Кабанов М.В., Лыкосов В.Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 9. С. 753–764.

Kabanov M.V., Lykosov V.N. Monitoring and modeling of natural and climate changes in Siberia // Optika atmosfery i okeana. 2006. V. 19. № 9. P. 753–764 (in Russian).

2. Демаков Д.В. Анализ исследований в области моделирования технологических процессов лесозаготовок // Перспективы науки. 2012. № 9 (36). С. 98–100.

Demakov D.V. Analysis of research in the sphere of modeling of technological processes of forest harvesting // Perspektivy nauki. 2012. № 9 (36). P. 98–100 (in Russian).

3. Мохирев А.П., Медведев С.О., Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 3 (35). С. 103–113. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/10.

Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Smolina O.N. Factors affecting the capacity of logging roads // Lesotekhnicheskiy zhurnal. 2019. V. 9. № 3 (35). P. 103–113 (in Russian).

4. Мохирев А.П., Горяева Е.В., Мохирев М.П., Ившина А.В. Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 2. С. 176–185. DOI: 10.12737/article_5b2406175e7765.44768086.

Mokhirev A.P., Goryaeva E.V. Mokhirev M.P., Ivschina A.V. Planning of operation periods of winter logging roads based on the analysis of climate data statistics // Lesotekhnicheskiy zhurnal. 2018. V. 8. № 2. P. 176–185 (in Russian).

5. Мазуркин П.М. Прогнозирование совместного развития сельского и лесного хозяйства // Научное обозрение. 2017. № 5. С. 57–71.

Mazurkin P.M. Forecasting joint development of agriculture and forestry // Nauchnoye obozreniye. 2017. № 5. P. 57–71 (in Russian).

6. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study). Journal of Applied Engineering Science. 2018. V. 16. № 3. P. 313–319. DOI: 10.5937/jaes16-16908.

7. Mazurkin P.M. Method of identification. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 427–434.

8. Морозов Е.В., Шегельман И.Р. О применении вероятностного моделирования для анализа некоторых технологических процессов лесозаготовок // Глобальный научный потенциал. 2011. № 9. С. 67–71.

Morozov E.V., SHegelman I.R. On the application of probabilistic modeling for the analysis of some technological forest harvesting processes // Global'nyy nauchnyy potentsial. 2011. № 9. P. 67–71 (in Russian).

9. Мельник М.А., Волкова Е.С. Сезонная дифференциация опасных и неблагоприятных природных явлений для сферы лесопользования Томской области // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24. № 2. С. 229–237. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-229-237.

Mel'nik M.A., Volkova E.S. Seasonal differentiation of dangerous and adverse natural phenomena for the sphere of forest management in the Tomsk region // Vestnik SGUGiT. 2019. V. 24. № 2. P. 229–237 (in Russian).

10. Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Лукашевич В.М. Обоснование периода эксплуатации зимних лесовозных дорог // Известия вузов. Лесной журнал. 2007. № 2. С. 54–57.

Shegelman I.R., Shchegoleva L.V., Lukashevich V.M. Justification of the period of operation of winter logging roads // Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal. 2007. № 2. P. 54–57 (in Russian).

СТАТЬИ

УДК 556:57.042

ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Акатьева Т.Г.

ФГБОУ «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Тюмень, e-mail: akatyevat@mail.ru

В обеспечении городского населения продуктами питания животного происхождения одно из ведущих мест принадлежит птицеводческой промышленности как производителю продукции из мяса птицы. Вместе с тем возрастает и степень негативного влияния предприятий на компоненты окружающей среды, в том числе поступление различных загрязнений в природные водоемы со сточными водами. Очистные сооружения, в силу ряда причин, часто не справляются с очисткой стоков до нормативно установленных требований, и поэтому недостаточно очищенные сточные воды продолжают загрязнять водные объекты. В данной статье рассмотрено влияние предприятия «ПРОДО Тюменский бройлер» на качество воды оз. Каскаринское, в которое производится сброс стоков птицефабрики. Качество сточных и природных вод оценивали по результатам химического анализа и биотестирования с использованием представителей зоопланктона (ветвистоусых рачков *Daphnia magna*) и высших водных растений (ряски малой *Lemna minor* L.). Водопользование птицефабрики и поселка, на территории которого расположено предприятие, осуществляется из городского водопровода. Перед сбросом в водоем осуществляется комплексная очистка и обеззараживание сточных вод. Согласно результатам химического и микробиологического анализов сточных вод содержание соединений азота и органических веществ не соответствовало установленным требованиям. Согласно данным биотестирования воды природного водоема-приемника сточных вод, наибольшей токсичностью для гидробионтов обладали пробы, отобранные в месте сброса стоков, что проявлялось в нарушении репродуктивной функции и возрастной структуры популяции *Daphnia magna* и развитии роста *Lemna minor* L.

Ключевые слова: ПРОДО Тюменский бройлер, сточные воды, озеро Каскаринское, метод биотестирования, ветвистоусые рачки, ряска малая

ECOTOXICOLOGICAL EVALUATION OF NATURAL RESERVOIRS UNDER THE INFLUENCE OF POULTRY COMPLEXES

Akateva T.G.

State Agrarian University of the Northern Trans-Urals, Tyumen, e-mail: akatyevat@mail.ru

One of the leading places in providing the urban population with food products of animal origin belongs to the poultry industry as a producer of poultry meat products. At the same time, the degree of negative impact of enterprises on environmental components is increasing, including the influx of various pollutants into natural bodies of water with wastewater. Wastewater treatment plants, for several reasons, often do not cope with wastewater treatment to regulatory requirements, and therefore insufficiently treated wastewater continues to pollute water bodies. This article discusses the impact of the enterprise «PRODO Tyumen broiler» on the water quality of Lake. Kaskarinskoye, which discharges poultry farm effluents. The quality of wastewater and natural waters was evaluated according to the results of chemical analysis and biotesting using representatives of zooplankton – branched crustaceans Daphnia magna and higher aquatic plants – duckweed Lemna minor L. Water use of the poultry farm and the village on whose territory the enterprise is located is carried out from the city water supply. Before discharge into the reservoir, a comprehensive treatment and disinfection of wastewater is carried out. According to the results of chemical and microbiological analyzes of wastewater, the content of nitrogen compounds and organic substances did not meet the established requirements. According to the biotesting of water from a natural sewage water reservoir, samples taken at the place of sewage discharge had the greatest toxicity for hydrobionts, which manifested itself in a violation of the reproductive function and age structure of the Daphnia magna population and the development of growth of Lemna minor.

Keywords: PRODO Tyumen broiler, wastewater, Lake Kaskarinskoye, biotesting method, branched crustaceans, small duckweed

В настоящее время крупные птицеводческие комплексы являются предприятиями различного направления (по производству мяса и яиц) и различной мощности; продолжается проектирование и строительство новых объектов практически во всех регионах России [1]. Вместе с тем птицеводческие комплексы становятся мощным фактором негативного воздействия на окружающую среду в результате накопления в них огромного количества птичьего помета и промышленных стоков [2]. Одной из важнейших проблем промышленного птицеводства является разработка эффективных систем защиты водных экосистем от негативного воздействия стоков с территории птицеводческого комплекса (ПК), включая и полигоны для хранения птичьего помета. Поверхностные сточные воды ПК, сформированные на данных территориях,

по степени загрязненности органическими веществами превосходят хозяйственно-бытовые. Воздействие загрязненных пометом сточных вод на водоемы выражается в повышении содержания биогенов, которые способствуют процессу эвтрофикации. При таком состоянии водоем постепенно утрачивает способность к самоочищению [3].

В Тюменской области отрасль птицеводства представлена тремя птицефабриками, специализирующимися на производстве яиц (Боровская и Пышминская) и выращивании кур-бройлеров мясного направления (АО «ПРОДО Тюменский бройлер»).

Цель данной работы заключалась в изучении влияния сточных вод птицефабрики АО «ПРОДО Тюменский бройлер» на состояние водоема – приемника стоков, оз. Каскаринское. Для этого были поставлены следующие задачи:

– охарактеризовать качество сточных вод;

– изучить качество воды природного водоема методом биотестирования.

Материалы и методы исследования

Предприятие АО «ПРОДО Тюменский бройлер» основано в 2004 г., входит в группу «ПРОДО» – один из крупнейших российских производителей продукции из мяса птицы, колбасных изделий, полуфабрикатов, мясных деликатесов и молочных продуктов. [4]. Производственный комплекс обеспечивает качественной продукцией жителей Тюменской области, включая автономные округа. Водоснабжение предприятия осуществляется за счет подземных вод.

На канализационные очистные сооружения птицефабрики поступают как производственные и ливневые сточные воды, так и хозяйственно-бытовые стоки с. Каскара. Очистка сточных вод производится механическим и биологическим методами, затем, после обеззараживания, они поступают в оз. Каскаринское, расположенное на восточной окраине с. Каскара, в левобережной пойме р. Туры. Длина водоема – 2,2 км, ширина в межень – 50–80 м, средняя глубина – 1,5 м, площадь зеркала воды – 0,15 км². Это проточный водоем: в северо-восточной его части в него впадает р. Капланка, в юго-западной из озера вытекает временный ручей, по которому вода при наполнении вытекает в р. Туру [5].

Для проведения исследований были взяты пробы сточных вод (до и после очистки) и воды оз. Каскаринское, отобранные выше и ниже места сброса стоков. О качестве воды судили по результатам химического анализа, определяя содержание основных загрязняющих веществ [6] и биотестирования [7, 8].

При использовании в качестве тест-объекта рачков *Daphnia magna в* сосуды с испытуемой водой помещали по 10 особей и экспонировали 4 (острые опыты) и 20 (хронические опыты) суток. Критериями токсичности являлись выживаемость и плодовитость рачков. Молодь, появившуюся в течение эксперимента, отсаживали в емкости с отстоянной водой, имевшиеся для каждого варианта опыта. По окончанию срока наблюдений производили подсчет количества рачков в разных размерных группах и общую численность популяции, сформировавшейся за период наблюдений.

Для экспериментов с ряской малой *Lemna minor* L. растения отбирались из природного водоема, в течение 7–10 дней проходили акклиматизацию в лабораторных условиях: при комнатной температуре и достаточной освещенности, со сменой воды каждые 2–3 суток для удаления продуктов метаболизма. Затем в стеклянные сосуды емкостью 100 мл наливали исследуемую воду и помещали по 5 двухщитковых растений в трехкратной повторности. О токсичности анализируемых проб воды судили по выживаемости и изменению морфометрических показателей (длины, количества корней и щитков) ряски. Длительность хронического опыта 20 суток. При проведении экспериментов в качестве контроля использовали отстоянную водопроводную воду.

По окончании экспериментов была проведена математическая обработка результатов методом вариационной статистики [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Характер загрязнения сточных вод выпуска определяется теми технологическими процессами, в которых вода участвует перед сбросом. В данном случае это хозяйственно-бытовые стоки с. Каскара (42 % от общего объема сточных вод), производственные сточные воды АО «ПРОДО Тюменский бройлер» (50 %) и ливневые сточные воды с территории птицефабрики (8 %). Хозяйственно-бытовые стоки являются стандартными, без внесения специфических примесей, производственные сточные воды содержат стоки от мясоперерабатывающих цехов птицефабрик, котельных, от складов ГСМ и автотранспорта.

Сточные воды, поступающие на канализационные очистные сооружения, перед

сбросом в оз. Каскаринское проходят предварительную биологическую очистку. Тем не менее результаты химического анализа показали значительное превышение нормативов по биохимическому потреблению кислорода (БПК) – в 1,8–3,2 раза, что свидетельствует об органическом загрязнении воды и расходовании кислорода на его минерализацию. Кроме этого, во всех исследованных пробах отмечались повышенные количества соединений азота и фосфатов.

Данные гидрохимических исследований качества воды *водоема – приемника* сточных вод показали, что наибольшее количество загрязняющих веществ (аммоний, нитраты, сульфаты, фосфаты и хлориды – в 3,2–4,9 раза выше ПДК) наблюдалось в месте сброса стоков. Однако и в пробе воды, отобранной ниже сброса, сохраняются значительные количества аммония и фосфатов (в 3,2–4,2 раза выше ПДК), что может свидетельствовать о низкой самоочищающей способности водоема (рис. 1).

Высокое содержание соединений азота, вероятно, связано со спецификой производства: в процессе жизнедеятельности птиц образуются продукты метаболизма, содержащие в том числе и аммиак. Аналогичные результаты были получены нами в исследованиях влияния других птицефабрик региона на природные водоемы, в частности птицефабрики «Пышминская», где было установлено, что при сбросе стоков в р. Цынга повышенным остается содержание соединений азота [2].

Результаты биотестирования воды из оз. Каскаринское показали, что наибольшей токсичностью для рачков *Daphnia magna* обладала проба, отобранная ниже выпуска сточных вод: гибель рачков к четвертым суткам (острый опыт) составила 40 %. В пробе, взятой выше сброса, выживаемость дафний в сравнении с контролем снизилась незначительно, однако при продлении эксперимента гибель рачков возросла и к двадцатым суткам опыта составила 20–36 %. Токсический эффект проб проявился и в нарушении эмбрионального развития рачков: смещении сроков наступления половозрелости и снижении общего количества молоди. По окончании исследований производили учет и измеряли размеры тела рачков, появившихся в популяции в течение эксперимента. Во всех вариантах опыта наибольшее число рачков отмечалось во второй размерной группе, что соответствует 2–4-суточному возрасту. Затем по численности следовала группа взрослых, половозрелых особей. Наименьшим было количество новорожденных рачков. Как видим, в сравнении с контролем существенных отличий в структуре популяции рачков не выявлено, не нарушена общая картина возрастного состава. Тем не менее новорожденных особей оказалось значительно меньше, чем представителей других возрастных групп, что может сказаться на дальнейшем существовании сформировавшейся популяции дафний (рис. 2).

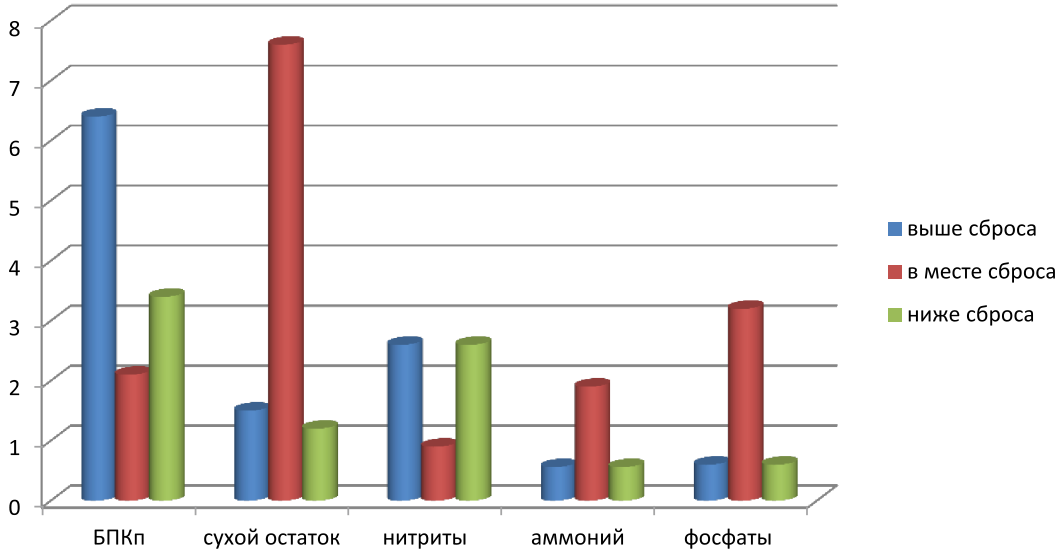


Рис. 1. Содержание загрязняющих веществ (относительно ПДК, раз) в контрольном створе оз. Каскаринское

В ранее проведенных нами исследованиях качества сточных вод с использованием *Daphnia magna* [10] наблюдали подобный эффект: токсическое действие сточной воды проявлялось не только в снижении выживаемости, но и репродуктивной функции рачков в ряду поколений, проявляющееся в появлении и общем количестве молоди в течение эксперимента. Несмотря на то, что в начале опыта рачки материнской культуры обладали высокой плодовитостью в сравнении с другими поколениями, к концу эксперимента репродуктивные возможности дафний снижались до полного прекращения размножения.

Результаты биотестирования с использованием ряски малой *Lemna minor* свидетельствуют о наибольшем негативном воздействии на вегетативное развитие растений из пробы воды, взятой в *месте сброса* сточных вод: отклонения биометрических измерений отличались от контрольных значений на 16 (количество щитков) – 22 (длина корней)%. Новые листецы в этой пробе на протяжении опыта развивались медленнее, чем в остальных пробах. Вероятно, это связано с повышенными концентрациями загрязняющих веществ в данной точке отбора в сравнении с другими пунктами наблюдений.

Наиболее благоприятной для развития ряски малой оказалась проба воды, взятая *выше сброса сточных вод*. За весь период опыта в этой пробе наблюдалось достаточно быстрое развитие новых листецов и образование корней. Длина и количество корешков были незначительно ниже либо на уровне контроля, но превышали аналогичный показатель растений из других анализируемых проб.

Морфологические показатели растений в пробах воды, отобранной *ниже сброса*, были либо недостоверными (длина корней и щитков), либо находились на уровне контроля (количество щитков и корней). Это может свидетельствовать о разбавлении сточной воды природными водами оз. Каскаринское (таблица).

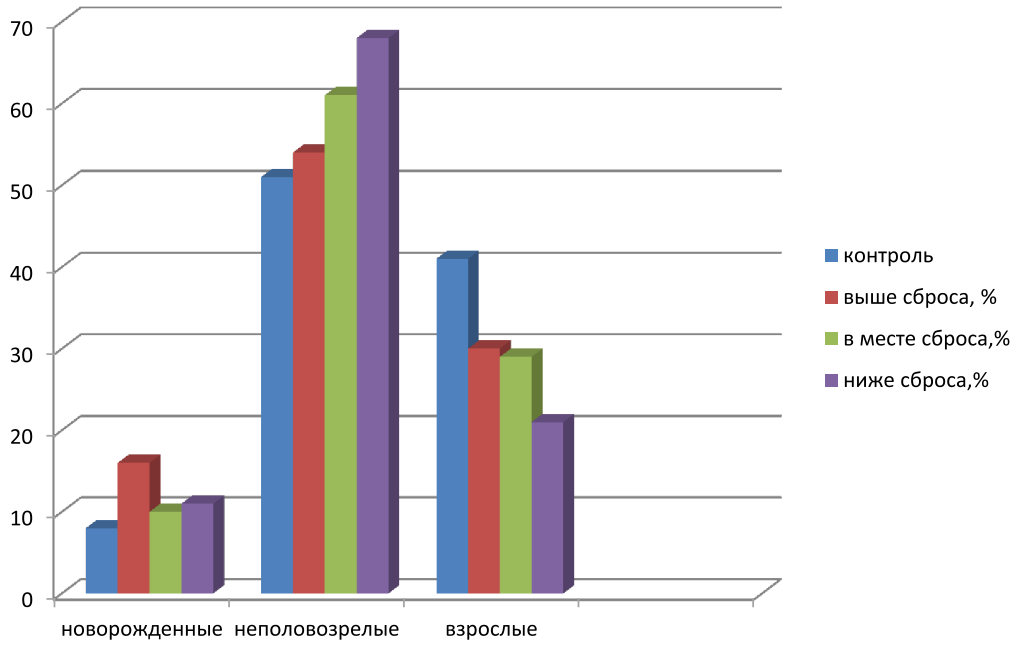


Рис. 2. Возрастной состав популяции Daphnia magna, сформировавшейся в течение эксперимента (в каждом варианте опыта, %)

Влияние вод озера Каскаринское на морфологические показатели (X ± m) ряски малой *Lemna minor*

Тест-функция	Пробы воды			
	контроль	выше сброса	в месте сброса	ниже сброса
Количество щитков, шт.	4,70 ± 0,33	4,80 ± 0,22	4,00 ± 0,67	4,50 ± 0,71
Длина щитков, мм	5,50 ± 0,38	5,10 ± 0,31	4,40 ± 0,25	4,60 ± 0,54
Количество корней, шт.	5,00 ± 0,34	5,00 ± 0,23	4,00 ± 0,50	4,70 ± 0,42
Длина корней, см	7,40 ± 0,54	6,80 ± 0,40	5,85 ± 0,32	6,25 ± 0,38

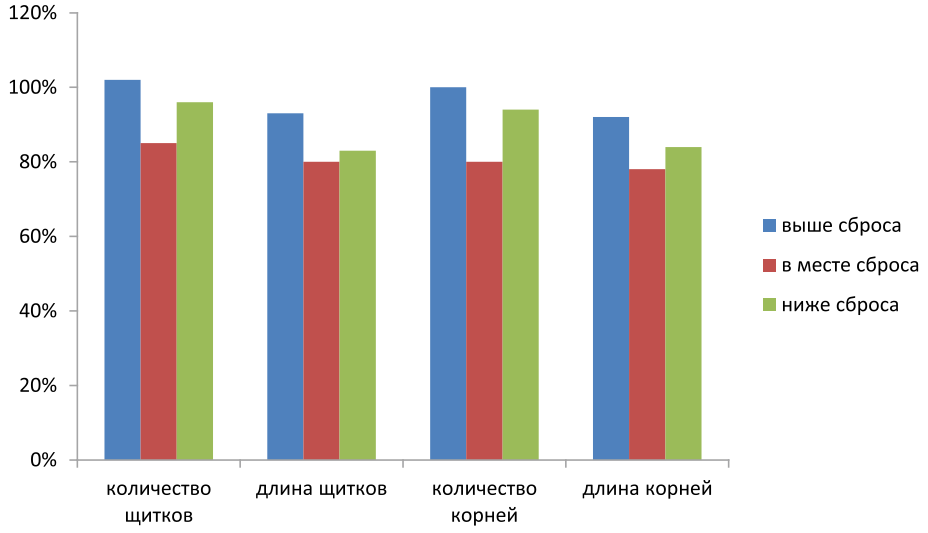


Рис. 3. Изменение морфологических показателей (% к контролю) ряски малой Lemna minor

Таким образом, сравнительный анализ влияния сточных вод птицефабрики на развитие ряски малой, представителя высшей водной растительности, выявил нарушение функциональных показателей растений, в сравнении с другими точками отбора, в пробах воды, взятых в месте сброса стоков (рис. 3).

Выводы

1. Сточные воды предприятия более всего загрязнены аммонием, природные воды – азотсодержащими веществами и фосфатами. Во всех пробах отмечалось значительное содержание органики, о чем свидетельствовали повышенные значения БПК.

2. Вода водоема – приемника стоков нарушала возрастную структуру лабораторной популяции рачков *Daphnia magna*, что в дальнейшем может сказаться на продолжительности её существования.

3. Наибольшую токсичность относительно роста и развития ряски проявляла проба воды, взятая в месте сброса стоков, проявляющаяся в изменении морфологических показателей растений.

4. Более чувствительными тест-функциями *Lemna minor* оказались длина и количество корней.

Список литературы

1. Васильева Н.В. Экотоксикологическая оценка воздействия птицеводческих комплексов на окружающую природную среду. автореф. дис. … канд. биол. наук. Владимир, 2006. 28 с.

Vasileva N.V. Ecotoxicological assessment of the impact of poultry complexes on the environment. autoref. dis. … kand. biol. nauk. Vladimir, 2006. 28 p. (in Russian).

2. Акатьева Т.Г. Качество сточных вод птицефабрики «Пышминская» Тюменской области // Сборник статей международной научно-практической конференции (Пенза, 23 октября 2017 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 44–46.

Akateva T.G. The quality of wastewater poultry «Pyshminskaya» Tyumen region // Collection of articles of the International scientific-practical conference (Penza, October 23, 2017). Penza: Nauka i Prosvescheniye, 2017. P. 44–46 (in Russian).

3. Шаравьев П.В., Неверова О.П., Ильясов О.Р., Шкуратова И.А. Биоиндикация состояния водных экосистем в зоне птицефабрики // Аграрный вестник Урала. 2013. № 4 (110). С. 67–69.

Sharaviev P.V., Neverova O.P., Ilyasov O.R., Shkuratova I.A. Bioindication of the state of aquatic ecosystems in the poultry area // Agrarnyy vestnik Urala. 2013. № 4 (110). P. 67–69 (in Russian).

4. ПРОДО Тюменский Бройлер. [Электронный ресурс]. URL: https://troekurovo.ru/manufacture/tyumenskiy-broyler (дата обращения: 14.06.2020) (in Russian).

PRODO Tyumen Broiler. [Electronic resource]. URL: https://troekurovo.ru/manufacture/tyumenskiy-broyler (date of access: 14.06.2020) (in Russian).

5. Лезин В.А. Озёра и реки южной части Тюменской области: словарь-справочник. Тюмень: Изд. ТГУ, 2018. 244 с.

Lezin V.A. Lakes and rivers of the southern part of the Tyumen region: a dictionary. Tyumen': Izd. TGU, 2018. 244 p. (in Russian).

6. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 2. Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2012. 720 с.

Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. Part 2. Rostov-na-Donu: Izd. YuFU, 2012. 720 p. (in Russian).

7. РД 52.24-868 2017 Использование методов биотестирования воды и донных отложений водотоков и водоемов. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2017. 64 с.

8. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение / Под ред. О.Ф. Филенко, С.А. Соколовой. М.: ВНИРО, 1998. 145 с.

Guidelines for the establishment of environmental – fisheries standards (MPC and SHOE) of pollutants for water of water bodies of fishery value / ed. O.F. Filenko, S.A. Sokolova. M.: VNIRO, 1998. 145 p. (in Russian).

9. Зверев А.А., Зефиров Т.Л. Статистические методы в биологии: учебно-методическое пособие. Казань: КФУ, 2013. 42 с.

Zverev A.A., Zefirov T.L. Statistical methods in biology: a teaching aid. Kazan': KFU, 2013. 42 p. (in Russian).

10. Акатьева Т.Г. Изучение качества сточных вод предприятия «Жилищно-коммунальное хозяйство п. Боровский» с помощью *Daphnia magna* // Сборник трудов конференции (Воронеж, 04–06 октября 2017 г.). Воронеж: Научная книга, 2017. С. 278–282.

Akateva T.G. The study of the quality of wastewater of the enterprise «Housing and communal services p. Borovsky» with Daphnia magna // Conference proceedings (Voronezh, October 04–06, 2017). Voronezh: Nauchnaya kniga, 2017. P. 278–282 (in Russian).

УДК 528.9(571.56)

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОХРАНЫ ЖИВОТНОГО МИРА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИИ)

Андреев Д.В.

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск, e-mail: verviL@List.ru

В настоящей статье рассматривается необходимость использования ГИС-технологий для охраны диких животных Республики Саха (Якутия) посредством мониторинга растительности как их кормовой базы. Животный мир Якутии богат и разнообразен. Фауна наземных позвоночных представлена 4 видами земноводных, 2 – пресмыкающихся, 280 – птиц и 63 видами млекопитающих. Из крупных копытных на территории республики обитают лось, изюбрь, северный олень, горный (снежный) баран – чубуку, широко распространены косуля, кабарга. Из хищников – бурый, на арктическом побережье – белый медведи, волки, рысь, росомаха, красная лисица, песец, колонок. Под воздействием антропогенной деятельности и под влиянием климатических катастроф происходят глобальные изменения среды обитания диких животных в регионе, что обуславливает актуальность темы исследования. Выявление изменений в среде обитания диких животных на современном этапе возможно только за счет организации постоянного мониторинга состояния и изменения природных территориальных комплексов и, в первую очередь, ландшафтов, в пределах которых существуют, размножаются и мигрируют популяции диких растений и животных. Мониторинг состояния растительности согласно аэрокосмическим снимкам дает возможность определить ее сезонное состояние и изменение. В последнее время выявлены изменения площадей естественной среды обитания диких животных, поэтому требуется тщательный анализ причин, которые провоцируют это явление. Такой анализ лег в основу организации мер для купирования их негативного влияния. Исследование по указанной теме показало, что современные ГИС-технологии позволяют строить 3D-модели местности с возможностью интерактивного управления информацией о состоянии биологических объектов.

Ключевые слова: ГИС-технологии, мониторинг, среда обитания, дикие животные, растительность, ландшафт

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES FOR THE PROTECTION OF ANIMAL WORLD OF THE REPUBLIC OF SAKH YAKUTIA

Andreev D.V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «M.K. Ammosov North-Eastern Federal University», Yakutsk, e-mail: verviL@List.ru

This article discusses the need to use GIS technologies for the protection of wild animals of the Republic of Sakha (Yakutia) by monitoring the vegetation as their food supply. The fauna of Yakutia is rich and diverse. The fauna of terrestrial vertebrates is represented by 4 species of amphibians, 2 – reptiles, 280 – birds and 63 species of mammals. Of the large ungulates in the republic live elk, red deer, reindeer, mountain (snow) ram – Chubuk, roe deer and musk deer are widespread. Of the predators – brown, on the Arctic coast – polar bears, wolves, lynx, wolverine, red fox, arctic fox, and columns. Under the influence of anthropogenic activity and under the influence of climatic disasters, global changes in the habitat of wild animals in the region occur, which determines the relevance of the research topic. The identification of changes in the habitat of wild animals at the present stage is possible only through the organization of continuous monitoring of the state and changes in natural territorial complexes and, first of all, landscapes within which populations of wild plants and animals exist, multiply and migrate. Monitoring the state of vegetation according to aerospace images makes it possible to determine its seasonal state and change. Recently, changes in the areas of the natural habitat of wild animals have been identified, therefore, a thorough analysis of the causes that provoke this phenomenon is required. Such an analysis formed the basis for organizing measures to stop their negative impact. A study on this topic showed that modern GIS technology allows you to build 3D terrain models with the ability to interactively manage information about the state of biological objects.

Keywords: GIS technology, monitoring, habitat, wild animals, vegetation, landscape

На сегодняшний день в Республике Саха (Якутия) под воздействием хозяйственной деятельности человечества и под влиянием ежегодных пожаров и наводнений происходят глобальные изменения среды обитания диких животных – совокупности природных условий, в которой объекты животного мира обитают в состоянии естественной свободы.

Решение проблемы охраны и рационального использования ресурсов популяций диких животных лежит в получении объективной информации об их расположении, путях миграции, среде обитания [1].

Элементами среды обитания, определяющими видовое разнообразие и численность популяций диких животных, выступают: особенности природных ландшафтов (тип климата, характер рельефа, тип почвенного покрова и растительности, состояние водных объектов, температурный и водный режимы); состояние кормовой базы,

защитные условия от внешних природных воздействий, условия для воспроизводства потомства; негативные природные явления (пожары, наводнения, землетрясения).

Постановка проблемы

Наиболее мощным фактором негативного влияния на популяции диких животных является антропогенное воздействие, которое заключается в сокращении площадей естественной среды обитания диких животных, факторах беспокойства, связанных с человеческой деятельностью, нарушении естественных процессов круговорота воды в природе, обмена веществом и энергией, трансформации всех элементов природных ландшафтов и превращении их в техногенные [2]. Своевременное выявление изменений в среде обитания диких животных возможно только при организации постоянного мониторинга состояния природных территориальных комплексов, и прежде всего ландшафтов, в границах которых обитают популяции диких растений и животных [3].

Вопросы исследования

Мониторинг среды обитания диких животных позволяет получать показатели о состоянии ландшафтов, природных защитных и кормовых условий, важных для диких животных. Поэтому требуется выявление изменения площадей естественной среды обитания диких животных, тщательный анализ вызывающих их причин, что является основой для организации мер для ослабления их негативного влияния. Знание закономерностей и принципов распространения растительности как кормовой базы диких животных позволяет установить ее потребности к различным экологическим условиям и факторам, обусловливающим это качество в разные периоды годового цикла. В итоге открываются дополнительные возможности для разработки научных основ охраны диких животных и рационального использования их ресурсов.

Цель данной статьи заключается в обосновании необходимости применения ГИС-технологий для охраны диких животных Республики Саха (Якутия) посредством мониторинга растительности как их кормовой базы.

В настоящее время мониторинг состояния среды обитания диких животных проводится как традиционными, так и современными способами. Традиционные способы основаны на наблюдениях за общим состоянием ландшафтов (почвы, водных объектов, лесного фонда и растительных группировок, видовым разнообразием и численностью популяций, поведением диких животных, возникновением негативных природных процессов и загрязнением среды обитания, а также незаконным сокращением площадей биогеоценозов), проведении различных инструментальных замеров и анализов.

Для получения количественно-качественных показателей используются методы статистической обработки данных, вероятностные методы, методы экстраполяции. Результирующая информация представляется в табличном, графическом или текстовом виде. Современные способы мониторинга среды обитания диких животных являются более производительными, поскольку в их основе лежит применение современных технических средств получения информации, установленных на космических и авиационных носителях, в разных участках электромагнитного излучения (ЭМИ), и информационные технологии ее обработки [4].

В зависимости от спектра, в границах которого ведется наблюдение, съемка может быть оптической, инфракрасной, оптико-электронной, лазерной, мультиспектральной, гиперспектральной, радиолокационной. Совокупность технологий (методов, способов) воздушного или космического (аэрокосмического) получения информации о состоянии ландшафтов относится к дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ).

Комплексный подход к съемке дает возможность получать цифровые изображения одновременно: в видимом и инфракрасном спектральном канале. В результате после обработки получаются детальные фото- и топографические планы. К сожалению, центров, которые могут обеспечить потребителей цифровой интегрированной информацией о ДЗЗ с использованием спутниковой, авиационной, а в последнее время и информацией, получаемой с борта беспилотных летательных аппаратов, в России пока не создано [5]. По характеру изображений можно определить фотосинтетическую активность развития биомассы как основы кормовой базы диких животных.

Для определения степени развития растительности используется относительный количественный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), измеряемый от –1 до +1 (таблица).

Значения индекса NDVI для разной плотности растительности

<table>
<tr><th>Лето</th><th colspan="3"></th><th>Зима</th></tr>
<tr><td rowspan="12">Степень развития зеленой массы</td><td rowspan="4">Высокая (густая)</td><td>1,0</td><td>100%</td><td rowspan="9">Плотность покрытия хвойными лесами</td></tr>
<tr><td>0,9</td><td>90%</td></tr>
<tr><td>0,8</td><td>80%</td></tr>
<tr><td>0,7</td><td>70%</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Средняя (разреженная)</td><td>0,6</td><td>60%</td></tr>
<tr><td>0,5</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>0,4</td><td>40%</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Низкая (очаговая)</td><td>0,3</td><td>30%</td></tr>
<tr><td>0,2</td><td>10%</td></tr>
<tr><td>0,1</td><td>0%</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Поверхность без растительности</td><td>0</td><td colspan="2" rowspan="3">Отсутствие хвойной растительности</td></tr>
<tr><td>-0,5</td></tr>
<tr><td>-0,1</td></tr>
</table>

Мониторинг состояния растительности ландшафтов по аэрокосмическим снимкам позволяет судить о ее состоянии по периодам созревания и, как следствие, о состоянии кормовой базы, о защитных и воспроизводственных условиях диких животных, возможных изменениях их сезонных стаций.

Необходимая информация извлекается из снимков двумя основными методами: дешифрированием и фотограмметрическими измерениями с использованием современных информационных технологий [6]. При дешифрировании определяются необходимые образы элементов среды обитания диких животных и характеристики их системных связей. Дополняет процесс дешифрирования фотограмметрическая обработка полученных снимков, в результате которой определяются геометрические характеристики элементов среды обитания. Для этого снимки трансформируются, а их изображение переносится в определенную картографическую проекцию с отображением на электронной карте [7].

Поскольку элементы среды обитания диких животных являются элементами ландшафта, то и их характеристики получают в процессе ландшафтного дешифрирования. Для каждого ландшафта характерно уникальное сочетание форм рельефа, литогенной основы, водных объектов, почвенного покрова, растительности, которые определяют его границы. Поэтому комплекс компонентов в том или ином сочетании может выступать в качестве его индикаторов, отражающихся в рисунке изображения [8].

Индикаторная роль растительности как основы кормовой базы диких животных заключается в ее приспособленности к определенным экологическим условиям. Некоторые ее виды характеризуются довольно узкой экологической амплитудой, произрастая лишь в определенных условиях (ель, пихта, кедр, ольха, осина). Другие деревья способны приспосабливаться к разным условиям, обладая экологической пластичностью (сосна, береза, дуб и др.) [9].

Высокий профессионализм специалистов-дешифровальщиков позволяет распознать необходимые элементы с высокой достоверностью. Но на процесс дешифрирования может воздействовать ряд субъективных факторов. Программная реализация математического метода распознавания образов позволит уйти от их влияния [3].

Результаты дешифрирования зависят от информационной емкости съемочных материалов, которая находится в прямой зависимости от разрешающей способности и контрастности полученных материалов. Информация передается скоплением отдельно различимых точек – ее носителей. Объем информации зависит от размера точек (пикселей) [10].

Однако интерес вызывает не столько объем информации об элементах среды обитания, сколько степень ее неопределенности [11].

Для получения необходимых качественно-количественных характеристик при дешифрировании данных аэрокосмической съемки используют специализированное программное обеспечение.

Для получения такого рода, объема и точности информации о местоположении диких животных, распространении растительности как их подложного корма и их системных связей, требуется определенная техника и аппаратура (GPS-навигация), ко-

торая должна отвечать следующим основным требованиям:

– наличие высокочувствительного GPS-приемника, включая функцию WAAS и технологию прогнозирования местоположения спутников HotFix, которая обеспечивает быстрый и точный расчет координат;

– наличие барометрического альтиметра, который отслеживает изменения давления для вычисления высоты, а полученный график барометрического давления относительно времени позволяет следить за изменениями погоды;

– наличие трехосевого электронного компаса;

– наличие слота для карты памяти microSD, который поддерживает такие функции, как беспроводной обмен данными (путевыми точками, треками, маршрутами), и бывает необходим при работе в группе; подходящими параметрами являются: размеры 5,8×11,4×3,5 см; диагональ 7,6 см; вес 192,7 г.

Прибор должен поддерживать растровые карты и космоснимки и иметь функцию расчета площади. Прибор должен позволять при непосредственной встрече животного отметить путевую точку в устройстве (номер точки, координаты, дата и время, высота в данный момент записывается автоматически).

Полученное графическое изображение расположения точек, в которых были обнаружены животные на местности, накладывается на любую геодезическую основу в соответствии с поставленными задачами. Например, на топооснову нужного масштаба, на сканерные многозональные аэроснимки, на поконтурное изображение рельефа, на лесотаксационные карты. Таким образом, обеспечивается послойное хранение пространственной информации.

На основании обработанных данных об элементах ландшафта могут быть рассчитаны количественные показатели уровня бонитета среды обитания диких животных (рисунок).

Применение ГИС-технологии с использованием GPS-навигации обеспечивает топографическую точность в распределении диких животных при учете растительности как их кормовой базы. Данная технология имеет широкий спектр возможного применения, так как работает с данными разного формата.

С использованием ГИС-технологий могут создаваться электронные карты с участками разного уровня бонитета. Для их создания требуется:

– топографическая основа;

– кадастровые границы;

– административно-территориальное деление;

– биосферное зонирование;

– лесохозяйственное зонирование.

Выводы

Современные аэрокосмические средства с широкими пространственными возможностями позволяют оперативно получать информацию о состоянии среды обитания диких животных, а новые информационные технологии способны своевременно ее обрабатывать. Современные ГИС-технологии позволяют строить 3D-модели местности с возможностью интерактивного управления информацией о состоянии биологических объектов. В них реализуются алгоритмы сбора, анализа, моделирования и отображения информационных данных о состоянии среды обитания на фоне цифровых моделей местности.

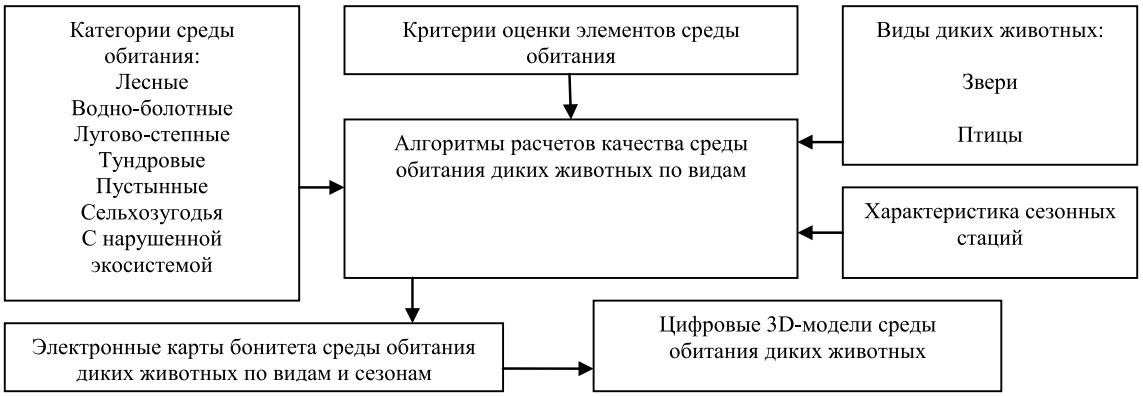


Схема автоматизированного определения бонитета среды обитания диких животных

Заключение

Резюмируя содержание статьи, можно заключить, что для обеспечения проведения полноценного мониторинга диких животных в местах их среды обитания, включая и животное население заповедников Республик (Саха) Якутия, а также растительности как их кормовой базы, необходимо применять ГИС-технологии в комплексе с отлаженным программным обеспечением. Это позволит своевременно выявлять изменения в среде обитания диких животных и более точно определять состояние природных территориальных комплексов, и прежде всего ландшафтов, в границах которых обитают популяции диких растений и животных.

Список литературы / References

1. Андреев Д.В. ГИС-технологии в Якутии // Экономическая, социальная, политическая и реакционная география. 2019. № 4. С. 96–98. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14096.

Andreev D.V. GIS technology in Yakutia // Ekonomicheskaya, sotsial'naya, politicheskaya i reaktsionnaya geografiya. 2019. № 4. P. 96–98 (in Russian).

2. Ерунцова Е.Р. Использование геоинформационных систем в экологии и природопользовании // Актуальные вопросы науки и образования: теоретические и практические аспекты. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции (Кишинев, Молдавия, 12 мая 2018 г.). Нефтекамск: Мир науки, 2018. С. 181–185.

Eruntsova E.R. The use of geographic information systems in ecology and nature management // Aktual'nyye voprosy nauki i obrazovaniya: teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty. Materialy Mezhdunarodnoy (zaochnoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kishinev, Moldaviya, 12 maya 2018 g.). Neftekamsk: Mir nauki, 2018. P. 181–185 (in Russian).

3. Чугреев М.К., Федотенков В.И., Ткачева И.С., Янгалычев С.Р. Применение ГИС-технологий для учета ресурсов копытных животных на ограниченных территориях // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный аграрноинженерный университет имени В.П. Горячкина. 2014. № 3 (63). С. 34–36.

Chugreev M.K., Fedotenkov V.I., Tkacheva I.S., Yangalychev S.R. Application of GIS-technology for resource accounting ungulates in limited areas // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agrarnoinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina. 2014. № 3 (63). P. 34–36 (in Russian).

4. Александров Н.П., Гуляев В.П., Климов С.М., Соловьев Г.А. Использование систем сбора и хранения информации в агропромышленном комплексе // Вестник ИрГСХА. 2017. № 81–1. С. 114–118.

Alexandrov N.P., Gulyaev V.P., Klimov S.M., Soloviev G.A. The use of information collection and storage systems in the agricultural sector // Vestnik IrGSKHA. 2017. № 81–1. P. 114–118 (in Russian).

5. Титов А.Г., Окладников И.Г., Гордов Е.П. Разработка Веб-ГИС на основе сервисов обработки и визуализации пространственных для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4–2. С. 96–109.

Titov A.G., Okladnikov I.G., Gordov E.P. Web-GIS development based on spatial processing and visualization services for analysis and prediction of regional climate changes // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii. 2016. № 4–2. P. 96–109 (in Russian).

6. Малько А.М., Живых А.В., Новоселов Е.С. Геоинформационная система в области защиты растений ФГБУ «Россельхозцентр». [Электронный ресурс]. URL: https://rosselhoscenter.com/index.php/otdel-zashchity-rastenij-31/85-deyatelnost/1053-geoinformatsionnaya-sistema-v-oblasti-zashchity-rastenij-fgbu-rosselkhoztsentr-3 (дата обращения: 10.05.2020).

Malko A.M., Alive A.V., Novoselov E.S. Geoinformation system in the field of plant protection FSBI «Rosselkhoztsentr». [Electronic resource]. URL: https://rosselhoscenter.com/index.php/otdel-zashchity-rastenij-31/85-deyatelnost/1053-geoinformatsionnaya-sistema-v-oblasti-zashchity-rastenij-fgbu-rosselkhoztsentr-3 (date of access: 10.05.2020) (in Russian).

7. Мышляков С.Г., Скачкова А.С., Величенко В.В. Создание карты среды обитания охотничьих ресурсов по результатам дешифрирования разновременных мультиспектральных космических снимков // Геоматика. 2015. № 1. С. 68–79.

Myshlyakov S.G., Skachkova A.S., Velichenko V.V. The map generation of hunting recourses habitat based on the results of muitispectrai satellite images decoding // Geomatika. 2015. № 1. P. 68–79 (in Russian).

8. Отбоева С.Д., Жалсараева Е.А. Особенности применения геоинформационных систем при экоаудите охраняемых природных территорий // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17. № 15. С. 1807–1816. DOI: 10.18334/rp.17.15.36404.

Otboeva S.D., Zhalsaraeva E.A. The peculiarities of using geoinformation systems at performing the ecological audit of specially protected natural territories // Rossiyskoye predprinimatel'stvo. 2016. V. 17. № 15. P. 1807–1816 (in Russian).

9. Коренной, Ф.И., Гуленкин, В.М., Дудников, С.А. Использование ГИС-технологий в научно-исследовательских работах по проблеме «Ветеринарное благополучие» в ФГУ «Федеральный центр охраны здоровья животных». [Электронный ресурс]. URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=6630&SECTION_ID=221 (дата обращения: 10.05.2020).

Korennoy F.I., Gulenkin V.M., Dudnikov S.A. The use of GIS technologies in research work on the problem of «Veterinary Well-being» at the Federal State Institution «Federal Center for Animal Health». [Electronic resource]. URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=6630&SECTION_ID=221 (date of access: 10.05.2020) (in Russian).

10. Шокин Ю.И., Федотов А.М., Жижимов О.Л. Технологии создания распределенных информационных систем для поддержки научных исследований // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 251–274.

Shokin, Yu.I., Fedotov A.M., Zhizhimov O.L. Technologies for creating distributed information systems to support scientific research // Vychislitel'nyye tekhnologii. 2015. V. 20. № 5. P. 251–274 (in Russian).

11. Гостюхина Д.Ф. Современное тематическое картографирование // Геосфера. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы естествознания» (14 ноября 2017 г.). Уфа, 2017. С. 95–97.

Gostyukhina D.F. Modern thematic mapping // Geosfera. Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye problemy yestestvoznaniya» (14 noyabrya 2017 g.). Ufa, 2017. P. 95–97 (in Russian).

УДК 550.84

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖАЮЩИХ ГРАНИЦ ПО СЕЙСМОГРАММАМ ФИКСИРОВАННЫХ ТОЧЕК ОТРАЖЕНИЯ

Бондарев В.И., Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Крылевская А.Н.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, e-mail: Bondarev_v@mail.ru

При построении сейсмических изображений геологической среды важно знать как пространственные, так и угловые характеристики сейсмических границ. В настоящее время основным способом получения информации о строении геологической среды является сейсмический метод общей глубинной точки (МОГТ). Этот метод предполагает получение представления о геологической среде на основе цифровой обработки совокупности специальным образом сформированных сейсмограмм, относящихся к равномерно расположенным по профилю общим средним точкам (ОСТ). В результате стандартной обработки каждая сейсмограмма ОСТ превращается в одну суммотрассу – трассу будущего изображения среды – временного разреза или, после пересчетов времени отражения в глубину, глубинного разреза. На получаемых таким способом сейсмических разрезах хорошо прослеживаются изображения сейсмических границ по профилю, дающие объективное представление как о строении геологической среды, так и об углах наклона сейсмических границ, разделяющих отдельные слои в среде. В статье описывается оригинальный способ определения пространственных и угловых характеристик сейсмических границ по динамическим свойствам сейсмических трасс, выбираемых по принципу фиксированной точки отражения. Для реализации способа по профилю и по глубине формируется двумерная детальная сетка возможных точек отражения. В точках этой сетки рассчитываются и накапливаются значения некоторой целевой функции, характеризующей по динамическим признакам принадлежность выбранной точки к одной из сейсмических границ. После построения двухмерного поля целевой функции по ее локальным экстремумам могут быть определены угловые параметры элементов границ, а также полученные изображения функции цели могут интерпретироваться как новые атрибутные сейсмические изображения среды. Приводятся необходимые элементы теории и результаты моделирования.

Ключевые слова: сейсморазведка 2D, отражающая граница, угловые характеристики

DETERMINING THE ANGULAR PARAMETERS OF REFLECTING BORDERS BY SEISMOGRAMS OF FIXED REFLECTION POINTS

Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Krylatkova N.A., Krylevskaya A.N.

Ural State Mining University, Ekaterinburg, e-mail: Bondarev_v@mail.ru

When constructing seismic images of the geological environment, it is important to know both the spatial and angular characteristics of seismic boundaries. In the main method of seismic exploration implemented in practice today – the method of the General deep (middle) point, such angular parameters are not used, but only evaluated from the obtained images. Determining the values of these parameters independently of obtaining images using the OGT method and further using them for image construction promises to increase the resolution of the seismic exploration method. The article describes an original method for determining the spatial and angular characteristics of seismic boundaries based on the dynamic properties of seismic paths selected on the principle of a fixed reflection point. To implement the method, a two-dimensional detailed grid of possible reflection points is formed based on the profile and depth. At the points of this grid, the values of a certain target function are calculated and accumulated, which characterizes the dynamic characteristics of the selected point belonging to one of the seismic boundaries. After constructing a two-dimensional field of the target function, the angular parameters of the boundary elements can be determined from its local extremes, and the resulting images of the target function can be interpreted as seismic images of the environment. The necessary elements of the theory and simulation results are presented.

Keywords: 2D seismic survey, reflecting boundary, angular characteristics

Сейсмическая разведка, как метод разведочной геофизики, занимает в настоящее время ведущее место в комплексе работ при поисках и разведке месторождений углеводородного сырья. Важной задачей научных исследований в этой области является совершенствование технологии применения сейсмической разведки для получения максимально объективной информации об изучаемой геологической среде. Один из видов важной информации, которую могут представить сейсмические данные, – это сведения об угловых атрибутах (углах и азимутах наклона) основных геологических напластований. Эта информация открывает новые возможности сейсмического метода, которые могут быть использованы как в процессе обработки, так и интерпретации экспериментальных данных, позволяя получать более объективное представление о строении изучаемой геологической среды. В частности, количественная информация об угловых атрибутах сейсмических границ позволяет более объективно анализировать историю осадконакопления в изучаемых геологических толщах.

Интерес к определению угловых характеристик отражающих границ (ОГ) по сейсмическим данным появился с самого начала развития сейсморазведки. Однако возмож-

ности сейсморазведки на ранних этапах ее развития ограничивали точность и достоверность решения задачи определения углов наклонов отражающих границ. Основные попытки определения углов наклона проводились с помощью использования кинематических годографов отраженных волн. При этом чаще всего использовались приемы, построенные на нахождении отношения разности времен прихода отраженных волн и разности координат в выбранных особым образом точках базы наблюдений. Технологичность, точность и достоверность таких определений была, как и у всех методов, использующих характерные точки годографов, невысокой.

В методе регулируемого направленного приема (МРНП), разработанного в СССР под руководством Л.А. Рябинкина, предполагалось определение углов подхода отраженных волн к поверхности наблюдений, как следствие, определение углов наклона сейсмических границ. Для этого в методе широко использовались кажущиеся скорости отраженных волн на фиксированных базах приема, что, к сожалению, не обеспечивало достаточной точности вычисления углов.

В настоящее время основным способом получения информации о строении геологической среды является сейсмический метод общей глубинной точки (МОГТ). Основные положения данного способа опубликованы в 1956 г. в патенте США Уильяма Мейна [1]. Этот метод предполагает получение детального представления о геологической среде на основе цифровой обработки совокупности специальным образом сформированных сейсмограмм, относящихся к равномерно расположенным по профилю общим средним точкам (ОСТ).

Сейсмограммы для каждой такой ОСТ подвергаются однотипной обработке с помощью целого ряда процедур, главными из которых являются ввод в трассы сейсмограмм статических и кинематических поправок и последующее горизонтальное суммирование таких трасс. В результате этих действий каждая сейсмограмма ОСТ превращается в одну трассу – суммотрассу будущего изображения среды – временного разреза или, после пересчетов времени отражения в глубину, глубинного разреза [2, 3]. На получаемых таким способом сейсмических разрезах хорошо прослеживаются изображения сейсмических границ по профилю, дающие объективное представление как о строении геологической среды, так и об углах наклона сейсмических границ, разделяющих отдельные слои в среде. Таким образом, в способе ОСТ углы наклона границ определяются опосредованно по получаемым сейсмическим разрезам или структурным картам.

Однако такой способ построения временного (или глубинного) сейсмического изображения геологической среды позволяет получить хорошее представление о среде и об угловых характеристиках границ в разрезе только в том случае, если среда содержит отражающие границы с углами наклона не более 3–5 градусов. При больших углах наклонов отражающих границ способ ОСТ будет давать искаженное представление, как о строении среды, так и об углах наклона границ в среде, и это искажение тем сильнее, чем больше значения углов наклона отражающих границ. В силу этого обстоятельства для получения более правдоподобных сейсмических изображений среды применяют дополнительные специальные методы преобразования глубинных или временных разрезов – миграционные преобразования. В настоящее время разработано много видов миграционных преобразований, отличающихся по сложности и эффективности. Следует сказать, что сложность и трудоемкость этих методов достаточно велика.

Авторами на основе анализа особенностей и недостатков вышеназванных подходов решалась задача разработки нового, более эффективного способа получения высококачественных представлений об углах наклонов отражающих границ в геологической среде по сейсмическим данным, получаемым при выполнении работ методом многократных перекрытий в профильном варианте 2D.

Материалы и методы исследования

В основе способа лежит использование совокупности сейсмических трасс, объединенных общностью их фиксированных точек отражения (ФТО) на сейсмической границе. В качестве таких фиксированных точек отражения принято чаще всего рассматривать точки на отражающих границах, которые являются основаниями нормалей к каждой конкретной границе, проведенными из специально выбранных на профиле общих расчетных точек (ОРТ). Класс таких волновых полей в сейсморазведке впервые предложил рассматривать и использовать Н.Н. Пузырев. Более подробно кинематические свойства этих волновых полей впоследствии изучали С.В. Гольдин, А.Н. Левин, Г.Н. Яшков и др. [4], а также авторы предлагаемого способа В.И. Бондарев, С.М. Крылатков [5, 6].

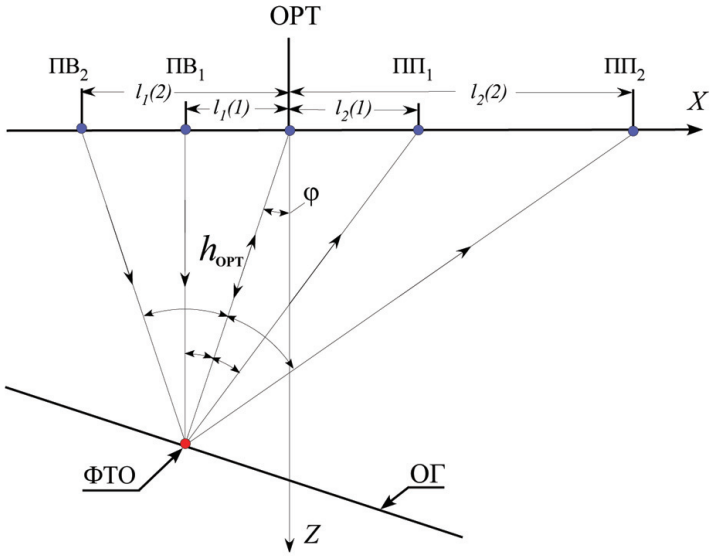


Рис. 1. Лучевая схема траекторий сейсмических волн ФТО. На рисунке показаны: одна из общих расчетных точек (ОРТ) на профиле исследований, отражающая граница (ОГ) с глубиной $h_{ОРТ}$ под ОРТ и углом падения φ, а также одна ФТО, относящаяся к выбранной ОРТ. На поверхности наблюдений показаны положения двух пунктов возбуждения $ПВ_1$ и $ПВ_2$ и соответствующие им пункты приема колебаний $ПП_1$ и $ПП_2$

Рассмотрим лучевую схему траекторий сейсмических волн такого типа для одной отражающей границы и двух пунктов возбуждения $ПВ_1$ и $ПВ_2$ и двух пунктов приема колебаний на поверхности наблюдений $ПП_1$ и $ПП_2$. Схема показана на рис. 1.

Для горизонтально залегающих отражающих границ кинематические свойства таких волновых полей совпадают со свойствами годографов от общих средних (глубинных) точек. Однако для наклонно залегающих отражающих границ годографы волновых полей этого типа существенно отличаются от годографов ОСТ.

Использование волновых полей фиксированных точек отражения при традиционной практике получения сейсмических изображений геологических сред по ряду причин пока не получило широкого распространения. Однако наши исследования показали, что волновые поля, соответствующие фиксированным точкам отражения рассматриваемого вида, можно с успехом использовать в сейсморазведке для решения целого ряда задач, в том числе и для решения задач по определению углов наклонов отражающих границ. Это связано с тем обстоятельством, что при фиксированном положении точки отражения на границе, свойства годографов таких волн начинают существенным образом зависеть от угла наклона отражающей границы. При многократном суммировании амплитуд сейсмических трасс, полученных при разных положениях ПВ и ПП для соответствующих фиксированных точек отражения (ФТО), появляется возможность построения такого амплитудного функционала, который может быть эффективным динамическим индикатором угловых характеристик отражающих границ. Именно эта особенность волновых полей ФТО и открывает перспективы создания автоматизированного подхода к определению угловых параметров изучаемых сейсмических границ.

Для фактического определения углов наклонов отражающих границ предлагается использовать ранее установленную авторами функциональную связь между координатами фиксированных точек отражения и координатами соответствующих пунктов возбуждения и приема колебаний [6]. Эта связь для ФТО рассматриваемого типа имеет следующий вид:

$$l_2 = \frac{l_1 \cdot h_{ОРТ}}{h_{ОРТ} - 2 \cdot l_1 \cdot \sin\varphi}, \qquad (1)$$

где $h_{ОРТ}$ расстояние от ОРТ до ФТО по нормали к границе, φ – угол наклона отражающей границы в этой точке, l_1 – удаление источника от ОРТ, l_2 – удаление приемника от ОРТ (рис. 1).

Решение поставленной задачи обеспечивается тем, что в выбранных на профиле исследований *общих расчетных точках* (*ОРТ*),

как правило, совпадающих с точками ОСТ, при известном по профилю наблюдений характере распределения по глубине численных значений эффективной скорости распространения упругих волн по набору трасс исходных сейсмограмм общих точек возбуждения (ОТВ) можно многократно формировать совокупности специально подобранных сейсмических трасс, объединенных тем, что отраженные волны на них возникают в конкретных фиксированных точках отражения (ФТО) на границе. Эти трассы подвергаются дальнейшему анализу.

Для получения практического результата нами предлагается оригинальная последовательность действий с зарегистрированными сейсмическими трассами, обеспечивающая получение в выбранных общих расчетных точках профиля достоверной динамической информации об углах наклона сейсмических границ в разрезе по результатам стандартных сейсморазведочных работ методом многократных перекрытий 2D.

Сейсмические трассы и сейсмограммы общих пунктов возбуждения, полученные по технологии метода многократных перекрытий МОГТ 2D, предварительно подвергают стандартной в сейсморазведке обработке (вводу и коррекции статических поправок, компенсирующих влияние неоднородностей верхней части среды в пунктах возбуждения и приема колебаний, фильтрации и регулировке и т.п.). Для этого на профиле, проходящем ортогонально предполагаемому простиранию горных пород, с заданным шагом создают (выбирают) сеть общих расчетных точек (ОРТ), в которых и будет производиться определение угловых параметров отражающих границ. После этого в окрестности каждой выбранной ОРТ в заданной области нижнего полупространства создают регулярную по осям координат x и z локальную сеть расположения возможных (виртуальных) фиксированных точек отражения ФТО с заданными интервалами между точками Δz (2÷20 м) по вертикали и Δx (4÷25 м) по горизонтали (рис. 2).

Через каждую построенную виртуальную фиксированную точку отражения, имеющую заданные координаты $x_{ФТО}$ и $z_{ФТО}$, может проходить одна плоская отражающая граница, нормаль к которой совпадает с прямой линией, соединяющей ФТО и ОРТ. Для всех таких точек рассчитывается кратчайшее удаление этой границы от ОРТ – глубина $h_{ОРТ}$ и угол падения этой границы φ в фиксированной точке отражения под выбранной ОРТ (рис. 2):

$$h_{ОРТ} = \sqrt{x_{ФТО}^{\ 2} + z_{ФТО}^{\ 2}}\ ,$$

$$\varphi = -\sin^{-1}\left(\frac{x_{ФТО}}{h_{ОРТ}}\right). \qquad (2)$$

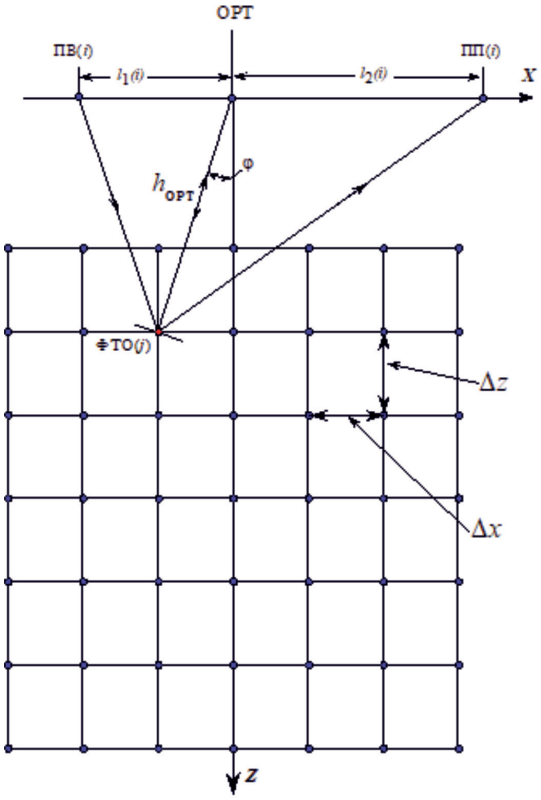


Рис. 2. Схема взаимного расположения пунктов возбуждения и пунктов приема сейсмических волн и точек сети, в узлах которой возможны отражения по принципу ФТО и где формируются значения целевой функции

Выбирают одну из таких возможных фиксированных точек отражения и один из существующих на профиле исследований пункт возбуждения ПВ(i). По вышеприведенной формуле (1) для этой пары точек рассчитывают координаты точки выхода ПП(i) отраженной волны на профиль наблюдений. Зная эффективную скорость в среде до глубины залегания конкретной ФТО, рассчитывают время пробега отраженной волны от ПВ до выбранной ФТО и от нее – до пункта ее регистрации ПП на профиле наблюдений:

$$t(l_1, l_2) = \frac{1}{V}\cdot\left(\sqrt{(x_{ПВ} - x_{ФТО})^2 + (z_{ФТО})^2} + \sqrt{(x_{ПП} - x_{ФТО})^2 + (z_{ФТО})^2}\right). \qquad (3)$$

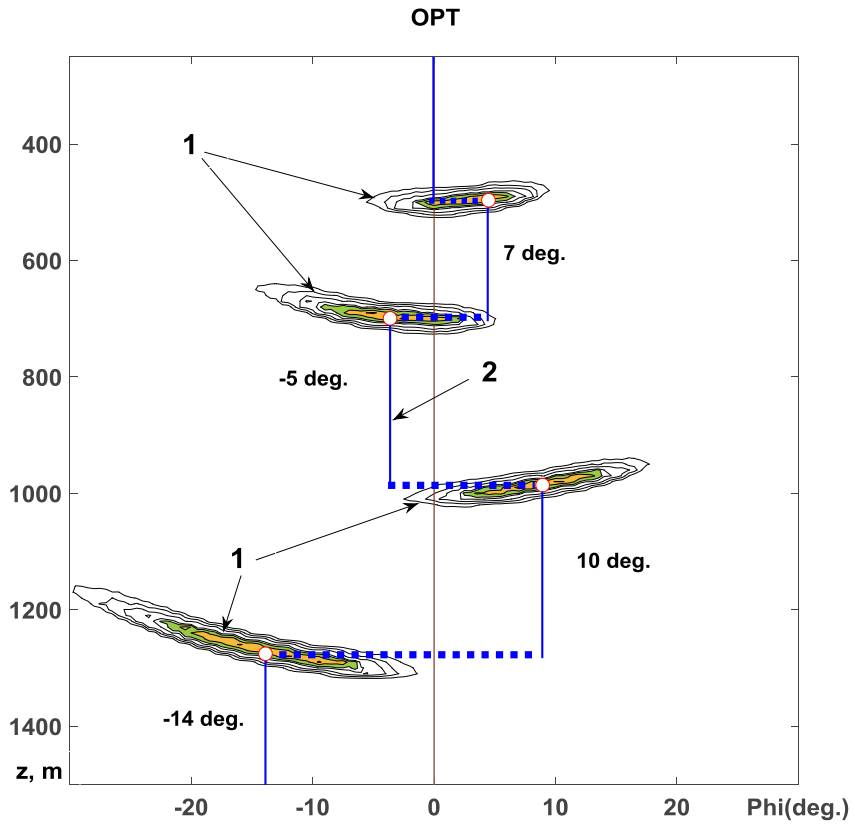


Рис. 3. Проявление наклонов отражающих границ на вертикальном спектре углов (карте значений специальным образом подобранной целевой функции). 1 – изолинии значений функции цели, 2 – график, показывающий характер изменения углов наклона границы по глубине в рассматриваемой точке ОРТ

По рассчитанному времени пробега отраженной волны на найденной наблюденной трассе находят значение амплитуды, характеризующее отражательную способность сейсмической границы в данной точке ФТО. Для повышения устойчивости процесса вычисления выбирают определенный ансамбль из нескольких амплитуд в окрестности найденного времени прихода отраженной волны. Сформированный ансамбль значений амплитуд отраженной волны переносят для последующего накапливания в предварительно созданный сумматор на каждой ФТО. Аналогичным образом поступают и с амплитудами, полученными из всех других доступных пунктов возбуждения и во всех точках созданной сети ФТО. После накопления амплитуд в сумматоре для каждой ФТО выбирают какой-либо способ формирования из собранных суммарных амплитуд одного численного значения некоторой функции цели (ФЦ), характеризующего интегральную отражательную способность этой ФТО (например, сумму квадратов всех амплитуд). После выбора способа формирования ФЦ во всех точках выбранной сетки по этому правилу рассчитывают значение этой функции для всех возможных ФТО в окрестности каждой ОРТ. Полученное для всех точек ФТО поле значений функции цели (ФЦ) анализируют на предмет обнаружения значимых локальных максимумов ФЦ. Координаты таких точек характеризуют глубину и угол наклона реальных отражающих границ в данной ОРТ.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 показаны локальные значения функций цели (ФЦ) в системе координат глубина – угол наклона границ, по теоретическому волновому полю, соответствующему модели среды с четырьмя отражающими границами. Отчетливо видно, что предложенный способ позволяет достаточно уве-

ренно определять углы наклона отражающих границ в диапазоне до 15–20 градусов. Совокупности полученных результатов для ряда соседних ОРТ позволяют построить по сейсмическому профилю ряд графических зависимостей угловых параметров отражающих границ в разных точках изученного профиля [5]. Последующая статистическая обработка этих данных может быть использована как для получения новых сейсмических изображений среды [7], так и для формирования выводов об истории формирования изучаемого геологического разреза.

Выводы

1. Разработана и обоснована методика определения углов наклона отражающих границ по исходным данным профильных многократных перекрытий МОГТ 2D.

2. В основу предложенной методики положена идея использования волновых полей фиксированных точек отражения.

3. Локализация экстремумов энергии отраженных волн при многократном суммировании отражений в некоторых фиксированных точках сейсмических границ позволяет находить как углы наклонов отражающих границ, так и их глубины залегания с достаточно высокой точностью.

Список литературы / References

1. Mayne W.H. Seismic Surveying. U.S. Patent. No. 2.732.906. 1956.

2. Ермаков А.П. Введение в сейсморазведку. Учебное пособие. Тверь: Изд. ГЕРС, 2012. 160 с.

Ermakov A.P. Introduction to seismic exploration. Uchebnoye posobiye. Tver: Izd. GERS. 2012. 160 p. (in Russian).

3. Воскресенский Ю.Н. Полевая геофизика. Учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Недра, 2010. 478 с.

Voskresenskiy Yu.N. Field geophysics. Uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy. M.: Nedra. 2010. 478 p. (in Russian).

4. Кузнецов В.И. Элементы объемной (3D) сейсморазведки. 2-е изд. Уфа: Информреклама, 2012. 269 с.

Kuznetsov V.I. 3D seismic survey elements. 2-e izd. Ufa: Informreklama, 2012. 269 p. (in Russian).

5. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Новые технологии анализа данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд. УГГУ, 2006. 116 с.

Bondarev V.I., Krylatkov S.M. New technologies for analyzing seismic data. Ekaterinburg: Izd. UGGU, 2006. 116 p. (in Russian).

6. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Способ определения углов наклона отражающих границ в геологической среде по данным профильной сейсморазведки 2D // Патент РФ № 2692001. Опубликовано: 19.06.2019. Бюл. № 17.

Bondarev V.I., Krylatkov S.M. Method for determining the slope angles of reflecting boundaries in the geological environment based on 2D profile seismic survey data // Patent RF № 2692001. Opublikovano: 19.06.2019. Byul. № 17 (in Russian).

7. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебное пособие. 3-е изд., доп. М.: ВНИИгеосистем, 2013. 118 с.

Nikitin A.A., Petrov A.V. Theoretical bases of processing of geophysical information: uchebnoye posobiye. 3-e izd., dop. M.: VNIIgeosistem. 2013. 118 p. (in Russian).

УДК 911.37(571.54/.55)

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ РАССЕЛЕНИЯ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)

[1]Гончиков Ц.Д., [1]Урбанова Ч.Б., [2]Ковалева Н.М., [1]Дымчикова Б.Ц.

[1]ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет», Улан-Удэ, e-mail: chimita76@gmail.com;
[2]Забайкальский институт железнодорожного транспорта, филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, e-mail: everest2011@yandex.ru

В статье рассматриваются региональные особенности расселения Забайкальского края. Выделены два основных подхода к изучению расселения – морфологический и функциональный. Особое внимание уделено влиянию географических факторов на процесс формирования сети населенных пунктов в годы предвоенных и послевоенных пятилеток в связи с освоением сырьевых ресурсов Восточного Забайкалья и развитием Транссибирского железнодорожного транспорта. Показаны особенности размещения населенных пунктов в соответствии с характером освоения обширной забайкальской территории и очаговым размещением производительных сил. Отмеченные особенности хозяйственного комплекса края определяли не только функциональную структуру городских и сельских поселений, формы ареалов расселения, но и соотношение размера и характера размещения поселений. Уровень освоенности территории Восточного Забайкалья ниже, чем во многих субъектах Сибирского федерального округа. Проведена функциональная типология городских поселений и раскрыты особенности взаимодействия иерархических звеньев единой системы расселения со своей окружающей средой, как основы пространственного развития своего края. В Забайкальском крае сформирована трехуровневая иерархическая система расселения – краевая во главе с г. Чита, районные во главе с райцентрами и локальные. Зоны их обслуживания, как правило, ограничиваются краевыми и районными границами. Остальные города и поселки городского типа обслуживают свое ближайшее окружение в пределах районных границ. Следовательно, населенные пункты единой системы расселения являются географическими точками концентрации (локализации) производства и населения в зависимости от характера освоения природных ресурсов и основных принципов размещения производительных сил.

Ключевые слова: Забайкальский край, каркас расселения, минерально-сырьевые ресурсы, градообразующая база, промышленность

REGIONAL FEATURES OF THE SETTLEMENT SYSTEM OF THE EASTERN REGIONS OF RUSSIA (ON THE EXAMPLE OF THE TRANS-BAIKAL TERRITORY)

[1]Gonchikov Ts.D., [1]Urbanova Ch.B., [2]Kovaleva N.M., [1]Dymchikova B.Ts.

[1]Buryat State University, Ulan-Ude, e-mail: chimita76@gmail.com;
[2]Zabaykalsky Institute of Railway Transport branch of Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: everest2011@yandex.ru

The article deals with regional features of settlement of the TRANS-Baikal territory. There are two main approaches to the study of settlement – morphological and functional. Special attention is paid to the influence of geographical factors on the formation of a network of settlements during the pre-war and post-war five-year plans in connection with the development of raw materials in the Eastern Transbaikalia and the development of TRANS-Siberian railway transport. It shows the features of localities in accordance with the nature of development of the vast TRANS-Baikal territory and the focal location of productive forces. The noted features of the economic complex of the region determined the functional structure of urban and rural settlements, the forms of settlement areas, but also the ratio of the size and nature of settlement placement. The level of development of the territory of Eastern Transbaikalia is lower than in many subjects of the Siberian Federal district. The functional typology of urban settlements is carried out and the features of interaction of hierarchical links of the unified settlement system with their environment as the basis for the spatial development of their region are revealed. In the TRANS-Baikal territory, a 3-level hierarchical settlement system has been formed – the regional one headed by Chita, the district ones headed by regional centers, and the local ones. Their service areas are usually limited to regional and district borders. The remaining cities and towns serve their immediate surroundings within the district borders. Therefore, localities of a single settlement system are geographical points of concentration (localization) of production and population, depending on the nature of the development of natural resources and the basic principles of the distribution of productive forces.

Keywords: Zabaykalsky Krai, settlement framework, mineral resources, city-forming base, industry

Понятие «расселение» в разных отраслях науки имеет различный смысл. Его употребляют в историческом, экономико-географическом, градостроительном и экономическом аспектах.

«Расселение», по мнению известного классика экономической и социальной географии В.В. Покшишевского, имеет двоякое значение. С одной стороны, расселение – это процесс заселения и освоения территории, с другой – это совокупность взаимодействующих между собой населенных пунктов на разных территориальных уровнях [1, с. 9]. Большинство географов

придерживаются такого взгляда на данное понятие.

Расселение, как правило, формируется под влиянием ведущих отраслей промышленности и сельского хозяйства, их технологических особенностей. В то же время в современных условиях расселение, особенно расселение города, все чаще выступает в качестве фактора размещения наукоемких и инновационных производств, предприятий малого и среднего бизнеса, для которых необходимы качественный по уровню квалификации персонал и развитая городская среда.

Расселение, как социально-экономическое явление, постоянно изменяется и развивается. Расселение – категория динамическая. Степень развитости расселения тесно связана с уровнем социально-экономического развития территории (региона), с территориальным распределением производства и, соответственно, населения, его численностью и плотностью, густотой и людностью поселений.

Цель исследования: показать региональные особенности системы расселения Забайкальского края на основе выявления исторических процессов формирования сети городских и сельских поселений в связи с освоением природных ресурсов, развитием транспорта и других производств.

Материалы и методы исследования

В качестве предмета исследования рассматриваем региональные особенности расселения Забайкальского края. В работе использованы в основном статистический, исторический, сравнительно-географический и типологический методы исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследователи выделяют два основных подхода к изучению расселения – морфологический и функциональный. Первый из них изучает сеть поселений, которая представляет собой совокупность всех населенных пунктов, расположенных на какой-либо территории. Второй подход делает упор на изучении систем расселения – территориальных сочетаний поселений, между которыми существует более или менее четкое распределение функций, а также разнообразные связи, в первую очередь – экономические и социальные. Основное различие между понятиями сеть поселений и система расселения состоит в том, что сеть – номинальная группа населенных пунктов, их совокупность в пределах определенной территории. А система расселения предполагает, что населенные пункты, входящие в нее, функционируют как единое целое, характеризующееся тесными внутренними связями: транспортными, производственными, торговыми, административными, социальными, образовательными, культурными, миграционными и т.д. Другими словами, система расселения есть сеть населенных пунктов и связи между ними.

Основой возникновения, развития и взаимодействия населенных пунктов между собой является их экономическая база. Она состоит из совокупности производственных предприятий, учреждений и организаций, которая определяет людность (численность жителей) и функциональный тип населенных пунктов.

Классик экономической и социальной географии Н.Н. Баранский убедительно показал в свое время, что населенные пункты, особенно города, возникают из своего окружения, т.е. они являются фокусами экономических связей со своим окружением. Населенные пункты необходимо рассматривать совместно с окружающей их территорией, как единое целое.

Развитие расселения зависит от ряда факторов или условий. К числу наиболее важных факторов его развития можно отнести следующее: экономико-географическое положение населенных пунктов (ЭГП), производство, транспорт, природные условия и ресурсы, общественные отношения и др. Наибольшее влияние оказывает, кроме ЭГП, производство, в первую очередь его материальная сфера.

Различают две основные категории поселений – городские и сельские, соответственно две формы расселения. Распределение жителей между городскими и сельскими населенными пунктами, а также по поселениям разных размеров (по людности) внутри этих основных категорий является одним из первых шагов при изучении системы расселения. Анализ расселенческой структуры важен для любой территории, так как она оказывает большое, хотя иногда и косвенное, влияние на все производственные и социальные процессы.

Обобщенным статистическим показателем развития урбанизации является доля городского населения в общей численности жителей какой-либо территории. Уровень урбанизации региона зависит не только от степени развития и концентрации промышленности, как раньше, но и от непроизводственной сферы в условиях рыночной экономики.

Таким образом, расселение населения – это форма территориальной организации населения, совокупность населенных пунктов различной людности и народнохозяйственного профиля (типа), их пространственные взаимоотношения и взаимодействия, т.е. своеобразная система, отражающая особенности социально-экономического развития любой территории.

Для характеристики расселения наиболее часто применяют следующие показатели:

– плотность населения и плотность сельского населения;

– густота сети населенных пунктов (среднее их число на единицу площади);

– средняя людность (численность жителей) населенных пунктов;

– распределение населения по поселениям разных групп людности;

– доля городского населения в общей численности населения территории (урбанизированность);

– доля населения больших городов от всего городского населения (проживающих в городах с численностью населения более 100 тыс. чел.);

– конфигурация ареалов расселения;

– функциональная структура экономической базы населенных пунктов;

– особенности взаимосвязей и взаимодействия поселений;

– локальные и региональные сети (системы) поселений и т.д.

В настоящее время система расселения Забайкальского края состоит из 10 городов, 41 поселка городского типа и 760 сельских населенных пунктов. Урбанизированность составляет 68,2 % (2018 г.), т.е. ниже среднероссийского показателя (73–74 %). Уровень освоенности территории Восточного Забайкалья ниже, чем во многих субъектах Сибирского федерального округа (табл. 1).

Средняя плотность населения Забайкальского края (2,5 чел/км^2) ниже, чем аналогичные показатели по стране и Сибирскому федеральному округу, соответственно в 3,4 и 1,5 раза. Уровень промышленной и сельскохозяйственной освоенности территории края по сравнению со среднероссийскими показателями ниже соответственно в 3,7 и 2,7 раза.

Региональные особенности расселения Забайкальского края заметны и на уровне Байкальского региона (табл. 2).

В Забайкальском крае общее количество городов в 2 раза меньше, чем в промышленно развитой Иркутской области. Доля городов края в общей численности городов Сибирского федерального округа составляет всего 7,7 %. В морфологической структуре городов только один краевой центр Чита относится к категории больших городов (с людностью свыше 100 тыс. чел.) и значительно уступает по численности населения городам Иркутск и Улан-Удэ. Для поселков городского типа Забайкальского края и Иркутской области характерна высокая доля поселков городского типа с людностью менее 3 тыс. чел. по сравнению с Сибирским федеральным округом и Российской Федерацией: соответственно 41,5 %, 48,1 % и 30,5 %, 27,0 %.

Большинство городских поселений края возникли в годы предвоенных и послевоенных пятилеток в советское время. До революции 1917 г. в регионе насчитывалось всего два города – г. Чита и г. Нерчинск, что было связано с появлением Читинского острога – основного форпоста освоения края и продвижения данного процесса на восток.

Таблица 1

Плотность населения, чел/км^2 (на 1 января 2016 г.)

Регионы	Средняя плотность	Средняя плотность сельского населения	Средняя плотность городского населения
Российская Федерация	8,5	2,21	6,34
Сибирский федеральный округ	3,8	1,01	2,73
Республика Алтай	2,3	1,63	0,67
Республика Бурятия	2,8	1,14	1,64
Республика Тыва	1,8	0,85	1,01
Республика Хакасия	8,7	2,71	5,99
Алтайский край	14,1	6,19	7,94
Забайкальский край	2,5	0,8	1,69
Красноярский край	1,2	0,27	0,93
Иркутская область	3,1	0,65	2,45

Примечание. Источник: составлено на основе данных с использованием [2; 3].

Таблица 2

Городские и сельские поселения Байкальского региона

Регионы	Города			Поселки городского типа			Сельские поселения	
	Всего	в том числе с людностью, тыс. чел.		Всего	в том числе с людностью, тыс. чел.		Всего	в том числе с людностью менее 500 чел.
		св. 100	св. 1000		менее 3	менее 5		
Российская Федерация	1100	169	15	1286	348	626	153124	
Сибирский федеральный округ	130	18	3	226	69	106	11464	8466
в том числе:								
Республика Бурятия	6	1	–	14	4	6	613	386
Забайкальский край	10	1	–	41	17	25	750	525
Иркутская область	22	3	–	54	26	34	1488	1061

Примечание. Источник: составлено на основе данных с использованием [2; 3].

После революции в связи с развитием металлургического завода появился г. Петровск-Забайкальский. Вскоре на пути первопроходцев в сторону Дальнего Востока возникли г. Сретенск и поселок Кокуй на базе создания Сретенского судостроительного завода – филиала Сормовского завода.

В условиях ускоренного развития хозяйства края в годы предвоенных пятилеток в 1927–1940 гг. возникли крупнейший по тому времени центр золотодобывающей промышленности страны – г. Балей и 21 поселок городского типа (пгт). К ним относятся поселки городского типа Шерловая Гора, Вершино-Дарасунский, Букачача, Калангуй, Запокровский, Букука, Усть-Карск, Итака, Хапчеранга, Карымское, Оловянная, Холбон, Чернышевск, Аксеново-Зиловский, Ксеньевка, Амазар, Кокуй, Новопавловка, Могзон, Дровяная и Яблоново [4, с. 104]. Они были связаны в основном с освоением угля, руд цветных, редких металлов, плавикового шпата, а также с развитием Транссибирского железнодорожного транспорта (Транссиб) – главного условия ускоренного освоения и развития Сибири и Дальнего Востока в те тревожные предвоенные годы.

В период восстановления разрушенного войной хозяйства страны, в первые годы послевоенных пятилеток, всего за 8 лет (1946–1953 гг.) возникли 12 городских поселений, в том числе г. Борзя, Хилок и Могоча, а также 8 поселков городского типа, связанные не только с дальнейшим развитием Транссиба, а также сопутствующих производств, но и расширением освоения минерально-сырьевых ресурсов Восточного Забайкалья. К ним относятся такие поселки городского типа, как Дарасун, Тарбагатай, Кличка, Вершино-Шахтаминский, Первомайский, Арбагар, Давенда и Ключевский.

С 1954 до середины 1960-х гг. в связи с дальнейшим развитием промышленности, прежде всего горнодобывающей, а также транспорта и других производств, дополнительно возникли еще 12 поселков городского типа [4, с. 117]. Среди них поселки Октябрьский, Кадая, Горный Зерентуй, Наминга, Баляга, Атамановка, Новокручининский, Курорт Дарасун, Агинское, Приисковый, Забайкальск и Приаргунск.

Таким образом, к середине 1960-х гг. в Забайкальском крае уже сформировалась система расселения из 9 городов и 41 поселка городского типа.

Позже в связи с постепенной стагнацией экономики страны, особенно с реформированием экономической системы с середины 1980-х гг., произошла своеобразная ротация поселков городского типа, т.е. поселки со слабой экономической базой перешли в категорию сел и появились новые города и поселки городского типа. В настоящее время в Забайкальском крае функционируют 10 городов и 41 поселок городского типа (табл. 3).

Анализ людности городских и сельских поселений показывает, что для края характерна мелкопоселковая и мелкоселенная система расселения с преобладанием малых городов, что связано с низким уровнем социально-экономического развития региона. 70% городов относятся к категории «малых» с людностью менее 20 тыс. чел. В них численность населения варьирует в пределах всего 7–16 тыс. чел. В остальных категориях числится лишь по одному городу. В крае один г. Чита с людностью 349 тыс. чел. (2018 г.) относится к категории «больших». Такая экономически неоправданная

чрезмерная концентрация населения, соответственно, и производства в первую очередь связана с нестабильностью социально-экономической ситуации в крае и притоком мигрантов в краевой центр. В настоящее время доля г. Читы в краевых показателях составляет: в населении – 32,5%, в основных фондах – 56,2%, в обрабатывающем производстве – 36,7%, в розничной торговле – 68,5%, в обороте общественного питания – 65,2%, в вводе в действие общей площади жилых домов – 43,9% и т.д. [6]. Семнадцать поселков городского типа относятся к категории «мелких» с людностью менее 3 тыс. чел., что составляет 41,5%. В некоторых поселениях, таких как Итака, Яблоново и Арбагар, численность проживающего населения варьирует в пределах всего 356–752 чел., что значительно ниже цензовых требований к поселкам городского типа в Российской Федерации. Восемь поселков (19,5%) относятся к категории «небольших» с людностью 3–5 тыс. чел. Таким образом, абсолютное большинство поселков городского типа (61%) имеют людность менее 3 тыс. чел. Лишь в десяти поселках (24,4%) проживают более 10 тыс. чел. К ним относятся, в порядке убывания, поселки Агинское (17,8 тыс. чел.), Чернышевск (13,3 тыс. чел.), Карымское (13,0 тыс. чел.), Шерловая гора (12,5 тыс. чел.), Первомайский (12,1 тыс. чел.), Забайкальск (11,7 тыс. чел.), Горный (10,9 тыс. чел.), Атамановка (10,3 тыс. чел.), Могойтуй (10,2 тыс. чел.) и Новокручининский (10,1 тыс. чел.).

В настоящее время в крае насчитывается 760 сельских поселений. Из них к категории сельских сельскохозяйственных поселений относится 661 населенный пункт, что составляет 87% от их общего количества. В качестве сельских несельскохозяйственных поселений выступают 99 сел (их обычно называют поселками), или 13% сельских населенных пунктов, что является одним из региональных признаков расселения края. Это, как правило, мелкие поселения с людностью менее 100 чел., представленные разъездами, поселками при железнодорожных станциях, блок-постами, разработкой россыпных месторождений минеральных ресурсов и леса, а также домами отдыха и т.д.

Большинство сельских поселений (529 из 760) выделяются людностью менее 500 жителей, что составляет почти 70% (69,6%) от общего количества сел. В том числе 343 села (45,1%) относятся к категории «небольших» с людностью 100–500 чел., 186 сел (24,5%) – к категории «мелких» (менее 100 жителей). Почти 1/5 часть поселений (19,3%) являются «средними» (500–1000 жителей). Лишь в 84 поселениях (11,0%) количество жителей превышает 10000 чел.

Необходимо заметить, что людность поселков городского типа и сельских поселений имеет тенденцию к снижению в связи с сокращением (разрушением) не только мощности градообразующих (системообразующих) производств материальной сферы, но и непроизводственной сферы, т.е. сферы социальных услуг – школ, учреждений, организаций здравоохранения и культуры, приведших к оттоку населения.

В подтверждение сказанному можно отметить, что в 2010–2018 гг. практически во всех муниципальных районах наблюдается уменьшение численности населения, за исключением всего двух – пристоличного Читинского и пограничного Забайкальского, где незначительно увеличилось число жителей (соответственно на 0,4 и 3,4%). При этом лишь в четырех городских поселениях, являющихся районными центрами, увеличилась численность их населения: Чита – 107,6%, Краснокаменск – 112,3%, Могоча – 102,7%, Могойтуй – 107,6%, что объясняется функциональной структурой градообразующей базы поселений [7; 8].

Для Забайкальского края характерно рассредоточенное и неравномерное размещение населенных пунктов. К примеру, средняя плотность населенных пунктов Байкальского региона составляет всего 1,9 поселений / 1000 км^2, в том числе городских – 0,09 поселений / 1000 км^2, сельских – 1,8 поселений / 1000 км^2 [9, с. 78]. На территории Забайкальского края аналогичные показатели несколько ниже и составляют соответственно 1,85; 0,01 и 1,7 поселений на 1000 км^2. Как видим, особенно низки показатели городских поселений, что связано со слабым развитием промышленности края. Также особенности размещения населенных пунктов и уровень хозяйственной освоенности края показывает соотношение основных категорий поселений и площади территории региона. Так, на один город края приходится 43189 км^2, на один поселок городского типа – 10533,9 км^2, на одно сельское поселение – 568,3 км^2 территории. Крайне неравномерно размещены города и поселки городского типа. Показатели даже многочисленных сельских поселений, распределенных по муниципальным районам, варьируют в пределах от 129,2 до 8571,9 км^2.

Таблица 3

Система расселения Забайкальского края (2018 г.)

Административные районы	Города, тыс. чел.				Поселки городского типа, тыс. чел.				Сельские поселения, чел.			
	Большие свыше 100	Средние, 50–100	п/ср., 20–50	Малые, менее 20	Крупные, свыше 10	Средние, 5–10	Небольшие, 3–5	Мелкие, менее 3	Крупные, более 1000	Средние, 500–1000	Небольшие, 100–500	Мелкие, менее 100
Акшинский									1	5	9	
Александрово-Заводский									1	2	21	3
Балейский				1						4	19	8
Борзинский			1		1					7	10/1'	2
Газимуро-Заводский									1	6/2'	11	10
Краснокаменский		1						,	3/2'	4/2'	6/2'	1/1'
Забайкальский					1				3/3'	1	4/2'	2/2'
Каларский							1		2/1'		4/2'	2
Калганский									1	4	6	1
Карымский					1	1	1		6/1'	2	11/2'	5/1'
Красночикойский									2	8/1'	22	15
Кыринский									2	6	8	5
Могочинский				1				5	2/2'	1/1'	3	20/17
Нерченский				1				1	1	5/1'	19/1'	8/1'
Нерчинско-Заводский									2	3	16	3/1'
Оловянинский						2		2	4/4'	8/2'	13/2'	5
Ононский									1	6	12	2
Петровск-Забайкальский				1			2	1	2	5	9/1'	6
Приаргунский						1		1	4/2'	6/1'	9	1
Сретенский				1		1		1	1	2	19	16/3'
Тунгиро-Олекминский										1	1	3
Тунгокоченский						1			1	3	6	6/1'
Улетовский					1			1	2	8	12/2'	
Хилокский				1			1		5/1'	1	10	10
Чернышевский					1		2	1	4	4/1'	10/3'	14/5'
Читинский	1				2			1	13/1'	10/3'	23/5'	8/3'
Шелопугинский									2		16/1'	7
Шилкинский				1	1			2	2	18	22	5/1
Агинский					1		1	1	5	6	3	8
Дульдургинский									4	4	3	1
Могойтуский					1				7/1'	7	6/1'	9/6'
ВСЕГО	1	1	1	7	10	6	8	17	84/18'	147/14'	343/25'	186/42'

Примечание: 2/2' – отмечены сельские несельскохозяйственные поселения. Источник: составлено на основе данных с использованием [5; 6].

Существующая система расселения и география населенных пунктов края отражают характер освоения обширной забайкальской территории и очаговое размещение производительных сил. Размещение населенных пунктов носит в основном линейный характер вдоль Транссибирской (с его ветвями в сторону пгт Забайкальск и г. Сретенск) и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей, автомобильных дорог федерального значения, а также крупных рек. Здесь размещено абсолютное большинство административно-хозяйственных центров с преобладанием обрабатывающей промышленности. К примеру, как было отмечено, только в г. Чита сконцентрировано более 1/3 (36,7%) обрабатывающего производства края. Как правило, вокруг краевого и районных административных центров, а также среднего и полусреднего городов формируются сгустки поселений, особенно сельских. Необходимо заметить, что даже в самой густонаселенной части края процесс формирования Читинского промышленного узла на основе возникновения городов-спутников значительно отстает, например, от Иркутского с г. Ангарск и Шелехов. К краевому центру тяготеют лишь три поселка городского типа Атамановка, Новокручининский и Яблоново со слабой экономической базой, где преобладают в основном трудовые, социальные и культурные пригородные связи.

В стороне от магистральных транспортных коридоров около соответствующих месторождений размещены горнопромышленные поселения. Основная масса сельских сельскохозяйственных поселений (сел) сконцентрирована в степной и лесостепной природных зонах.

Забайкальский край в межрегиональном географическом разделении труда традиционно специализировался на горнодобывающей промышленности, отдельных отраслях машиностроения и на обслуживании транзитной железнодорожной магистрали. К середине 1970-х гг. отношение вывоза производимых товаров и услуг к производству в добывающей промышленности составляло 70,0%, в машиностроении – 54,5% и на транспорте и связи – 50% [10, с. 11]. Экономические связи по ввозу и вывозу товаров были чрезмерно дальними, в основном западными вплоть до европейской части страны, и транспортные составляющие в ряде случаев в отдельных отраслях доходили до $^1/_3$ их себестоимости.

Отмеченные особенности хозяйственного комплекса края определяли функциональную структуру городских и сельских поселений. Проведенная типология городских поселений показала, что самую многочисленную группу (38,0%) составляли центры горнорудной промышленности, т.е. поселения, градообразующая база которых основана на добыче руд цветных, редких и драгоценных металлов, а также плавикового шпата. К ним относились один город (г. Балей) и 18 поселений городского типа, такие как Орловский, Шерловая Гора, Давенда, Ключевский, Итака, Ксеньевка, Калангуй, Кличка, Усть-Карск, Вершино-Дарасунский, Хапчеранга, Запокровский, Вершино-Шахтаминский, Кадая, Горный Зерентуй, Наминга, Октябрьский и Букука. Последние 8 поселков по мере отработки месторождений минеральных ресурсов и разрушения градообразующей базы перешли в разряд сельских поселений (некоторые и вовсе исчезли). В последующие годы возникли новые поселения, в том числе г. Краснокаменск и семь поселков городского типа – Новоорловск, Золотореченск, Ясногорск, Жирекен, Первомайский, Горный и Новая Чара. Возникновение и развитие этих поселений также связано с геологоразведкой и разработкой руд цветных и драгоценных металлов. В настоящее время градообразующая база большинства поселений потеряла былую значимость. Более приоритетной стали добыча золота, стратегических ресурсов и драгоценных камней.

На втором месте после горнорудных поселений по численности были транспортные центры (26,0%). К ним относятся 13 городских поселений – гг. Борзя, Хилок, Шилка, Могоча, поселки городского типа Могойтуй, Забайкальск, Карымское, Чернышевск, совмещающие транспортную функцию с административной на уровне района, а также Приисковый, Могзон, Аксеново-Зиловское, Яблоново и Амазар.

На долю центров обрабатывающей промышленности приходилось 18% от общей численности городов и поселков городского типа края. К данному типу относились 9 городских поселений, в том числе г. Нерчинск и Сретенск, поселки городского типа Оловянная, Приаргунск, Агинское, совмещающие промышленную функцию с районной административной, а также Дарасун, Тарбагатай, Кокуй и Холбон. В условиях затяжного экономического кризиса 1990-х гг. многие машиностроительные предприятия были либо ликвидированы, либо существенно сокращены их производственные мощности. К центрам лесной и угольной

промышленности, а также прочим относились всего по 2–3 поселка. В настоящее время в связи с усиленной рубкой лесных ресурсов многие городские и сельские поселения становятся центрами лесопиления и приема лесной продукции.

Таким образом, в настоящее время в системе расселения Забайкальского края можно выделить следующие типы поселений:

I. Организующие центры:

а) краевой центр – крупный многофункциональный город;

б) районные центры – городские поселения с административной функцией и небольшим промышленным производством;

в) районные центры – городские поселения с ярко выраженной транспортной функцией;

г) районные центры во главе с сельским поселением.

II. Промышленные центры:

а) центры горнорудной промышленности;

б) центры угольной промышленности;

в) центры лесной промышленности;

г) центры обрабатывающей промышленности;

III. транспортные центры;

IV. прочие городские поселения.

Заключение

Городские поселения, как звенья единой системы расселения, взаимодействуют между собой, обеспечивают производственные и социальные потребности своей окружающей территории. Одновременно они формируют трехуровневую иерархическую систему расселения – краевую во главе с г. Чита, районные во главе с райцентрами и локальные. Зоны их обслуживания, как правило, ограничиваются краевыми и районными границами. Остальные города и поселки городского типа обслуживают свое ближайшее окружение в пределах районных границ.

Все городские поселения, как опорный каркас расселения, формируют единое экономическое, социальное и административное пространства краевого уровня, а также обеспечивают внешние экономические связи, отражающие особенности и уровень социально-экономического развития региона.

Таким образом, населенные пункты единой системы расселения являются географическими точками концентрации (локализации) производства и населения в зависимости от характера освоения природных ресурсов и основных принципов размещения производительных сил. Они обеспечивают пространственное развитие своего края и, как составляющие звенья иерархической системы расселения, выступают в качестве основного инструмента повышения уровня и качества жизни населения.

Список литературы / References

1. Покшишевский В.В. География населения СССР. Экономико-географические очерки. М.: Просвещение, 1971. 173 с.

Pokshishevskiy V.V. Geography of the Soviet population. Economic and geographical essays. M: Prosveshcheniye, 1971. 173 p. (in Russian).

2. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru (дата обращения: 11.05.2020).

Official website of the Federal state statistics service. [Electronic resource]. URL: http://www.gks.ru (date of access: 11.05.2020) (in Russian).

3. Официальный сайт Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Забайкальскому краю. [Электронный ресурс]. URL: https://chita.gks.ru (дата обращения: 11.05.2020).

Official website of the Territorial body of the Federal state statistics service for the TRANS-Baikal territory. [Electronic resource]. URL: https://chita.gks.ru/ (date of access: 11.05.2020) (in Russian).

4. Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область). Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. Москва – Иркутск, 1967. 104 с.

Atlas of Transbaikalia (Buryat ASSR and Chita region). Main Directorate of geodesy and cartography under the Council of Ministers of the USSR. Moscow – Irkutsk, 1967. 104 p. (in Russian).

5. Социально-экономическое положение городских округов и муниципальных районов Забайкальского края: статистический сборник. Чита, 2018. 145 с.

Socio-economic status of urban districts and municipal districts of the TRANS-Baikal territory: statistical compilation. Chita, 2018. 145 p. (in Russian).

6. Регионы России. Основные социально-экономические показатели городов: статистический сборник. М., 2018. С. 348–349.

The Regions of Russia. Main socio-economic indicators of cities: statistical compilation. M., 2018. P. 348–349 (in Russian).

7. Социально-экономическое положение городских округов и муниципальных районов Забайкальского края: статистический сборник. Чита, 2010. 138 с.

Socio-economic situation of urban districts and municipal districts of the TRANS-Baikal territory: statistical compilation. Chita, 2010. 138 p. (in Russian).

8. Забайкальский край в цифрах 2019. Краткий статистический сборник. Забайкалкрайстат. Чита, 2019. 78 с.

Zabaykalsky Krai in numbers 2019. Brief statistical compilation. Zabaykalkraystat. Chita, 2019. 78 p. (in Russian).

9. Гончиков Ц.Д., Гомбоев Б.О., Урбанова Ч.Б., Мандыт М.К., Гладинов А.Н. Особенности расселения восточных регионов России в контексте «зеленой экономики»: пространственные аспекты // Научное обозрение. 2017. № 11. С. 75–83.

Gonchikov Ts.D., Gomboev B.O., Urbanova Ch.B., Mandyt M.K., Gladinov A.N. Specific features of settlement in the eastern regions of Russia in the context of «green» economy: spatial aspects // Nauchnoye obozreniye. 2017. № 11. P. 75–83 (in Russian).

10. Гончиков Ц.Д. Промышленное развитие и городское расселение Восточного Забайкалья: автореф. дис. … канд. геогр. наук. Москва, 1974. 24 с.

Gonchikov Ts.D. Industrial development and urban settlement of Eastern Transbaikalia: avtoref. dis. … kand. geogr. nauk. Moscow, 1974. 24 p. (in Russian).

УДК 551.51:519.6:504.064.2

УРАВНЕНИЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ КВАЗИГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЫ В ЗАДАЧАХ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ

Калажоков Х.Х., Увижева Ф.Х.

Институт информатики и проблем регионального управления – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук», Нальчик, e-mail: iipru@rambler.ru

В данной работе рассматриваются основные направления анализа экологических характеристик атмосферы локальных и глобальных масштабов. На основе анализа результатов вычислительных экспериментов по исследованию динамики крупномасштабных атмосферных процессов в рамках уравнений квазигеострофической и гидростатической модели атмосферы показывается возможность их применения для решения задач региональной экологии. Рассмотрены задачи экологии в региональном масштабе, где для определения полей течения и турбулентных характеристик атмосферы используются математические модели динамики атмосферных процессов в квазигеострофическом и гидростатическом приближениях. Краевые условия заданы в первом приближении на поверхности земли и на верхней границе тропосферы для вертикальной составляющей скорости. Представлена математическая постановка задачи переноса экологически вредных примесей в атмосфере региона в виде трехфазных аэрозолей, в предположении, что дисперсная компонента аэрозолей представляет собой жидкие капли и твердые частицы полидисперсного спектра по величине, размеру частиц. Предложена математическая формулировка задачи совместного краткосрочного прогноза погоды и прогноза экологической обстановки в регионе. В методической основе численной реализации предложенного подхода к постановке задач прогноза экологической обстановки региона лежат различные варианты представления исходной сложной задачи в виде последовательности простых задач с применением так называемых методов расщепления сложных задач. Для решения основных задач региональной экологии предложен также спектральный вычислительный метод Галеркина, позволяющий получить приближенные решения для широкого класса исследуемых задач с использованием меньшего количества оперативной памяти и за меньшее количество шагов без существенной потери точности.

Ключевые слова: региональная экология, уравнения термогидродинамики, квазигеострофическая и гидростатическая атмосфера, анализ и прогноз экологической обстановки, спектральный метод Галеркина, метод расщепления

EQUATIONS OF THERMOHYDRODYNAMICS OF A QUASI-GEOSTROPHIC AND HYDROSTATIC ATMOSPHERE IN THE PROBLEMS OF REGIONAL ECOLOGY

Kalazhokov Kh.Kh., Uvizheva F.Kh.

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center «Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Nalchik, e-mail: iipru@rambler.ru

This article considers the main directions of the analysis of the ecological characteristics of the atmosphere of local and global scales. Based on the analysis of the results of computational experiments to study the dynamics of large-scale atmospheric processes in the framework of the equations of a quasi-geostrophic and hydrostatic model of the atmosphere, the possibility of their application to solve problems of regional ecology is shown. Ecological problems on a regional scale are considered, where mathematical models of the dynamics of atmospheric processes in quasi-geostrophic and hydrostatic approximations are used to determine flow fields and turbulent characteristics of the atmosphere. The boundary conditions are given in the first approximation on the earth's surface and on the upper boundary of the troposphere for the vertical velocity component. The mathematical formulation of the problem of the transfer of environmentally harmful impurities in the atmosphere of the region in the form of three-phase aerosols is presented, under the assumption that the dispersed component of the aerosols is liquid droplets and solid particles of the polydisperse spectrum in size, particle size. The mathematical formulation of the problem of a joint short-term weather forecast and environmental forecast in the region is proposed. The methodological basis for the numerical implementation of the proposed approach to the formulation of problems of forecasting the environmental situation in the region is based on various versions of the original complex problem in the form of a sequence of simple problems using the so-called methods of splitting complex problems. To solve the main problems of regional ecology, the Galerkin spectral computational method is proposed also, which allow obtaining approximate solutions for a wide class of problems under study using fewer RAM and in fewer steps without significant loss of accuracy.

Keywords: regional ecology, equations of thermohydrodynamics, quasi-geostrophic and hydrostatic atmosphere, analysis and forecast of the ecological situation, spectral Galerkin method, splitting method

Известно, что интенсивность загрязнения природной среды региона и величина ущерба, наносимого экономике в результате производственно-хозяйственной деятельности, зависят от конкретных экологических характеристик рассматриваемого региона, а также от долготы, широты, высоты точек рассматриваемой местности. К настоящему времени российскими и зарубежными специалистами выполнен большой комплекс

исследований по методам анализа экологических характеристик окружающей среды.

Однако такие важные и сложные проблемы современной региональной экологии, как построение и исследование уравнения динамики переноса загрязняющих примесей в различных окружающих средах с учетом их физико-химического взаимодействия, разработка методов прогноза экологической обстановки в регионе различной заблаговременности, проведение вычислительных экспериментов по исследованию и анализу сложных экологических процессов регионального масштаба и другие, по-прежнему представляют научный и практический интерес.

Большое количество публикаций, посвященных модельным задачам локальных экологических процессов переноса пассивных и активных примесей атмосферы, составляет первое направление исследований. Эти модельные задачи бедны по физическому содержанию и описывают только распространение в атмосфере аэрозолей от различных типов источников в рамках уравнений переноса и диффузии, решаются в рамках одномерной системы при заданных скоростях (например, [1]). Исследования Г.И. Марчука и его учеников во многом положили начало моделированию мезомасштабных экологических процессов на основе уравнений термогидродинамики атмосферы с учетом физико-химических превращений примесей [2].

Второе направление исследований посвящено математическому моделированию сложных экологических процессов в атмосфере регионального и глобального масштабов с использованием полных уравнений динамических и кинетических процессов [3].

Настоящая работа посвящена приложению к экологии уравнений термогидродинамики квазигеострофической и гидростатической атмосферы. Квазигеострофические и гидростатические модели успешно используются для создания на их основе глобальных климатических моделей, гидродинамической теории краткосрочного прогноза погоды. Разработаны новые версии этих моделей, обладающие высоким пространственным разрешением и адаптированные к параллельным вычислительным системам [4–6]. Отметим, что в результате численного анализа динамики крупномасштабных атмосферных процессов с помощью квазигеострофической модели установлены механизмы формирования полей метеоэлементов в атмосфере и основные закономерности атмосферных процессов регионального масштаба с приемлемой точностью [7–9]. Основные спектральные алгоритмы, а также некоторые примеры приложения спектральных методов для решения актуальных задач прикладной гидродинамики, метеорологии хорошо рассмотрены и систематизированы в [10].

Одной из главных проблем, возникающих при реализации математических моделей основных задач региональной экологии, является снижение требований к ЭВМ по быстродействию и объему памяти. Вычислительные эксперименты предложенного в работе метода аналитического расщепления показывают, что полученные приближенные решения подобного класса задач можно получить быстрее и без значительной потери точности [11, 12].

Целью настоящего исследования является реализация сложных задач региональной экологии в рамках основных уравнений динамики квазигеострофической атмосферы, позволяющая уменьшить объем вычислительных работ, необходимых для их численной реализации.

Система уравнений термогидродинамики квазигеострофической и гидростатической атмосферы

В области $D = \{(t, x, y, p)): t > 0, -\infty < x, y < \infty, 0 < p < p_0\}$, состоящей из точек (t, x, y, p) прямоугольной системы координат, где t – время, (x, y) – пространственные горизонтальные координаты, p – давление, которое в дальнейшем играет роль вертикальной координаты, а неизвестной функцией становится изобарическая поверхность, рассматривается система уравнений термогидродинамики квазигеострофической и гидростатической атмосферы [13], которая после некоторых упрощающих преобразований имеет вид

$$\frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \frac{1}{l}(\mathrm{H}, \Delta \mathrm{H}) + \beta \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{l^2}{p_0}\frac{\partial \tau}{\partial \varsigma}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{l}(\mathrm{T}, \mathrm{H}) - \frac{\varepsilon}{c_p} = \frac{m^2 l^2}{p_0 R}\frac{\tau}{\varsigma}, \quad (2)$$

$$T = -\frac{1}{R}\varsigma \frac{\partial H}{\partial \varsigma}. \quad (3)$$

Для полученной системы уравнений термогидродинамики квазигеострофической и гидростатической атмосферы нужно определить граничные условия. В этом ка-

честве будем использовать вертикальную составляющую вектора скорости τ, пространственный вид которой при $p = p_0$ имеет вид

$$\tau = \frac{p}{RT}(\mathrm{H}_t + \mathrm{u}\mathrm{H}_x + \mathrm{v}\mathrm{H}_y).$$

Приравнивая к нулю и произведя некоторые целесообразные поставленной задаче упрощения, получим компоненты вектора скорости в виде

$$u = -\frac{1}{l}\frac{\partial H}{\partial y}, v = \frac{1}{l}\frac{\partial H}{\partial x}.$$

Здесь и далее использованы следующие обозначения:

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа, l – параметр Кориолиса для точек земной поверхности вдали от экватора, $H = gz$ – новая неизвестная функция, g – ускорение силы тяжести, p – атмосферное давление, $\tau = \frac{dp}{dt}$ играет роль вертикальной составляющей вектора скорости, которая описывает смещение частицы воздуха относительно изобарических поверхностей, T – температура, γ_a – адиабатический градиент температуры, c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, ε – приток тепла к единице массы воздуха, который будем считать известным, R – универсальная постоянная, p_0 – среднее давление на земной поверхности, принимаемое равным 1000 мб, $\beta = \frac{\partial l}{\partial y}$ – коэффициент, учитывающий изменение параметра Кориолиса с широтой, $\varsigma = \frac{p}{p_0}$, $m^2 = \frac{R^2 T(\gamma_a - \gamma)}{gl^2}$ и изменяются по высоте незначительно, u, v – горизонтальные составляющие вектора скорости воздуха, (H, ΔH) и (T, H) из (1) и (2) соответственно – якобианы, вычисляемые по формуле

$$(a,b) = \frac{\partial a}{\partial x}\frac{\partial b}{\partial y} - \frac{\partial b}{\partial x}\frac{\partial a}{\partial y}.$$

Некоторые краевые задачи физики квазигеострофической и гидростатической атмосферы

Для исследования физических закономерностей формирования и развития атмосферных процессов разных масштабов под влиянием различных факторов (например, приток тепла, орография, фазовые превращения и др.) рассмотрим некоторые краевые задачи в рамках системы уравнений (1)–(3).

Задача 1. Рассмотрим систему уравнений термогидродинамики физики квазигеострофической и гидростатической атмосферы (1)–(3) с краевыми условиями:

$$\tau = \frac{p}{RT}\frac{\partial H}{\partial t} \text{ при } p = p_0, \qquad (4)$$

$$\tau = 0 \text{ при } p = 0.$$

Решение задачи 1 ищется в классе функций, ограниченных на бесконечности по горизонтальным координатам. Заметим, что задача 1 моделирует атмосферные процессы в свободной атмосфере без учета влияния процессов в пограничном слое турбулентного трения.

Для количественной оценки влияния приземного пограничного трения на эволюцию метеорологических элементов в свободной атмосфере рассматривается краевая задача:

Задача 2. Рассмотрим систему уравнений термогидродинамики физики квазигеострофической и гидростатической атмосферы (1)–(3) с краевыми условиями:

$$\tau \approx a\Delta\frac{\partial H_h}{\partial t} + p_0\frac{\partial H_h}{\partial t} - b\Delta H_0 -$$

$$-\frac{1}{l^2}\int_0^h\left[\frac{1}{l}(\mathrm{H}, \Delta\mathrm{H}) + \beta\frac{\partial H}{\partial x}\right]\left(1 - e^{-k\varsigma}\cos k\varsigma\right)d\varsigma$$

$$\text{при } p = p_h, \qquad (5)$$

$$\tau = 0 \text{ при } p = 0,$$

где $a = \frac{1}{l}\left(h - \frac{1}{2k}\right)$, h – толщина слоя трения, выраженная в единицах давления, $k = \frac{1}{g}\sqrt{\frac{l}{2\rho\mu}}$ – коэффициент турбулентной вязкости в пограничном слое атмосферы, $b = \frac{g}{l}\sqrt{\frac{\rho\mu}{2l}}$, где μ – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, который на практике можно определить как по данным регистрации воздушных течений, так и по данным о диффузии искусственно вводимых в атмосферу примесей.

В настоящее время выполнен большой комплекс исследований, посвященных решению модельных задач типа (1)–(4) и (1)–(3), (5) по анализу локальных процессов, необхо-

димых для реализации сложных и важных проблем. В результате этих исследований разработана оперативная схема краткосрочного прогноза погоды с применением ЭВМ и выявлено некорректное описание эволюции планетарных ультрадлинных волновых возмущений в атмосфере в квазигеострофическом и гидростатическом приближении, что представляет большой интерес в прогнозе погоды на длительный срок.

Модель переноса экологически вредных примесей в атмосфере региона

Рассмотрим модель переноса примесей, загрязняющих экологию атмосферы региона. Пусть вредные примеси представляют собой трехфазную смесь газа, жидкости и твердого вещества в виде аэрозолей.

Предположим, что дисперсная компонента аэрозолей представляет собой жидкие капли и твердые частицы полидисперсного спектра по величине, размеру (или объему) частиц.

Пусть ρ – плотность воздуха, а ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотности вредных примесей в виде газа, жидких капель и твердых частиц в динамической атмосфере соответственно. Рассмотрим удельные величины $q_1 = \frac{\rho_1}{\rho}$, $q_2 = \frac{\rho_2}{\rho}$, $q_3 = \frac{\rho_3}{\rho}$, удовлетворяющие соотношению $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 << \rho$ [13].

Упрощенная простейшая модель переноса и диффузии примесей в атмосфере региона в системе координат (t, x, y, p) имеет вид

$$\frac{dq_i}{dt} = \left(\frac{g}{RT}\right)^2 \frac{\partial}{\partial p} \nu p^2 \frac{\partial q_i}{\partial p} + \mu \Delta q_i + I_i, i = 1,2,3,$$

$$q_i = q_i^0 = const, \text{ при } t = 0,\ q_i = 0$$

$$\text{при } p = p_0,\ q_i = 0 \text{ при } p = 0,$$

где $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + \tau\frac{\partial}{\partial p}$,, Δ – оператор Лапласа, v, μ – коэффициенты турбулентной диффузии примесей; u, v, τ – составляющие вектора скорости переноса примесей в атмосфере; I_i – мощности источников вредных примесей с учетом физико-химического взаимодействия примесей между собой и со средой. При определении функционального вида источников примесей учитываются выпадения тяжелых жидких и твердых вредных примесей на поверхности земли путем учета величины вертикальной скорости частиц под действием силы тяжести в уравнениях переноса аэрозолей.

Заметим, что для задач прогноза погоды и экологии региона на сравнительно короткий срок граничные условия на поверхности земли и на верхней границе атмосферы региона будут выполняться удовлетворительно. При увеличении срока заблаговременности прогноза граничные условия могут оказаться недостаточно точными.

В этом случае граничные условия на поверхности земли можно получить на основе решения вспомогательной задачи относительно баланса примесей на границе раздела атмосфера – земля в зависимости от характера подстилающей поверхности и структуры почвы. Возможны и другие варианты постановки граничных условий переноса примесей.

Постановка задачи метода прогноза экологической обстановки в регионе

Рассмотрим постановку задачи прогноза экологической обстановки в регионе в виде двух блоков. Первый блок представляет собой задачу расчета метеорологических элементов на основе термогидродинамических уравнений в приближении квазигеострофической и гидростатической атмосферы.

Следовательно, задача, рассматриваемая в первом блоке, является методологической основой численного метода краткосрочного прогноза погоды в квазигеострофическом приближении.

Во втором блоке рассматривается задача переноса экологически вредных примесей в атмосфере региона. Совместное рассмотрение указанных двух задач представляет собой постановку задачи прогноза погоды и экологической обстановки в регионе.

Тогда полная математическая формулировка задачи совместного краткосрочного прогноза погоды и экологической обстановки в регионе в системе координат (t, x, y, p) в виде

$$\frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \frac{1}{l}(\mathrm{H}, \Delta \mathrm{H}) + \beta \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{l^2}{p_0}\frac{\partial \tau}{\partial \varsigma},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{l}(\mathrm{T}, \mathrm{H}) - \frac{\varepsilon}{c_p} = \frac{m^2 l^2}{p_0 R}\frac{\tau}{\varsigma},\ T = -\frac{1}{R}\varsigma\frac{\partial H}{\partial \varsigma},$$

$$\frac{dq_i}{dt} = \left(\frac{g}{RT}\right)^2 \frac{\partial}{\partial p} \nu p^2 \frac{\partial q_i}{\partial p} + \mu \Delta q_i + I_i, i = 1,2,3,$$

$$\tau = \frac{p}{RT}\frac{\partial H}{\partial t} \text{ при } p = p_0, \tau = 0 \text{ при } p = 0,$$

$$q_i = q_i^0 = const \text{ при } t = 0, q_i = 0$$

$$\text{при } p = 0 \text{ и } p = p_0.$$

Таким образом, задача краткосрочного прогноза погоды и экологической обстановки в регионе является сложной задачей прикладной математики, вычислительной математики и вычислительной техники. Решение расщепленных таким образом задач получено и подробно рассмотрено авторами в работе [14] с применением спектрального метода Галеркина.

Заключение

Широко распространенные конечно-разностные методы требуют проведения громоздких вычислений на каждом временном шаге, в каждой точке пространственной сетки, что влечет за собой значительное увеличение используемой оперативной памяти и замедление расчетов. Применение аналитических методов расщепления позволяет получить приближенные формулы решений для широкого класса задач, притом вычислительные эксперименты показывают, что проведение расчетов значительно ускоряется, притом без существенной потери точности. К расщепленным по физическим процессам, уже более простым задачам, можно применить спектральный вычислительный метод Галеркина, позволяющий получить приближенные решения поставленной задачи.

В заключение отметим, что в предложенных постановках краевые условия имеют довольно формальный характер, ибо оценка количества примесей, осевших близко к поверхности Земли, крайне специфична для каждой конкретно решаемой задачи.

Список литературы / References

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.

Berlyand M.E. Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 448 p. (in Russian).

2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.

Marchuk G.I. Mathematical modeling in the environment problem. M.: Nauka, 1982. 320 p. (in Russian).

3. Марчук Г.И., Алоян А.Е. Математическое моделирование в задачах экологии. Препринт № 234. М.: ОВМ АН СССР, 1989. 36 с.

Marchuk G.I., Aloyan A.E. Mathematical modeling in ecology problems. Preprint № 234. M.: OVM AN SSSR, 1989. 36 p. (in Russian).

4. Дымников В.П. Моделирование климата и его изменений. 2015. 59 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.scert.ru/conferences/cites/2015/presentation/Presentation/School/20.06.15/2-Dymnikov.pdf (дата обращения: 18.05.2020).

Dymnikov V.P. Modeling climate and its changes. 2015. 59 p. [Electronic resource]. URL: http://www.scert.ru/conferences/cites/2015/presentation/Presentation/School/20.06.15/2-Dymnikov.pdf (date of access: 18.05.2020) (in Russian).

5. Голицын Г.С., Мохов И.И., Куличков С.Н., Курганский М.В., Репина И.А., Чхетиани О.Г. Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов. М.: Физматкнига, 2018. 587 с.

Golicyn G.S., Mohov I.I., Kulichkov S.N., Kurganskij M.V., Repina I.A., Chhetiani O.G. Turbulence, Atmospheric and Climate Dynamics: Proceedings. M.: Fizmatkniga, 2018. 587 p. (in Russian).

6. Davies H.C. The Quasigeostrophic Omega Equation: Reappraisal, Refinements, and Relevance. American Meteorological Society. 2015. Vol. 143. P. 3–25. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00098.1.

7. Cai M., Huang B. A new look at the physics of Rossby waves: a mechanical–Coriolis oscillation. Journal of the atmospheric sciences. 2013. Vol. 70. P. 303–316. DOI: 10.1175/JAS-D-12-094.1.

8. Курганский М.В. Спиральность в атмосферных динамических процессах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 147–163. DOI: 10.7868/S0002351517020079.

Kurgansky M.V. Helicity in dynamic atmospheric processes. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. № 2. С. 127–141. DOI: 10.1134/S0001433817020074.

9. Callies J., Ferrari R., Bühler O. Transition from geostrophic turbulence to inertia–gravity waves in the atmospheric energy spectrum. Proc Natl Acad Sci USA. 2014. 111(48). P. 17033–17038. DOI: 10.1073/pnas.1410772111.

10. Shen J., Tang T., Wang L.-L. Spectral Methods: Algorithms, Analysis and Applications. Berlin: Springer, 2011. 472 p. DOI: 10.1007/978-3-540-71041-7.

11. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды. Л.: Гидрометеорологическое издание, 1967. 356 с.

Marchuk G.I. Numerical methods in weather forecast. L.: Gidrometeorologicheskoe izdanie, 1967. 356 p. (in Russian).

12. Полякова Н.М., Ширяева Е.В. О вычислении коэффициента турбулентного переноса в задаче о седиментации примеси // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 4–1. С. 44–50.

Poljakova N.M., Shirjaeva E.V. On the calculation of the turbulent transport coefficient in the problem of sedimentation of an impurity // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki. 2017. № 4–1. P. 44–50 (in Russian).

13. Петрова А.А., Смагин В.В. Сходимость метода Галеркина приближенного решения параболического уравнения с весовым интегральным условием на решение // Известия вузов. Математика. 2016. № 8. Р. 49–59.

Petrova A.A., Smagin V.V. Convergence of the Galyorkin method of approximate solving parabolic equation with weight integral condition. Russian Mathematics. 2016. Vol. 60. № 8. P. 42–51. DOI: 10.3103/S1066369X16080053.

14. Увижева Ф.Х., Калажоков Х.Х. Применение метода расщепления и спектрального метода Галеркина к задачам региональной экологии // Успехи современного естествознания. 2019. № 10. С. 132–140. DOI: 10.17513/use.37226.

Uvizheva F.H., Kalazhokov H.H. Application of the splitting method and the Galerkin spectral method to the problems of regional ecology // Advances in current natural sciences. 2019. № 10. P. 132–140 (in Russian).

УДК 911.375

ПРЕДПОСЫЛКИ И ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В КРИЗИСНЫЕ СИТУАЦИИ С УЧЕТОМ ВОСПРИЯТИЯ И ПОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДОВ И СОЦИАЛЬНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБЩНОСТЕЙ

Копосова Н.Н., Волкова А.В.

ФГБОУ ВО Нижегородский государственный педагогический университет имени К. Минина, Нижний Новгород, e-mail: repulenko@mail.ru

Тема преобразования и оптимизации урбанистической среды в последнее время привлекает особое внимание. В статье рассматриваются проблемы городских территорий, связанные с кризисными ситуациями, в частности таких объектов городской среды, как общественные пространства. Необходимо изучить возможную трансформацию общественных пространств с целью сохранения их функций по улучшению качества жизни населения, среди которых – коммуникация, поддержание физической формы, психологического благополучия, общая социализация граждан и ряд других. В статье рассмотрены некоторые предложения по изменению городской среды. Это, например, разграничение общественных территорий с помощью разметки, превращение кровель зданий в парки с контейнерным озеленением с целью поддержания физического и психологического здоровья граждан, зонирование территорий общественных пространств. Все это поможет в будущем не изолировать городские территории от населения, а оптимизировать и трансформировать их под нужды граждан, не создавая при этом угрозы распространения заболевания. Авторы приходят к мнению, что в ближайшем будущем у городов будет больше возможностей преодолевать подобные кризисы, которые, безусловно, будут периодически случаться. Также авторами сделан прогноз о возможных изменениях в образе жизни населения, условиях занятости, трансформации городской среды после кризиса эпидемиологического характера. Среди возможных изменений следует отметить некоторое замедление развития таких новых форм организации трудового пространства и проживания, как коворкинги и коливинги, сокращение строительства офисных зданий, усиление автоматизации городского пространства, повышение роли онлайн-сервисов, многофункциональность и возможность быстрой трансформации различных объектов городской среды при возникновении подобных кризисных ситуаций.

Ключевые слова: городская среда, качество жизни населения, общественное пространство, эпидемиологическая ситуация, оптимизация

BACKGROUND AND FACTORS OF CHANGE OF URBAN PUBLIC SPACES IN CRISIS SITUATIONS WITH ACCOUNT OF PERCEPTION AND BEHAVIOR OF INDIVIDUALS AND SOCIO-TERRITORIAL COMMUNITIES

Koposova N.N., Volkova A.V.

Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, e-mail: repulenko@mail.ru

The topic of transformation and optimization of the urban environment has recently attracted special attention. The article discusses the problems of urban areas associated with crisis situations, in particular of such objects of the urban environment as public spaces. It is necessary to study the possible transformation of public spaces in order to preserve their functions to improve the quality of life of the population, including communication, maintaining physical fitness, psychological well-being, general socialization of citizens and a number of others. The article discusses some suggestions for changing the urban environment. This, for example, delimitation of public territories by means of marking, turning roofs of buildings into parks with container gardening in order to maintain the physical and psychological health of citizens, zoning the territories of public spaces. All this will help in the future not to isolate urban areas from the population, but to optimize and transform them according to the needs of citizens, without creating a threat of the spread of the disease. The authors come to the conclusion that in the near future cities will have more opportunities to overcome such crises, which, unconditionally, will happen periodically. The authors also made a forecast about possible changes in the lifestyle of the population, conditions of employment, and the transformation of the urban environment after an epidemiological crisis. Among them there is a slight slowdown in the development of such new forms of organizing labor space and living as coworking and co-living, reducing the construction of office buildings, enhancing the automation of urban space, increasing the role of online services, multifunctionality and the ability to quickly transform various objects of the urban environment in the event of similar crisis situations.

Keywords: urban environment, quality of life of the population, public space, epidemiological situation, optimization

В последнее время тема организации общественных пространств становится все более актуальной. Этому способствовала реализация идеи национальных проектов, в рамках которой были выделены значительные суммы на исследования, подготовку технических заданий, самих проектов, реорганизацию общественных пространств, работу с населением (изучение общественного мнения и т.п.). Все эти мероприятия были направлены на оптимизацию общественных пространств для улуч-

шения качества жизни людей в обычное, «мирное» время. Сложившаяся ситуация во время пандемии показала неготовность общественных пространств выполнять ряд своих функций. После стабилизации ситуации в стране общественные пространства претерпят ряд изменений, как и городская среда в целом.

Исходя из вышесказанного целью нашего исследования является изучение способов оптимизации общественных пространств для выполнения ими функций по улучшению качества жизни населения в кризисных ситуациях.

Материалы и методы исследования

Среди методов исследования особое внимание уделяется сравнительному, исследовательскому, типологическому, аналитическому методам, методу прогнозирования. Материалами являются опубликованные исследования архитектурного бюро STRELKA CA.

Результаты исследования и их обсуждение

Мы понимаем под общественными пространствами городской среды различные территории для свободного посещения граждан с целью проведения своего досуга, т.е. пространства коммуникации. Вследствие этого можно выделить ряд функций, которые подобные пространства должны выполнять, среди них – использование территорий для проведения массовых мероприятий, улучшения здоровья и общего самочувствия граждан, коммуникации, экологические функции, обеспечение безопасности.

В период кризисных ситуаций, например эпидемий, некоторые функции выполняться общественными пространствами не должны: это коммуникационные функции, использование данных территорий для общественных мероприятий. Но к общественным пространствам относятся не только площади и парки, посещение которых с целью проведения досуга запрещено в режиме повышенной готовности. К общественным пространствам относятся также улицы с пешеходным движением, перекрестки, которые используются населением для передвижения; кроме того, существуют еще территории городской среды, на которых происходит скопление населения независимо от кризисных ситуаций. К таким территориям относятся подъезды, продовольственные магазины, аптеки, остановки общественного транспорта.

Крайне важно, чтобы городская среда в любых ситуациях была безопасна для граждан, особенно в режиме повышенной готовности, когда часть ее функций трансформируются, а также городская среда должна соответствовать требованиям и правилам, принятым правительством страны, потому что все общественные пространства во время таких кризисных ситуаций, как, например, пандемия, – это места повышенной опасности. Сложившаяся ситуация обозначила все «белые пятна» на карте устойчивости городской среды.

Ряд идей, отвечающих таким требованиям, был предложен сотрудниками архитектурного бюро STRELKA CA [1]. Среди них маркировка дистанции на улицах (1,5 м), наносимая на тротуары в местах скопления людей – у пешеходных переходов, на остановках. Такая разметка может встречаться на тротуарном покрытии не повсеместно, а через 500 метров как напоминание, показывающее удаленность до другого пешехода, либо, если это остановка или место ожидания на переходе, – нанесенные на тротуарное покрытие окружности, также с определенной дистанцией. Подобную разметку наносят и в магазинах, во многих продовольственных магазинах страны такая мера уже принята.

Мы считаем, что подобные идеи в кризисных ситуациях просто необходимы, так как они позволяют гражданам не терять бдительности, постоянно напоминая о сложившейся ситуации, кроме того, помогают людям с повышенной тревожностью избегать паники.

Также архитекторы предлагают установить съемные разделители на скамейки, которые не позволят людям сидеть слишком близко друг к другу. Нам такая мера кажется не столь необходимой вследствие запрещения посещения парков и площадей для прогулок.

При режиме повышенной готовности люди довольно редко выходят из дома. Общественные пространства, такие как парки, скверы и детские площадки, больше не выполняют функции по укреплению здоровья, наоборот – являются объектами повышенной опасности, кроме того, их посещение запрещено. Поскольку физические нагрузки и свежий воздух необходимы всем группам населения, особенно детям, группа архитекторов STRELKA CA предложила также использовать в летние месяцы в этих целях крыши домов. Эта идея может быть реализована в виде летнего парка, размещенного

на крыше дома, для которого используется временное контейнерное озеленение. Предполагается согласование жильцами дома посредством социальных сетей времени посещения данного пространства, чтобы избежать скопления населения и риска заражения.

Мы считаем данную идею заслуживающей наибольшего внимания, поскольку, помимо пользы от прогулок на свежем воздухе, крайне важное значение такие «парки» имеют для восстановления психологического здоровья, ведь в режиме самоизоляции люди вынуждены подолгу находиться на замкнутой территории, что при условии небольшой площади квартиры может вызвать ряд психологических проблем. Кроме того, на такую территорию могли бы иметь доступ только жильцы данного дом, с гарантией невозможности проникновения посторонних.

Правила посещения таких территорий во избежание конфликтов между жильцами должны прорабатываться администрацией города (например, от 30 минут до 1 часа в день на каждую квартиру в зависимости от количества жильцов в доме либо подъезде). За каждым подъездом можно закрепить определенные территории, которые будут изолированы друг от друга, чтобы минимизировать скопление населения и не сокращать время посещения «парка». Созданы приложения с QR-кодами на выход из дома, аналогичную (с определенными изменениями) систему можно применить и в данной ситуации.

Мы считаем, что в продолжение этой идеи на рынке недвижимости приобретут особую популярность квартиры, имеющие балконы, ведь они являются одновременно и частью квартиры, и в некоторой мере общественным пространством, поскольку они позволяют быть на улице, не выходя при этом из дома, кроме того, с них можно общаться с теми, кто находится на улице. Кроме то, больше будут цениться дома с внутренней, огороженной территорией.

Помимо парков на крышах домов, исследователи STRELKA CA разработали концепцию приложения, которое позволило бы посещать реальные парки, которые закрыты для посетителей на время карантина. Путем подобного приложения можно было бы забронировать участок парка или какой-то прогулочный маршрут на определенный промежуток времени, правда, для этого необходимо в парках, участвующих в этой программе, нанести разметку маршрутов, а также промаркировать возможную дистанцию. Получение QR-кода на недолгое посещение определенного участка парка позволило бы гражданам улучшить свое самочувствие, а также избежать психологического дискомфорта вследствие нахождения в замкнутом пространстве своих квартир. Безусловно, что парки выбираются жителями в непосредственной близости от дома и не допускается посещение игровых зон, где расположены аттракционы.

Как отмечают многие урбанисты, сложившийся из-за пандемии 2020 г. режим, безусловно, изменит ряд функций городской среды, хотя пока сложно прогнозировать, до какой степени трансформируются некоторые из них. Городские общественные пространства в этот период находятся в состоянии заброшенности. Появляются новые термины, среди которых, например, «дизайн, отвечающий требованиям социального дистанцирования». Некоторые исследователи (среди которых профессор Калифорнийского университета в Сан-Диего, автор ряда книг Бенджамин Браттон) считают, что многие последствия карантина станут постоянными, поскольку часть общественных мест, выполнявших определенные функции, превратились в компьютерные приложения, которые можно использовать внутри дома, и домашняя среда заменяет человеку общественные пространства [2]. Речь идет о ряде сервисов по доставке товаров, удаленном образовании для ряда специалистов и пр. Также Б. Браттон утверждает, что наши общества сейчас упрощены до основных функций, среди которых продовольствие, медицина, транспортное сообщение, и большая часть такого упрощенного взаимодействия останется и после отмены карантина. Данное утверждение не лишено смысла, но мы считаем, что делать такие выводы преждевременно, потому что в период «затворничества» населению остро не хватает социализации. Нам кажется, что многие практики онлайн-платформ действительно обретут еще большую популярность вследствие широких возможностей их применения, но общественные пространства, среди которых центральные площади городов, пешеходные улицы, парки, получат огромную популярность у населения после завершения карантина.

Мнения, что многие не захотят возвращаться к некоторым докарантинным моделям поведения, придерживает и глава Центра городской экономики КБ «Стрелка» Е. Короткова. Она приводит гипотезу

М. Портера, основная мысль которой заключается в том, что жесткие ограничения дают толчок к возникновению инноваций и повышению эффективности [3]. По словам Е. Коротковой, даже те люди, которые в это время освоили онлайн-платформы и были вынуждены ими пользоваться, оценили их удобства и уже не захотят тратить денежные и временные ресурсы на перелеты в другие города и страны (например, для переговоров). Кроме того, многие граждане, изменившие свои привычки по необходимости (например, практически перестали пользоваться общественным транспортом и пересели на велосипеды или стали ходить пешком, когда это, конечно, возможно), впредь уже не захотят от них отказываться.

Трансформация или замедление формирования могут произойти и в таких новых формах объединения для работы и для проживания, как коворкинги и коливинги. Сложившаяся эпидемиологическая обстановка показала несовершенство подобных форм. Во время подобных эпидемий самым «крупным» объединением является семья, находящаяся в замкнутом пространстве своей квартиры или дома. Существование же таких новых форм проживания, как коливинги, ставится под угрозу, поскольку на одной территории проживает довольно большое количество людей. Переход к новым формам совместной жизни, конечно, не будет прекращен полностью, но, видимо, замедлится.

Еще одна совместная форма, только касающаяся не проживания, а работы, – коворкинги. В период эпидемий такой подход к организации труда невозможен вследствие большого скопления населения, поэтому подобные формы, актуальные для многих крупных городов, также перестают функционировать.

Мы также придерживаемся мнения, что в дальнейшем у городов будет больше возможностей переживать подобные кризисы, которые, к сожалению, ввиду увеличения количества населения будут периодически случаться. Так, все вирусные заболевания распространяются в городской среде очень быстро вследствие повышенного скопления населения. Этому также способствуют ускоренный ритм городской жизни, необходимость длительных поездок в городском транспорте, неизбежные контакты в торговых центрах, офисах, оторванность горожан от естественной природной среды [4]. Безусловно, город не всегда может быть готовым к разного рода кризисам, форс-мажорные обстоятельства потенциально возможны, и в планировании городской среды нельзя учесть все варианты, но все-таки принять к сведению этот урок необходимо, чтобы в будущем, при повторении подобных кризисов эпидемиологического характера, перестраивание хозяйства и оптимизация городской среды проходили менее болезненно.

Как будет трансформироваться городская среда в ближайшее время? Мы считаем, что, во-первых, изменения коснутся ряда помещений, занимаемых бизнесом, не выдержавшим изменившейся ситуации, в частности офисных помещений, которые занимали разорившиеся сейчас фирмы, например туристические. Кроме того, офисные помещения станут не нужны ряду фирм с небольшим количеством сотрудников, занятость которых позволяет работать удаленно. Так, вынужденно переведя работников на новую форму занятости, возможно, работодатель не посчитает нужным возвращаться к аренде помещения (сэкономив при этом на самой аренде, техническом оснащении рабочего места, ремонте техники, решении различных коммунальных вопросов и т.п.); некоторые помещения, занимаемые под ресторанный бизнес, также ждет трансформация. Сложившаяся ситуация приведет к снижению арендной платы за офисные помещения ввиду их большого количества, а также к снижению темпов их строительства, а это в свою очередь окажет влияние на городскую планировку.

Многие исследователи говорят об усилении субурбанизации крупных населенных пунктов. Понятие субурбанизации вообще характерно для городов России, особенно центральных регионов, а во время кризисов эпидемиологического характера и запрета на посещение общественных мест, перехода на удаленный формат работы переезд на дачные участки становится особенно актуальным. Дачные участки, расположенные в пригороде, позволяют избегать повышенного скопления населения и в целом способствуют стабилизации психологическо-эмоционального состояния.

Безусловно, городская среда трансформируется во времени вне зависимости от кризисов в связи с постоянно меняющимися условиями жизни. В современном мире эти преобразования происходят усиленными темпами. Иногда становится трудно учесть интересы всех заинтересованных сторон и подстроиться под противостоящие друг другу субъекты: обывателей,

представителей экономического сектора и политических структур [5]. Жители хотят использовать определенную территорию города для проведения своего досуга, те же самые территории могут быть запланированы для использования каких-либо бизнес-проектов либо же для изъятия из пользования для восстановления экологического потенциала города.

Если подобные, как пандемия 2020 г., кризисные ситуации будут случаться чаще, учитывать интересы всех сторон будет еще сложнее. Поэтому необходимо выбирать такие формы взаимодействия и такие виды природопользования, когда возможно совместное использование территории, а один вид эксплуатации какого-то ресурса не исключает другого. Например, при необходимости строительства жилого или офисного здания вместо небольшого сквера можно использовать внешнюю поверхность здания под озеленение: стены, кровлю, применяя контейнерное озеленение на крыше для создания своеобразного парка, разместить экопарковки, таким способом будут учтены интересы разных сторон. Потребности нескольких возрастных групп населения по проведению досуга в городских парках можно учесть, зонируя пространство, выделяя велосипедные дорожки, секторы детских площадок, огороженные площадки для тренировки собак, пешеходные дорожки для пожилых людей, спортивные территории, коммуникативные территории для концертов и развлечений.

Выводы

Любые кризисные ситуации в стране влияют на качество жизни населения, на мировоззрение граждан, находят отражение они и в городской среде, в планировании общественных пространств. Сложившаяся весной 2020 г. ситуация повлияет на многие сферы жизни населения, в том числе трансформация коснется и ряда общественных пространств и их функций, которые должны изменяться в зависимости от нужд населения.

Одно из новых направлений, на которое будет направлена трансформация, – это многофункциональность, когда один объект может выполнять несколько функций. Так, жилой дом с размещенным на нем контейнерным озеленением способен совмещать функции здания и парка для прогулок, обширные помещения – галерей, гостиниц – могут трансформироваться в госпитали.

Многие сферы жизни будут переведены на онлайн-платформы, которые способны использоваться чаще, чем до эпидемиологического кризиса. Сложившаяся ситуация доказала, что автоматизация многих сфер жизни крайне важна и является основой стабильности, а в ряде случаев – и единственно возможным путем поддержания благосостояния граждан.

Возможно, в будущем при возникновении подобных ситуаций городские общественные пространства не будут полностью изолированы от граждан, а их посещение будет ограничено, но все-таки допустимо при принятии определенных мер и соответствующей подготовке.

Список литературы / References

1. Головкин К. 7 идей по адаптации города к карантину от архитекторов STRELKA CA. [Электронный ресурс]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/kak-adaptirovat-gorod-k-karantinu (дата обращения: 07.05.2020).

Golovkin K. 7 ideas on adapting the city to quarantine from architects of The STRELKA CA. [Electronic resource]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/kak-adaptirovat-gorod-k-karantinu (date of access: 07.05.2020) (in Russian).

2. Браттон Б. 18 уроков карантинного урбанизма. [Электронный ресурс]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/18-urokov-karantinnogo-urbanizma (дата обращения: 28.04.2020).

Bratton B. 18 lessons of quarantine urbanism. [Electronic resource]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/18-urokov-karantinnogo-urbanizma (date of access: 28.04.2020) (in Russian).

3. Докучаева А. Эпидемия страха или страх эпидемии: как вирусы меняют наши дома, образ жизни и экономику города. [Электронный ресурс]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/epidemiya-strakha-ili-strakh-epidemii-kak-virusy-menyayut-nashi-doma-obraz-zhizni-i-ekonomiku-goroda (дата обращения: 11.05.2020).

Dokuchaeva A. An epidemic of fear or fear of an epidemic: how viruses are changing our homes, lifestyle, and city economy [Electronic resource]. URL: https://strelkamag.com/ru/article/epidemiya-strakha-ili-strakh-epidemii-kak-virusy-menyayut-nashi-doma-obraz-zhizni-i-ekonomiku-goroda (date of access: 11.05.2020) (in Russian).

4. Волкова А.В., Копосова Н.Н. Устойчивое развитие городов Нижегородской области // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 42–46.

Volkova A.V., Koposova N.N. Sustainable development of cities of the Nizhny Novgorod region // Advances in current natural sciences. 2019. № 5. P. 42–46 (in Russian).

5. Бабаева А.В., Крашенинников А.А. Антропологическое измерение пространства современного города // Вестник Мининского университета. 2019. Т. 7. № 2. [Электронный ресурс]. URL: https://vestnik.mininuniver.ru/jour/article/view/994 (дата обращения: 07.05.2020). DOI: 10.26795/2307-1281-2019-7-2-14.

Babayeva A.V., Krasheninnikov A.A. Anthropological measurement of modern city space // Vestnik of Minin University. 2019. Vol. 7. № 2. [Electronic resource]. URL: https://vestnik.mininuniver.ru/jour/article/view/994 (date of access: 07.05.2020) (in Russian).

УДК 556:627.8(470.325)

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ГИДРОУЗЛА БЕЛГОРОДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

[1]Коржов И.В., [1,2]Журавлёв А.А.

[1]ФГБУ «Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр», Ростов-на-Дону, e-mail:uch-sekrwxc.shemet@yandex.ru;
[2]Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова ФГБОУ ВО Донской ГАУ, Новочеркасск, e-mail:sasha201133@rambler.ru

В рассматриваемом исследовании проведена оценка эффективности информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы Белгородского водохранилища. Необходимость в разработке инструментария вызвана сложной водохозяйственной обстановкой, сложившейся в бассейне р. Северский Донец, что подтверждено результатами анализа фактических режимов работы Белгородского водохранилища за период 2010/2011–2019/2020 гг. Основаниями для разработки инструментария послужили: ввод в постоянную эксплуатацию информационно-аналитического блока контроля состояния и режимов работы водохранилищ, анализ соответствия фактических режимов действующим Правилам использования водных ресурсов в составе Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) и разработка проекта правил использования водных ресурсов Белгородского водохранилища. В статье дается краткое описание структуры, технических возможностей, а также основных достоинств информационно-аналитического инструментария. Для оценки эффективности работы разработанного инструментария выполнено моделирование основных режимов работы Белгородского водохранилища для различных по водности лет (50 %, 75 %, 95 % обеспеченности). Полученные результаты свидетельствуют о том, что выполненные с помощью информационно-аналитического инструментария расчеты позволяют эффективно использовать водные ресурсы водохранилища. На основе выполненных расчётов осуществляется автоматизированная подготовка информационно-аналитических материалов, что несомненно, способствует повышению оперативности принятия решений при управлении режимами работы Белгородского водохранилища. Использование информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы водохранилища, безусловно, является одним из основных способов оптимизации режимов работы гидроузлов комплексного назначения. Информационно-аналитический инструментарий для управления режимами работы Белгородского водохранилища на р. Северский Донец успешно внедрен на рабочих местах отдела водных ресурсов Белгородской области Донского бассейнового водного управления.

Ключевые слова: режим работы водохранилища, водохозяйственный год, годовой сток, предполоводная сработка, половодье, межень, информационно-аналитический инструментарий, водохозяйственный баланс

INFORMATION AND ANALYTICAL TOOLS FOR MANAGING THE OPERATION MODES OF THE BELGOROD RESERVOIR WATERWORKS

[1]Korzhov I.V., [1,2]Zhuravlev A.A.

[1]FGBU «Russian information-analytical and research water management center», Rostov-on-Don, e-mail: uch-sekrwxc.shemet@yandex.ru;
[2]Novocherkassk Institute of Reclamation Engineering after A.K. Kortunov, FGBOU VO Donskoy GAU, Novocherkassk, e-mail:sasha201133@rambler.ru

In this study, the effectiveness of information and analytical tools for managing the operation modes of the Belgorod reservoir was evaluated. The need to develop tools is caused by the complex water management situation in the Seversky Donets river basin, which is confirmed by the results of the analysis of the actual operating modes of the Belgorod reservoir for the period 2010/2011–2019/2020. The basis for the development of the Toolkit was put into permanent operation of information-analytical control unit the status and operation modes of the reservoirs, analysis of the actual modes with the existing Rules of water use in the Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS SMWB) and development of draft rules of use of water resources of the Belgorod reservoir. The article provides a brief description of the structure, technical capabilities, as well as the main advantages of information and analytical tools. To assess the effectiveness of the developed tools, the main modes of operation of the Belgorod reservoir were simulated for different water years (50 %, 75 %, 95 % availability). The results obtained show that calculations performed using information and analytical tools allow efficient use of water resources of the reservoir. Based on the calculations performed, automated preparation of information and analytical materials is carried out, which undoubtedly contributes to improving the efficiency of decision-making in managing the operation modes of the Belgorod reservoir. The use of information and analytical tools for managing reservoir operation modes is, of course, one of the main ways to optimize the operation modes of integrated water systems. Information and analytical tools for managing the modes of operation of the Belgorod reservoir on the Seversky Donets river have been successfully implemented at the workplaces of the water resources Department of the Belgorod region of the don basin water management.

Keywords: reservoir operation mode, water management year, annual runoff, pre-water discharge, high water, mezhen, information and analytical tools, water management balance

В условиях неравномерного распределения водных ресурсов по территории Российской Федерации, наличия районов страны с их дефицитом или избытком, а также роста водопотребления для нужд населения и экономики страны в целом требуется рациональный и комплексный подход по их использованию и управлению. Одним

из возможных решений данного вопроса является оптимизация режимов работы гидроузлов комплексного назначения, поэтому разработку информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы водохранилища можно считать одним из способов ее достижения [1, с. 11].

Цель исследования: проведение оценки эффективности информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы Белгородского водохранилища как одного из мероприятий оптимизации режимов работы гидроузлов комплексного назначения.

Материалы и методы исследования

Информационной базой послужили сведения о фактических режимах работы Белгородского водохранилища, данные о современном уровне водопотребления на водохозяйственном участке 05.01.04.001.01 – р. Северский Донец от истока до створа Белгородского гидроузла, а также инструментарий разработанного комплекса.

В качестве основных методов исследования были использованы эмпирический (изучение и анализ имеющихся сведений) и теоретический (моделирование) методы исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Белгородское водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока р. Северский Донец для целей водоснабжения Белгородского промышленного района и частично г. Шебекино, улучшения санитарного состояния р. Северский Донец, орошения сельхозугодий, прилегающих к водохранилищу, любительского и спортивного рыболовства, отдыха жителей г. Белгорода и прилегающих районов, а также для обеспечения гарантированных расходов воды в пограничном с Украиной створе.

Основным источником питания рек в бассейне р. Северский Донец являются талые снеговые воды, поэтому его водный режим характеризуется выраженным весенним половодьем и низкой меженью в остальное время года. Весенний подъем уровней в р. Северский Донец начинается в конце февраля – начале марта. Пик половодья наблюдается в большинстве случаев в марте. Половодье продолжается 1,5–2 месяца, а в годы с затяжной весной длительность половодья увеличивается до 2,5–3 месяцев.

Последующий летне-осенний период характеризуется длительным стоянием низких уровней воды, иногда нарушаемых кратковременными дождевыми паводками.

Зимняя межень устанавливается в конце ноября и заканчивается в конце февраля – начале марта; ее продолжительность составляет 70–120 дней. Зимний период отличается устойчивостью уровней, которые по своей величине несколько выше уровней летней межени [2–4]. Основные характеристики Белгородского водохранилища приведены в табл. 1 [5].

Для оценки современного состояния Белгородского водохранилища был выполнен анализ фактического режима работы водохранилища за период 2010/2011–2019/2020 гг. (здесь и далее по тексту указываются водохозяйственные годы (в/х)). Фактические значения годового стока р. Северский Донец в створе Белгородского гидроузла за период 2010/2011–2019/2020 гг. приведены в табл. 2.

Согласно данным, полученным из электронного журнала состояния и режимов работы Белгородского водохранилища, содержащего сведения о фактических режимах работы водохранилищ, выявлено, что за рассматриваемый период:

1) максимальное наполнение Белгородского водохранилища наблюдалось 13.04.2017 – 17.04.2017, 19.04.2017, 13.04.2019 – 26.04.2019 до отметки 114,5 м в балтийской системе высот (БС), минимальное – 111 мБС (31.10.2018 – 06.11.2018). Наполнение выше НПУ 114,5 мБС не осуществлялось. Снижение отметок уровней воды в водохранилище ниже УМО 110 мБС не осуществлялось;

2) приток к водохранилищу за выбранный период составил 1225,1 млн м^3. Максимальное значение суточного притока к водохранилищу расходом 38,2 м^3/с наблюдалось 12.04.2018, минимальное значение 0,2 м^3/с наблюдалось 29.07.2010, 20.08.2010, 23.08.2010 – 25.08.2010, 08.11.2010 – 09.11.2010, 11.06.2015, 09.07.2015, 14.07.2015, 09.08.2015 – 10.08.2015, 21.08.2015, 27.08.2015;

3) попуск в нижний бьеф водохранилища за выбранный период составил 1120,38 млн м^3;

4) максимальный сбросной расход 23,35 м^3/с 25.04.2018 – 27.04.2018, минимальный – 0,9 м^3/с 03.10.2012, 07.06.2017 – 08.08.2017;

5) объемы водохранилища изменялись в пределах от 76 млн м^3 до 16,88 млн м^3. Процент наполнения изменялся в пределах от 100 % до 13,21 % [6].

Таблица 1

Основные технико-эксплуатационные характеристики Белгородского водохранилища

№ п/п	Наименование параметров	Единицы измерения	Значения
Естественные водные ресурсы в створе гидроузла			
1	Средний годовой сток	млн м^3	234,9
2	Сток 0.1% обеспеченности	млн м^3	577,11
3	Сток 1% обеспеченности	млн м^3	475,88
4	Сток 5% обеспеченности	млн м^3	392,94
5	Сток 25% обеспеченности	млн м^3	288,87
6	Сток 50% обеспеченности	млн м^3	226,11
7	Сток 75% обеспеченности	млн м^3	170,93
8	Сток 95% обеспеченности	млн м^3	106,91
Характерные проектные уровни воды водохранилища (у плотины)			
1	Форсированный подпорный уровень (ФПУ)	м	114,5
2	Нормальный подпорный уровень (НПУ)	м	114,5
3	Уровень мертвого объема (УМО)	м	110
4	Уровень предполоводной сработки (УПС)	м	113,5
Топографическая характеристика водохранилища			
1	Объем водохранилища при ФПУ	млн м^3	76
2	Объем водохранилища при НПУ	млн м^3	76
3	Объем водохранилища при УМО	млн м^3	7,88
4	Полезный объем	млн м^3	68,12
5	Площадь зеркала при ФПУ	км^2	23,1
6	Площадь зеркала при НПУ	км^2	23,1
7	Площадь зеркала при УМО	км^2	7,6

Таблица 2

Фактический годовой сток р. Северский Донец к Белгородскому водохранилищу за период 2010/2011–2019/2020 гг.

В/х год	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
Объем млн м^3	101,7	88,8	86,9	111,9	85,9	86,7	165,8	138,6	219,4	139,4

Анализ водохозяйственной ситуации в бассейне р. Северский Донец показал, что за период 2010/2011–2019/2020 гг. лишь в 2018–2019 в/х году фактический годовой сток к Белгородскому водохранилищу практически достиг объема стока среднего по водности года 50% обеспеченности. В 2016/2017 в/х году фактический объем стока находился на уровне стока для года 75% обеспеченности, тогда как в период 2010/2011–2015/2016 гг. наблюдалась череда маловодных лет, а в 2017/18–2019/2020 в/х годах объем стока находился на границе объема стока для лет 75% и 95% обеспеченности (рис. 1).

Кроме того, анализ данных на продленном хронологическом графике годового стока р. Северский Донец к Белгородскому водохранилищу свидетельствует о наличии тенденции уменьшения объема годового стока (рис. 2) [3, 7]. Для продления гидрологического ряда на период 2010/2011–2019/2020 гг. были использованы данные о фактических годовых объемах стока р. Северский Донец к Белгородскому водохранилищу [6].

Ввиду сложной водохозяйственной обстановки в бассейне р. Северский Донец, разработки и ввода в постоянную эксплуатацию информационно-аналитического блока контроля состояния и режимов работы водохранилищ, анализа соответствия фактических режимов действующим Правилам использования водных ресурсов в составе Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), а также с учетом разработки проекта правил использования водных ресурсов Белгородского водохранилища

возникла необходимость в создании информационно-аналитического инструментария для управления Белгородским водохранилищем [3, 8, 9].

Информационно-аналитический инструментарий для управления режимами работы Белгородского водохранилища на р. Северский Донец предназначен для достижения максимальной эффективности использования водных ресурсов и работы гидроузла Белгородского водохранилища. Инструментарий обеспечивает возможность оперативного расчета и корректировки вариантов режимов работы водохранилища с учетом поступающих прогнозов приточности к створу гидроузла при пропуске половодий в период летне-осенней межени и в предполоводный период [10].

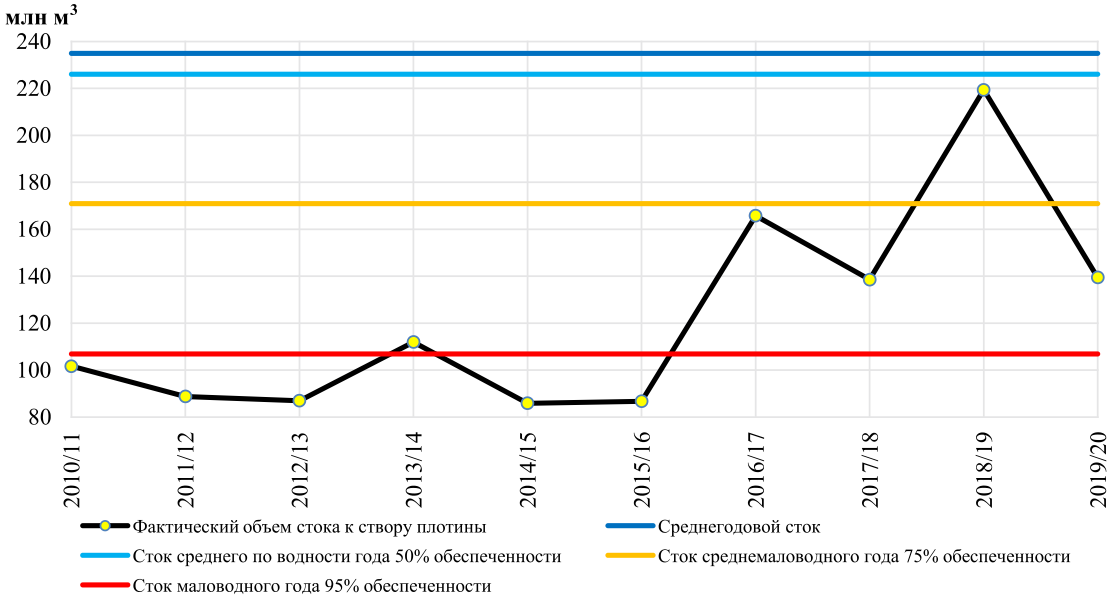


Рис. 1. Фактический годовой объем стока к Белгородскому водохранилищу за период 2010/11–2019/20 гг. относительно объема стока различной обеспеченности

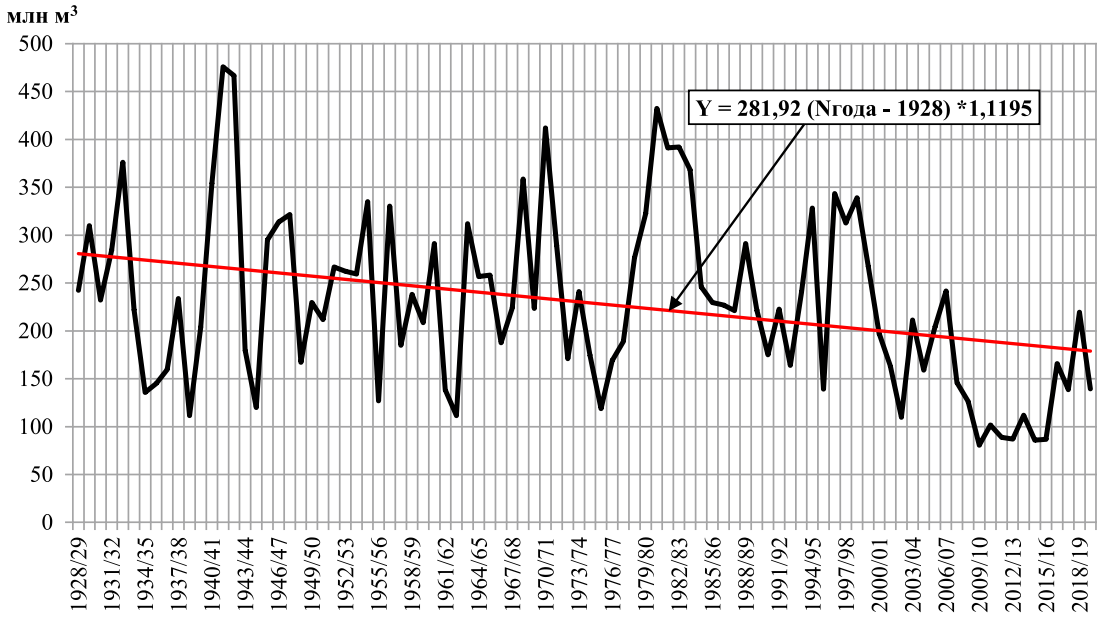


Рис. 2. Хронологический график годового объема стока р. Северский донец к Белгородскому водохранилищу

Структура информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы Белгородского водохранилища представлена на рис. 3.

В настоящее время информация о прогнозах приточности воды к створу Белгородского гидроузла на период половодья отсутствует. В соответствии с этим в комплексе предусмотрена возможность поиска, обработки и корректировки подходящего гидрографа приточности воды к водохранилищу за ретроспективный период по заданным характеристикам половодья, таким как объем половодья, максимальный расход, даты начала и конца половодья и дата прохождения пика половодья.

Также стоит отметить, что информационно-аналитический инструментарий Белгородского водохранилища успешно интегрирован с программным информационно-аналитическим комплексом анализа режимов работы водохранилищ (ПИАК), что позволяет использовать актуальную информацию о фактическом режиме работы Белгородского водохранилища (сведения о приточности воды к водохранилищу, сбросу в нижний бьеф и уровне верхнего бьефа).

В качестве примера работы информационно-аналитического инструментария было проведено моделирование основных режимов работы Белгородского водохранилища: предполоводной сработки, пропуска весеннего половодья, а также работы водохранилища в период межени для разных по водности лет (50%, 75%, 95% обеспеченности) (рис. 4). Результаты смоделированных расчетов представляются в графической и табличной форме. Табличная форма представления результатов выполнена в виде расчета водохозяйственного баланса (ВХБ) (табл. 4–6). Данные условно-естественного стока р. Северский Донец в створе Белгородского гидроузла для водохозяйственных лет (50%, 75%, 95% обеспеченности), использованные для расчета, приведены в табл. 3 [3].

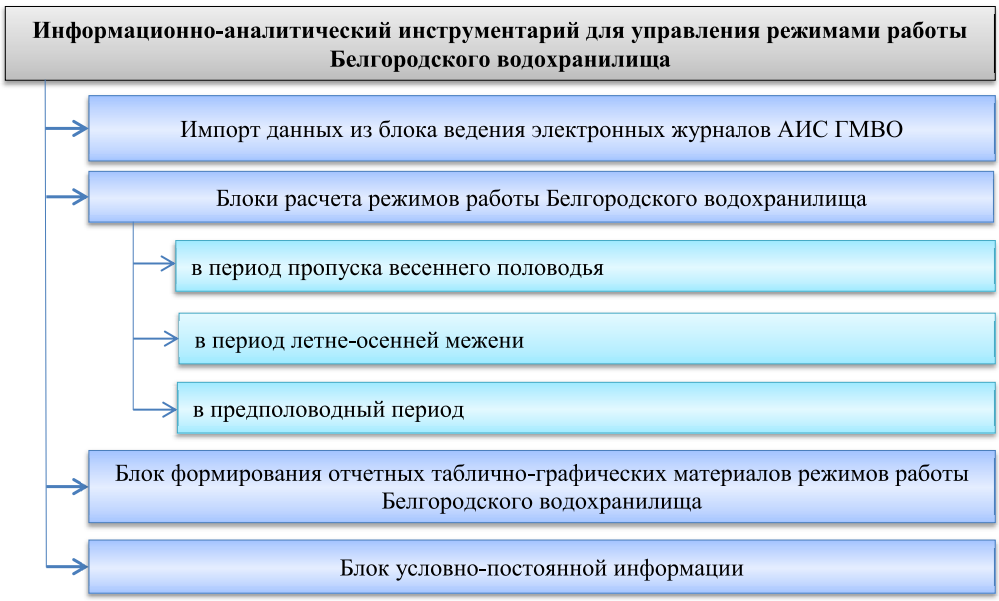


Рис. 3. Структура информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы Белгородского водохранилища

Таблица 3

Условно-естественный сток р. Северский Донец в створе Белгородского гидроузла для водохозяйственных лет (50%, 75%, 95% обеспеченности)

В/х год	Месяцы												Объем, млн м^3
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	
50%	12,4	23,5	4,3	3,5	4,4	3,4	4,1	5,9	5,3	4,3	7,2	5,9	221,9
75%	5,5	15,7	4,7	1,9	1,4	2,8	3,3	2,4	5,2	3,9	2,8	16,5	171,9
95%	6,2	3,5	1,8	1,8	1,6	0,9	3,5	6,5	6,5	2,1	2,5	1,9	101,8

В качестве основных условий для моделируемых режимов работы водохранилища были выбраны следующие:

– уровень на начало предполоводной сработки (1 ноября) установлен 113,56 мБС;

– уровень воды в водохранилище на момент окончания предполоводной сработки (28 февраля) должен быть установлен на отметке не выше 113,5 мБС;

– использованы данные современного уровня водопотребления на водохозяйственном участке 05.01.04.001.01 – р. Северский Донец от истока до створа Белгородского гидроузла.

Заключение

Полученные результаты моделирования основных режимов работы Белгородского водохранилища свидетельствуют о том, что выполненные с помощью информационно-аналитического инструментария (ИАИ) расчеты позволяют эффективно использовать водные ресурсы водохранилища. На основе выполненных расчётов осуществляется автоматизированная подготовка информационно-аналитических материалов, что несомненно, способствует повышению оперативности принятия решений при управлении режимами работы Белгородского водохранилища.

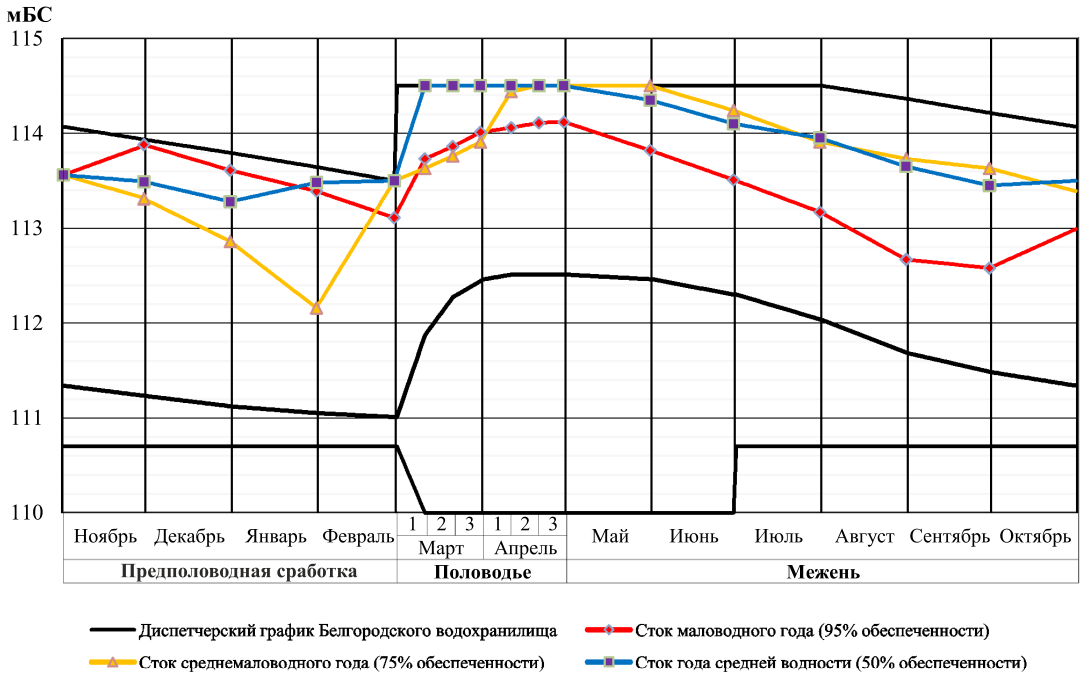


Рис. 4. Совмещенный график моделирования основных режимов работы Белгородского водохранилища в условиях различной водности

Таблица 4

Пример расчета приходной части ВХБ для года 95 % обеспеченности при пропуске половодья

Наименование составляющей	Итого млн м^3	Март			Апрель		
		1	2	3	1	2	3
Приходная часть:							
1. Сток на участке	25,799	7,6	5,6	5,6	3,9	3,7	2,9
2. Подзем воды, не связанный с поверхностным стоком	6,282	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192
3. Сработка прудов и водохранилищ	0,532	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101
4. Возвратные воды на участке	7,51	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425	1,425
4.1. Коммунально-бытовые	6,609	1,254	1,254	1,254	1,254	1,254	1,254
4.2. Промышленные	0,29	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
4.3. Рыбного хозяйства	0,611	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
Итого:	40,123	10,318	8,318	8,318	6,618	6,418	5,618

Таблица 5

Пример расчета расходной части ВХБ для года 95 % обеспеченности при пропуске половодья

Наименование составляющей	Итого млн м^3	Март			Апрель		
		1	2	3	1	2	3
Расходная часть:							
1. Коммунально-бытовое водоснабжение	7,199	1,366	1,366	1,366	1,366	1,366	1,366
2. Промышленное водоснабжение	3,257	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618
3. Орошение	0,084	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
4. Сельскохозяйственное водоснабжение	0,179	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
5. Рыбное хозяйство	0,611	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
6. Наполнение прудов и водохранилищ	0,538	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
7. Потери в прудах и водохранилищах	0,216	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
Итого:	12,084	2,293	2,293	2,293	2,293	2,293	2,293

Таблица 6

Пример расчета попусков, потерь и режима водохранилища в ВХБ для года 95 % обеспеченности при пропуске половодья

Наименование составляющей	Итого млн м^3	Март			Апрель		
		1	2	3	1	2	3
Попуски:							
1. Санитарная проточность	5,27	1	1	1	1	1	1
2. Дополнительный гарантированный попуск	10,541	2	2	2	2	2	2
3. Холостой сброс	0	0	0	0	0	0	0
Итого:	15,811	3	3	3	3	3	3
Потери:							
1. Потери из водохранилища на доп. испарение	0	0	0	0	0	0	0
Итого:	0	0	0	0	0	0	0
Режим водохранилища, млн.м^3:							
Наполнение	12,228	4,342	2,614	2,875	1,145	0,972	0,281
Опорожнение	0	0	0	0	0	0	0
Объем воды в водохранилище		59,762	62,375	65,25	66,395	67,367	67,648
Отметка уровня, м		113,73	113,86	114,01	114,06	114,11	114,12
% наполнения		78,63	82,07	85,86	87,36	88,64	89,01
Свободная емкость		16,238	13,625	10,75	9,605	8,633	8,352
Дефицит	0	0	0	0	0	0	0

Одним из достоинств ИАИ Белгородского водохранилища является возможность выбора варианта расчета водохозяйственного баланса для разных режимов работы водохранилища с учетом диспетчерского графика, что позволяет автоматически определять зоны и назначение соответствующих отдач для каждого интервала времени.

Следует отметить, что использование информационно-аналитического инструментария для управления режимами работы водохранилищ является одним из мероприятий, способствующих обеспечению устойчивого водопользования [11].

Информационно-аналитический инструментарий для управления режимами работы Белгородского водохранилища на р. Северский Донец успешно внедрен на рабочих местах отдела водных ресурсов Белгородской области Донского бассейнового водного управления.

Список литературы / References

1. Журавлёв А.А. Проблема нехватки водных ресурсов для социальных, экологических и экономических нужд в Российской федерации на примере Ростовской области // Научный форум. Инновационная наука: сборник статей по материалам XIII международной научно-практической конф. № 4 (13). М.: «МЦНО», 2018. С. 5–13.

Zhuravlev A.A. The Problem of lack of water resources for social, environmental and economic needs in the Russian Federation on the example of the Rostov region // Scientific forum. Innovative science: collection of articles based on the materials of the XIII international conference. scientific-practical Conf. № 4 (13). M.: «MCNO», 2018. P. 5–13 (in Russian).

2. Белгородское водохранилище на р. Северском Донец. Технический проект. Том 2. Природные условия. Книга 1.

Климат и гидрология. № 218-2-Т1 / «Гидропроект» им. С.Я. Жука. М., 1970. 262 с.

Belgorod reservoir on the Seversky Donets river. Technical project. Volume 2. Geographical description. Book 1. Climate and hydrology. No. 218-2-T1 / «Gidroproyekt» im. S.Ya. Zhuka. M., 1970. 262 p. (in Russian).

3. Правила использования водных ресурсов Белгородского водохранилища: пояснительная записка к проекту. Новочеркасск: СевКавНИИВХ, 2012. 341 с.

Rules for using water resources of the Belgorod reservoir: explanatory note to the project. Novocherkassk: SevKavNIIVH, 2012. 341 p. (in Russian).

4. Режимы использования водных ресурсов Белгородского водохранилища на р. Сев. Донце / ГПИО «Энергопроект», «Гидропроект». М., 1990. 59 с.

Modes of use of water resources of the Belgorod reservoir on the SEV river. Donce / SPIO «Energoproekt», «Gidroproekt». M., 1990. 59 p. (in Russian).

5. Информационно-аналитические материалы о режимах работы водохранилищ, 2018 год / Федеральное агентство водных ресурсов, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр». Новочеркасск: Лик, 2019. 490 с.

Information and analytical materials on the modes of operation of reservoirs, 2018 / Federal Agency of water resources, Federal state budgetary institution «Russian information and analytical and research water management center». Novocherkassk: Lik, 2019. 490 p. (in Russian).

6. Электронный журнал Белгородского водохранилища АИС ГМВО. [Электронный ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 20.05.2020).

Electronic journal of the Belgorod reservoir AIS GMVO. [Electronic resource]. URL: https://gmvo.skniivh.ru (date of access: 20.05.2020) (in Russian).

7. Косолапов А.Е., Коржов И.В., Чмыхов А.А. Гидролого-водохозяйственные исследования при разработке правил использования водных ресурсов Белгородского водохранилища на реке Северский Донец // Естественные и технические науки. 2017. № 8 (110). С. 38–49.

Kosolapov A.E., Korzhov I.V., Chmikhov A.A. Hydrological and water management research in the development of rules for the use of water resources of the Belgorod reservoir on the Seversky Donets river // Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki. 2017. № 8 (110). P. 38–49 (in Russian).

8. Приказ Росводресурсов от 31 декабря 2015 № 320 «О вводе в постоянную эксплуатацию программного информационно-аналитического комплекса анализа режимов работы водохранилищ». Росводресурсы. 2015. 4 с.

Order of the Federal Agency of water resources dated December 31, 2015 No. 320 «on putting into permanent operation of the software information and analytical complex for analyzing reservoir operation modes». Rosvodresursy. 2015. 4 p. (in Russian).

9. Приказ Росводресурсов от 10 февраля 2014 года № 35 «О вводе в постоянную эксплуатацию автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL:http://docs.cntd.ru/document/420279560 (дата обращения: 20.05.2020).

Order of the Federal Agency for water resources dated February 10, 2014 № 35 «On putting into permanent operation the automated information system for state monitoring of water bodies of the Russian Federation». [Electronic resource]. URL: http://docs.cntd.ru/document/420279560 (date of access: 20.05.2020) (in Russian).

10. Разработка систем поддержки принятия решений для управления режимами водохранилищ в бассейнах со сложной водохозяйственной обстановкой: отчет о НИР (промежуточ.) ФГБУ РосИНИВХЦ / рук. Косолапов А.Е.; исполн.: Коржов И.В., Ткаченко И.В., Приходько М.А., Журавлёв А.А. Ростов-на-Дону, 2017. 98 с.

Development of decision support systems for managing reservoir regimes in basins with complex water management conditions: report on research (interim) of the Federal state budgetary institution Rosinivkhts / ruk. Kosolapov A.E.; performers: Korzhov I.V., Tkachenko I.V., Prikhodko M.A., Zhuravlev A.A. Rostov-na-Donu, 2017. 98 p. (in Russian).

11. Косолапов А.Е. Цимлянское водохранилище в условиях длительного периода пониженной водности // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения: сборник научных трудов. Сочи, 2017. С. 31–36.

Kosolapov A.E. Tsimlyanskoe reservoir in the conditions of a long period of low water content // Vodnyye resursy: novyye vyzovy i puti resheniya: sbornik nauchnykh trudov. Sochi, 2017. P. 31–36 (in Russian).

УДК 502:504.54:911.2:911.52:519.876

ЗЕМЕЛЬНЫЕ УГОДЬЯ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИИ

Мазуркин П.М.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, e-mail: kaf_po@mail.ru

Иерархию субъектов федерации на примере Сибирского федерального округа предложено выявлять по местам в рейтинге, по площади угодий, по территориальному и экологическому принципам. Оба принципа были рассмотрены на субъектах федерации федеральных округов. Территориальный принцип присущ всему живому и конкурентно определяется наращиванием вокруг себя площади территории. Он формулируется очень просто: чем больше площадь земель, тем лучше. По ГОСТ 26640-85 угодья – это земли, которые используются или пригодны для хозяйственных целей. Они отличаются по природно-историческим признакам. В итоге угодья являются преобразованными человеком территориями. Причем люди свои потребности в расширении территории установили как безоговорочный закон. В итоге другие виды живого вещества страдают. На уровне государств к XXI в. границы территорий определились. Но территориальный принцип ныне является мало управляемым внутри государств. В будущем должен доминировать экологический принцип, который учитывает человека как часть природы, причем доминирующими будут дикие растения. Границы федеральных округов, субъектов федерации и даже муниципалитетов могут изменяться. Для научно обоснованного изменения территорий необходимо выявлять закономерности распределений угодий. Для этого следует признать, что населением является не только человек, но животные и растения. Тренд является частным случаем колебания. Он исходит из модифицированного нами для математики закона Лапласа, физики – закона Мандельброта, биологии – закона Ципфа – Перла, эконометрики – закона Парето. Приведены графики распределения по фракталам Мандельброта угодий по площади с коэффициентом корреляции более 0,99.

Ключевые слова: субъекты федерации, угодья, площадь, экологический принцип, закономерности

LAND AREAS OF THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT OF RUSSIA

Mazurkin P.M.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: kaf_po@mail.ru

It is proposed to identify the hierarchy of the subjects of the federation by the example of the Siberian Federal District in places in the ranking by area of land according to territorial and environmental principles. Both principles were considered in the constituent entities of the federal districts. The territorial principle is inherent in all living things and is competitively determined by the increase in the area of the territory around itself. It is formulated very simply: the larger the land area, the better. According to GOST 26640-85, lands are lands that are used or suitable for economic purposes. They differ in natural-historical signs. As a result, the lands are human-transformed territories. Moreover, people set their needs to expand the territory as an unconditional law. As a result, other types of living matter suffer. At the state level, by the 21st century, the borders of territories have been determined. But the territorial principle is now poorly managed within states. In the future, the environmental principle should prevail, which takes human beings into account as part of nature, with wild plants dominating. The boundaries of federal districts, federal subjects and even municipalities are subject to change. For scientifically substantiated changes in territories, it is necessary to identify patterns of land distribution. For this, it should be recognized that the population is not only a person, but animals and plants. Trend is a special case of fluctuation. It starts from the Laplace law we modified for mathematics, the physics of the Mandelbrot law, the biology of the Zipf-Pearl law, the econometrics of the Pareto law. Mandelbrot fractal distribution plots of land a correlation coefficient of more than 0.99 are presented.

Keywords: subjects of the federation, lands, area, environmental principle, laws

Угодья – это используемые или пригодные к использованию земли. Ныне хозяйственные цели первичны в отношениях между человеком и другими субъектами природы. Человек доминирует, а биоцентризм требует равенства с другими существами.

В современную эпоху прогнозируемых изменений климата актуальными становятся вопросы изменения условий жизнедеятельности человека [1–3]. А для их решения необходимо вначале рассмотреть распределения земель по 13 видам угодий.

Цель исследования – методом идентификации [4] выявление закономерностей площади на 01.01.2019 [5] несельскохозяйственных видов угодий ($s_6 ... s_{13}$) в субъектах Сибирского федерального округа по двум принципам: территориальному и экологическому.

Материалы и методы исследования

В [5] имеется приложение 2, из которого нами были выделены восемь видов несельскохозяйственных угодий.

Колебания (вейвлет-сигналы) записываются волновой формулой [4] вида

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}),$$

$$A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}),$$

$$p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \qquad (1)$$

где y – показатель, i – номер составляющей (1), x – объясняющая переменная, a_1... a_8 – параметры (1); A_i – амплитуда (половина) вейвлета, p_i – полупериод колебания.

Амплитуда $y = A$ при $a_2 = 0$ и $a_4 = 1$ превращается в закон $y = a_1 \exp(-a_3 x)$, который в математике называется законом Лапласа, физике – Мандельброта, биологии – Циппфа–Перла и эконометрике – Парето. Модифицированная нами конструкция имеет вид $y = a_1 \exp(-a_3 x^{a_4 \neq 1})$.

Распределение площади земель по территориям происходит по закономерности

$$s = a \exp(-bR^c), \qquad (2)$$

где s – площадь угодья, тыс. га, R – ранг (R = 0, 1, 2, 3,...), a, b, c – параметры уравнения (2), числовые значения которых ищутся в программной среде CurveExpert-1.40 [4].

Территориальный принцип. Стремление увеличивать свое жизненное пространство (территорию) на основе видовой и межвидовой конкуренции присуще каждому существу (человеку, животному или растению). Поэтому территориальный принцип формулируется так: чем площадь угодий больше, тем лучше. Физически убывающее распределение подчиняется закону (2). Однако по сравнению с кратными фракталами Мандельброта (по целым числам) площадь по рангам убывает по некратным фракталам, то есть по вещественным числам. В этом заключается отличие нашего подхода от кратных фракталов Мандельброта.

В табл. 1 приведены ранги распределения земель, $R = 0$ присваивается угодьям СФО. Тогда субъекты СФО распределяются по местам.

Ранг является влияющей переменной, а площадь угодий – показателем. Например, Красноярский край в СФО (ранг = 0) занимает первые места по шести видам несельскохозяйственных угодий.

Параметры модифицированного закона Мандельброта (2) даны в табл. 2.

Таблица 1

Ранги субъектов СФО по несельхозугодьям

Субъект федерации	Ранги площади по видам угодий							
	6	7	8	9	10	11	12	13
Сибирский ФО	0	0	0	0	0	0	0	0
1. Республика Алтай	8	6	10	10	10	9	10	3
2. Республика Тыва	4	2	7	9	9	6	6	4
3.Республ. Хакасия	10	10	8	8	8	10	4	5
4. Алтайский край	9	5	6	3	2	7	8	6
5. Красноярск. край	1	1	1	1	3	1	3	1
6. Иркутская область	2	4	2	2	1	5	2	2
7.Кем. обл. – Кузбасс	5	7	9	4	4	8	1	8
8. Новосибирск. обл.	6	3	3	5	5	3	9	7
9. Омская область	7	8	5	6	6	4	7	10
10. Томская область	3	9	4	7	7	2	5	9

Таблица 2

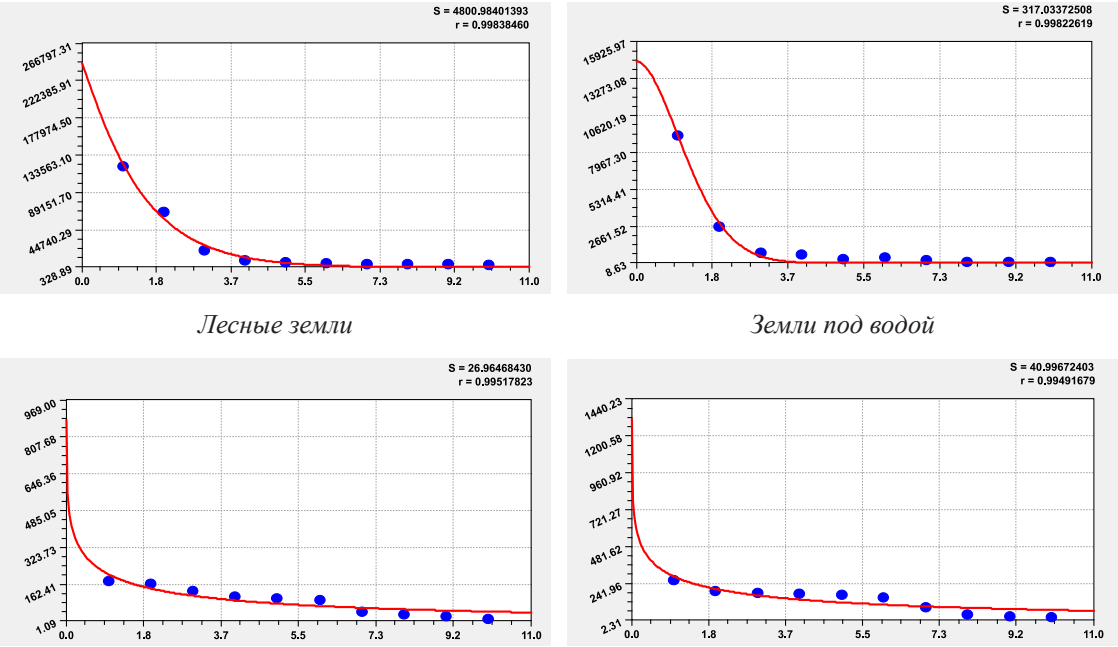
Распределения угодий субъектов СФО

Виды несельскохозяйственных земель	Параметры модели (2)			Коэф. корр. r
	a	b	c	
Лесные земли s_6, т. га	2,42576e5	0,67511	1,07852	0,9984
Лесные насажд. s_7	4913,0942	0,43558	2,42583	0,9952
Земли под водой s_8	14516,796	0,46491	1,80339	0,9982
Земли застройки s_9	881,29308	1,45386	0,31849	0,9952
Под дорогами s_{10}	1310,8297	1,52089	0,28660	0,9949
Болота s_{11}	40326,865	0,59131	1,27728	0,9988
Нарушен. земли s_{12}	170,86585	0,72746	1,05770	0,9950
Прочие земли s_{13}	93390,704	0,69807	1	0,9324

Таблица 3

Параметры модели (1) изменения площади угодий по субъектам СФО

Номер i	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}}\exp(-a_{3i}x^{a_{4i}})\cos(\pi x/(a_{5i}+a_{6i}x^{a_{7i}})-a_{8i})$								Коэф. корр. r
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
Лесные насаждения, не входящие в лесной фонд									
1	4910,3962	0	0.54197	2,57772	0	0	0	0	1,0000
2	-1511,1933	2,36434	0,41696	1	-21,39213	29.57933	1,27526	-1,52148	
Прочие земли									
1	85457,112	0	0.87887	1	0	0	0	0	1,0000
2	6,84397e6	5.71601	4,61933	1	3,31433	0	0	0	



Лесные земли *Земли под водой*

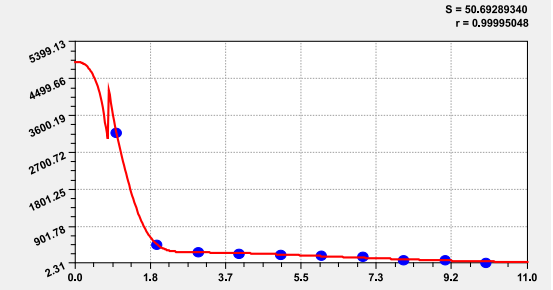
Земли застройки *Земли под дорогами*

Рис. 1. Графики распределения субъектов СФО по земельным угодьям (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

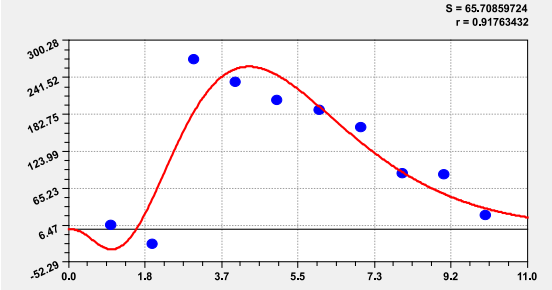
Уровень адекватности показывает, что угодья субъектов СФО подчиняются модифицированному закону Мандельброта (рис. 1). Кроме прочих земель, коэффициент корреляции выше 0,99. А распределения площади лесных насаждений и прочих земель, по табл. 3, сложны (рис. 2) и дополнительно дают волновое уравнение (1).

По остальным видам угодий также заметны малые колебания. Как видно из табл. 3, коэффициенты корреляции с включением колебания становятся больше 0,99995, и это приводит практически к 1,0000. Таким образом, территориальное распределение субъектов Сибирского ФО является вполне закономерным с высокой адекватностью моделей (1) и (2). Это означает, что субъекты федерации по своим земельным угодьям территориально показывают некратное фрактальное распределение по модифицированному закону Мандельброта.

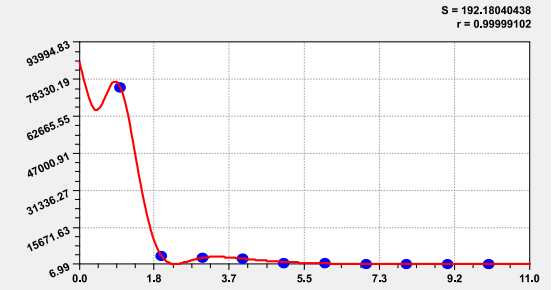
Из-за разных эвристических ориентаций ранги или места по табл. 1 нельзя складывать. При этом складывать можно только относительные величины одной ориентации.



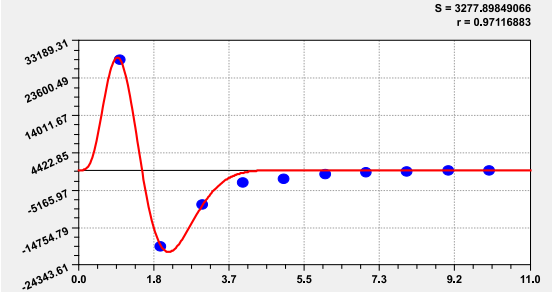
Тренд и колебание лесных насаждений



Колебание лесных насаждений, не входящих в ЛФ



Тренд и колебание прочих земель



Колебание прочих земель

Рис. 2. Графики распределения субъектов СФО по модели (1) с включением колебания

Экологический принцип. По В.И. Вернадскому, живое вещество на Земле по массе примерно одинаковое. Исторически плотность живого вещества, по-видимому, на поверхности суши примерно одинакова при равных климатических условиях. Со временем усиливалась внутривидовая и межвидовая конкуренция.

В табл. 4 даны экологические векторы видов несельскохозяйственных угодий.

Таблица 4

Направленность видов угодий

Виды несельскохозяйственных угодий	Меньше – лучше	Больше – лучше
6. Лесные земли s_6	–	+
7. Лесные насажд. s_7	–	+
8. Земли под водой s_8	–	+
9. Земли застройки s_9	+	–
10. Под дорогами s_{10}	+	–
11. Болота s_{11}	–	+
12. Наруш. земли s_{12}	+	–
13. Прочие земли s_{13}	+	–

К природным объектам относят первые три вида угодий, а также болота. Антропогенными являются земли застройки и под дорогами, а также нарушенные и прочие земли. Нарушенные земли могут быть и природными объектами. Прочие земли имеют неопределенность по отнесению к тем или иным видам угодий. Поэтому их следует отнести к отходам неэкологического хозяйства человека. С ними нужно определяться.

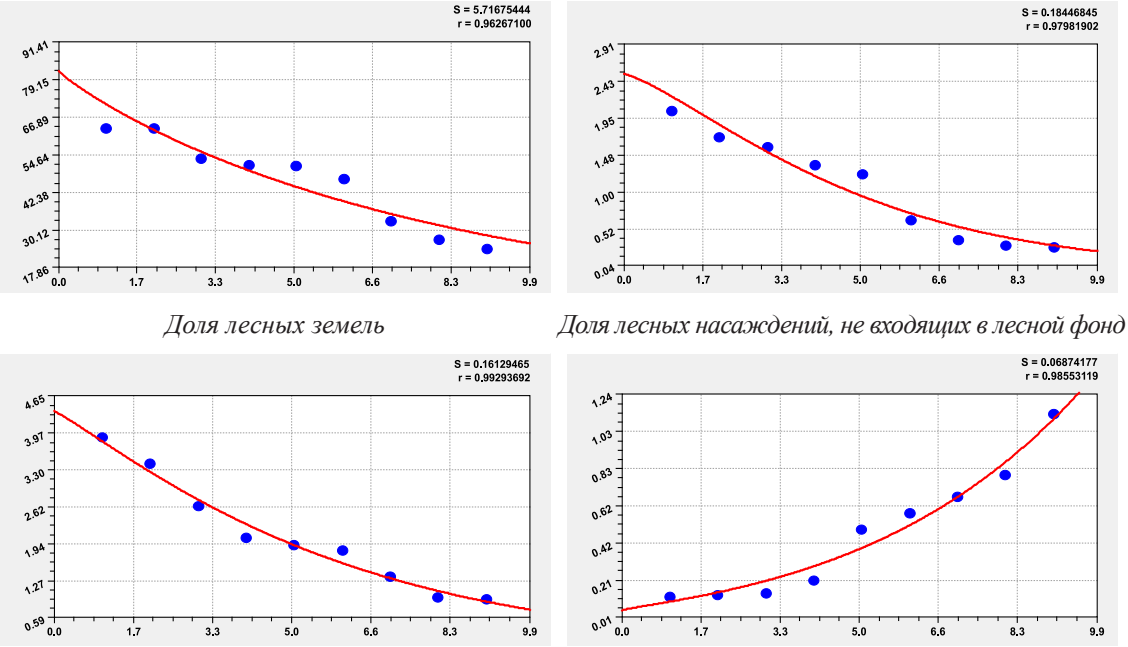
По каждому виду доли угодий (табл. 5) вычисляются так: $\alpha_{jk} = 100 S_{jk} / S$, где j – номер субъекта СФО (табл. 1), k – номер вида угодий (табл. 4); S – общая площадь [5].

По экологическому принципу хозяйствования первое место имеет Красноярский край. Второе место получает Томская область, а третье – Новосибирская область. Нулевые ранги Красноярский край имеет по землям застройки, угодьям под дорогами, затем $R = 1$ получает по землям под водой и нарушенным землям. Наибольшая доля лесов находится в Иркутской области, а максимальная доля лесных насаждений, не входящих в лесной фонд, находится в Республике Тыва. Таким образом, три из четырех субъектов Ангаро-Енисейского региона имеют хорошие стартовые условия по экологическому потенциалу для прогнозирования и развертывания социально-экономических преобразований.

Таблица 5

Распределение мест среди субъектов федерации СФО по видам не с/х угодий

j	s_6		s_7		s_8		s_9		s_{10}		s_{11}		s_{12}		s_{13}		ΣR	Место I
	i	α	i	α	i	α	i	α	i	α	i	α	i	α	i	α		
СФО		55,68		1,13		3,32		0,20		0,30		9,23		0,04		19,59		
1	6	46,90	1	2,05	9	0,93	1	0,12	2	0,25	8	0,79	0	0,00	8	29,68	35	6
2	4	51,41	0	2,67	7	1,35	2	0,13	1	0,17	4	6,09	3	0,03	7	15,41	28	4
3	3	53,42	7	0,38	6	1,82	5	0,49	5	0,64	9	0,52	5	0,24	6	11,42	46	10
4	9	23,99	5	1,23	3	2,63	8	0,79	8	1,16	5	2,23	2	0,02	4	2,44	44	8
5	5	51,10	4	1,35	1	3,90	0	0,07	0	0,08	3	9,59	1	0,01	9	31,63	23	1
6	0	85,28	8	0,30	2	3,41	4	0,21	4	0,34	6	2,21	3	0,03	5	4,61	32	5
7	1	63,46	2	1,71	8	0,96	9	1,13	9	1,82	7	0,94	6	0,92	3	1,73	45	9
8	8	27,00	3	1,58	0	4,31	6	0,58	6	0,94	1	17,21	1	0,01	2	1,12	27	3
9	7	33,07	6	0,63	4	2,05	7	0,67	7	1,07	2	14,36	4	0,04	1	0,50	38	7
10	2	63,42	9	0,28	5	1,93	3	0,14	3	0,28	0	29,18	2	0,02	0	0,38	24	2



Доля лесных земель

Доля лесных насаждений, не входящих в лесной фонд

Доля земель, находящихся под водой

Доля земель под застройками

Рис. 3. Ранговые распределения субъектов СФО по долям угодий

В табл. 6 (рис. 3 и рис. 4) даны параметры закона (2).

Из значений параметров уравнения (2) по табл. 6 видно, что коэффициент корреляции больше 0,96. В этом случае формула (2) имеет уровень адекватности «сильнейшая связь». Но в изменениях доли площади угодий субъектов Сибирского ФО России по экологическому принципу, что видно из графиков на рис. 3 и 4, возможны колебания.

Как видно из табл. 6, а затем по колебаниям и из табл. 7, чем меньше коэффициент корреляции тренда, тем выше амплитуда колебания. Колебание показывает неосознанность структуры угодий лицами, принимающими решения.

В табл. 7 и на рис. 5 показаны колебания, доводящие коэффициент корреляции более 0,99.

Три члена модели (1) получились у доли лесных насаждений, не входящих в лесной

фонд. Аналогичная модель с тремя членами была получена для доли прочих земель (для первых двух членов коэффициент корреляции стал равным 0,9990 и для третьего члена 0,8726).

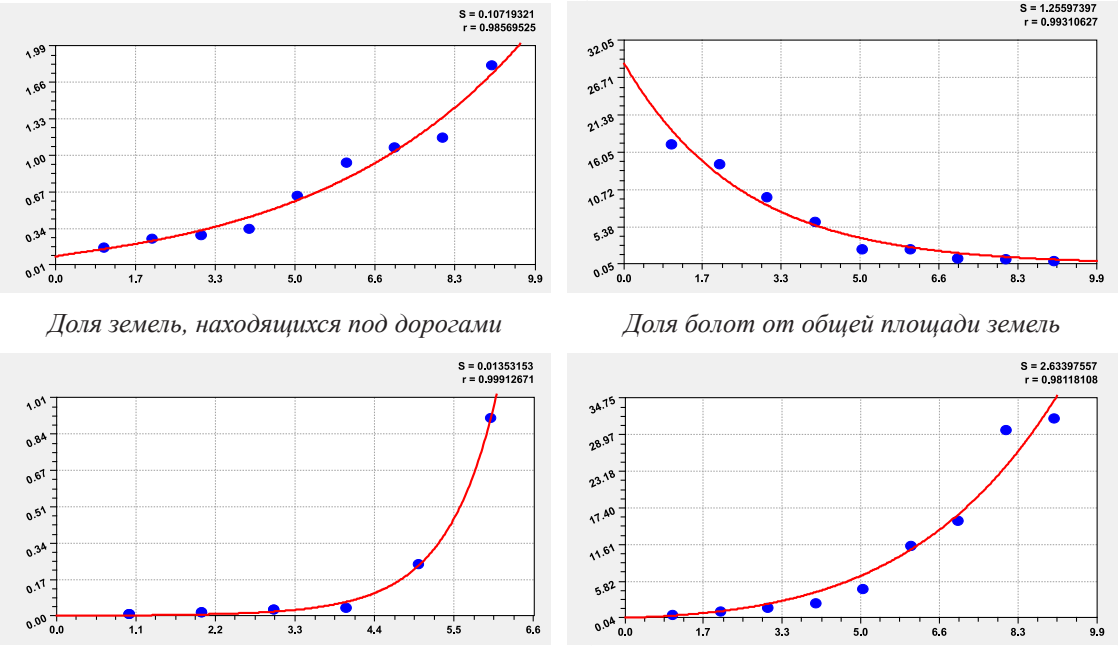
Заключение

Несельскохозяйственные угодья по субъектам СФО получили фрактальные распределения по модифицированному закону Мандельброта по двум принципам:

1) территориальному с коэффициентом корреляции больше 0,93, а для прочих земель с дополнением колебания все виды угодий получили адекватность более 0,99;

2) экологическому с коэффициентом корреляции больше 0,96, снова с учетом колебаний у нескольких видов угодий адекватность возросла и стала более 0,99.

Территориальный принцип доминирует в землепользовании и поныне. Об этом свидетельствует создание новой Архангельской области путем объединения двух субъектов федерации. Также, например, для выравнивания социально-экономического развития в новый Ангаро-Енисейский регион поместили внутри Сибирского федерального округа ФО Республику Тыва, Республику Хакассия, Красноярский край и Иркутскую область.



Доля земель, находящихся под дорогами

Доля болот от общей площади земель

Доля нарушенных угодий

Доля прочих земель

Рис. 4. Графики рангового распределения субъектов СФО по долям земельных угодий

Таблица 6

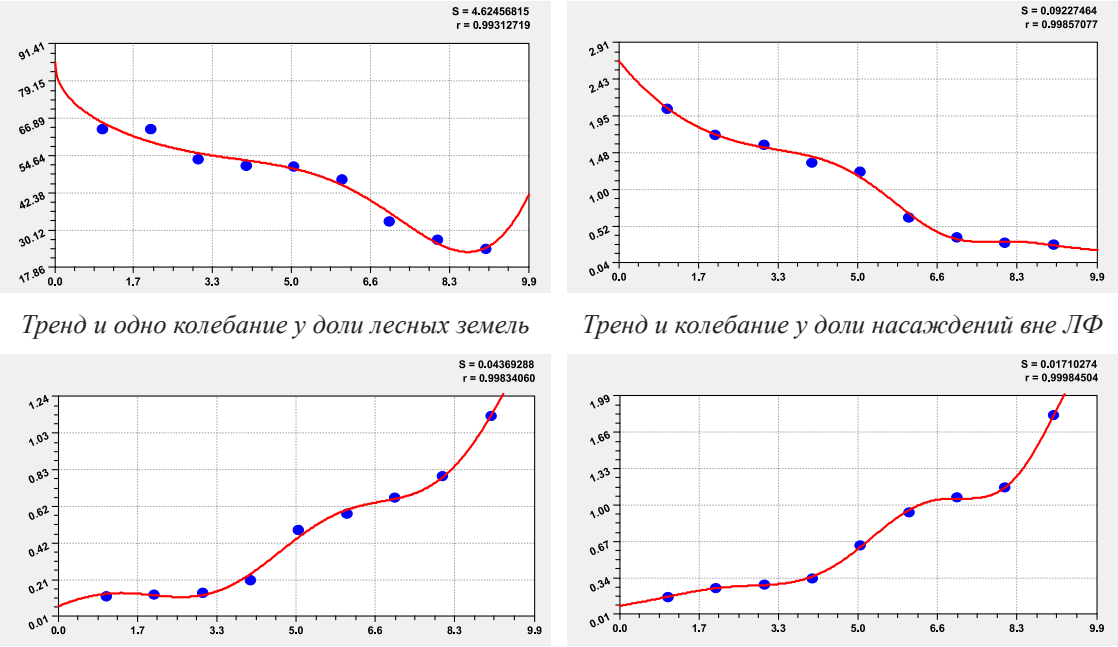
Распределение доли угодий СФО по рангам

Виды несельскохозяйственных земель	Параметры модели (2)			Коэф. корр. r
	a	b	c	
Лесные земли s_6, %	81,85031	0,14067	0,91877	0,9627
Лесные насажд. s_7	2,52774	0,12353	1,29435	0,9798
Земли под водой s_8	4,36810	0,13441	1,12620	0,9929
Земли застройки s_9	0,044626	-0,74177	0,66630	0,9857
Под дорогами s_{10}	0,083954	-0,59599	0,74035	0,9857
Болота s_{11}	28,74749	0,40523	1,00574	0,9931
Нарушенные земли s_{12}	0,0019074	-0,52598	1,37484	0,9991
Прочие земли s_{13}	0,024607	-2,83409	0,42698	0,9812

Таблица 7

Параметры модели (1) рангового распределения долей земель у субъектов СФО

Номер i	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}}\exp(-a_{3i}x^{a_{4i}})\cos(\pi x/(a_{5i}+a_{6i}x^{a_{7i}})-a_{8i})$								Коэф. корр. r
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
Доли лесных земель на территории субъектов Сибирского федерального округа, %									
1	85,46709	0	0,26181	0,49203	0	0	0	0	0,9931
2	-0,28940	0	-0,49930	1	3,75428	0,0088798	1	0,14881	
Доли лесных насаждений субъектов СФО, не входящих в лесной фонд, %									
1	3,03405	0	0,28474	0,97803	0	0	0	0	0,9986
2	-0,52983	0	0,00014701	4,70591	11,64435	-1,79146	0,70288	-0,81032	
3	-0,13461	4,64491	1,41136	1	1,04209	0	0	4,45100	0,9987
Доли земель застройки у субъектов СФО, %									
1	0,037441	0	-0,78620	0,67404	0	0	0	0	0,9983
2	0,048339	0	-0,11936	1	2,30846	0,012647	1,05051	1,01950	
Доля земель, находящихся под дорогами, у субъектов СФО, %									
1	0,083654	0	-0,59932	0,74035	0	0	0	0	0,9998
2	0,020230	1,54829	0,18137	0,77791	2,82941	-0,018188	1,54762	1,13963	



Тренд и одно колебание у доли лесных земель *Тренд и колебание у доли насаждений вне ЛФ*

Тренд и одно колебание у доли земель застройки *Тренд и колебание доли земель под дорогами*

Рис. 5. Графики колебательного распределения доли угодий по рангам у субъектов СФО

Нулевые ранги Красноярский край имеет по землям застройки, угодьям под дорогами, затем $R = 1$ получает по землям под водой и нарушенным землям. Наибольшая доля лесов находится в Иркутской области, а максимальная доля лесных насаждений, не входящих в лесной фонд, находится в Республике Тыва. Таким образом, три из четырех субъектов Ангаро-Енисейского региона имеют хорошие стартовые условия по экологическому потенциалу для прогнозирования и развертывания социально-экономических преобразований.

Предложенная в статье методика рангового распределения долей видов угодий может быть использована и для других федеральных округов Российской Федерации, а также для всех субъектов федерации в целом по России.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-45-240004р_а «Прогноз эколого-экономического потенциала возможных «климатических» миграций в Ангаро-Енисейском макрорегионе в меняющемся климате 21-го века».

Список литературы / References

1. Парфенова Е.И., Чебакова Н.М., Швецов Е.Г. Оценка суровости климата в аспекте комфортности для человека при изменении климата в 21 веке в Средней Сибири // Специфика этнических и миграционных процессов на территории Центральной Сибири в XX–XXI веках: опыт и перспективы. VI Международная научно-практическая конференция. Сборник материалов. Красноярск: СФУ, 2017. С. 70–73.

Parfenova E.I., Chebakova N.M., Shvetsov E.G. Evaluating the climate severity in terms of comfort for the humans under warming in Central Siberia in the 21st century // Specificity of ethnic and migration processes in Central Siberia in the XX–XXI centuries: experience and prospects. VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Sbornik materialov. Krasnoyarsk: SFU, 2017. P. 70–73 (in Russian).

2. Парфенова Е.И., Чебакова Н.М., Швецов Е.Г. Агро- и лесохозяйственный потенциал Сибири в условиях изменений климата в XXI веке // В сборнике: Математическое моделирование в экологии. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2017. С. 149–151.

Parfenova E.I., Chebakova N.M., Shvetsov E.G. Agro- and forestry potential of Siberia under the conditions of climate change in the XXI century // In the collection: Mathematical modeling in ecology. Pushchino: IFKhiBPP RAN, 2017. P. 149–151 (in Russian).

3. Parfenova E.I., Chebakova N.M., Soja A.J. Assessing landscape potential for human sustainability and ‘attractiveness’ across Asian Russia in a warmer 21st century. Environmental Research Letters. 2019. 14. 065004. DOI: 10.1088/1748-9326/ab10a8.

4. Мазуркин П.М. Земельные угодья федеральных округов Российской Федерации // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 106–113. DOI 10.17513/use.37370.

Mazurkin P.M. Land of the Federal Districts of the Russian Federation // Advances in current natural sciences. 2020. № 4. P. 106–113 (in Russian).

5. Распределение земель Российской Федерации по категориям в разрезе субъектов Российской Федерации (на 1 января 2019 года, тыс. га). Приложение 1. Ф. 22 за 2019 год (по субъектам РФ). М.: Минсельхоз РФ, 2019. 17 с.

Distribution of land of the Russian Federation into categories by regions of the Russian Federation (as of January 1, 2019, thousand hectares). Appendix 1. F. 22 for 2019 (for the constituent entities of the Russian Federation). M.: Minsel’khoz RF, 2019.17 p. (in Russian).

УДК 553.98

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ПРОГРАММА ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ЮЖНО-ЛЕБЕДИНСКОЙ ПЛОЩАДИ (ТИМАНО-ПЕЧОРСКИЙ НЕФТЕГАЗОНОСНЫЙ БАССЕЙН)

Маракова И.А.

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта, e-mail: imarakova@ugtu.net

Статья посвящена актуальной на сегодняшний день теме – поиску новых залежей нефти. В статье идет речь об особенностях геологического строения и перспективах нефтегазоносности Южно-Лебединской площади. Приведены данные о расположении исследуемой площади в тектоническом и нефтегазогеологическом отношении. Выполнен анализ нефтегазоносности изучаемой площади и определены её перспективы. В ходе работы выделены предполагаемые залежи нефти в отложениях джьерского возраста в пределах Южно-Лебединской структуры, тиманского и доманикового возраста в пределах Ариваньской структуры, сирачойского и усть-печорского возраста в пределах Кушьельской структуры. Произведена оценка ресурсов по категории $Д_0$. Подсчетные параметры (коэффициент нефтенасыщенности, плотность нефти, пересчетный коэффициент, коэффициент извлечения) приняты по аналогу – Лузскому месторождению. На Южно-Лебединской структуре по джьерским отложениям геологические ресурсы составили 40091 тыс. т, извлекаемые – 12027 тыс. т. На Ариваньской структуре по двум предполагаемым залежам суммарные ресурсы категории D_0 составили – 236 тыс. т (геологические) и 78 тыс. т (извлекаемые). Наиболее перспективной является Кушьельская структура. По этой структуре геологические и извлекаемые ресурсы двух предполагаемых залежей составили 759 тыс. т и 282 тыс. т соответственно. Основаниями для проведения поискового этапа геологоразведочных работ на Южно-Лебединской площади являются: высокие перспективы нефтегазоносности осадочного чехла Ижма-Печорской впадины; наличие рифовых ловушек и залежей в отложениях верхнего девона; подготовленность структуры к глубокому бурению. В работе представлена программа поисковых работ на исследуемой площади. Дана оценка геолого-экономической эффективности работ.

Ключевые слова: Тимано-Печорская провинция, перспективы нефтегазоносности, залежь, поисковая скважина, программа геологоразведочных работ, ресурсы

STRUCTURAL STYLE AND EXPLORATION PROGRAM AT YUZHNO-LEBEDINSKAYA AREA (TIMAN-PECHORA OIL AND GAS BASIN)

Marakova I.A.

Ukhta State Technical University, Ukhta, e-mail: imarakova@ugtu.net

The article is devoted to the current topic – the search for new oil deposits. The article deals with the features of the geological structure and the prospects of oil and gas potential of the South Lebedinsky area. The data on the location of the studied area in tectonic and oil and gas geological terms are given. An analysis of the oil and gas potential of the studied area is carried out and its prospects are determined. In the course of the work, the alleged oil deposits in sediments of the Dzhyer age within the South Lebedinsky structure, the Timanian and Domanic age on the Arivanskaya structure, the Syrachoy and Ust-Pechora age on the Kushyelskaya structure were identified. Assessed resources for category D_0. The estimated parameters (oil saturation coefficient, oil density, conversion factor, recovery coefficient) are taken according to the similarly of the Luzskoe oil field. Geological resources in the South Lebedinsky structure by Dzhyer sediments amounted to 40,091 thousand tons, recoverable – 12,027 thousand tons. On the Arivanskaya structure, the total resources of category D_0 for the two expect oil deposit were 236 thousand tons (geological) and 78 thousand tons (recoverable). The most promising is the Kushielskaya structure. By this structure, the geological and recoverable resources of the two expected oil deposits amounted to 759 thousand tons and 282 thousand tons, respectively. The grounds for carrying out the search stage for exploration on the South Lebedinsky area are: high prospects for oil and gas potential sedimentary cover of the Izhma-Pechora depression; the presence of reef traps and oil deposits in sediments of the Upper Devonian; preparedness of the structure for deep drilling. The paper presents a program of exploratory work on the studied area. An assessment of the geological and economic effectiveness of the work.

Keywords: Timan-Pechora province, oil and gas prospects, deposit, prospect well, exploration program, resources

Южно-Лебединская площадь расположена на территории Ижемского и Усинского районов Республики Коми. Территория характеризуется сложным тектоническим строением: блоковым строением фундамента в поддоманиковой части разреза, с востока ограничена нарушением, входящим в состав Припечорской системы разломов. Для поддоманиковой части разреза характерно наличие тектонически экранированных структур. В пределах рассматриваемой территории происходит выклинивание (стратиграфическое срезание) различных стратиграфических подразделений ордовикской, силурийской, девонской систем и соответственно значительно меняются мощности отложений осадочного чехла. На территории выделяется среднефранская (доманиковая) рифогенная зона барьерного типа.

На площади работ в предшествующие годы проводились геоморфологические, геологические, региональные и детальные аэромагнитные, гравиразведочные, электроразведочные и сейсморазведочные работы.

К настоящему времени на рассматриваемой территории проведен определенный объем сейсморазведочных исследований, позволяющих судить о структурно-тектоническом строении площади, но степень изученности сейсморазведкой все еще остается достаточно низкой. На территории Южно-Лебединской площади отработано 987 пог. км сейсмопрофилей МОГТ, изученность сейсморазведкой составляет 1,18 пог. км/км^2. Через рассматриваемую территорию проходит региональный профиль 28-РС.

Целью исследований является изучение особенностей геологического строения и обоснование основных направлений поисковых работ на Южно-Лебединской площади.

Материалы и методы исследования

В тектоническом отношении Южно-Лебединская площадь расположена на территории двух тектонических элементов I порядка, входящих в состав Ижма-Печорской синеклизы: восточного борта Ижма-Печорской синеклизы (Кипиевская ступень) и Ерсинской впадины.

Ижма-Печорская синеклиза представляет собой надпорядковый тектонический элемент, ограниченный на западе Тиманским кряжем, на северо-востоке Малоземельско-Колгуевской моноклиналью, на востоке структурами сложного Печоро-Колвинского авлакогена и Предуральского краевого прогиба [1].

По кровле карбонатных отложений нижней перми Ижма-Печорская синеклиза представляет собой асимметричную структуру северо-западного простирания размерами 800×100-200 км, ограниченную с запада и востока глубинными разломами.

В границах Ижма-Печорской синеклизы выделяются пять элементов I порядка: Нерицкая ступень, примыкающая к Тиманской гряде, Ерсинская депрессия и Ижемская ступень в северной части синеклизы, восточный борт Ижма-Печорской синеклизы и Омра-Лыжская седловина, охватывающая южную часть синеклизы.

Восточный борт Ижма-Печорской синеклизы является тектоническим элементом I порядка, представляет собой узкую структурную зону северо-западного простирания размерами 400×20-50 км, формирование которой связано во многом с тектоническим развитием Печоро-Колвинского авлакогена. В составе Восточного борта Ижма-Печорской синеклизы выделяются три структуры II порядка (с юга на север): Кипиевская и Янгытская ступени, Седуяхинский вал.

Кипиевская ступень (150×25-40 км) представляет собой пониженную седловину между Янгытской ступенью на севере и Лузской ступенью (Омра-Лыжская седловина) на юге с отметками кровли карбонатов нижней перми от минус 1150 до минус 1400 м. Западный борт ступени погружается в Ерсинскую депрессию, восточный примыкает к Печоро-Кожвинскому мегавалу. На территории Южно-Лебединской площади сейсмическими работами оконтурены две структуры: Ариваньская и Кушьельская, все на территории Кипиевской ступени. Структуры изучены очень слабо.

Ариваньская структура в виде антиклинальной складки выражена по ОГ IIIf_1 (D_3f_1) (но джьерские отложения отсутствуют), IIId (D_3dm) и IIIf_2 (D_3f_2) (с амплитудой не более 5,0 м). По ОГ II-III (C-D) и I_1 (P_1) структура отсутствует. Верхнедевонские и нижнепермские карбонатные постройки не картируются (в зоне предполагаемых фациальных изменений в доманиковых отложениях). Оконтуривается одной замкнутой изогипсой.

Кушьельская структура из всех представленных ОГ выражена только по ОГ II-III (C-D) и I_1 (P_1) с амплитудой не более 5,0 м (по остальным ОГ в виде структурного носа). Верхнедевонские карбонатные постройки не картируются. По ОГ I_1 (P_1) структура частично находится в контуре предполагаемой карбонатной постройки. Оконтуривается одной замкнутой изогипсой.

Южно-Лебединская тектонически экранированная структура расположена в центральной части Кипиевской ступени. Объект прослежен по подошве джьерских отложений, площадь по ОГ IIIdzr в контуре замкнутой изогипсы минус 3120 м, размер структуры 22,5×6,5 км, амплитуда – 170 м.

Нефтеперспективными в пределах изучаемой площади являются карбонатные отложения доманиково-турнейского комплекса. Прежде всего перспективы связаны с распространением позднедевонских рифогенных отложений. Полоса доманикового барьерного рифа протягивается в срединной части площади с севера на юг в субмеридиональном направлении от Чаркаюлуньвожской до Малолебединской структуры (обе структуры за предела-

ми площади) [2; 3]. Достоверное картирование зоны распространения рифогенных отложений является одной из основных задач по проведению геологоразведочных работ на рассматриваемой площади. Признаки нефтегазоносности отложений комплекса выявлены на территории смежной Чаркаюской площади в скважинах 1 и 2 – Чаркаюлуньвожские.

При опробовании доманиковых отложений в скважине 1-Чаркаюлуньвожская (два объекта) получены притоки минерализованной воды с фильтратом бурового раствора и газом. Рекомендованные на выяснение характера насыщения пласты были опробованы очень большим интервалом 2884-3364 м совместно с нижележащими водонасыщенными пластами доманикового, саргаевского, тиманского и джьерского горизонтов. При лабораторных исследованиях газа при высоком содержании азота (61,4%) и гелия (0,38%) и невысоком общем содержании углеводородов (37,4%) обнаружено присутствие тяжелых нефтяных углеводородов (C_5 – 3,2 г/нм^3), что характерно для пластовых вод в районе залежей тяжелых нефтей. В скважине 2-Чаркаюлуньвожская доманиковый горизонт представлен мелководно-шельфовыми карбонатами. По керну в интервалах 2874,1-2881,4; 2893,3-2885,5; 2896,6-2900,3 м известняки и доломиты коричневые за счет остаточного нефтенасыщения.

Возможно нефтенасыщенные интервалы в рифогенных доманиковых отложениях выделены в скважине 1-Лебединская. Промышленная нефтеносность доманикового барьерного рифа в сходных по генезису и строению ловушках установлена на целом ряде месторождений южнее Южно-Лебединской площади на территории Ижемской ступени (Макарьельское, Низевое, Южно-Низевое и др.). Залежи массивные сводовые, коллекторами порового и порово-кавернового типов служат доломитизированные известняки, флюидоупор – глинисто-карбонатная пачка сирачойского возраста [4].

Карбонатные отложения верхнего девона мелководно-шельфового генезиса также представляют поисковый интерес. По результатам переинтерпретации материалов ГИС перспективные (возможно нефтенасыщенные) интервалы выделены в обеих скважинах: в скважине 50-Восточно-Созьвинская в сирачойских, елецких и усть-печорских отложениях верхнего девона, в скважине 1-Лебединская в сирачойских и усть-печорских отложениях.

В пользу перспектив отложений подобного генезиса свидетельствует открытие промышленных залежей нефти на Лузском месторождении. Залежи приурочены к карбонатам сирачойского (верхний фран) и задонского (нижний фамен, пласт $Ф_0$) горизонтов верхнего девона. Залежи связаны с антиклинальными ловушками, массивного типа, экранируются соответственно карбонатно-глинистой евлановско-ливенской толщей и нижнефаменским пластом «Г». Коллекторы представлены известняками в различной степени доломитизированными, с порово-каверновым типом емкости.

На территории Южно-Лебединской площади прогнозируются залежи в доманиковых отложениях на Ариваньской и Лебединской структурах, в сирачойских и усть-печорских отложениях на Кушьельской, Восточно-Созьвинской и Лебединской структурах, в елецких отложениях на Восточно-Созьвинской структуре.

Результаты исследования и их обсуждение

Уточнение геологического строения площади работ по результатам переинтерпретации материалов сейсморазведки и бурения прошлых лет является основанием для проведения поискового этапа геологоразведочных работ на Южно-Лебединской площади.

К ним относятся:

– высокие перспективы нефтегазоносности осадочного чехла Ижма-Печорской впадины, где открыт ряд месторождений нефти и газа: Береговое, Лузское, Сотчемьюское, Среднекосьюское, Турчаниновское, Мичаюское, Восточно-Савиноборское, Нижнеомринское, Джебольское;

– наличие рифовых ловушек и залежей в отложениях верхнего девона;

– подготовленность структуры к глубокому бурению.

Программа геологоразведочных работ на Южно-Лебединской площади разработана в соответствии с основными задачами по проведению геологоразведочных работ и с соблюдением общепринятой этапности их проведения.

Программа предусматривает проведение на территории Южно-Лебединской площади следующих основных видов работ:

1) полевые сейсморазведочные работы 2D;

2) поисковое бурение.

2D-переинтерпретация сейсмических материалов прошлых лет по территории Южно-Лебединской площади явилась важ-

ным и необходимым этапом проведения геологоразведочных работ.

Выполнение переинтерпретации сейсмических материалов прошлых лет позволило решить следующие задачи: увязать структурные построения разных сейсмопартий, в том числе в районе ранее выявленных структур; выполнить структурные построения по всем основным поверхностям осадочного разреза (в том числе по кровле доманиковых рифогенных отложений); уточнить границы зоны распространения рифогенных отложений как наиболее перспективных для поисков нефти; уточнить линии выклинивания стратиграфических подразделений поддоманиковой части разреза и ниже; закартировать тектонические нарушения и связанные с ними тектонически экранированные ловушки; уточнить строение зоны сочленения Ижма-Печорской синеклизы и Печоро-Кожвинского вала (в направлении перспективных Мутноматерикового-2 и Мутноматериково-Терехевейского участков); рационально разместить новые сейсмопрофили для планируемых сейсморазведочных работ 2D.

По материалам планируемых сейсморазведочных работ 2D будет создана модель геологического строения территории площади, построены структурные карты по основным геологическим поверхностям. Будут выявлены и подготовлены объекты (структуры, ловушки различного генезиса), оценены их ресурсы нефти, выбраны первоочередные объекты под поисковое бурение.

Предполагается, что по результатам планируемых сейсморазведочных работ в районе Восточно-Созьвинской и Лебединской структур будут оконтурены ловушки того или иного типа, Ариваньская и Кушьельская структуры будут подготовлены к бурению.

Поисковое бурение

Для поискового бурения могут быть указаны следующие объекты:

1. Ранее выявленные объекты, по результатам бурения оказавшиеся неопоискованными или недоопоискованными (по перспективным горизонтам скважины заложены в неблагоприятных структурных или литолого-фациальных условиях), но сохраняющие перспективы выявления промышленных залежей нефти.

2. Ранее выявленные объекты, бурение на которых не проводилось.

3. Новые объекты (ловушки различного генезиса – структурные, рифогенные, тектонически экранированные, стратиграфические).

Таким образом, исходя из имеющейся на настоящий момент совокупности геолого-геофизической информации, объектами поискового бурения на Южно-Лебединской площади предварительно могут быть:

1) выявленные Восточно-Созьвинская и Лебединская структуры (районы скважин 50-Восточно-Созьвинская и 1-Лебединская);

2) объекты, оконтуренные в полосе барьерного доманикового рифа или в непосредственной близости от нее (Кушьельская и Ариваньская структуры, а также новые объекты после их подготовки к бурению).

Первоочередной поисковый интерес, в том числе в отношении возможности выявления «пропущенных» залежей в ранее пробуренных скважинах, представляют собой терригенные и карбонатные (рифогенные) отложения верхнего девона.

Это обосновывается результатами бурения скважин, их опробования и испытания, ГИС, в том числе переинтерпретации материалов ГИС, выполненной в ходе данной работы, исследованиями кернового материала, а также установленной нефтегазоносностью смежных территорий.

Первоочередным объектом является Южно-Лебединская структура, на которой планируется заложение поисковой скважины 1-Южно-Лебединская (рисунок).

Оценка ресурсов

В результате переинтепретации данных сейсморазведочных материалов прошлых лет, переинтепретации данных ГИС, выполненной в ходе данной работы, а также установленной нефтегазоносности смежных территорий поисковый интерес вызывают терригенные отложения верхнего девона на изучаемых структурах. Ресурсы нефти оценены по категории Д0 объемным методом [5].

Южно-Лебединская структура. Прогнозируемая залежь нефти D_3dzr

Ожидаемая залежь нефти – неполнопластовая, сводовая, тектонически экранированная взбросом. Коллекторы представлены песчаниками. Флюидоупором для залежи являются одновозрастные глинистые отложения мощностью около 10 м, залегающие непосредственно над пластом-коллектором. Средневзвешенная эффективная нефтенасыщенная мощность и коэффициент пористости взяты по данным ГИС скважины № 1-Лебединской 11,0 м и 0,1 соответственно. В качестве аналога для оценки ресурсов использована нефтяная залежь в тиман-

ских отложениях Лузского месторождения пласт Ia, где установлены следующие параметры: коэффициент нефтенасыщенности – 0,82; плотность нефти – 0,859 г/см^3; пересчетный коэффициент – 0,877; коэффициент извлечения – 0,30.

Ресурсы нефти:

$Q_{геол.}$ = 40 091 тыс. т; $Q_{извл.}$ = 12 027 тыс. т.

Ариваньская структура.
Прогнозируемая залежь нефти D_3tm

Ожидаемая залежь нефти – пластовая, сводовая, литологически экранированная. Коллекторы представлены песчаниками. Флюидоупором для залежи являются одновозрастные глинистые отложения. Структура прослежена по ОГ $IIIf_1$ (D_3f_1). Площадь перспективной залежи в контуре замкнутой изогипсы минус 2620 м составляет 1,4 км^2.

Средневзвешенная эффективная нефтенасыщенная мощность принята равной 1,0 м, поскольку амплитуда ловушки менее 5 м. В качестве аналога для оценки ресурсов использована нефтяная залежь в тиманских отложениях Лузского месторождения пласт Ia, где установлены следующие параметры: коэффициент нефтенасыщенности – 0,82; плотность нефти – 0,859 г/см^3; пересчетный коэффициент – 0,877; коэффициент извлечения – 0,30.

Ресурсы нефти:

$Q_{геол.}$ = 130 тыс. т; $Q_{извл.}$ = 39 тыс. т.

Прогнозируемая залежь нефти D_3dm

Ожидаемая залежь нефти – пластовая, сводовая, литологически экранированная. Коллекторы представлены известняками. Флюидоупором для залежи являются глинистые отложения. Структура прослежена по ОГ $IIIf_2$ (D_3f_2). Площадь перспективной залежи в контуре замкнутой изогипсы минус 2540 м составляет 1,8 км^2. Средневзвешенная эффективная нефтенасыщенная мощность принята равной 1,0 м, поскольку амплитуда ловушки менее 5 м.

Расположение проектной скважины

В качестве аналога для оценки ресурсов использована нефтяная залежь в сирачойских отложениях Лузского месторождения, где установлены следующие параметры: коэффициент нефтенасыщенности – 0,93; плотность нефти – 0,823 г/см^3; пересчетный коэффициент – 0,853; коэффициент извлечения – 0,369.

Ресурсы нефти:

$$Q_{геол.} = 106 \text{ тыс. т.};$$

$$Q_{извл.} = 106 \times 0{,}369 = 39 \text{ тыс. т.}$$

Кушьельская структура.
Прогнозируемая залежь нефти D_3srč

Ожидаемая залежь нефти – пластовая, сводовая, литологически экранированная. Коллекторы представлены известняками. Флюидоупором для залежи являются глинистые отложения. Структура прослежена по ОГ II-III (C-D). Площадь перспективной залежи в контуре замкнутой изогипсы минус 2150 м составляет 6,5 км^2. Средневзвешенная эффективная нефтенасыщенная мощность принята равной 1,0 м, поскольку амплитуда ловушки менее 5 м.

В качестве аналога для оценки ресурсов использована нефтяная залежь в сирачойских отложениях Лузского месторождения, где установлены следующие параметры: коэффициент пористости 0,09, коэффициент нефтенасыщенности – 0,93; плотность нефти – 0,823 г/см^3; пересчетный коэффициент – 0,853; коэффициент извлечения – 0,369.

Ресурсы нефти:

$$Q геол. = 382 \text{ тыс. т};$$

$$Q извл. = 382 \times 0{,}369 = 141 \text{ тыс. т.}$$

Прогнозируемая залежь нефти D_3μp

Ожидаемая залежь нефти – пластовая, сводовая, литологически экранированная. Коллекторы представлены известняками. Флюидоупором для залежи является глинистые отложения. Площадь перспективной залежи в контуре замкнутой изогипсы минус 2150 м составляет 6,5 км^2. Средневзвешенная эффективная нефтенасыщенная мощность принята равной 1,0 м, поскольку амплитуда ловушки менее 5 м.

Ресурсы нефти:

Qгеол. = 377 тыс. т; Qизвл. = 141 тыс. т.

Геолого-экономическая эффективность работ составила: прирост запасов на 1000 рублей затрат 7,14 т/тыс. руб. и затраты на подготовку 1 тонны прироста запасов 140,1 руб./т.

Заключение

В ходе данной работы были изучены геологические особенности строения исследуемого района и составлена программа геологоразведочных работ на Южно-Лебединской площади.

В процессе выполнения задач изучено геологическое строение площади, оценены перспективы нефтегазоносности, выделены первоочередные объекты, оценены ресурсы категории $Д_0$, составлена программа геологоразведочных работ на Южно-Лебединской площади.

На основе изученных материалов по соседнему (Лузскому) месторождению, на котором была доказана промышленная нефтегазоносность и выявлена залежь нефти, были изучены нефтегазоносные комплексы подготовленной к бурению Южно-Лебединской структуры; обоснована их нефтегазоносность и подсчитаны ресурсы прогнозируемой залежи нефти.

Перспективы нефтегазоносности Южно-Лебединской структуры и подсчет перспективных ресурсов категории $Д_0$ связываются с отложениями верхнего девона. Ожидаемая залежь нефти неполнопластовая сводовая, стратиграфически и тектонически экранированная.

Для реализации данной работы рекомендуется бурение одной поисковой скважины № 1-Южно-Лебединская, которая закладывается по данным сейсморазведки на наиболее благоприятных гипсометрических условиях Южно-Лебединской структуры, проектной глубиной –3200 м. Намечен комплекс геолого-геофизических исследований в скважине, опробование и испытание перспективных интервалов.

Подсчет ресурсов по категории $Д_0$ произведен объемным методом. Всего по структуре Qгеол. = 40,091 млн т и Qизвл. = 12,027 млн т.

Параллельно с бурением предусматриваются полевые сейсморазведочные работы 2D-методом ОГТ. Объем сейсморазведочных работ планируется количестве 200 пог. км.

Приведены геолого-экономические показатели поисковых работ на Южно-Лебединской структуре, доказана их эффективность.

Список литературы / References

1. Ступакова А.В. Тимано-Печорский бассейн. Строение и основные этапы развития // Георесурсы. 2017. № 5. С. 56–64. DOI: 10.18599/grs.19.7.

Stupakova A.V. Timan-Pechora basin. The structure and main stages of evolution // Georesources. 2017. № 5. P. 56–64 (in Russian).

2. Пармузина Л.В. Нефтегазоносность верхнедевонского комплекса Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовое дело. 2014. № 6. [Электронный ресурс]. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2014/ogbus62014p210-225ParmuzinaLV_ru.pdf (дата обращения: 20.05.2020).

Parmuzina L.V. Oil and gas potential of the Upper Devonian complex of the Timan-Pechora oil and gas province // Neftegazovoye delo. 2014. № 6. [Electronic resource]. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2014/ogbus62014p210-225ParmuzinaLV_ru.pdf (date of access: 20.05.2020) (in Russian).

3. Пармузина Л.В., Лагутина Ю.А., Смирнова А.Е. Расчленение и корреляция отложений верхнедевонского комплекса Ижемской ступени // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2015. № 2. С. 17–25. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-2-17-25.

Parmuzina L.V., Lagutina Yu.A., Smirnova A.E. Breaking up and correlation of sediments of the Upper Devonian complex of the Izhma stage // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. 2015. № 2. P. 17–25 (in Russian).

4. Боровинских А.П., Пармузина Л.В., Маликова А.Ю. Природные резервуары в ордовикских, силурийских и девонских отложениях Джебольской ступени Ижма-Печорской впадины // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т.9. № 3. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/35_2014.pdf (дата обращения: 20.05.2020).

Borovinsky A.P., Parmuzina L.V., Malikova A.Yu. Natural reservoirs in the Ordovician, Silurian and Devonian sediments of the Jebol stage of the Izhma-Pechora depression // Oil and gas geology. Theory and practice. 2014. V. 9. № 3. [Electronic resource]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/35_2014.pdf (date of access: 20.05.2020) (in Russian).

5. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / Под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Проскурина, Г.Г. Яценко. Москва-Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. 258 с.

Guidelines for calculating the geological reserves of oil and gas by the volumetric method / Pod red. V.I. Petersil'ye, V.I. Proskurina, G.G. Yatsenko. Moskva-Tver': VNIGNI, NPTS «Tver'geofizika», 2003. 258 p. (in Russian).

УДК 556.166.4

ЛАНДШАФТЫ НАВОДНЕНИЙ С КРИТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ НЕУСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ

Напрасников А.Т.

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, e-mail: r. kodar@mail.ru

В статье наводнения впервые обосновываются как мультипликативные географические системы с квазиустойчивым равновесием и с потенциалом критических компонентов. К критическим явлениям отнесены не только избытки влаги, тепла, но и свойства самих ландшафтов. Ими являются размеры, емкости, ограничивающие водовмещающие свойства: понижения, барьеры, а также превышающие их притоки воды из гидрогеологических горизонтов, подмерзлотных таликов. В июле-августе в долинах рек протаивают прослойки многолетней мерзлоты, и из подземных резервуаров изливаются воды в русла рек, увеличивают их сток и повышают возможность формирования наводнений. Подобных регулярных и случайных событий множество. Они становятся составляющими серии геосистем – ландшафтов наводнения. Проявляется опасность не только от водной стихии, но и от самого ландшафта с его критическими свойствами. Более того, последовательные продвижения излившихся водных масс поступательно или мгновенно увеличивают его площадь. Новый мультипликативный ландшафт становится «подвижным», опасным для элементов окружающих сред. Подобные ландшафты имеют двойственную природу – естественную, со «спящим» потенциалом критических компонентов и постоянно увеличивающую площадь с «пробужденной» кинетической энергией. Возникает необходимость применения мультипрограммирования – метода последовательного и одновременного выполнения расчетов водного и энергетического балансов естественных ландшафтов до наводнений и последующих расчетов во время наводнения. С учетом данных положений рассчитан баланс тепла и влаги ландшафтов Иркутско-Черемховской равнины и местоположений городов Тулун, Нижнеудинск и Зима, максимально пострадавших от наводнений. Обозначились критические компоненты как самих ландшафтов, так и элементов их водного и энергетического балансов. Одним из них оказалась естественная влажность почвогрунтов – свободная емкость, не занятая водой. Если скважность достигает полной влагоемкости (ПВ) почв, на ее поверхности формируется слой воды, предвестник наводнений. Этот процесс явился одним из главных критических для элементов водного баланса наводнений. Приведенные положения определяют необходимость создания на равнине единой мелиоративной системы.

Ключевые слова: Иркутско-Черемховская равнина, ландшафты, катастрофическое наводнение, критические компоненты, элементы водного и энергетического баланса

FLOOD LANDSCAPES WITH CRITICAL COMPONENTS OF UNSTABLE EQUILIBRIUM

Naprasnikov A.T.

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, e-mail: r. kodar@mail.ru

For the first time, floods are substantiated as multiplicative geographical systems with a quasi-stable equilibrium and with the potential of critical components. Not only excess moisture and heat but also the properties of landscapes themselves are assigned to critical phenomena. These include the size, the capacities limiting the water-bearing properties, such as declines and barriers, as well as the inflows of water exceeding them arriving from hydrogeological horizons, subpermafrost taliks. In July−August, permafrost interlayers in the river valleys are thawing. Subterranean reservoirs discharge the waters to the river channels thus increasing their flow and the possibility for flood formation. There occur a great number of such regular and occasional events. They become components of the series of geosystems, i. e. flood landscapes. Not only the water-related hazard but also the landscape itself with its critical properties present a threat. Successive advances of the water masses discharged sequentially or instantaneously increase their area. The new multiplicative landscape becomes «mobile» and dangerous for environmental elements. Landscapes of this kind have a dual nature: natural, with a «dormant» potential of critical components, and a steadily increasing area with the «awakened» kinetic energy. It becomes necessary to use multiprogramming implying the method of consecutive and simultaneous calculations of the water and energy balances of natural landscapes at the time of flooding. These principles were used to calculate the neat and moisture balance of the landscapes of the Irkutsk-Cheremkhovo plan and the location of the cities of Tulun, Nizhneudinsk and Zima which were most severely affected by floods. Critical components of the landscapes themselves, and also the elements of their water and energy balances have been identified. Among them was the natural humidity of soil-ground, a vacant capacity not occupied by water. If porosity reaches total moisture capacity of soils, its surface develops a water layer as the precursor of floods. This process was one of the critical processes for the elements of the water balance of floods. The statements made above dictate a need to create on the plain a unified melioration system.

Keywords: Irkutsk-Cheremkhovo plain, landscapes, catastrophic flood, critical components, water and energy balance elements

Традиционно наводнения анализируются не как отдельные кратковременные явления, а как динамические геосистемы, вмещающие их. При этом общепринятое единство содержания и функционирования в одном объекте нарушается. В связи с этим в работе анализируются «ландшафты наводнений» топологической и региональной размерности, с критическими компонентами неустойчивого равновесия. Возникли

проблемы определения, управления, нейтрализации и обоснования соответствующих методов борьбы с ними. Трудности реально обозначились в связи с катастрофическими наводнениями в Иркутско-Черемховской равнине в 1919 г. и сложностью их реального отображения классическими методами.

Академик В.Б. Сочава [1] характеризовал критические компоненты геосистем как определяющие энергетику, преобразующие и стабилизирующие их динамику. Это в полной мере соответствует содержанию наводнений, которые аккумулируют воду в ограниченных земных пространствах, нарушают структуры и режимы прежних естественных систем, а впоследствии масса-энергетический потенциал местного климата и ландшафта выравнивает их неравновесное состояние.

Данные обстоятельства определили цель исследований – анализ ландшафтов наводнений с критическими компонентами, с неравновесной динамикой водных масс.

Природа наводнений оказывается двойственной и дополнительно усложняется тем, что их динамика на земной поверхности сопровождается ростом последовательного приращения площадей наводнений. Это особое географическое динамическое явление со своим объектом и функционированием, общность определяется мультипликативными свойствами ландшафтов наводнения.

Логично прослеживается разделение функций: атмосфера приносит влагу и тепло, ландшафт перераспределяет, формирует их естественные и критические состояния. Естественные состояния являются системно формирующими, критические – преобразующими. Вода, вырвавшаяся из ландшафта, остается его частью, динамическим и пространственным продолжением, расширяющим и формирующим новую геосистему – ландшафты наводнений. К ним можно отнести геосистемы редуцированного развития – с большим недостатком тепла и избытком влаги, ограниченного – с умеренными различиями тепла и влаги и оптимального развития с их эквивалентным равенством, когда система находится ближе к естественному состоянию. Но при этом оптимальное состояние является крайне критическим, за ним следует переувлажнение.

Эти многофакторные геосистемы сложно выразить единым определением, единой формулой. Необходимо их логическое обоснование. Наводнения возможно описать статистическими приемами, оценить в практических целях коэффициентами корреляции и уровнями значимости. Но они не определяют весь механизм развития наводнений. Следует применять ландшафтные характеристики.

Водные и энергетические состояния наводнений постоянно находятся в квазиустойчивом равновесии. Любое дополнительное количество влаги может создать наводнение от обычного разлива речных вод до катастрофического. Или, наоборот, избыток тепла может в виде испарения ликвидировать опасность любого наводнения. Исследования показали, что в Иркутско-Черемховской равнине почво-грунты оптимально увлажнены и практически не нуждаются в гидротехнической мелиорации [2, 3]. Вместе с этим оптимальное увлажнение является крайне критическим, за ним следует процесс переувлажнения, а в почво-грунтах накапливаются гравитационные воды и, достигая полной влагоемкости (ПВ), формируют на поверхностях слой воды [4]. Поэтому ряд ландшафтов Иркутско-Черемховской равнины имеют потенциальные свойства формирования наводнений. Данный факт определил вектор исследований ландшафтов наводнений – водного и энергетического баланса, потребовал обоснования мер их нейтрализации. Следует учитывать, что ряд естественных ландшафтов выполняют функции обычных природных систем, но имеют и критические состояния. Это предельные водные емкости почво-грунтов, геоморфологические уровни понижений, высоты увалов-барьеров и т.д. При их изменении потенциально неравновесная геосистема становится опасной для окружающей среды.

Движущаяся опасная водная стихия порождает внешние и внутренние критические компоненты географической оболочки. Ими являются: предельно максимальный для ландшафта приток атмосферных осадков, максимальный сток вод любого происхождения, влажность и влагоемкость почво-грунтов. Парадоксальным явлением критических наводнений в 2019 г. в Иркутско-Черемховской равнине следует считать фон установившегося высокого давления в Байкальском регионе. При данных условиях ограничивается поступление в регион атмосферных осадков, снижается сток рек и, соответственно, уменьшается возможность формирования наводнений, тем более катастрофических. Подобные факторы отмечены в работах [5–7]. Иными словами,

количество атмосферных осадков уменьшается, а критические наводнения в регионе регулярно проявляются.

Метастабильные ландшафты наводнений двойственные. Водные массы обладают свойством пребывать какое-то время в состоянии равновесия, после чего при внешнем воздействии, например при мощных ливнях или интенсивном горном стоке, мгновенно приходят в стремительные необратимые движения. Освободившись от слоя воды, но сохранив влажность почв на уровне полной влагоемкости (ПВ), почво-грунты способны заново накапливать поверхностные воды, затем их сбрасывать и снова формировать наводнения. Данный факт стал вектором обоснования понятия «ландшафты наводнения».

Специфика обоснования ландшафтов учитывает переход от естественных состояний природной системы к их критическим значениям. В условиях выхода водных масс из ландшафта на смежные территории следует оценивать состояние и функции уже измененных в пространстве систем. Проблема сводится к обоснованию многократно приращиваемых площадей наводнений. Это уже мультипликативные «движущие» природные системы, преобразующие все на своем пути.

Отечественная наука способна решать поставленные задачи. Был использован метод гидролого-климатических расчетов, дополненный ландшафтными закономерностями. С учетом этого автором разработан ландшафтный метод гидролого-климатических расчетов наводнений [4].

Информационную базу составили теоретические труды В.С. Мезенцева, А.А. Григорьева, В.Б. Сочавы, наблюдения метеорологических станций, гидрологических постов. Учитывались и геоморфологические характеристики земной поверхности. Такими были орографические понижения у основания Восточных Саян, концентрирующие огромные массы воды. Придя в движение, они расширяют площади наводнений, разрушают смежные территории, поселения и города. Особенно информационными оказались описание наводнения в 2019 г. в г. Тулуне [8], где проявился быстрый подъем воды, а также методические подходы ученых в приведенных работах [9, 10].

В Иркутско-Черемховской равнине в июне и июле 2019 г. отмечена серия катастрофических наводнений. Они и раньше происходили, но такого разрушительного эффекта не наблюдалось. Современный анализ распределения атмосферных осадков, стока рек и влажности почв в границах бассейнов равнины позволил выявить, что наводнения в основном являются следствием концентрации вод в низинах холмисто-увалистого рельефа территории [10]. Схема расчетов элементов водного и энергетического балансов наводнений сводилась к обоснованию преобразований естественных геосистем в ландшафты наводнений. До наводнения водным балансом в природных системах определялись влажность и остаточная водная емкость (скважность) в метровом слое почво-грунтов. С их учетом уже в условиях наводнения рассчитывался слой воды в достаточно увлажненных почво-грунтах или на их водных поверхностях. Далее вносились поправки, так как атмосферные осадки с увалов стекали в понижения и составляли 25% в пределах равнины. Поэтому общая концентрация водных масс наводнения в понижениях увеличивалась в 4 раза. Данное соотношение на склонах, не концентрирующих ливневые воды, равно 1, а на вертикальных стенках – меньше 1. Показательными параметрами водного баланса ландшафтов наводнения, кроме осадков и стока рек, являются влажность почв (V) в долях наименьшей влагоемкости (НВ). Ее средние месячные арифметические значения за все периоды метеорологических наблюдений для станций Тулун, Нижнеудинск, Зима и Иркутск изменяются незначительно: в июне V = 0,78–0,82; в июле V = 0,82–0,91; в августе V = 0,81–0,93. Стандартные отклонения в среднем составили 0,18–0,22. Приблизительно каждый второй год влажность почво-грунтов превышает НВ, и в них накапливаются гравитационные воды. Это уже инвариантные свойства почво-грунтов, формирующихся наводнения в Иркутско-Черемховской равнине (таблица). Отрицательные значения (ΔX) в таблице показывают, сколько воды необходимо для создания в почво-грунтах полной влагоемкости (ПВ) и, следовательно, возможность последующего накопления воды на их поверхностях. В скобках приведены стандартные отклонения.

Количество атмосферных осадков в июне небольшое, обеспечивающее минимальное количество наводнений. Их максимум проявляется в июле. Юг региона относится к областям криолитозоны с прерывистой мерзлотой. В долинах рек в конце июля и начале августа мерзлая прослойка полностью протаивает, и весь дея-

тельный слой почв с гидрогеологическим горизонтом поглощает избыточную воду, нейтрализует формирование наводнений. Но проявляется и обратный эффект – мощное излияние вод подмерзлотных таликов в русла рек, что обеспечивает условия формирования наводнений. Двоякие функции осадков, почв и глубинных вод являются следствием превышения критических значений НВ почво-грунтов, а водный и энергетический балансы увеличивают их случайные эффекты. В условиях последовательного формирования водного и энергетического балансов от естественных природных систем до сформировавшихся наводнений прослеживаются как накопление критических масс и энергий, так и взаимная нейтрализация. Поэтому при решении проблем наводнений следует учитывать критические компоненты.

Пониженные участки рельефа Иркутско-Черемховской равнины находятся в пределах 500–560 м абсолютных высот и могут сформировать множество локальных водоемов слоем воды 50–100 см. Это аккумулятивный критический потенциал начального проявления наводнений, при котором все локальные подпрудные водоемы объединяются и создают единую движущую силу водных масс. Их не могут пропустить ссуженные русла рек у подножья северных нагорий. Они не обеспечивают быстрый отток избыточных вод, что и формирует наводнения.

В таблице показаны максимальные критические компоненты – атмосферные осадки – наибольшие месячные 2%-ной обеспеченности. Суточные максимумы ливней имеют такую же обеспеченность, но увеличены в 3 раза. Им соответствуют и рассчитанные максимальные слои воды на поверхностях почв, более приближенные к реальным высотам прошедших наводнений. Следует подчеркнуть, что все перечисленные явления происходят внутри ландшафта, им же и координируются.

Таким образом, ландшафты наводнений формируются под воздействием климата, определяются геолого-гидрологической поверхностью самого ландшафта с равенством водных и тепловых ресурсов. В этих наводнениях данное равенство нарушается исключительно мощным притоком атмосферной влаги, стоком рек или иным источником воды. Их потенциал не может поглотить или нейтрализовать естественную емкость почв, равную скважности. Эти природные системы подавляют экстремумы климата, ресурсы влаги и тепла окружающей среды. Они усиливаются самими ландшафтами, их неровными формами рельефа, перераспределяющими воду равнины и концентрирующими ее в низинах. Иными словами, ландшафт с критическими компонентами осуществляет функции наводнения. В конечном итоге определение «ландшафты наводнений» приобретает особый смысл.

Влажность почво-грунтов (V) на станциях Тулун, Нижнеудинск и Зима до наводнения и слой воды (ΔX, мм) в пониженных частях рельефа

Тулун									
Месяц	Июнь			Июль			Август		
Парам.	X	V	ΔX	X	V	ΔX	X	V	ΔX
. –ΔX	45,6(15)	0,67(0,12)	–252	56,5(18)	0,67(0,13)	–203	50(38)	0,64(0,08)	–142
V≤1.0	51,9(19)	0,72(0,14)	–184	71,7(26)	0,76(0,15)	–56	64,7(27)	0,78(0,13)	72
V≥1,0	68,6(27)	1,07(0,1)	367	112(73)	1,12(0,12)	569	96(37)	1,12(0,15)	618
Ср. мес.	59,3(27)	0,76(0,18)	–113	93,3(43)	0,88(0,22)	146	81,8(36)	0,9(0,21)	269
2%X	124	1,14	523	205	1,325	1063	180	1,4	1181
Нижнеудинск									
. –ΔX	45,8(17)	0,65(0,12)	–284	48,6(21)	0,62(0,14)	–288	41,8(13)	0,63(0,07)	–172
V≤1.0	52,7(20)	0,7(0,15)	–203	73,5(24)	0,78(0,15)	–24	67,5(20)	0,81(0,13)	109
V≥1,0	118,7(21)	1,06(0,07)	362	131,7(32)	1,13(0,11)	586	121(26)	1,1(0,1)	587
Ср. мес.	56,9(25)	0,72(0,16)	–175	98,2(41)	0,91(0,22)	204	89,5(36)	0,93(0,18)	300
2%X	125	1,06	409	187	1,27	843	156	1,11	563
Зима									
. –ΔX	43,2(19)	0,61(0,13)	–344	71,2(41)	0,65(0,1)	–205	71(34)	0,6(0,1)	–207
V≤1.0	49,6(23)	0,91(0,03)	98	80,3(44)	0,87(0,06)	126	67,1(22)	0,84(0,06)	149
V≥1,0	49,9(27)	1,03(0,02)	301	96,7(52)	1,13(0,15)	585	88,4(37)	1,11(0,1)	593
Ср. мес.	48,4(23)	0,66(0,17)	–271	74,9(41)	0,82(0,21)	67	70,7(32)	0,82(0,2)	129
2%X	124	1,05	224	218	1,41	1278	152	1,17	708

На этом фоне города Тулун, Нижнеудинск, Зима справедливо отнесены к территориям с уровнем опасности наводнений от значительных до высоких. Город Тулун считается территорией с высокой степенью опасности, а Нижнеудинск попал в категорию с очень высокой степенью опасности [10]. Последствия наводнений стали катастрофическими, а ученые подчеркивают, что эти стихийные бедствия постоянные.

Заключение

Приведенный тезис «климат приносит влагу и тепло, ландшафт их перераспределяет» явился ключевым для данной статьи и определил ее содержание и структуру. Это взаимообусловленные природные процессы.

Взаимодействия климата Иркутско-Черемховской равнины с горным обрамлением формируют инвариантные условия потенциального формирования наводнений в любых геосистемах. Наводнение может быть описано статистическими приемами, оценено в практических целях коэффициентами корреляции и уровнями значимости. Но они не вскрывают и не решают проблемы его начального, текущего и завершающего развития. Познание наводнений возможно лишь на основе учения о геосистемах с логическим учетом особенностей изучаемых территорий. В исследовании обозначены критические компоненты как самих ландшафтов, так и элементов их водного и энергетического балансов и раскрыта сущность формирования ландшафтов наводнения. К критическим явлениям, формирующим наводнение, относятся и предельные размеры элементов геосистем. В связи с этим следует добавить, что в природе имеются аналоги наводнений: наледи, снежники и ледники.

Практическим выводом из проведенных исследований является необходимость осуществления гидротехнических мероприятий не только на Иркутско-Черемховской равнине, но и в ее горном обрамлении. В долинах рек, особенно вблизи населенных пунктов, следует расширять русла рек, увеличивать их пропускную способность, строить обводные каналы, чтобы сбросить опасный слой воды. Кроме этого, на самой равнине необходимо осушать все переувлажненные почво-грунты до влажности наименьшей влагоемкости. При данном приеме будут формироваться запасные почвенные емкости, способные поглощать избыточную влагу и нейтрализовать наводнение. Этого обусловливает необходимость создания мониторинга за переувлажненными землями. Кроме этого, приведенные положения определяют насущность создания на Иркутско-Черемховской равнине единой мелиоративной системы.

Список литературы / References

1. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.

Sochava V.B. Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1978. 318 p. (in Russian).

2. Корзун М.А, Кузьмин В.А. Почвы Иркутской области // Почвы Иркутской области, их использование и мелиорация: сборник статей. Иркутск: Изд. ИГУ, 1979. С. 17–36.

Korzun M.A., Kuz`min V.A. Soils of the Irkutsk region // Soils of the Irkutsk region, their use and reclamation: collection of articles. Irkutsk: Izd. IGU, 1979. P. 17-36 (in Russian).

3. Лопатовская О.Г., Сугаченко А.А. Эколого-мелиоративные особенности почвенного покрова Предбайкалья. Иркутск: Изд. ИГУ, 2012. 137 с.

Lopatovskaya O.G., Sugachenko A.A. Ecological and reclamation features of the soil cover of the Prebaikalia. Irkutsk: Izd. IGU, 2012. 137 p. (in Russian).

4. Напрасников А.Т. Ландшафты наводнений: концепция и способы расчетов // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 70–75. DOI: 10.17513/use.37394.

Naprasnikov A.T. Landscapes of floods: the concept and methods of calculations // Advances in current natural sciences. 2020. № 5. P. 70–75 (in Russian).

5. Синюкович В.Н., Латышева И.В., Макухин В.Л. Циркуляционные факторы современного маловодья в бассейне озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 60–66. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(60-66).

Sinyukovich V.N., Latysheva I.V., Makukhin V.L. Circulatory factors of modern low water in the lake Baikal basin // Geografiya i prirod. resursy. 2019. № 3. P. 60–66 (in Russian).

6. Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007) // География и природ. ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.

Shimaraev M.N., Starygina L.N. Lake Baikal: Zonal atmospheric circulation, climate and hydrological processes (1968–2007). Geography and Natural Resources. 2010. Vol. 31. № 3. P. 245–250. DOI: 10.1016/j.gnr.2010.09.009.

7. Антохина О.Ю. Атмосферные осадки в бассейне реки Селенги и крупномасштабная циркуляция атмосферы над Евразией в июле // География и природ. ресурсы. 2019. № 4. С. 104–115. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(104-115).

Antokhina O.Yu. Atmospheric precipitation in the Selenga river basin and large-scale atmospheric circulation over Eurasia in July // Geografiya i prirod. resursy. 2019. № 4. P. 104–115 (in Russian).

8. Кичигина Н.В. Опасность наводнений на реках Байкальского региона // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 41–51. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(41-51).

Kichigina N.V. Flood Hazard on the Rivers of the Baikal Region. Geography and Natural Resources. 2018. Vol. 39. № 2. P. 120–129. DOI: 10.1134/S187537281802004X.

9. Махинов А.Н. Основные факторы формирования катастрофических наводнений в бассейне реки Амура в 2013 году // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 6. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 435–442.

Mahinov A.N. The main factors in the formation of catastrophic floods in the Amur River basin in 2013 // Readings in memory of Vladimir Yakovlevich Levanidov. Vladivostok. Dalnauka, 2014. P. 435–442 (in Russian).

10. Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г. Наводнения в Иркутской области 2018 года // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 6. С. 48–65. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-6-4.

Shalikovsky A.V., Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Kurganovich K A., Morozov M.G. Floods in the Irkutsk region in 2018 // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye. 2019. № 6. P. 48–65 (in Russian).

УДК 550.379

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ ПЕРИОДИЧНОСТИ СИГНАЛОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

[1]Нерадовский Л.Г., [2]Фёдорова Л.Л.

[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru;
[2]Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru

Рассмотрены результаты применения нескольких методов и компьютерных программ спектрального анализа с целью изучения наличия и геологической природы периодической структуры сигналов георадиолокации. Эти сигналы были записаны георадаром «ОКО-2М» на частоте 400 МГц на участке реконструируемой автодороги в г. Якутске. Методами интегрального преобразования Фурье и методом максимума энтропии, представляющего собой один из вариантов авторегрессионного спектрального анализа, установлено, что сигналы георадиолокации состоят из двух генераций импульсов с разными периодами повторения. Геологическая природа первой генерации импульсов со значениями периодов 0,81–1,26 м обусловлена отражением импульсов от границ основных ритмов осадконакопления песчаных отложений аллювиального генезиса. Природа второй генерации импульсов со значениями периодов 0,40–0,48 м более сложна. С одной стороны, она обусловлена более тонкими фациальными ритмами или стратиграфическими перерывами в процессе осадконакопления глинистых отложений озёрно-болотного генезиса с формированием в них часто переслаивающихся границ маломощных прослоев растительных осадков и органики в виде ила и торфа. С другой стороны, в этой тонкослоистой литогенной структуре в процессе её длительного промерзания сложнейшим образом сформировалась криогенная структура с границами мёрзлых грунтов, имеющих разную температуру, а также льдистость и засолённость. Всё вместе взятое создаёт благоприятные физические предпосылки для применения метода георадиолокации, как неразрушающего инструмента с целью изучения ритмов осадконакопления в мёрзлых толщах четвертичных отложений. Более того, метод георадиолокации можно использовать при проведении проектно-изыскательских работ с целью идентификации областей или участков развития наиболее тонкослоистых структур. Они, как известно, являются материнской средой для криопэгов и сильнольдистых разностей дисперсных грунтов. В свою очередь эти образования представляют явную или потенциальную угрозу для безаварийной эксплуатации инженерных сооружений.

Ключевые слова: автодорога, мёрзлые грунты, скважины, сигналы георадиолокации, спектральный анализ, частота и периоды импульсов

EXPERIENCE IN STUDYING THE NATURE OF PERIODICITY OF GPR SIGNALS USING SPECTRAL ANALYSIS METHODS

[1]Neradovskiy L.G., [2]Fedorova L.L.

[1]Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru;
[2]Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru

The results of applying several methods and computer programs of spectral analysis are considered with a view to studying the presence and geological nature of the periodic structure of GPR signals. These signals were recorded by the «OKO-2M» GPR at a frequency of 400 MHz on a section of a reconstructed road in Yakutsk. Using the method of integral Fourier transform and the method of maximum entropy, which is one of the variants of autoregressive spectral analysis, it was found that GPR signals consist of 2 pulse generation with different repetition periods. Geological nature of the first generation of pulses with periods 0.81-1.26 m is due to the reflection of impulses from the boundaries of the basic rhythms of sedimentation of sandy deposits of alluvial genesis. The nature of the second generation of pulses with periods of 0.40-0.48 m is more complex. On the one hand, it is caused by the thinner, facial rhythms or stratigraphic interruptions in the process of sedimentation of clay deposits of wetlands genesis with the formation of often overlapping borders of low-power layers of plant sediments and organic matter in the form of silt and peat. On the other hand, in this thin-layered lithogenic structure, during its long-term freezing, a cryogenic structure was formed in a very complex way with the borders of frozen soils having different temperatures, as well as ice and salinity. All taken together creates favorable physical conditions for the use of GPR method, as a non-destructive tool for studying the rhythms of sedimentation in the frozen strata of Quaternary deposits. Moreover, the GPR method can be used in design and survey works to identify areas of development of the most thin-layer structures. They are known to be the maternal environment for cryopegs and heavily icy of dispersed soils. In turn, these formations represent a clear or potential threat to the trouble-free operation of engineering facilities.

Keywords: road, frozen soils, borehole, GPR signals, spectral analysis, impulse frequency

В настоящей работе на примере участка реконструируемой автодороги «Вилюйский тракт» в г. Якутске описан опыт изучения периодической структуры сигналов георадиолокации. Такие сложные задачи решаются с помощью компьютерных программ, в которых заложен тот или иной метод спектрального анализа. В настоящей работе сравниваются возможности решения обозначенной задачи с помощью разных компьютерных программ. С одной стороны, программ, которые используют классическое интегральное преобразование Фурье, а с другой стороны, не используемой в практике георадиолокации программы авторегрессионного спектрального

анализа, использующей алгоритм метода максимальной энтропии [1, с. 122–144; 2, с. 16–25]. Широко применяемый в настоящее время в георадиолокации метод вейвлет-спектрального анализа в настоящей работе не использован по той причине, что этот метод имеет принципиальные недостатки при изучении сложных периодических структур временных рядов, которые вносят искажения и погрешности в результат спектрального анализа [3]. Другой особенностью настоящей работы выступает ориентированность на поиск наиболее вероятных интерпретационных решений, касающихся геологической природы периодической структуры сигналов георадиолокации, несущих информацию о верхней части криолитозоны. То есть в слое годовых теплооборотов, где происходит взаимодействие мёрзлых грунтов с основаниями инженерных сооружений. Такая особенность с привязкой данных георадиолокации к данным бурения двух проектно-изыскательских скважин делает настоящую работу актуальной не только в области геофизики криолитозоны, но и инженерной геологии, мерзлотоведения.

Участок работ

Работы методом георадиолокации выполнены в 2011 г. на участке реконструируемой автодороги «Вилюйский тракт» в г. Якутске, расположенном между постом ГИБДД и Хатын-Юряхским шоссе. В геоморфологическом отношении участок работ находится на 2-й высокой террасе долины р. Лены (Сергелляхской) вблизи тылового шва левого берега, представляющего собой уступ эрозионно-денудационной равнины, называемой геологами Мыранновой грядой. По современным представлениям, основанным на детальной стратиграфии четвертичных отложений в геоморфологическом строении долины р. Лены, в районе г. Якутска выделена только одна разновысотная надпойменная терраса дриас-голоценового возраста. Её денудационно-аккумулятивная поверхность имеет сложное строение микрорельефа и гидрографической сети (стариц, проток, озёр) [4–6].

На границе Сергелляхской террасы с Мыранновой грядой расположена полоса озёр, стариц и проток разной формы и размеров. В центральной части участка работ до глубины 10 м пробурены две скважины С-2 и С-3. Их криогенно-литологический разрез показан на рис. 1. Из него следует, что основание автодороги сложено до глубины 0,7–1,0 м насыпными грунтами песчано-гравийного состава. Ниже до 10 м залегают мёрзлые нельдистые и льдистые грунты песчано-глинистого состава озёрно-болотного и аллювиального генезиса. Озёрно-болотные фации представлены коричневыми супесями и в разной степени засолёнными пылеватыми песками с включением органики (торфа, ила) и растительных веществ (детрита). Эти включения встречаются и в незасолённых серых аллювиальных песках мелкой и средней зернистости. Во всех случаях тёмно-серый цвет песков связан с включением органики и растительных веществ. Общая мощность мёрзлой толщи четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса на Сергелляхской террасе в большинстве случаев равна 25 м и редко 40 м.

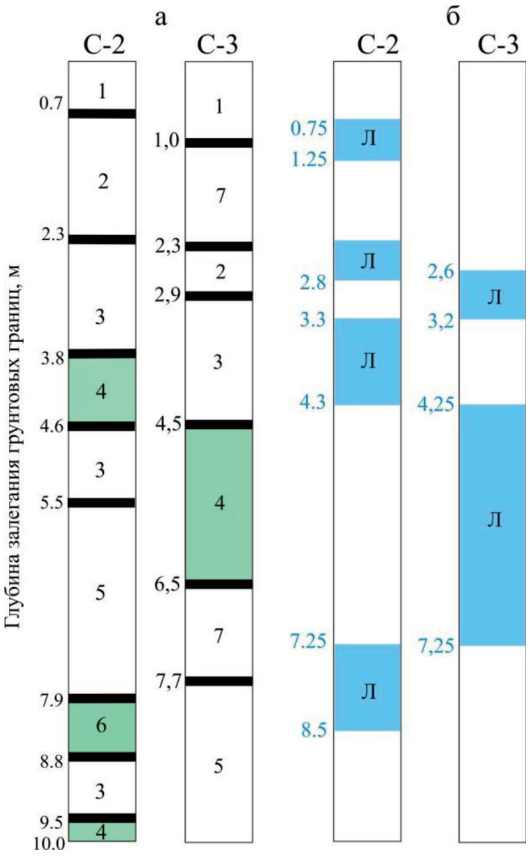


Рис. 1. Геологический разрез скважин С-2 и С-3 на участке автодороги «Вилюйский тракт» в г. Якутске: а, б – литологическая и криогенная колонка скважин. Условные обозначения: 1 – насыпные грунты; 2 – супесь; 3 – песок пылеватый; 4 – пылеватый песок с органикой; 5 – песок мелкий; 6 – песок мелкий с органикой; 7 – песок средний; Л – сильно льдистые грунты с суммарным показателем влажности выше 40%

Простое литологическое строение разреза автодороги осложняется неравномерным распределением льдистости, температуры и других свойств мёрзлых грунтов. По лабораторным данным и геотермии скважин С-2 и С-3 льдистость и температура грунтов изменяются от 8 до 84 % и от -2,2 до -6,9 °С при среднем медианном значении 33 % и -4,0 °С. Стоит заметить, что медианный показатель среднего при небольших выборках исходных данных, каковыми являются данные измерений температуры и лабораторных определений свойств мёрзлых грунтов всего лишь по двум скважинам, даёт более точные оценки средних значений исследуемых физических величин.

Таким образом, изменение основных показателей свойств мёрзлых грунтов вдоль трассы автодороги между недалеко расположенными скважинами (на расстоянии 43 м) весьма существенно, в особенности для показателя льдистости.

Методика георадиолокации

Измерение сигналов георадиолокации выполнялось в апреле 2011 г. георадаром «ОКО-2М» по стандартной методике непрерывного профилирования двухполосных автодорог [7] с антенным блоком АБ-400 (центральная частота 400 МГц) с целью детального изучения основания автодороги до глубины 5–7 м. Сигналы георадиолокации измерялись до двойного времени задержки 150 наносекунд (далее время задержки). Амплитуда импульсов измерялась в дискретах (числе разбиений). Такой способ измерения принят у большинства георадаров. Для транспортировки антенных блоков применялся автомобиль ГАЗ «Соболь» со скоростью движения до 20 км/ч. Антенный блок прикреплялся к автомобилю с помощью специальных лыж. Измерения сигналов георадиолокации проведены в непосредственном контакте с поверхностью автодороги. Запись сигналов выполнялась по линии профиля, проходящего между точками скважин С-2 и С-3, пробуренных на обочине автодороги. Запись радарограммы внесена в базу данных георадиолокации [8]. Привязка измерений сделана GPS/ГЛОНАСС приемником с использованием колёсного датчика перемещения «ДП-32» и дополнительно с помощью маркерных отметок на радарограмме по столбам линии электрического освещения автодороги. Измерение и запись сигналов георадиолокации выполнены блоком обработки и управления в связке с антенным блоком. Построение радарограммы и её математическая обработка выполнены с помощью программы «Геоскан 32» [9]. Из имеющихся в программе модулей обработки для усиления чёткости визуализации радиоотражающих границ применялись модули вычитания среднего, медианной фильтрации и деконволюции. Результат такой обработки показан на рис. 2.

Кинематическим атрибутом при обработке радарограммы выступало двойное время задержки импульсов, прошедших расстояние от поверхности автодороги до отражающих грунтовых границ и обратно. Динамическим атрибутом служила мгновенная или текущая амплитуда импульсов в момент их измерения георадаром. На начальном этапе обработки преобразование радарограммы из масштаба времени в масштаб глубины сделано по априорной оценке вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости, равной 5,01. Это значение соответствует обобщённой средней скорости распространения электромагнитной волны (0,134 м/нс) в мёрзлых грунтах песчано-глинистого состава, слагающих Центрально-Якутскую низменность [10]. Частью этой низменности является долина р. Лены «Туймаада», где построен г. Якутск.

Для расчёта значений периодов чередования импульсов в сигналах георадиолокации применялась апостериорная оценка средневзвешенной (по мощности грунтовых слоёв) скорости 0,150 м/нс. Эта оценка получена до глубины 10 м по данным анализа физико-геокриологической модели автодороги «Вилюйский тракт», построенной по данным скважин С-2 и С-3 и обработанным данным георадиолокации.

Спектральный анализ окрестности скважин

Цель спектрального анализа – дать ответ на вопрос, есть ли периодическая составляющая в следовании импульсов по глубине, и в случае положительного ответа попытаться установить природу периодичности. Рассмотрим результаты спектрального анализа сигналов георадиолокации с применением разных компьютерных программ цифровой обработки временных рядов: «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG», «Стадия».

Исходя из лучевых представлений, заимствованных из законов геометрической оптики сконцентрированный по энергии отклик геологической среды на упругое или электромагнитное взаимодействие

формируется в пределах границ 1-й зоны Френеля [11, с. 101]. Опыт работы в криолитозоне показал, что помехоустойчивость отклика и чистота его приёма антенной георадара существенно увеличивается за счёт дополнительного зашумления случайно фазированных импульсов путём измерений в пределах суммарного радиуса 1–2-й зоны Френеля. Такой подход находится в полном согласии с теоретическими представлениями о цифровой обработке стохастических сигналов [2] и, в частности, сигналов георадиолокации [12; 13]. По отмеченной выше причине исходными данными для спектрального анализа служили не единичные трассы сигналов георадиолокации, а их группа, собранная в окрестности опорных точек скважин в пределах границ 1–2 зоны Френеля. При максимальной глубине бурения скважин 10 м и средней длине зондирующего импульса 0,32 м (иначе его называют сигналом прямого прохождения) радиус 1–2 зон Френеля равен 2,50 м. При таком радиусе и расстоянии между трассами 0,108 м слева и справа от точек скважин С-2 и С-3 было собрано по 12 трасс. По каждой трассе с помощью программы «Koeff» [14] произведена выборка импульсов с относительными максимумами амплитуды импульсов в положительной фазе вступления, т.е. в фазе нарастания значений амплитуды.

Рассмотрим результаты спектрального анализа по каждой апробированной компьютерной программе с иллюстрацией графиков спектральной плотности сигналов георадиолокации на рис. 3. Расчёт периода следования импульсов сигналов георадиолокации по глубине сделан по средневзвешенной скорости 0,150 м/нс.

Программа «Statistica 6». Эта широко известная зарубежная программа выполняет спектральный анализ временных или пространственных рядов классическим методом быстрого дискретного интегрального преобразования Фурье. В рассматриваемом случае преобразование выполнено со сглаживающим фильтром Хемминга. Присутствие на графике спектра (рис. 3) двух максимумов удостоверяет о присутствии в сигналах георадиолокации двух периодических генераций импульсов. Одна из них с пикообразным максимумом спектра является доминирующей по энергии. В ней импульсы следуют друг за другом через 0,65 м в окрестности скважины С-2 и через 0,78 м в окрестности скважины С-3. Аналогичным образом во второй генерации с небольшим, но статистически значимым максимумом импульсы следуют друг за другом через 0,32 и 0,39 м.

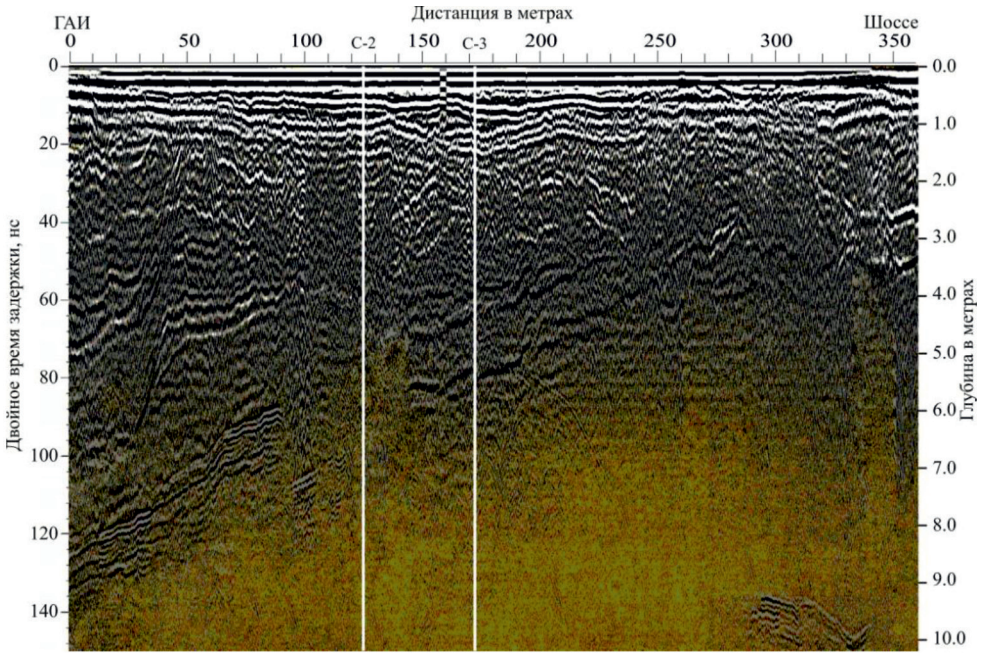


Рис. 2. Радарограмма мёрзлого основания автодороги «Вилюйский тракт» в г. Якутске на начальном этапе математической обработки

Программа «Мезозавр». Эта программа входила в пакет программ по прикладному статистическому анализу, разработанному в 1980–1990-х гг. Центральным экономико-математическим институтом (ЦЭМИ, г. Москва) под руководством С.А. Айвазяна. В настоящее время программа «Мезозавр» стала практически недоступной для научного и инженерного сообщества, да и пользоваться ею в период стремительного развития современной компьютерной техники стало затруднительно. Тем не менее, находясь в личном пользовании первого автора настоящей статьи, программа успешно продолжает работать в операционной системе Windows XP.

В отличие от программы «Statistica 6», программа «Мезозавр» выполняет спектральный анализ методом интегрального преобразования Фурье посредством расчёта автокорреляционной функции сигналов георадиолокации. Результаты спектрального анализа представлены на рис. 3 в виде фотографий спектров, сделанных с экрана ноутбука, во время текущего сеанса работы программы «Мезозавр». Графики спектров опять же свидетельствуют о присутствии в сигналах георадиолокации двух периодических генераций импульсов с явным доминированием более длиннопериодной генерации. Эта генерация выражается максимальным значением энергии (пиком спектра) с одинаковым периодом следования импульсов в окрестности скважин С-2 и С-3 равным 0,81 м. Короткопериодная генерация импульсов с небольшим максимумом спектра имеет в два раза меньший и также одинаковый в окрестности скважин С-2 и С-3 период следования импульсов равный 0,40 м.

Программа «BURG». Эта программа реализует сложный для понимания метод максимальной энтропии, предложенный в конце 1960-х – начале 1970-х гг. И.П. Бургом. Программа написана в 1991 г. на языке TURBO-PASCAL для операционной системы DOS программистом Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ) О.Ю. Евсеевой для решения задач георадиолокации с одним из первых образцов отечественной георадарной техники 17ГРЛ-1. С алгоритмом программы можно ознакомиться в работе Канасевича [1, с. 132–134]. Достоинство программы «BURG» состоит в получении спектров высокого разрешения по коротким временным рядам. Однако, как показывает долговременный опыт использования программы «BURG» в ЯкутТИСИЗ, серьёзным её недостатком нужно признать трудность правильного выбора числа итераций, необходимого для вычисления оптимального числа коэффициентов фильтра предсказания. В конечном итоге этот методический недостаток оборачивается неоднозначной идентификацией периодической структуры временного ряда.

В рассматриваемом случае проблем с неоднозначностью идентификации не возникает в части признания достоверности присутствия в сигналах георадиолокации короткопериодной спектральной компоненты с чередованием импульсов в окрестности скважин С-2 и С-3 через 0,52 и 0,33 м. Эта компонента проявляет себя пиковым максимумом (рис. 4) среди всех остальных компонент, представляющих собой спектральные шумы.

В локальном масштабе, используя приём увеличительного стекла, контрастной и статистически значимой длиннопериодной компонентой в окрестности скважины С-2 также следует признать компоненту с периодом 1,04 м (фрагмент спектра на рис. 4, а). Аналогичная компонента в окрестности скважины С-3 (фрагмент спектра на рис. 4, б) с периодом 0,95 м фиксируется хорошо разрешённым, контрастным слабым по амплитуде максимумом.

Программа «Стадия». Эта программа разработана А.П. Кулаичевым [15] и так же, как программы «Statistica 6», «Мезозавр», выполняет спектральное разложение сигналов георадиолокации на гармонические составляющие методом интегрального преобразования Фурье. Спектральный анализ периодической структуры сигналов георадиолокации выполнялся программой «Стадия» в двух вариантах: без устранения и с устранением из сигналов георадиолокации тренда в виде закономерного уменьшения амплитуды импульсов с ростом времени задержки. Устранение тренда выполнялось автоматически операцией нормирования значений амплитуд импульсов к нулевому среднему. Сравнение полученных результатов расчёта спектров, показывает, что они одинаковы, как в присутствии, так и в отсутствии тренда в сигналах георадиолокации. Отметим, что спектральный анализ с помощью программ «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG» выполнялся без устранения обозначенного тренда из сигналов георадиолокации.

Из рис. 3 видно, что в окрестности скважин С-2 и С-3 присутствуют пиковые максимумы спектральной плотности, ука-

зывающие на доминирование в сигналах георадиолокации мощной периодической генерации импульсов с одним и тем же периодом равным 0,81 м. Другая генерация менее энергична, но также имеет одинаковый период равный 0,40 м.

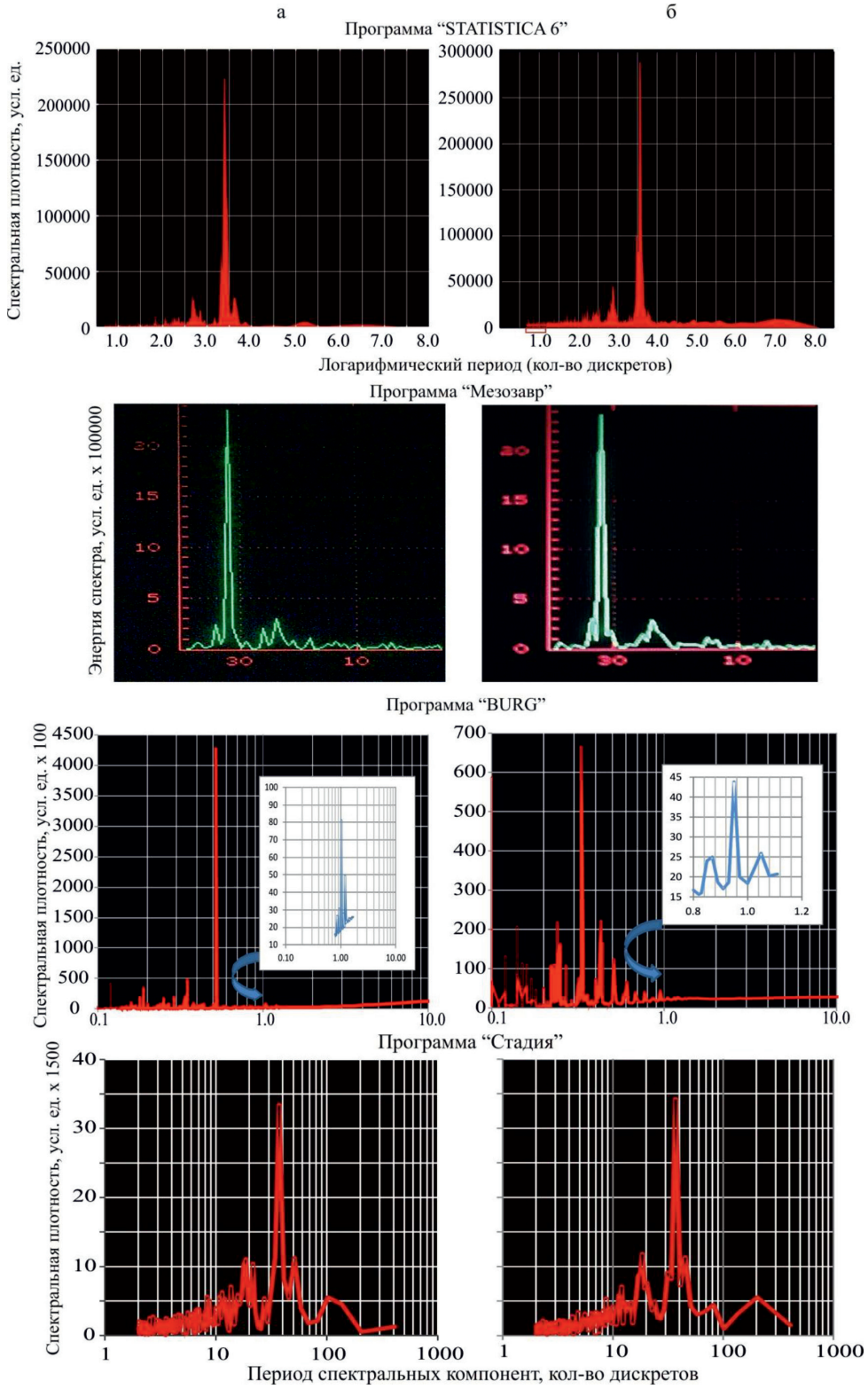


Рис. 3. Графики спектральной плотности распределения импульсов в сигналах георадиолокации, собранных в окрестности скважин: а) скважина С-2; б) скважина С-3

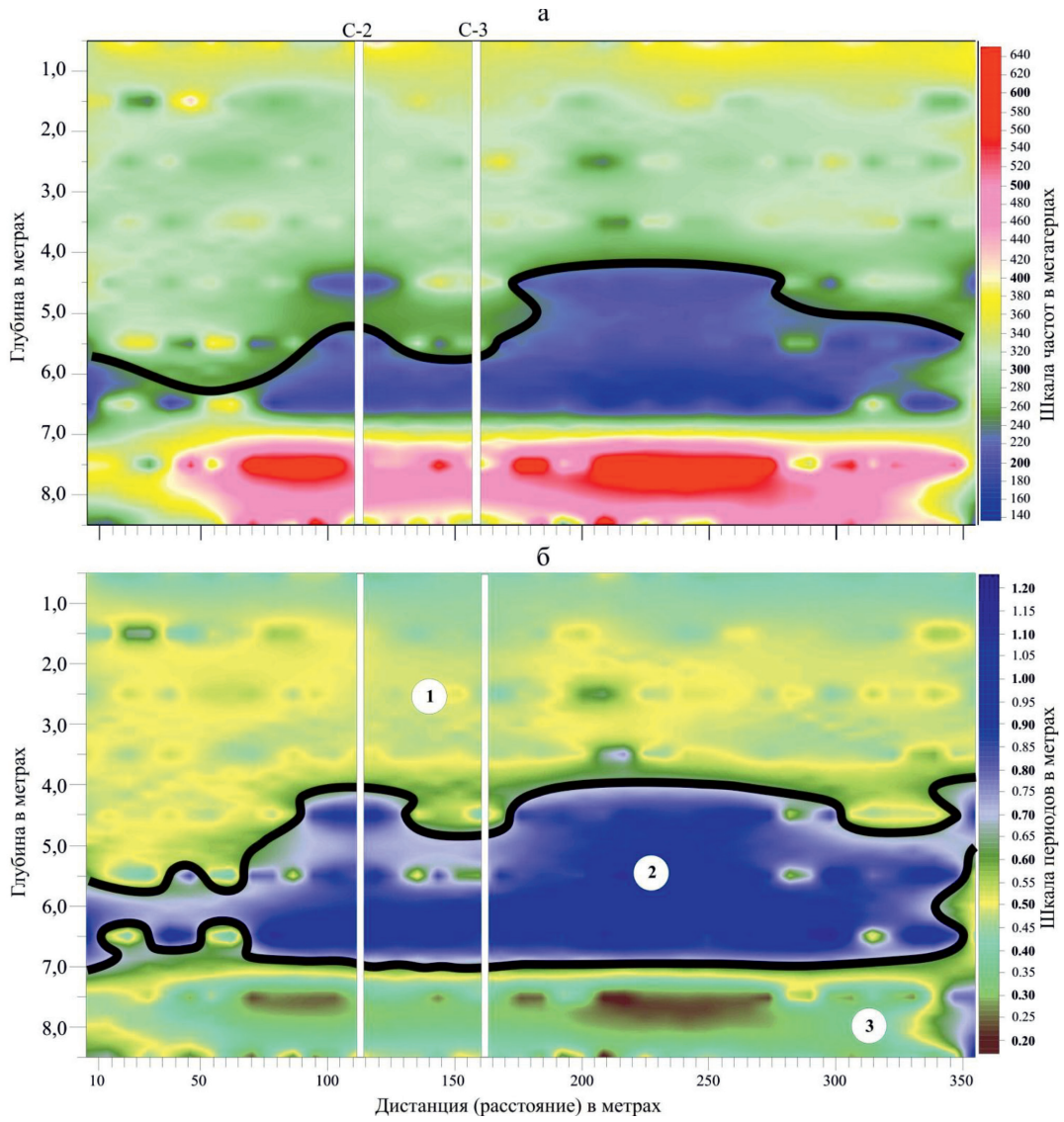


Рис. 4. Разрез значений частоты (а) и периодов импульсов (б) в сигналах георадиолокации на участке автодороги «Вилюйский тракт»: 1 – толща озёрно-болотных отложений; 2 – толща аллювиальных отложений с преобладанием песчаного материала мелкой и средней зернистости; 3 – то же, с включением пылеватых песков

Спектральный анализ радарограммы

Цель анализа – понять природу особенностей изменения в мёрзлых грунтах частотного состава сигналов георадиолокации и связанного с ним изменения периода временных рядов импульсов вдоль исследуемого участка автодороги «Вилюйский тракт» и по глубине. Анализ выполнялся с помощью программы «Геоскан32», разработанной группой компаний ЛОГИС (г. Жуковский) и ГЕОТЕХ (г. Москва) [9].

Спектральный оконный анализ с определением частотных характеристик сигналов георадиолокации и построением их графиков выполнялся на интервалах глубин: 0–1, 1–2, 2–3, ... , 8–9 м. На каждом интервале окно анализа длиной 10 м перемещалось ручным способом вдоль радарограммы с шагом 10 м. К сожалению, автоматизированное перемещение окна анализа в программе «Геоскан 32» не предусмотрено.

Результат спектрального оценивания присваивался к середине окна анализа. Полученные с помощью программы «Геоскан 32» результаты оконного спектрального анализа были построены в виде тоновых цветных разрезов частоты и периодов с помощью программы «Surfer-8» (рис. 4).

На рис. 4, а, отчётливо видна зональность частоты сигналов георадиолокации по глубине. Сверху вниз частота уменьшается. В верхней части разреза до глубины 1,0–1,5 м частота в насыпных грунтах песчано-гравийного состава равна 340–380 МГц. Ниже в обширной части разреза до глубины 4,5–6,5 м, где по данным бурения скважин расположена главная структурная литогенная граница (она показана утолщённой кривой чёрного цвета) глинистых озёрно-болотных и песчаных аллювиальных отложений, частота постепенно, но существенно снижается до 300–220 МГц. Граница смены генезиса и состава грунтов вскрыта в точках скважин С-2 и С-3 на глубине 5,3 и 6,5 м. По данным частотного анализа эта граница расположена на глубине 5,3 и 5,8 м. Разница между бурением скважин и георадиолокацией в относительных единицах составляет 3,6 и 14,4 %.

В песчаных аллювиальных отложениях, залегающих в целом до глубины около 7 м, частота снижается до минимальных значений 220–140 МГц. Появление таких сравнительно низких частот связано не с высоким поглощением энергии электромагнитной волны в мёрзлых песках, а существованием в них фациальных границ разной зернистости (преимущественно мелкой и средней), чередующихся через 0,7–1,2 м (рис. 4, а).

Инверсия частот с ростом до 400–640 МГц наблюдается в нижней части разреза в толще мёрзлых грунтов песчаного состава на строго выдержанной глубине около 7 м. Такое интересное явление с неравномерным, но упорядоченным распределением частот в горизонтальном направлении вряд ли обусловлено технической причиной, например шумами и помехами в приёмно-измерительном канале георадара. Вероятнее всего, причина высоких частот заключена в прерывистом процессе осадконакопления песчаного материала на Сергелляхской террасе в примыкании к тыловому шву высокого левого берега долины р. Лены. В результате такой геоморфологической особенности в переходной зоне ниже границы глинистых отложений озёрно-болотного генезиса сформировалась неоднородная песчаная толща по петрографическому и гранулометрическому составу. Строение этой толщи более упорядоченно и понятно на рис. 4, б.

Верхняя часть песчаной толщи в точках бурения скважин С-2 и С-3 сложена песчаным материалом в виде серых песков мелкой и средней зернистости. Верхняя граница толщи на рис. 4, б, залегает на глубине 4,0–4,8 м. По отношению к данным скважин положение границы в разрезе определяется с большей погрешностью (31,6 и 30,1 %), нежели на рис. 4, а.

Нижняя граница песчаной толщи по данным георадиолокации залегает на глубине около 7 м. Положение этой границы по визуальному описанию геологического разреза скважин однозначно не установлено. Судя по однородности значений сравнительно длиннопериодных импульсов (рис. 5, б), пески мелкой и средней зернистости в целом хорошо отсортированы, а их границы сложным образом чередуются в основании изученного участка автодороги «Вилюйский тракт» с интервалом 0,9–1,2 м.

В нижней части песчаной толщи чистота сортировки песчаного материала нарушается. В нём, как это следует из смены длиннопериодных на короткопериодные импульсы (менее 0,4 м), появляется тонкослоистая структура в виде песчаных слоёв с глинистыми частицами (пылеватые пески) и прослоек илисто-торфяного материала с включениями растительных веществ. Будучи насыщены водой, они в процессе последующего длительного промерзания превратились в льдистые образования со слоистой криогенной текстурой. По данным анализа значений периодов импульсов мощность льдистых прослоек в мёрзлых грунтах песчаного состава приблизительно оценивается в 20–30 см (рис. 5, б).

Результаты исследования и их обсуждение

Объединим полученные разными компьютерными программами результаты спектрального анализа в окрестности точек скважин С-2 и С-3 и в целом по всей радарограмме, записанной на изученном участке автодороги « Вилюйский тракт». Однако прежде рассмотрим результаты гистограммного анализа значений периодов импульсов на всём участке автодороги. Из этого рассмотрения следует, что общая совокупность значений периодов импульсов состоит из двух групп. Вероятностное распределение значений периодов в первой группе описывается смесью двух законов: равномерного и нормального. Вероятностное распределение значений периодов во второй группе проще и описывается одним логнормальным законом. Групповые описательные статистики значений периодов представлены в табл. 1. Несмотря на несоответствие нормальному закону вероят-

ностных распределений периодов значения их средних показателей близки друг к другу. Наиболее точным из них следует признать показатель модального среднего, т.е. значения, которое наиболее часто встречается в совокупности исходных данных. Такими значениями для первой и второй группы являются значения периодов 0,48 и 1,26 м.

Таблица 1

Описательная статистика значений периодов в сигналах георадиолокации по данным спектрального анализа радарограммы

Период импульсов, метры	1 группа	2 группа
Среднее арифметическое (САР)	0,46	1,34
Медианное среднее	0,47	1,31
Модальное среднее	0,48	1,26
Стандартное отклонение	0,113	0,219
Коэффициент вариации, %	24,7	16,3
Минимум	0,18	0,93
Максимум	0,77	2,78
Количество определений	427	80
Уровень доверия САР (95%)	0,011	0,049

Обобщающая статистика значений периодов импульсов сигналов георадиолокации в окрестности точек скважин С-2, С-3 и по радарограмме (всему изученному участку автодороги «Вилюйский тракт») представлена в табл. 2. Из неё следует, что частные средние оценки значений периодов, полученные в окрестности скважин с помощью программ «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG», «Стадия», и общая оценка средних значений периодов, полученная по радарограмме с помощью программы «Геоскан 32», близки друг к другу. В 1-й периодической генерации импульсов разница между частной и общей оценкой средних значений составляет 0,45 м, а во второй – 0,08 м. В относительных единицах разница соответственно равна 43,5 и 18,2 %.

Большое различие оценок для 1-й генерации говорит о том, что в окрестности скважин, т.е. в локальном масштабе, эта генерация имеет существенно меньший период, нежели в масштабе всей радарограммы. Иначе говоря, локальная оценка среднего значения периода 1-й генерации не является репрезентативной по отношению к общей оценке. Напротив, небольшое различие оценок для 2-й генерации свидетельствует о репрезентативности локальной оценки среднего значения периода.

Рассмотрим вопрос о геологической природе 1 и 2 периодических генераций в сигналах георадиолокации, опираясь на данные бурения скважин С-2 и С-3. Статистический анализ значений мощности мёрзлых грунтов, вскрытых этими скважинами, показывает, что их вероятностное распределение не подчиняется нормальному закону и описывается логнормальным законом. Руководствуясь этим фактом, оценим среднюю мощность слоёв по модальному показателю. В соответствии с ним средняя мощность, а значит, и среднее значение периода повторения грунтовых границ равно 0,83 м.

Описание разреза скважин С-2 и С-3 свидетельствует, что такими границами предстают литолого-фациальные границы, т.е. границы переслаивания грунтов глинистого и песчаного состава, слагающие мёрзлую толщу четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса.

Таблица 2

Сводная статистика значений периодов в сигналах георадиолокации по данным спектрального анализа в окрестности скважин С-2 и С-3 и по всей радарограмме

Программы спектрального анализа	Периоды 1 генерации импульсов в метрах		Периоды 2 генерации импульсов в метрах	
	С-2	С-3	С-2	С-3
Statistica 6	65	78	32	39
Мезозавр	0,81	0,81	0,40	0,40
BURG	1,04	0,95	0,52	0,33
Стадия	0,81	0,81	0,40	0,40
Среднее медианное значение в окрестности скважин С-2 и С-3	0,81	0,81	0,40	0,40
Геоскан 32 Среднее модальное значение по всей радарограмме	1,26		0,48	

Таким образом, квазипериодическая структура литолого-фациальных границ порождает такую же квазипериодическую структуру потока отражённых импульсов, наблюдаемых в сигналах георадиолокации. Разность оценок в периодах чередования в разрезе скважин литолого-фациальных границ (0,83 м) и импульсов в сигналах георадиолокации (0,81 м) незначительна и равна 0,02 м или 2,4 %.

Посмотрим, насколько согласуется общая оценка среднего значения периода 1-й генерации импульсов (1,26 м) на участке записи радарограммы с аналогичным значением периода чередования литолого-фациальных границ разреза за пределами границ этого участка, где были пробурены ещё шесть проектно-изыскательских скважин.

С дополнением данных по этим скважинам среднее значение мощности или периода чередования упомянутых границ при оптимальном разбиении исходных данных, приготовленных для гистограммного анализа в программе «Стадия», принимает наиболее вероятное значение равное 1,10 м. Разница со средним значением периода 1-й генерации импульсов (1,26 м) невелика и равна 0,16 м или 13,6 %.

Установить геологическую природу 2-й периодической генерации импульсов в точности невозможно по данным бурения не только скважин С-2 и С-2, но и других скважин, пробуренных на сопредельной территории Сергелляхской террасы в пределах реконструируемой автодороги «Вилюйский тракт». Тем не менее, опираясь на анализ лабораторных данных физико-механических свойств мёрзлых грунтов, отобранных по стволу скважин, можно с некоторой долей уверенности предположить, что геологическая природа 2-й периодической генерации импульсов порождена очень сложным сочетанием границ изменения льдистости и засолённости мёрзлых грунтов. К сожалению, существующая в инженерно-геологических изысканиях схема технологии бурения скважин с неравномерным избирательным отбором проб грунтов из каждого литологического слоя, препятствует точному определению мощности прослоев и линз льдистых и засолённых грунтов (криопэгов), а значит, и определению интервала чередования границ таких грунтов.

Таким образом, по результатам спектрального анализа периодической структуры сигналов георадиолокации и идентификации их геологической природы с привязкой к данным бурения проектно-изыскательских скважин сделаем несколько выводов.

Во-первых, с точки зрения теории системного анализа при электромагнитном возбуждении антенной георадара «ОКО-2М» с центральной частотой спектра 400 МГц в мёрзлом основании исследуемого участка автодороги «Вилюйский тракт», сложенного дисперсными грунтами песчано-глинистого состава, образуется интегральный отклик в виде двух периодических генераций импульсов. Первая генерация со средними значениями периода 1,26–1,34 м связана с процессом осадконакопления и формируется литолого-фациальными границами глинистых грунтов озёрно-болотного генезиса и песчаных грунтов аллювиального генезиса. Вторая генерация со средними значениями периода 0,46–0,48 м обусловлена процессом промерзания осадочной толщи четвертичных отложений. В результате формируется тонкослоистая структура границ с чередованием слоёв и прослоев грунтов разной льдистости и температуры, а также границ слоёв в разной степени засолённых глинистых грунтов с включением органики, являющихся, как известно, материнской средой для образования межмерзлотных криопэгов.

Во-вторых, появляется возможность оценивать мощность и долю прослоев грунтов, которые в той или иной степени создают неблагоприятные инженерно-геологические условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. В рассматриваемом случае такими опасными образованиями являются прослои льдистых грунтов и криопэгов. Их мощность (идентифицируемых по минимальным значениям периода импульсов в сигналах георадиолокации), как это следует из результатов детального гистограммного анализа, равна 0,20–0,41 м, а общая доля в основании изученного участка автодороги «Вилюйский тракт» достаточно велика (23,1 %).

В-третьих, метод интегрального преобразования Фурье, реализуемый с помощью таких программ спектрального анализа, как «Statistica 6», «Мезозавр», «Стадия», является эффективным инструментом выделения в сигналах георадиолокации длиннопериодной генерации последовательности импульсов, отражённых от литолого-фациальных границ мёрзлых дисперсных грунтов.

В-четвёртых, метод максимальной энтропии, реализуемый с помощью программы «BURG», является тонким инстру-

ментом спектрального анализа сигналов георадиолокации с чётким выделением доминирующей короткопериодной генерации импульсов, отражённых от границ свойств и состояния мёрзлых дисперсных грунтов.

В-пятых, наиболее универсальной среди рассмотренных программ, реализующих метод интегрального преобразования Фурье в варианте оконного спектрального разложения сигналов георадиолокации, является программа «Геоскан 32». Она одинаково легко выявляет все существующие в сигналах георадиолокации периодические генерации импульсов, отражённых от любых границ мёрзлых дисперсных грунтов.

Заключение

Спектральный анализ показал, что не во всех случаях ритмический рисунок записанных сигналов георадиолокации, наблюдаемых на осциллограммах или радарограммах, бывает обусловлен кратными отражениями импульсов от одной или нескольких радиоконтрастных геологических границ. Поэтому прежде, чем заниматься фильтрацией периодических импульсов, рекомендуется изучить их геологическую природу.

Привязка результатов спектрального анализа к данным буровых работ позволила изучить геологическую природу двух периодических генераций импульсов сигналов георадиолокации. Доминирующей по величине энергии оказалась 1 генерация с периодом следования импульсов равным 0,81–1,26 м. Эти импульсы отразились от границ основной литолого-фациальной ритмической структуры. Она сложена грунтами песчано-глинистого состава, слагающих до глубины 10 м верхнюю часть мёрзлой толщи четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса.

Существенно меньшая по энергии 2 генерация импульсов с периодом 0,40–0,48 м сформирована предположительно тонкослоистой структурой границ маломощных прослоев, прослоек и линз льдистых и засолённых мёрзлых грунтов, включая минерализованные рассолы, незамерзающие при температуре ниже нуля Цельсия (криопэги).

С точки зрения науки полученные результаты спектрального анализа важны, как новые знания в области изучения реакции мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов на импульсное высокочастотное электромагнитное возбуждение георадарной техникой с поверхности Земли. В прикладном, но также научном аспекте полученные результаты предлагается рассматривать как частное доказательство благоприятных физических предпосылок применения метода георадиолокации как тонкого и достоверного неразрушающего инструмента с целью изучения ритмической структуры мёрзлых четвертичных отложений, слагающих долину р. Лены и обширную Центрально-Якутскую низменность. Это одно из перспективных направлений развития метода георадиолокации в инженерной геологии и мерзлотоведении, обозначенное в работе А.В. Старовойтова и названного изучением георадарных седиментационных комплексов и фаций [16, с. 35–48]. Актуальность этого направления подтверждается в работе М.С. Судаковой и М.Л. Владова в аспекте решения задачи картирования границ льдистых грунтов [17, с. 7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-140061 р_а).

Список литературы / References

1. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. Перевод с англ. В.Н. Лисина. Редактор перевода докт. техн. наук О.А. Потапов. М.: Недра, 1985. 300 с.

Kanasewich E.R. Time sequence analysis in geophysics. Third edition. The University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, 1981. 492 p.

2. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.

Nikitin A.A. Statistical methods for detecting geophysical anomalies. M.: Nedra, 1979. 280 p. (in Russian).

3. Кулаичев А.П. Критика вейвлет-анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 12–1. С. 47–57.

Kulaichev A.P. Criticism of wavelet analysis of electroencephalograms (EEG) // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2016. № 12–1. P. 47–57 (in Russian).

4. Спектор В.Б., Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Спектор В.В., Иванова Л.Д. Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Магадан (Россия), 5–8 сентября 2017 г.: тезисы докладов. Якутск: Изд. ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2017. С. 320–321.

Spektor V.B., Shestakova A.A., Torgovkin Ya. I., Spektor V.V., Ivanova L.D. Engeneering and geological map of the Republic of Sakha (Yakutia) // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya, g. Magadan (Rossiya), 5–8 sentyabrya 2017 g.: tezisy dokladov. Yakutsk: Izd-vo FGBUN «Institut merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2017 P. 320–321 (in Russian).

5. Спектор В.Б., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Чжан Р.В., Спектор В.В. Инженерно-геокриологическое районирование территории Республики Саха (Якутия) // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 28–37.

Spektor V.B., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., Chzhan R.V., Spektor V.V. Engineering and geocryological zoning of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) // Inzhenernaya geologiya, 2017. № 2. P. 28–37 (in Russian).

6. Спектор В.Б., Спектор В.В. Рельеф и геологическое строение территории Большого Якутска // Прикладные

экологические проблемы г. Якутска: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука, 2017. С. 7–15.

Spektor V.B., Spektor V.V. Relief and geological structure of the territory of Greater Yakutsk // Prikladnye ekologicheskie problemy g. Yakutska: sbornik nauchnykh trudov. Novosibirsk: Nauka, 2017. P. 7–15 (in Russian).

7. Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации. Отраслевой дорожный методический документ 218.3.075-2016. Министерство транспорта РФ. Служба дорожного хозяйства РФ (РОСАВТОДОР). М., 2016. 71 с.

Recommendations for quality control of road construction works by the method of GPR. Industry road guidance document 218.3.075-2016. Ministerstvo transporta RF. Sluzhba dorozhnogo khozyaystva RF (ROSAVTODOR). M., 2016. 71 p. (in Russian).

8. Федорова Л.Л., Соколов К.О., Саввин Д.В., Стручков А.С. Данные мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620713, 01.06.2016. Заявка № 2016620386 от 05.04.2016.

Fedorova L. L., Sokolov K. O., Savvin D. V., Struchkov A. S. Data of monitoring GPR sounding of highways // Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh RU 2016620713, 01.06.2016. Zayavka № 2016620386 ot 05.04.2016 (in Russian).

9. Программа управления георадаром «ОКО-3» и визуализации получаемых данных. Иллюстрированное руководство пользователя. Версия 2.5. М.: ООО «ЛОГИС», 2018. 138 с.

OKO-3 GPR control program and visualization of the received data. Illustrated user's guide. Version 2.5. M: OOO «LOGIS», 2018. 138 p. (in Russian).

10. Нерадовский Л.Г. Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии / отв. ред. Г.П. Кузьмин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. Якутск: Изд. Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. 166 с.

Neradovskiy L.G. The temperature dependence of georadiolocation signal in the developed regions of the permafrost zone of Yakutia / otv. red. G.P. Kuz'min; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova. Yakutsk: Izd. In-ta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. 166 p. (in Russian).

11. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: Изд. «ГЕОС», 2017. 240 с.

Vladov M.L. Sudakova M.S. Ground penetrating radar. From the physical basics to the most promising directions. Textbook. M: Izd. «GEOS», 2017. 240 p. (in Russian).

12. Нерадовский Л.Г. К вопросу о стохастической природе сигналов георадиолокации // Геофизика. 2013. № 2. С. 58–62.

Neradovskiy L.G. The question of stochastic nature of georadiolocation signal // Geophysika, 2013. № 2. P. 58–62 (in Russian).

13. Нерадовский Л.Г. Способ георадиолокации многолетнемёрзлых пород // Патент 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. заяв. Л.Г. Нерадовский. № 2011125238/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23. 11 с.

Neradovsky L.G. Method of GPR of permafrost rocks // Patent 2490671 RU, MPK G01V 3/12, G01S1 3/88. zayav. L.G. Neradovskiy. № 2011125238/28; zayavl. 17.06.2011; publ. 20.08.2013. Byul. № 23. 11 p. (in Russian).

14. Соколов К.О., Нерадовский Л.Г. Анализ георадиолокационных данных на основе аппроксимации амплитудных значение степенной функцией // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015661470 Российская Федерация. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук. № 2015618054; заявл. 02.09.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. 2015. № 11. 1 с.

Sokolov K.O., Neradovsky L.G. Analysis of GPR data based on approximation of amplitude values by a power function // Svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2015661470 Rossiyskaya Federatsiya. Zayavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Severa im. N.V. Cherskogo Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. № 2015618054; zayavl. 02.09.2015; publ. 20.11.2015, Byul. 2015. № 11. 1 p. (in Russian).

15. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: ФОРУМ. ИНФРА-М, 2006. 512 с.

Kulaichev A.P. Methods and tools for integrated data analysis. M.: FORUM. INFRA-M, 2006. 512 p. (in Russian).

16. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. М.: Изд. МГУ, 2008. 192 с.

Starovoitov A.V. Interpretation of GPR data. Textbook. M: Izd. MGU, 2008. 192 p. (in Russian).

17. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2018. № 2. С. 3–12.

Sudakova M. S., Vladov M.L. Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar Sudakova // Moscow University Geology Bulletin. 2018. Vol. 73. № 3. P. 219–228. DOI: 10.3103/S0145875218030109.

УДК 551.24.02:528.344

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОИСТОСТИ И СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ НА РАСЧЁТ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ИНВЕРСИИ

[1,2]Нечаев Г.В., [1,2]Шестаков Н.В., [3]Такахаши Х.

[1]ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток,
[2]ФГБУН Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, e-mail: shestakov.nv@dvfu.ru;
[3]Институт сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета, Саппоро, e-mail: hiroaki@sci.hokudai.ac.jp

Точность моделирования деформаций земной коры, вызванных землетрясениями, зависит не только от детальности модели очага сейсмического события, но и от сложности и структуры используемой модели Земли. Соответственно, при решении обратной задачи (определение параметров землетрясения в результате инверсии косейсмических смещений) используемая модель внутреннего строения Земли также оказывает влияние на конечный результат. В системах предупреждения о цунами, основанных на применении методов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), одна из главных задач – определить, насколько возможно точное определение параметров землетрясения, от которых зависит надёжность последующего моделирования цунами. В данной работе рассмотрено влияние модели Земли на величины косейсмических смещений при прямом их моделировании. Рассмотрены эффекты, вызываемые влиянием слоистости, сферичности и обоих факторов одновременно. При моделировании использовались три гипотетических очага с магнитудами M_w 7,5; 8,0 и 8,5, принадлежащих Камчатской зоне субдукции. В результате моделирования определены вертикальные поля смещений морского дна и Камчатского полуострова, а также горизонтальные смещения на пунктах региональных ГНСС-сетей. Сравнение полученных смещений говорит о том, что учёт слоистости и сферичности приводит к уменьшению значений расчётных подвижек, кроме того, влияние на их величины оказывает и дальность расположения ГНСС-станций от очага землетрясения, а также магнитуда события. Рассчитанные наборы смещений на пунктах ГНСС-сетей далее были инвертированы по методу Мацууры и Хасегавы, в котором модель Земли представлена однородным полупространством. При инверсии определялась только величина смещения в очаге и магнитуда, остальные параметры считались известными. Сравнение полей вертикальных смещений морского дна, соответствующих инвертированным очагам, с опорными значениями показало, что пренебрежение слоистостью и сферичностью Земли в работе СПЦ выражается в некоторой недооценке цунамиопасности.

Ключевые слова: ГНСС-методы, предупреждение о цунами, инверсия, косейсмические смещения

INVESTIGATION OF IMPACT OF THE EARTH MODEL TO COSEISMIC DISPLACEMENTS CALCULATION AND RESULTS OF THEIR INVERSION

[1,2]Nechaev G.V., [1,2]Shestakov N.V., [3]Takakhashi Kh.

[1]Far Eastern Federal University, Vadivostok;
[2]Institute for Applied Mathematics of Far Eastern branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, e-mail: shestakov.nv@dvfu.ru;
[3]Institute of Seismology and Volcanology of Hokkaido University, Sapporo, e-mail: hiroaki@sci.hokudai.ac.jp

Accuracy of modeling of Earth's crust deformation caused by earthquakes depends not only on seismic source model details but also on particularity of utilized Earth's model. Respectively for the inverse problem (determination of earthquake's parameters during the inversion of coseismic displacements) used Earth's model affects the result too. One of the main task of tsunami warning systems (TWS), which are based on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is possibly accurate determination of earthquake's parameters that strongly affect the reliability of tsunami modelling. Influence of Earth's model to coseismic displacements' values obtained by direct modelling is reviewed in the paper. Effects of stratification and spherecity were considering individually and together. Three hypothetical sources of magnitudes M_w 7,5, 8,0 and 8,5 belonging to Kamchatka subduction zone were taken to modelling. Fields of vertical coseismic displacements of sea bottom and Kamchatka peninsula and horizontal offsets at the locations of local GNSS-networks' stations were calculated. Comparison of obtained displacements shows that considering of stratification and sphericity leads to reduction of modelled offsets. In addition, distance of GNSS-stations from earthquake source and its magnitude affect the coseismic displacements too. Calculated sets of displacements at the GNSS-networks' points were inverted by Matsuura & Hasegawa method that utilize homogeneous half-space Earth's model. The only displacement in the source value and magnitude were determined by the inversion. Comparison of coseismic displacements' vertical fields corresponding to inverted sources with reference ones showed some underestimation of tsunami hazard due to neglecting of stratification and sphericity by TWS.

Keywords: GNSS-methods, tsunami warning, inversion, coseismic displacements

В последние годы активно развиваются системы предупреждения о цунами (СПЦ), основанные на использовании методов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В отличие от СПЦ, использующих сейсмические методы, системы нового типа нацелены на определение параметров очага землетрясения и, далее, оценку

начальных движений морского дна и характеристик цунами. Подобный принцип используется в системах REGARD (Япония) и G-larmS и G-FAST (США) [1–3]. Схема работы этих систем схожа:

1) детектирование косейсмических смещений, порождённых землетрясением, ГНСС-методами (либо их комбинированием, например, с обработкой сейсмологических данных);

2) определение параметров землетрясения путём решения обратной задачи (инверсия косейсмических смещений);

3) моделирование смещений морского дна с использованием полученных параметров землетрясения;

4) расчёт характеристик цунами, заплесков волн на побережье и определение зоны затопления.

От системы требуется не только точность оценки цунамиопасности, но и оперативность её получения. Одним из факторов, влияющих на точность оценки параметров землетрясения и смещений морского дна, является используемая системой модель внутреннего строения и физических свойств Земли. Более подробные модели, участвующие в инверсии и моделировании смещений морского дна, теоретически должны способствовать более точной оценке параметров очага и цунами. Однако использование сложных моделей неизбежно приведёт к дополнительным временным затратам при расчётах и негативно отразится на быстродействии системы. Следовательно, необходимо соблюсти разумное соотношение скорости обработки данных и точности получаемых результатов. Даже в наиболее совершенной на данный момент СПЦ REGARD [1] модель Земли представлена однородным полупространством (инверсия происходит по методу Мацууры и Хасегавы [4]), т.е. не учитывает ни слоистости земной коры, ни сферичности её поверхности.

В работе [5] уже рассматривалось влияние слоистости и сферичности на величины горизонтальных косейсмических смещений, смоделированных с использованием параметров Суматра-Андаманского землетрясения M_w 9,2. В отличие от [5], в настоящей работе исследуется необходимость учёта слоистости и сферичности Земли в работе СПЦ, поскольку одним из ключевых аспектов её работы является оперативное моделирование косейсмических движений морского дна. Зависимость быстродействия гипотетической системы от задействованных моделей Земли рассматриваться не будет, поскольку здесь большую роль играют вычислительные возможности центра обработки системы.

Расчёт косейсмических смещений

Наиболее цунамиопасными регионами России являются Камчатка и Курильские острова, и наличие здесь СПЦ, основанной на ГНСС-методах, крайне желательно [6]. Для простоты рассмотрены только гипотетические землетрясения: три очага, с моментными магнитудами M_w 7,5; 8,0 и 8,5. Очаги локализованы в Камчатской зоне субдукции у берегов п-ова Камчатка, приблизительно в районе генерации землетрясения 1952 г. M_w 9,0. Данные события потенциально способны вызвать волны цунами различной интенсивности. Очаги представлены одной дислокационной плоскостью с равномерным распределением смещения. Длина L и ширина W плоскости дислокаций и величина смещения в очаге D были рассчитаны по формулам (1)–(4) [7].

$$M_w = \frac{2}{3}\log_{10} M_0 - 10,7\,, \qquad (1)$$

$$\log_{10} L = -2,28 + 0,55 \times M_w, \qquad (2)$$

$$\log_{10} W = -1,8 + 0,45 \times M_w, \qquad (3)$$

$$M_0 = \mu LWD\,. \qquad (4)$$

Полученные с использованием $\mu = 3,5 \times 10^{10}$ Н/м параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры очагов гипотетических землетрясений

магнитуда	L (км)	W (км)	D (м)
M_w 7,5	70,00	37,58	2,16
M_w 8,0	131,82	63,20	3,85
M_w 8,5	248,31	105,92	6,85

Для всех плоскостей глубина залегания верхней грани равна 5 км, угол падения 15° и направление простирания сейсморазрыва 215°, что в целом соответствует параметрам землетрясений Камчатской зоны субдукции.

Для расчёта косейсмических смещений использованы три модели Земли: I) однородное полупространство с $\mu = 3,5 \cdot 10^{10}$ (программный пакет Coulomb3.0), II) сферическая однородная и III) сферическая слоистая модели (программный пакет Static1D). В качестве сферической слоистой была использована модель Preliminary Reference Earth

Model (PREM), в то время как в сферической однородной земная кора представлена слоем толщиной 61 км с $\mu = 3{,}5 \cdot 10^{10}$ Н/м, коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}25$ и плотностью 3300 кг/м^3.

Для всех очагов и моделей среды были рассчитаны соответствующие им вертикальные косейсмические смещения в узлах сетки с шагом 0,2° (рис. 1) и максимальные вертикальные сдвиги морского дна (табл. 2). Разность косейсмических смещений дна моря, рассчитанных с использованием сферической однородной и модели однородного полупространства, показывает влияние сферичности, а разность смещений, полученных с использованием слоистой сферической и однородной сферической моделей, отображает влияние слоистости земной коры.

В соответствии с табл. 2 и рис. 1 учёт слоистости и сферичности Земли выражается в получении меньших величин вертикальных смещений. Полученная разница достигает 30 см только при самом сильном рассматриваемом землетрясении, при котором дислокации морского дна составляют порядка 3 м.

Далее, были рассчитаны горизонтальные косейсмические смещения в местах расположения станций постоянных ГНСС-наблюдений на Дальнем Востоке России (рис. 2). Как и в случае с вертикальными, наименьшие смещения соответствуют слоистой сферической модели, несколько большей величины – однородной сферической, самые большие – однородному полупространству. Влияние слоистости и сферичности значительнее на горизонтальные смещения, чем на вертикальные. Также визуально виден различный вклад сферичности и слоистости в уменьшение величины смещений в зависимости от магнитуды события.

Таблица 2

Максимальные вертикальные косейсмические смещения, соответствующие рассмотренным гипотетическим землетрясениям и моделям Земли

Магнитуда	Максимальные вертикальные движения морского дна (см)			СОМЗ / ОПМЗ	ССМЗ / СОМЗ	ССМЗ / ОПМЗ
	Однородное полупространство (ОПМЗ)	Сферическая однородная модель Земли (СОМЗ)	Слоистая сферическая модель Земли (ССМЗ)			
M_w 7,5	87,5	85,9	77,5	0,98	0,90	0,88
M_w 8,0	171,4	162,4	148,1	0,95	0,91	0,86
M_w 8,5	307,4	297,7	276,7	0,97	0,93	0,90

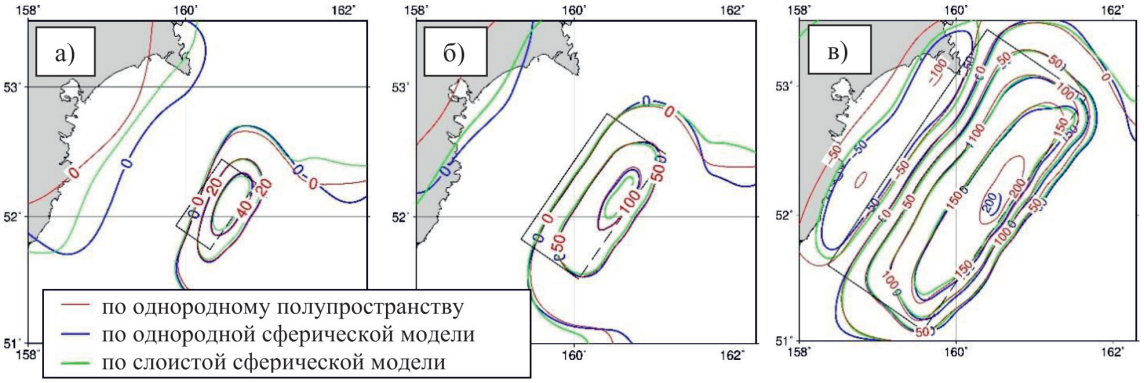


Рис. 1. Вертикальные косейсмические смещения, рассчитанные с использованием различных моделей Земли и магнитуд гипотетических землетрясений: а) M_w 7,5, б) M_w 8,0, в) M_w 8,5. Для M_w 7,5 изолинии проведены через 20 см, для M_w 8,0 и M_w 8,5 – через 50 см. Красной линией обозначены смещения, рассчитанные с помощью однородного полупространства, синей линией – по однородной сферической модели, зелёной – по слоистой сферической модели. Проекции плоскостей очагов отображены чёрными прямоугольниками, верхняя грань отображена прерывистой линией

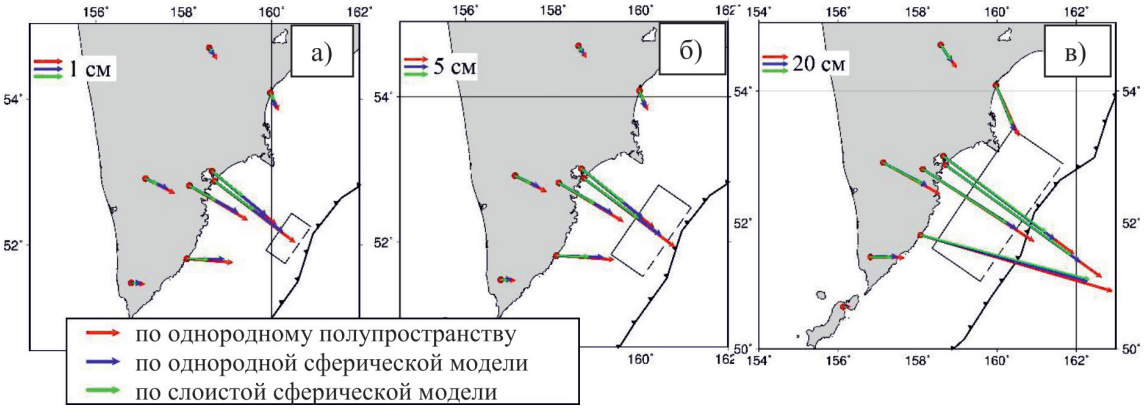


Рис. 2. Горизонтальные косейсмические смещения, рассчитанные на пунктах региональных ГНСС-сетей с использованием моделей – сферической слоистой (зелёные векторы), однородной сферической (синие векторы) и однородного полупространства (красные векторы). Использовались гипотетические очаги: а) M_w 7,5, б) M_w 8,0, в) M_w 8,5

Так, для очага M_w 7,5 эффект слоистости земной коры ведёт к более значимому преуменьшению смещений, чем сферичность поверхности. Для M_w 8,0, заметно примерно равное влияние факторов, а при M_w 8,5 слоистость практически не влияет на смещения, и к уменьшению их величин, согласно расчётам, ведёт сферичность поверхности. При этом следует заметить, что по отношению к очагам землетрясений рассматриваемые ГНСС-пункты принадлежат к разным зонам – ближней и дальней, в зависимости от магнитуды события. Для события M_w 7,5 все ГНСС-станции будут принадлежать дальней зоне, для M_w 8,0 в неё попадают только ближайшие станции, расположенные на побережье Камчатского п-ова, а для землетрясения M_w 8,5 ближняя зона охватывает уже все станции южной части Камчатки.

Таким образом, можно предположить, что чем сильнее событие и ближе наблюдаемые пункты находятся к очагу, тем больший вклад в уменьшение смещений оказывает сферичность поверхности по сравнению со слоистостью. И наоборот, чем слабее очаг и чем дальше от него расположены пункты наблюдения, тем заметнее влияние слоистости земной коры. В любом случае, оба рассматриваемых фактора приводят к уменьшению косейсмических смещений, причём в большей степени этот эффект сказывается на горизонтальной компоненте сдвигов.

Инверсия

Слоистая сферическая модель намного точнее описывает действительное строение Земли, нежели однородное полупространство. Поэтому для дальнейших вычислений мы приняли косейсмические смещения, рассчитанные с помощью модели PREM в качестве реальных подвижек. Как было показано выше, использование однородного полупространства в качестве модели Земли при моделировании косейсмических смещений приводит к переоценке их значений. И наоборот, инвертирование реальных смещений без учёта слоистости и сферичности должно привести к недооценке магнитуды землетрясения и, соответственно, цунамиопасности.

Для наглядной демонстрации этого эффекта магнитуды гипотетических землетрясений были переопределены путём инверсии по методу [4] рассчитанных с использованием сферической слоистой модели косейсмических смещений. При инверсии пространственные характеристики очагов были зафиксированы, и определялась только величина смещения в сейсмофокальной плоскости ($D_{inverted}$). Косейсмическим смещениям присвоены ошибки величиной 1 мм, по аналогии с точностями реальных измерений. После определения $D_{inverted}$ по формулам (1)–(4) были определены магнитуды инвертированных событий $M_{winverted}$ (табл. 3).

Инвертированные значения смещения в очаге $D_{inverted}$ меньше опорных (исходных) $D_{reference}$. В абсолютных значениях разница варьируется от 1 м при M_w 8,5 до 1,53 м при M_w 8,0. Однако при относительном сравнении $D_{reference}$ и $D_{inverted}$ становится очевидным, что расхождение уменьшается с ростом

магнитуды. При M_w 7,5 недооценка составляет около 50 %, при M_w 8,5–15 % от опорных значений. Для большей наглядности были смоделированы поля вертикальных косейсмических смещений (инвертированные поля вертикальных смещений) с использованием инвертированных параметров землетрясений и модели Земли PREM (рис. 3). Максимальные косейсмические смещения согласно опорной $disp_{reference}$ и инвертированной $disp_{inverted}$ моделям землетрясений представлены в табл. 4. Относительное соотношение $disp_{max}$ inverted и $disp_{max}$reference идентично отношениям $D_{reference}$ и $D_{inverted}$. При этом абсолютное максимальное расхождение в 60 см наблюдается при M_w 8.0.

С другой стороны, если в СПЦ на всех этапах обработки адаптировано однородное полупространство в качестве модели Земли, то недооценка дислокации в очаге может быть частично компенсирована переоценкой смещений морского дна в ходе последующего моделирования. В связи с этим предположением также были рассчитаны поля смещений морского дна с использованием инвертированных параметров землетрясений и однородного полупространства как модели Земли (табл. 4, рис. 3). В данном случае, действительно, инвертированные поля имеют меньшее расхождение с опорными. Для M_w 8,0 и M_w 8,5 улучшение составило 10 % от опорных значений по сравнению с применением слоистой сферической модели. Максимальная недооценка наблюдается при M_w 8,0 и равна 45 см. Для события M_w 8,5 недооценка минимальна как в абсолютном (14 см), так и в относительном (5 %) отношениях.

Таблица 3

Опорные и инвертированные значения магнитуд землетрясений и смещения в очаге

магнитуда	$D_{reference}$ (см)	$D_{inverted}$(см)	$D_{inverted}$ / $D_{reference}$	$M_{winverted}$
M_w 7,5	216,0	105,5	0,49	7,29
M_w 8,0	385,0	231,4	0,60	7,85
M_w 8,5	685,4	585,4	0,85	8,49

Таблица 4

Опорные и инвертированные максимальные вертикальные смещения морского дна

Магнитуда	Максимальные вертикальные движения морского дна (см)			$disp_{inverted}$ (однородное полупространство)/$disp_{reference}$
	$disp_{reference}$	$disp_{inverted}$ (PREM)	$disp_{inverted}$ (однородное полупространство)	
M_w 7,5	77,5	37,9	42,7	0,55
M_w 8,0	148,1	89,0	103,0	0,70
M_w 8,5	276,7	236,4	262,5	0,95

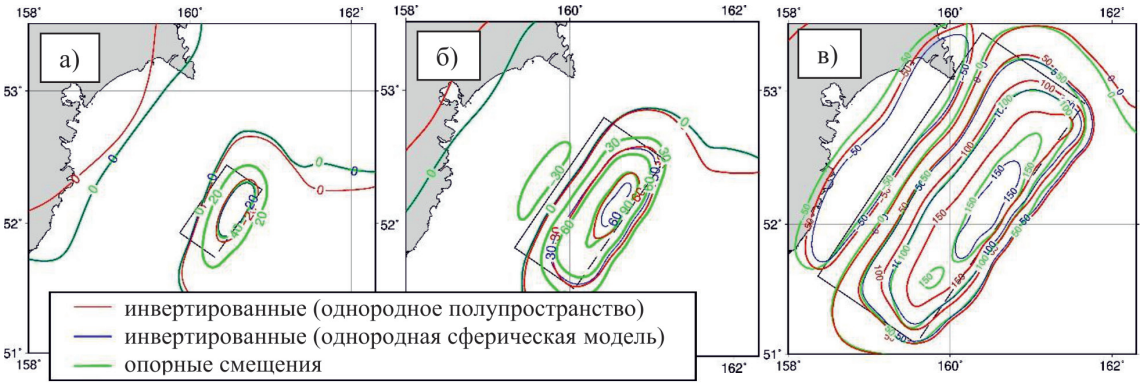


Рис. 3. Вертикальные поля смещений, соответствующие опорным (зелёные изолинии) и инвертированным очагам (красные изолинии – смещения рассчитаны в однородном полупространстве, синие изолинии – с использованием слоистой сферической модели Земли). Магнитуды гипотетических землетрясений: а) M_w 7,5, б) M_w 8,0, в) M_w 8,5

Для проверки применённой методологии, косейсмические смещения, рассчитанные в однородном полупространстве на ГНСС-станциях, были инвертированы, и полученные магнитуды достигли значений исходных, что говорит о корректности применяемого подхода.

Заключение

На примере трёх гипотетических землетрясений различной мощности было рассмотрено влияние используемой модели Земли на величины моделируемых косейсмических смещений, а также на результаты инверсии. Показано, что модель Земли существенным образом влияет на величины смещений, причём данное влияние более значимо по горизонтальной компоненте. Кроме того, учёт сферичности и слоистости влияет на смоделированные величины смещений неравномерно и варьируется в зависимости от силы землетрясения и дальности расположения наблюдаемых пунктов от очага. Тем не менее некоторые закономерности очевидны: влияние слоистости коры усиливается при удалении от очага, а сферичности поверхности – при увеличении магнитуды землетрясения и приближении к нему. Игнорирование обоих факторов ведёт к переоценке величин смещений в ходе моделирования.

Для целей СПЦ важно хорошее соответствие реальных смещений морского дна (в нашем случае – опорных смещений) с инвертированными. При использовании однородного полупространства, несмотря на некоторую недооценку величины дислокации в очаге и, соответственно, магнитуды землетрясения, недооценка инвертированных смещений в худшем случае не превышает 50 см. Наилучшее соответствие получено при наиболее сильном событии M_w 8,5.

Если учесть, что одноплоскостная модель землетрясения не способна точным образом описать реально возникшие смещения в очаге землетрясения, то полученные расхождения можно считать приемлемыми, по крайней мере для наиболее сильных землетрясений. В случае событий $M_w \leq 8{,}0$ недооценка максимальных смещений морского дна достигает половины от опорных значений, что может отразиться на выявлении самого факта цунами при его моделировании.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что в случае сильных землетрясений $M_w \approx 8{,}5$, происходящих в зоне субдукции на небольшом удалении от побережья и ГНСС-станций, пренебрежение слоистостью и сферичностью не является критическим. С другой стороны, для событий $M_w \leq 8{,}0$ всё же желательно использование более точной модели Земли.

Таким образом, при возникновении сильных землетрясений задействование наиболее простой модели Земли (однородное полупространство) в СПЦ способствует довольно точному и наиболее быстрому на данный момент определению начальных параметров волны цунами.

Работа выполнена при поддержке Японско-Российского центра молодёжных обменов, а также Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Список литературы / References

1. Kawamoto S., Ohta Y., Hiyama Y., Todoriki M., Nishimura T., Furuya T., Sato Y., Yahagi T., Miyagawa K. REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017 February. Vol. 122. 26 p. DOI: 10.1002/2016JB013485.

2. Melgar D., Geng J., Crowell B.W., Haase J.S., Bock Y., Hammond W.C., Allen R.M. Seismogeodesy of the 2014 M_w6.1 Napa earthquake, California: Rapid response and modeling of fast rupture on a dipping strike-disp fault. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015 May. Vol. 120. 22 p. DOI: 10.1002/2015JB011921.

3. Crowell B.W., Schmidt D.A., Bodin P., Vidale J.E., Gomberg J., Hartog J.R., Kress V.C., Melbourne T.I., Santillan M., Minson S.E., Jamison D.G.. Demonstration of the Cascadia G-FAST Geodetic Earthquake Early Warning System for the Nisqually, Washington, Earthquake. Seismological Research Letters. 2016. Vol. 87. Number 4 July/August. 14 p. DOI: 10.1785/0220150255.

4. Matsuura M., Hasegawa Y. A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints. Physics of the Earth and planetary interiors. 1987. Vol. 47. P. 179–187.

5. Banerjee P., Pollitz F.F., Bürgmann R. The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from Far-Field Static Offsets. Science. 2005. Vol. 308. Issue 5729. P. 1769–1772. DOI: 10.1126/science.1113746.

6. Нечаев Г.В., Шестаков Н.В., Такахаши Х., Герасименко М.Д., Сысоев Д.В. О применении методов Глобальных навигационных спутниковых систем для целей раннего предупреждения о цунами в Курило-Камчатском регионе // Успехи современного естествознания. 2020. № 3. С. 92–98. DOI: 10.17513/use.37351.

Nechaev G.V., Shestakov N.V., Takahashi H., Gerasimenko M.D., Sysoev D.V. On application of methods of Global Navigation Satellite Systems for tsunami early warning in the Kuril-Kamchatka region // Advances in current natural sciences. 2020. № 3. P. 92–98 (in Russian).

7. Blaser L., Krüger F., Ohrnberger M., Scherbaum F. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. Vol. 100. № 6. P. 2914–2926. DOI: 10.1785/0120100111.

УДК 556:544.723

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КАДМИЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ КАОЛИНОМ

Пимнева Л.А., Искакова А.И., Ларионова К.А.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: l.pimneva@mail.ru

Актуальной проблемой в наши дни является очистка природных вод от промышленных стоков. В промывных водах гальванических производств содержатся загрязняющие вещества в виде ионов тяжелых металлов. Известно, что ионы многих тяжелых металлов обладают биологической активностью, мутагенными и токсическими свойствами. Одним из таких ионов в воде является кадмий. Эффективность извлечения тяжелых металлов из вод является важной экологической задачей. Применяемыми методами очистки вод служат реагентное осаждение, электрокоагуляция, электролиз, которые требуют большого количества химических реагентов и при использовании которых образуются вторичные продукты загрязнения. Применение сорбционных технологий с использованием природных адсорбентов – экономически выгодный процесс. В настоящей статье представлены результаты исследований адсорбционной активности природной и модифицированных форм каолина по отношению к ионам кадмия. С помощью рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа определен химический и минералогический состав природного каолина. Каолин – глинистый минерал, в большом количестве находится на территории Тюменской области. Исследован процесс поглощения ионов кадмия в зависимости от его концентрации в растворе при температуре 298 К в статических условиях. Методом разбавления готовили модельные растворы нитрата кадмия. Содержание ионов кадмия в растворах составляло от 0,02 до 0,15 ммоль/мл. Результаты исследования адсорбционной активности каолина показали, что ОН-форма каолина адсорбирует значительно больше ионов кадмия по сравнению с нативной и Н-формой каолина. Построенные изотермы адсорбции ионов кадмия отражают мономолекулярную адсорбцию. Рассчитаны значения максимальной адсорбционной емкости ионов кадмия в зависимости от формы каолина. Химический, фазовый состав, установленная поглотительная способность каолина свидетельствуют о перспективности его применения для извлечения ионов кадмия из природных и промышленных сточных вод.

Ключевые слова: адсорбция, ионы кадмия, каолин, модифицирование каолина, изотермы адсорбции

EXTRACTION OF CADMIUM FROM AQUEOUS SOLUTIONS WITH MODIFIED KAOLIN

Pimneva L.A., Iskakova A.I., Larionova K.A.

Tyumen industrial University, Tyumen, e-mail: l.pimneva@mail.ru

An urgent problem today is the treatment of natural waters from industrial effluents. The washing waters of electroplating plants contain pollutants in the form of heavy metal ions. It is known that many heavy metal ions have biological activity, mutagenic and toxic properties. One of these ions in water is found in cadmium. The efficiency of extracting heavy metals from water is an important environmental issue. The applied methods of water treatment use reagent deposition, electrocoagulation, and electrolysis, which require a large number of chemical reagents and form secondary products of contamination. The use of sorption technologies using natural adsorbents is a cost-effective process. This article presents the results of studies of the adsorption activity of natural and modified forms of kaolin in relation to cadmium ions. Using x-ray diffraction and x-ray phase analysis, the chemical and mineralogical composition of natural kaolin was determined. Kaolin is a clay mineral found in large quantities on the territory of the Tyumen region. The process of absorption of cadmium ions from its concentration in a solution at a temperature of 298 K under static conditions is studied. Model solutions of cadmium nitrate were prepared by dilution. The content of cadmium ions in solutions varied from 0.02 to 0.15 mmol / ml. The results of the study of the adsorption activity of kaolin showed that the OH-form of kaolin significantly more adsorbs cadmium ions, compared with the native and N-form of kaolin. The constructed isotherms of adsorption of cadmium ions reflect monomolecular adsorption. The values of the maximum adsorption capacity of cadmium ions depending on the form of kaolin are calculated. The chemical, phase composition, and established absorption capacity of kaolin indicate that it is promising for the extraction of cadmium ions from natural and industrial wastewater.

Keywords: adsorption, cadmium ions, kaolin, kaolin modification, adsorption isotherms

Загрязнение природных вод промышленными стоками является актуальной проблемой в наши дни, оно негативно влияет на экологию биосферы. В роли загрязнителей вод выступают сбросы гальванических производств, которые потребляют огромное количество воды для промывки обрабатываемых деталей [1]. В сточных и промывных водах данных предприятий содержатся ионы тяжелых металлов, обладающие биологической активностью, мутагенными и токсическими свойствами, приводящими к отравлению живых организмов и человека.

К тяжелым металлам, содержащимся в воде, относится кадмий. Повышенная концентрация ионов кадмия в питьевой и водопроводной воде приводит к таким проблемам со здоровьем, как анемия, поражение легких, печени и почек, ослабление костей,

кардиопатия, эмфизема легких, остеопороз и повышение дефицита цинка и селена [2]. По этим самым причинам удаление ионов кадмия относится к основным задачам водоочистки.

Возникает потребность извлечения ионов кадмия из водных объектов с использованием эффективных методов. Одним из них, используемым на практике, является адсорбционный. В XXI в. стали активно применять природные адсорбенты со слоистой структурой алюмосиликатов для извлечения тяжелых металлов [3, 4]. Эти адсорбенты экономичны, стоят недорого, механически устойчивы, обладают высокими сорбционными характеристиками.

Целью данной работы является исследование способности природного и модифицированного каолина поглощать ионы кадмия из водных растворов.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве адсорбента использовали природный и модифицированный каолин. Рентгеноструктурным анализом (РСА) при помощи сканирующего растрового микроскопа JEOLJSM 6510 LV определяли химический состав каолина, который представлен в табл. 1. Точность установления элементного состава ∓2%. Потери при прокаливании каолина составляют 5,51%.

Согласно ГОСТ 9169-75 по содержанию оксида алюминия каолин относится к высокоосновным глинам.

Фазовый состав каолина определяли с использованием рентгенофазового анализа, представленного на рис. 1. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре Bruker D2 Phaser с линейным детектором Lynxeye (CuK_a – излучение, Ni – фильтр).

Согласно полученным данным рентгенофазового анализа можно выделить две фазы: каолинит – 98% и хлорит – 2%.

Каолин относится к классу алюмосиликатов [5]. Основным минералом природного каолина является каолинит. Кристаллическая решетка неподвижная, состоит из двухслойных пакетов [5], один слой состоит из октаэдров, второй слой – из кремнекислородных тетраэдров. Между слоями находятся катионы щелочных металлов Na^+, K^+ и щелочноземельных металлов Ca^{2+}, Mg^{2+} [5], которые являются источником катионообменной способности каолина. Расстояние между пакетами постоянно и составляет 0,4 нм, каолинит не набухает в воде.

Таблица 1

Химический состав каолина

Содержание	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	TiO_2
% масс.	49,22	46,87	1,21	0,13	0,42	0,86	0,97

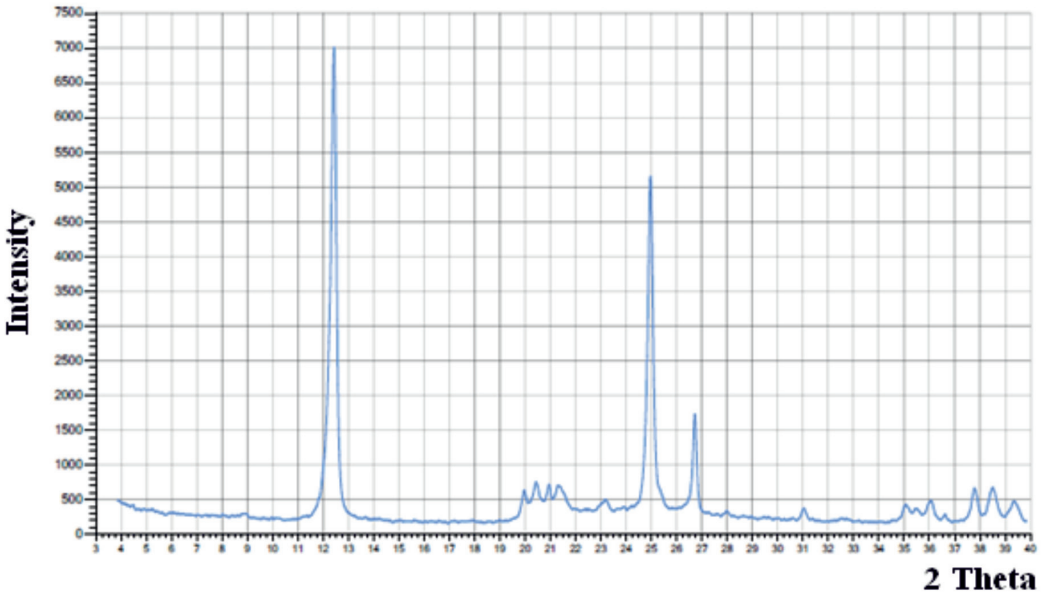


Рис. 1. Рентгенограмма каолина

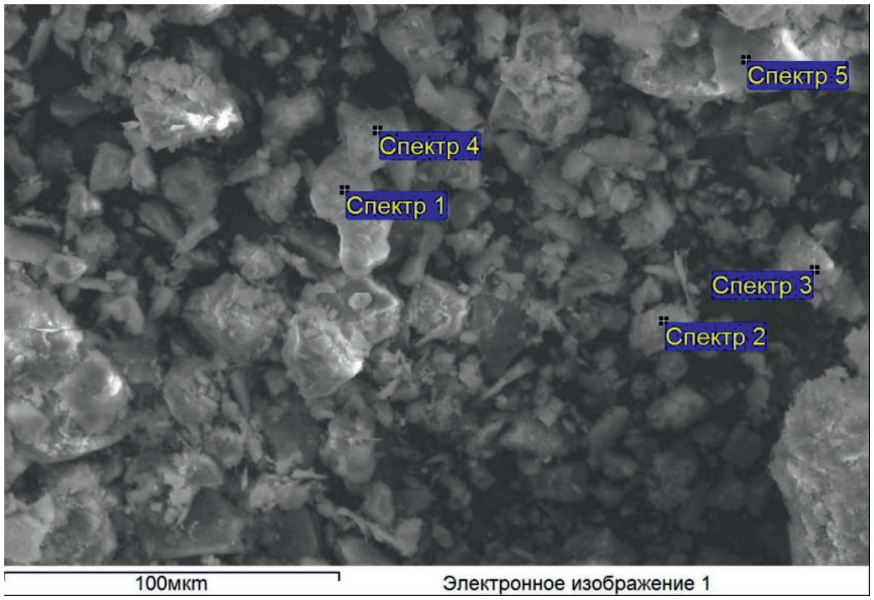


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок природной (нативной) формы каолина

На рис. 2 представлен снимок нативной формы каолина.

Адсорбцию ионов кадмия на каолине изучали в нитратных растворах в статических условиях. Для улучшения адсорбционных свойств каолина провели его модифицирование. Химическую модификацию осуществляли переводом нативной формы каолина 2М растворами соляной кислоты HCl и гидроксида натрия NaOH. Содержание ионов кадмия в растворах варьировали от 0,02 до 0,15 ммоль/мл при температуре 298 К. Концентрацию ионов кадмия в растворе определяли комплексонометрическим титрованием.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлена зависимость удельной адсорбции ионов кадмия от равновесной концентрации на каолине в нативной и модифицированных Н- и ОН-формах. Формы кривых имеют выпуклый характер, что указывает на высокое сродство ионов кадмия к каолину. На кривых отсутствуют перегибы, значит, все молекулы исходного вещества находятся в диссоциированном состоянии. С увеличением концентрации ионов кадмия в исходном растворе величина адсорбции возрастает. Величина адсорбции в зависимости от формы каолина имеет значения: нативная – 0,89 ммоль/мл; Н-форма – 0,96 ммоль/мл; ОН-форма – 1,26 ммоль/мл. Анализ полученных результатов показывает, что величина адсорбции изменяется в ряду:

нативная > Н-форма > ОН-форма.

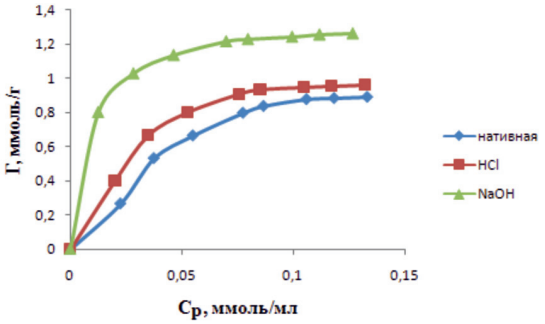


Рис. 3. Изотермы адсорбции ионов кадмия при температуре 298 К

Процесс адсорбции на каолине объясняется тем, что в кристаллах обмен ионами происходит только на внешней поверхности. Адсорбционные свойства природных алюмосиликатов находятся в прямой зависимости от величины удельной поверхности [6].

На рис. 4 представлен ИК спектр каолина для подтверждения процесса адсорбции. Полосы поглощения в области 3600–3800 см$^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям ОН-групп [7]. Присутствующий пик при 730–780 см$^{-1}$ соответствует наличию связей Al-O, интенсивный пик при 830–1050 см$^{-1}$ отвечает валентным колебаниям Si-O- Si связей [7].

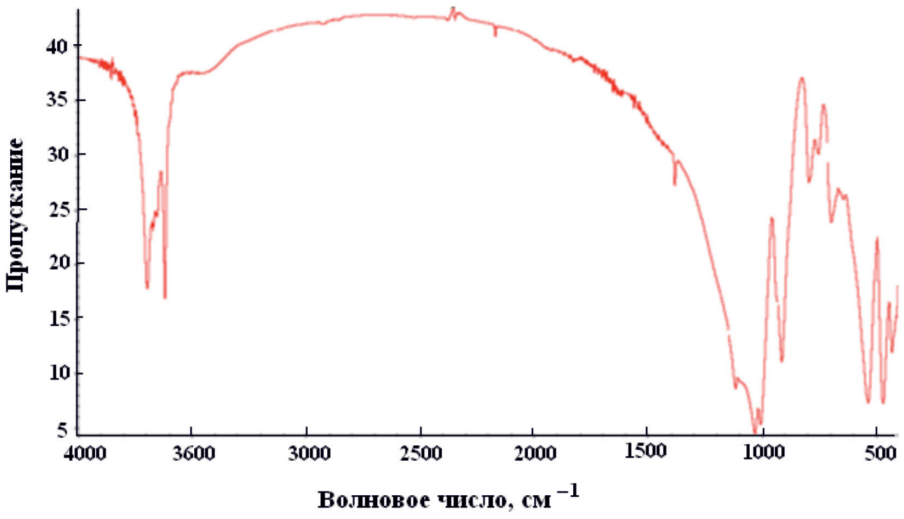


Рис. 4. ИК – спектр нативного (природного) каолина

Таблица 2

Модель	Ленгмюра	Фрейндлиха	Темкина
Уравнение	$\Gamma = \Gamma_\infty \frac{k_L \cdot C_P}{1 + k_L \cdot C_P}$	$\Gamma = k_F C_P^{1/n}$	$\Gamma = \frac{1}{\infty} \cdot \ln(k_T \cdot C_P)$
Уравнение в линейной форме	$\frac{C_P}{\Gamma} = \frac{C_P}{\Gamma_\infty} + \frac{1}{\Gamma_\infty \cdot k_L}$	$\lg \Gamma = \lg k_F + \frac{1}{n} \cdot \lg C_P$	$\Gamma = \frac{1}{\infty} \cdot \ln k_T + \frac{1}{\infty} \cdot \ln C_P$

Примечание. Здесь Г – величина адсорбированного кадмия (ммоль/г), k_L и Γ_∞; k_F и n; k_T и ∞ – константы Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина соответственно.

Таблица 3

Экспериментально полученные константы Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина

Форма каолина	Ленгмюра			Фрейндлиха			Темкина		
	Γ_∞, $\frac{\text{ммоль}}{\text{г}}$	k_L, $\frac{\text{мл}}{\text{ммоль}}$	R^2	$\ln k_F$	1/n	R^2	$\ln k_T$	1/α	R^2
Нативная	1,23	22,63	0,987	1,55	0,19	0,936	4,44	0,35	0,961
Н-форма	1,14	46,15	0,995	0,96	0,44	0,883	5,51	0,29	0,937
ОН-форма	1,35	123,2	0,999	1,32	0,64	0,896	19,9	0,09	0,965

Изотермы адсорбции по классификации БЭТ [8] соответствуют мономолекулярному типу. Для количественного описания адсорбционного равновесия использовали несколько моделей, приведенных в табл. 2.

На рис. 5 представлены изотермы в координатах линейной формы уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина. Результаты обработки линейных изотерм адсорбции ионов кадмия приведены в табл. 3. По значению коэффициентов корреляции модель Ленгмюра описывает экспериментальные данные лучше, чем другие модели. Результаты расчета подтверждают, что при модифицировании каолина гидроксидом натрия повышается его предельная адсорбция до 1,35 ммоль/мл.

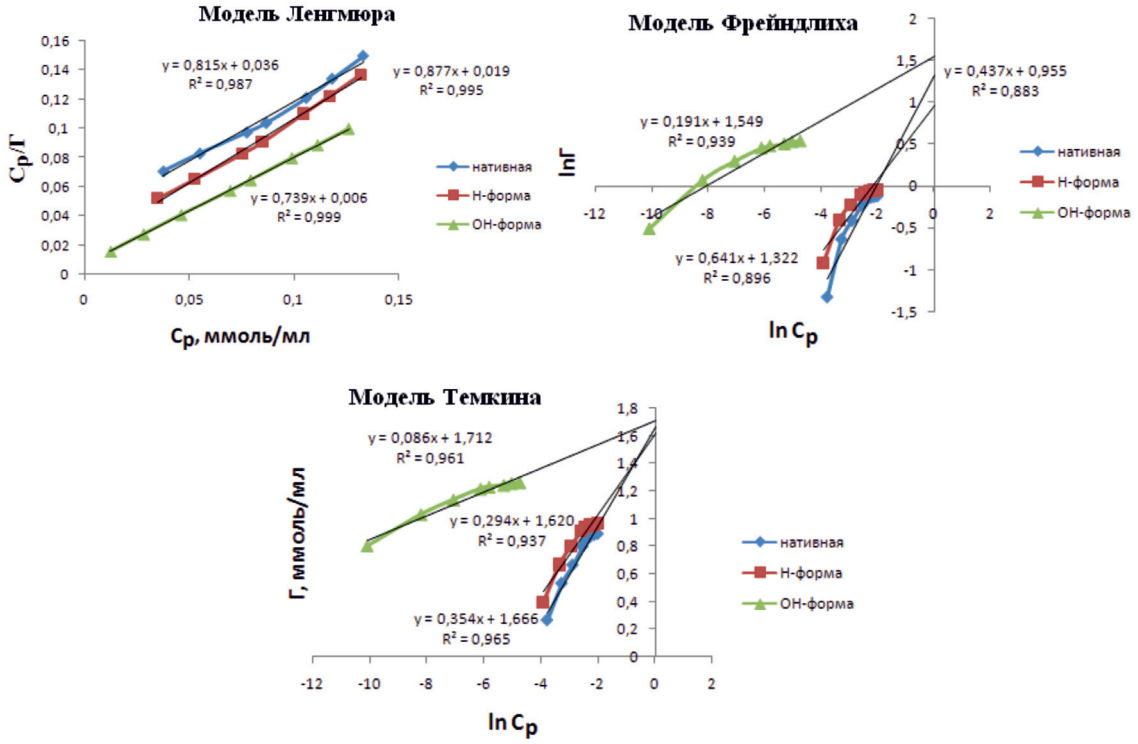


Рис. 5. Изотермы адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина в линейных координатах ионов кадмия на каолине

Заключение

Установлено, что модифицирование каолина соляной кислотой и гидроксидом натрия приводит к увеличению адсорбционных характеристик адсорбента по отношению к ионам кадмия. Химический, фазовый состав, установленная поглотительная способность каолина свидетельствуют о перспективности его применения для извлечения ионов кадмия из природных и промышленных сточных вод.

Список литературы / References

1. Лупандина Н.С., Свергузова Ж.А. Очистка сточных вод от тяжелых металлов как фактор повышения экологической безопасности // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 4. С. 19–22.

Lupandina N.S., Sverguzova J.A. Wastewater Treatment from heavy metals as a factor for improving environmental safety // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2012. № 4. P. 19–22 (in Russian).

2. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: «Мир», 1987. 288 с.

Moore J.V., Ramamurti S. Heavy metals in natural waters. M.: «Mir», 1987. 288 p. (in Russian).

3. Каныгина О.Н., Четверикова А.Г., Стрекаловская А.Д., Варламова О.В. К вопросу о сорбционной очистке воды монтмориллонит содержащей глиной // Вестник ОГУ. 2014. № 9. С. 160–163.

Kanygina O.N., Chetverikova A.G., Strekalovskaya A.D., Varlamova O.V. On the issue of sorption treatment of water with montmorillonite containing clay // Vestnik OGU. 2014. № 9. P. 160–163 (in Russian).

4. Иванова Е.С., Гавронская Ю.Ю., Пак В.Н. Структура и сорбционные свойства Н-формы глины Луковского месторождения Псковской области // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 2. С. 254–259.

Ivanova E.S., Gavronskaya Yu.Y., Pak V.N. Structure and sorption properties of the N-form clay of the Lukovsky Deposit in the Pskov region // Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy. 2014. Vol. 14. № 2. P. 254–259 (in Russian).

5. Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 721 с.

Betekhtin A.G. Course of crystallography: textbook. M.: KDU, 2007. 721 p. (in Russian).

6. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе. Тула: Гриф и К, 2012. 124 с.

Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Trofimov S.Ya. Soil acidity. Acid-base buffering of soils. Aluminum compounds in the solid phase of the soil and in the soil solution. Tula: Grif i K, 2012. 124 p. (in Russian).

7. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного адсорбента // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 2. С. 237–245.

Shilina A.S., Milinchuk V.K. Sorption treatment of natural and industrial waters from heavy metal cations and radionuclides with a new type of high-temperature adsorbent // Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy. 2010. Vol. 10. № 2. P. 237–245 (in Russian).

8. Волков В.А. Теоретические основы охраны окружающей среды. СПб.: Лань, 2015. 188 с.

Volkov V.A. Theoretical foundations of environmental protection. SPb.: Lan', 2015. 188 p. (in Russian).

УДК 504.054(470.111)

РАДИАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИДРОБИОНТОВ УСЛОВНО ЧИСТОЙ ТЕРРИТОРИИ НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Пучков А.В., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В.

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова РАН, Архангельск, e-mail: vp-andrew@list.ru

Авторами проведены исследования отдельных проб гидробионтов чистой территории Ненецкого автономного округа (НАО) на содержание в них естественных и искусственных радионуклидов. Условно чистой территорией определены бассейны рек Несь, Вижас, Ома, Снопа, Пеша и территории одноименных населенных пунктов. На данном этапе исследований были отобраны пробы гидробионтов с рек Несь, Вижас, Ома, Пеша и озера, располагающегося между с. Несь и д. Вижас. Для реализации намеченной цели были применены методы альфа-, бета-радиометрии, полупроводниковой гамма-спектрометрии и радиохимической пробоподготовки на определение радионуклида стронций-90. Выявлено наличие искусственных радионуклидов цезий-137 и стронций-90 в гидробионтах, отобранных с реки Несь. В соответствии с действующими в Российской Федерации гигиеническими требованиями полученные значения удельных активностей радионуклидов цезий-137 и стронций-90 не превышают нормируемых значений в рыбе, используемой для пищевых целей. Единственным предположением, позволяющим объяснить факт наличия искусственных радионуклидов в гидробионтах реки Несь, является возможный радиоактивный след, возникший по результатам ядерных испытаний на архипелаге Новая Земля. Для подтверждения наличия искусственных радионуклидов в гидробионтах реки Несь, а также выявления других возможных причин данного факта планируется повторный отбор проб гидробионтов с данной реки с разделением по видам, возрасту, а также отдельным системам организма, а также отбор проб других компонентов природной среды бассейна реки (донные отложения, водная среда, растительность). Кроме этого, отмечен незначительный повышенный уровень радионуклида калий-40 в гидробионтах, отобранных в р. Вижас. В целом содержание радионуклида калий–40 варьируется в пределах характерных границ для гидробионтов других регионов Земли.

Ключевые слова: гидробионты, радионуклид, стронций, цезий, калий, кривая распада

RADIATION PARAMETERS OF HYDROBIONTS OF THE BACKGROUND TERRITORY OF THE NENETS AUTONOMOUS OKRUG

Puchkov A.V., Yakovlev E.Yu., Druzinin S.V.

Federal Centre for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov RAS, Archangelsk, e-mail: vp-andrew@list.ru

We studied hydrobionts at background territories of Nenets autonomous okrug to determine natural and artificial radionuclides in them. We consider that background territories of the NAO are river basins named Nes', Vizhas, Oma, Snopa, Peosha and villages with same names. At this stage of the research, we took samples of hydrobionts from the Nes', Vizhas, Oma, Peosha rivers and a lake located between Nes' and Vizhas. The methods of alpha, beta radiometry, semiconductor gamma spectrometry and radiochemical sample preparation for the determination of radionuclide strontium-90 were used to achieve our goal. The presence of artificial radionuclides of cesium-137 and strontium-90 in hydrobionts taken from the Nes' river was determined. In accordance with the current hygiene requirements in the Russian Federation, the obtained values of the cesium-137 and strontium-90 radionuclides activities do not exceed the normalized values in fish used for food purposes. The main reason for the revealed fact of the presence of artificial radionuclides in the hydrobionts of the Nes' river is a possible radioactive track that arose as a result of nuclear tests on the Novaya Zemlya archipelago. To confirm the presence of artificial radionuclides in the hydrobionts of the Nes' river, as well as to identify other possible causes of this fact, we planned to re-take samples of hydrobionts from this river with separation by species, age and body systems, as well as take samples of other components of the natural environment of the river basin (bottom sediments, aquatic environment, vegetation). In addition, a slight increased level of potassium-40 radionuclide was noted in hydrobionts taken in the Vizhas river. In general, the content of potassium – 40 radionuclide varies within the characteristic boundaries for hydrobionts of other regions of the Earth.

Keywords: hydrobionts, radionuclide, strontium, cesium, potassium, decay curve

Ненецкий автономный округ (НАО) – особый регион, уникальность которого заключается в природно-ресурсном богатстве, в т.ч. водными биологическими ресурсами. Практически все водоемы в НАО служат местом нагула, зимовки, нереста и миграции различных видов рыб. Ихтиофауна в реках и озерах представлена 40 видами водных биоресурсов, а в прибрежных морских водах – 64 видами, из которых 27 видов имеют промысловое значение [1]. Рыболовство, наряду с оленеводством и охотой, является одним из основных традиционных хозяйств, а рыба – один из основных источников питания у населения НАО [2].

С учетом сложности природно-климатических условий, труднодоступности большей части территории региона, но в то же время все возрастающего уровня хозяйственной деятельности, актуальность

оценки экологических параметров водных биологических ресурсов остается на высоком уровне. При этом в условиях наличия большого количества ядерно- и радиационно-опасных объектов (в том числе объектов «ядерного наследия») как на территории (в т.ч. вокруг территории) Северо-Западного федерального округа, так и частично на территории НАО оценка радиационных параметров стоит особняком среди всех остальных параметров загрязнения компонентов окружающей среды [3].

В части ихтиофауны происходят интенсивные процессы аккумуляции рыбой радионуклидов как из водной среды, так и из донных отложений, кормовых гидробионтов, подводной растительности. В связи с этим рыба становится своеобразным биоиндикатором наличия в природных средах радионуклидов как природного, так и техногенного происхождения [4; 5].

Одними из основных техногенных загрязнителей рыбных ресурсов являются долгоживущие радионуклиды цезий-137 и стронций-90 [4]. Данные радионуклиды являются яркими представителями «осколочной активности» (имеющие наибольший выход при делении ядерного топлива на основе радионуклидов урана и плутония), наличие которых в компонентах природной среды обусловлено как современной деятельностью предприятий по обращению с радиоактивными отходами, стационарных и транспортных ядерно-энергетических установок и др., так и объектами «ядерного наследия» (испытания ядерного оружия, «мирные» ядерные взрывы и др.).

Кроме искусственных радионуклидов цезий–137 и стронций–90 гидробионты могут аккумулировать в различных системах организма радионуклиды естественного происхождения. В первую очередь, это радионуклиды радиоактивных рядов урана–238 и тория–232, а также радионуклид калий–40, содержащиеся в водной среде, донных отложениях, кормовых гидробионтах и подводной растительности и др. Их содержание в компонентах природной среды напрямую зависит от геологического строения территории, геохимического состава, климатообразующих факторов, а также антропогенного вмешательства в результате различного рода деятельности человека (например, деятельность нефтегазодобывающей отрасли) [6].

Целью исследования в данной работы было провести отбор проб гидробионтов (рыба без разделения на виды) в западной части территории НАО, обеспечить качественную их пробоподготовку (в том числе с применением методов радиохимической подготовки) и провести измерения радиационных параметров проб гидробионтов с применением высокоточной радиометрической и спектрометрической аппаратуры.

Материалы и методы исследования

Для достижения целей изучения радиационных параметров объектов окружающей среды территорий НАО в рамках данной работы авторами было проведено изучение гидробионтов в реках Несь, Вижас, Ома, Пеша и одного озера б/н к югу между с. Несь и д. Вижас. Для этого в период с 01.08.2019 по 28.02.2020 были отобраны 12 проб указанного объекта общей массой около 23 кг. До момента проведения измерений пробы гидробионтов были законсервированы (глубокая заморозка в условиях морозильной камеры). Точки отбора проб гидробионтов указаны на рис. 1.

Подготовка проб гидробионтов проводилась в лабораторных условиях путем высушивания каждой пробы с дальнейшим озолением с применением муфельной печи при температуре не более 400 °С.

Определение радионуклида стронций-90 проводилось с применением методики радиохимического выделения его дочернего продукта распада радионуклида иттрия-90 в соответствии с [7] с дальнейшим измерением на бета-радиометре (при этом авторами принято, что в пробе радионуклиды стронций-90 и иттрий-90 находятся в состоянии радиоактивного равновесия). Подтверждение достоверности и чистоты радиохимического выделения проводилось методом построения «кривой распада» радионуклида иттрия-90.

Измерение проб гидробионтов на радиационный фактор проводилось с применением следующих средств измерений:

– полупроводникового гамма-спектрометрического комплекса ORTEC с детектором GEM 10 в низкофоновом исполнении с азотным охлаждением (для определения гамма-излучающих радионуклидов и их удельной активности);

– низкофонового альфа-бета-радиометра РКС-01А «Абелия» (для определения суммарной удельной активности отдельно бета-излучающих и альфа-излучающих радионуклидов, а также удельной активности радионуклида стронций-90 по его дочернему радионуклиду иттрий-90).

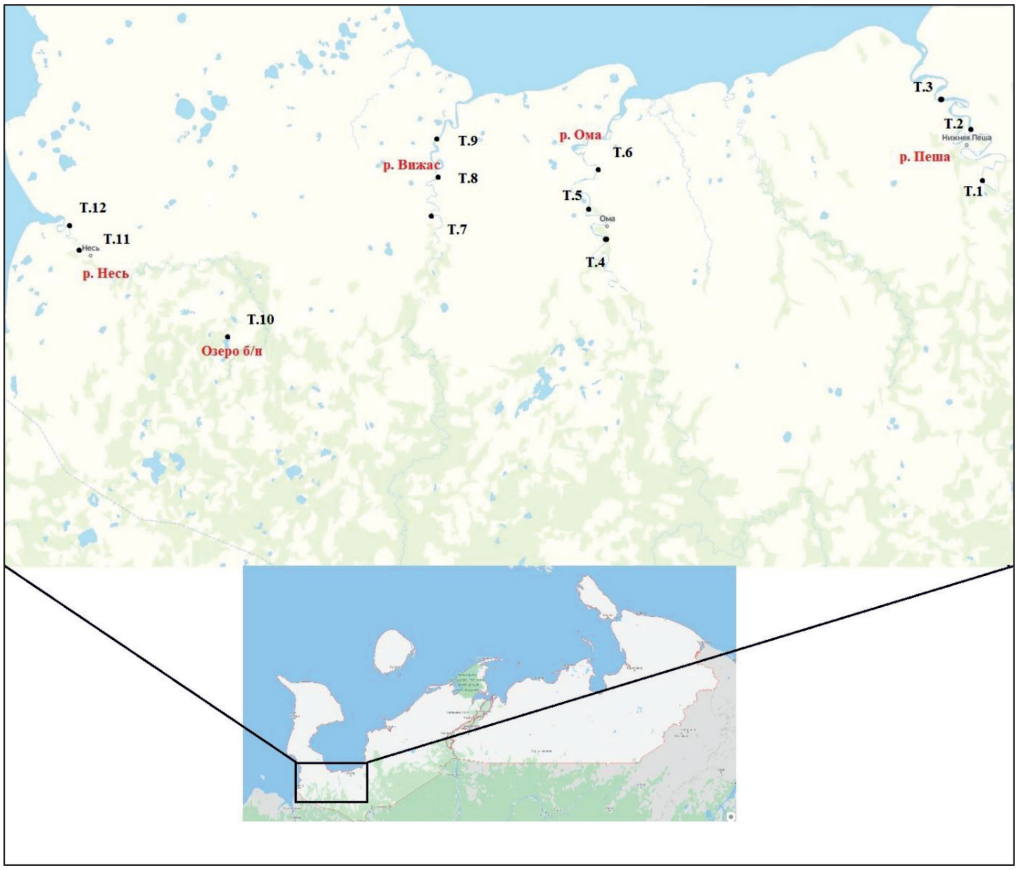


Рис. 1. План-схема отбора гидробионтов в западной части территории НАО

Результаты исследования и их обсуждение

В результате выполненных исследований авторами выявлено наличие искусственных радионуклидов цезий-137 и стронций-90 в гидробионтах, отобранных из реки Несь. В соответствии с действующими в Российской Федерации гигиеническими требованиями полученные значения удельных активностей радионуклидов цезий-137 и стронций-90 не превышают нормируемых значений в рыбе (безусловно соответствующая критерию радиационной безопасности), используемой для пищевых целей [8]. Оценку соответствия гидробионтов, отобранных из р. Несь, критериям радиационной безопасности провели в соответствии с требованиями [9; 10]. Для этого провели расчет показателя соответствия B и неопределенности его расчета ΔB по следующим формулам:

$$B = \left(\frac{Q}{H}\right)_{Sr-90} + \left(\frac{Q}{H}\right)_{Cs-137},$$

$$\Delta B = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{H}\right)^2_{Sr-90} + \left(\frac{\Delta Q}{H}\right)^2_{Cs-137}},$$

где Q – измеренное значение удельной активности радионуклида в пробе;
H – допустимый уровень удельной активности радионуклида в испытуемом продукте (для радионуклида стронций-90 – 100 Бк/кг, для радионуклида цезий-137 – 130 Бк/кг);
ΔQ – абсолютная расширенная (коэффициента охвата к = 2) неопределенность измерения удельной активности.

В случае выполнения соответствия $(B + \Delta B) < 1$ рыба как пищевой продукт признается безусловно соответствующей критерию радиационной безопасности.

Единственным предположением, позволяющим объяснить факт наличия искусственных радионуклидов в незначительных количествах в гидробионтах реки Несь, является возможный радиоактивный след, возникший по результатам ядерных испытаний на архипелаге Новая Земля. Согласно [11] примерно 12% радиоактивных продуктов

по результатам проведенных испытаний оказались в районе мест испытаний с небольшим удалением, 10% радионуклидов попали в концентрическое циркумполярное кольцо на широте Новой Земли, а 78% в виде мелкодисперсных продуктов пополнили глобальный фонд радионуклидов атмосферы Земли. В случае загрязнения в результате глобальных радиоактивных выпадений по результатам испытаний ядерного оружия другими странами искусственные радионуклиды были бы обнаружены также и в остальных точках отбора с соизмеримыми значениями удельных активностей. Необходимо отметить, что данное загрязнение, несмотря на небольшие значения радиационных параметров, может явиться следствием наличия другого антропогенного источника (например, захоронение радиоактивных отходов).

Результаты измерений проб гидробионтов с указанием точек отбора, веса проб, определяемых параметров и их значений приведены в табл. 1.

Подтверждение достоверности и чистоты радиохимического выделения проводилось методом построения «кривой распада» радионуклида иттрия-90, приведенной на рис. 2 (построена на основе данных табл. 2). Отчетливо видно, что уменьшение скорости счета от счетного образца в два раза происходит за период – 66 часов. При этом период полураспада иттрия-90 составляет 64,2 часа. Однозначно можно утверждать, что в счетном образце присутствует радионуклид иттрий-90 и отсутствуют другие радионуклиды, возможные к внесению при радиохимическом выделении.

Таблица 1

Точки отбора гидробионтов и их исследованные параметры

№ п/п	Точка отбора гидробионтов	Вес пробы (сырой), г	Радиационные параметры пробы, Бк/кг				
			А уд., β	А уд., α	Cs-137	Sr-90+Y-90	K-40
1	Река Пеша, точка 1	1950	93,0	менее 2,7	0,37	менее 3,4	85,0
2	Река Пеша, точка 2	2320	91,0	менее 2,5	0,22	менее 2,4	80,6
3	Река Пеша, точка 3	1560	97,0	менее 2,4	менее 0,20	менее 1,9	75,3
4	Река Ома, точка 4	1260	94,3	менее 2,3	0,25	менее 2,6	71,0
5	Река Ома, точка 5	1570	67,8	менее 2,7	0,32	менее 2,3	59,9
6	Река Ома, точка 6	1400	78,7	менее 3,6	0,50	менее 1,5	68,9
7	Река Вижас, точка 7	1430	131,4	менее 3,5	0,21	менее 1,5	125,0
8	Река Вижас, точка 8	1860	125,7	менее 2,8	менее 0,15	менее 1,9	110,1
9	Река Вижас, точка 9	1770	143,2	менее 2,6	менее 0,12	менее 1,3	138,0
10	Озеро между с. Несь и д. Вижас, точка 10	1950	94,6	менее 7,1	0,70	менее 5,1	80,0
11	Река Несь, точка 11	2100	118,3	менее 2,9	9,6	19,1	95,4
12	Река Несь, точка 12	2310	115,6	менее 2,2	11,2	15,4	85,1

Примечание. Погрешность измерений вышеприведенных параметров не превышала 40%.

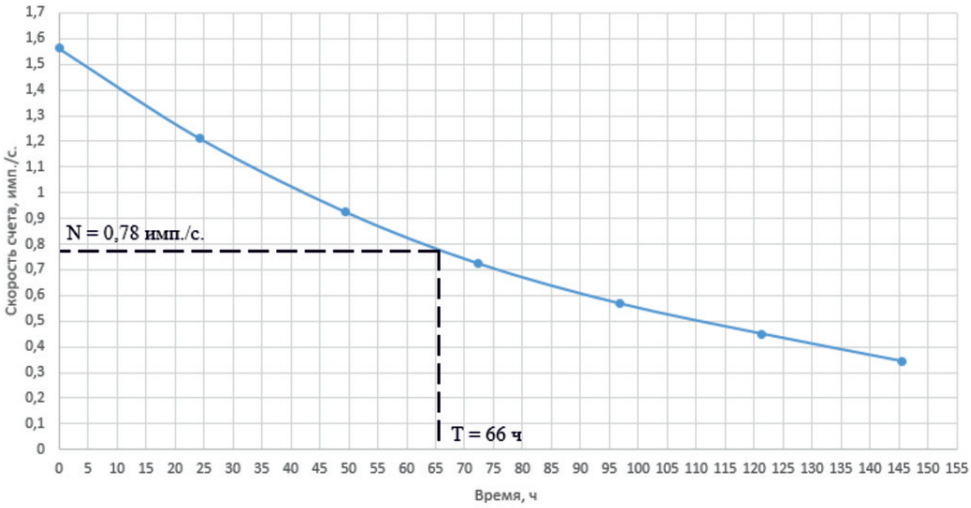


Рис. 2. Кривая распада радионуклида иттрий-90 (проба гидробионтов, р. Несь)

Таблица 2

Изменение скоростей счета от счетного образца с течением времени

№ п/п	Время, ч	Скорость счета, имп./с
1	0	1,564
2	24,25	1,212815
3	49,35	0,926566
4	72,38	0,724271
5	96,78	0,568482
6	121,18	0,451091
7	145,42	0,343881

В изученных пробах гидробионтов радионуклидов естественного происхождения найдено не было, кроме радионуклида калий-40. Альфа-излучающих радионуклидов также не было найдено (суммарная удельная активность альфа-излучающих радионуклидов определялась с применением альфа-радиометра, радиохимического выделения альфа-излучающих радионуклидов не проводилось). Содержание радионуклида калий–40 варьируется в пределах характерных границ для гидробионтов других регионов Земли [5; 6; 12]. Незначительное повышенное содержание калия–40 отмечается в гидробионтах реки Вижас. Именно данный радионуклид является основным дозообразующим радионуклидом в изученных пробах гидробионтов и вносит основной вклад в суммарную удельную активность по бета-излучению.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что искусственных радионуклидов в отобранных пробах гидробионтов не выявлено, за исключением одной пробы с реки Несь. Значения удельных активностей искусственных радионуклидов в пробах данной реки не превышают нормируемых значений для пищевых продуктов. Предполагается, что причиной незначительного повышения содержания радионуклидов цезий-137 и стронций-90 в пробах реки Несь является радиоактивный след, обусловленный испытаниями ядерного оружия на архипелаге Новая Земля.

Радионуклидов естественного происхождения в изученных пробах не найдено, за исключением радионуклида калий-40, характерного для гидробионтов.

Для подтверждения наличия искусственных радионуклидов в гидробионтах реки Несь, а также выявления других возможных причин данного факта планируется повторный отбор проб гидробионтов с данной реки с разделением по видам, возрасту, а также отдельным системам организма, и отбор проб других компонентов природной среды бассейна реки (донные отложения, водная среда, растительность).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1919.2020.5.

Список литературы / References

1. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды Ненецкого автономного округа в 2018 году», Департамент природных ресурсов, экологии и агропромышленного комплекса Ненецкого автономного округа. Нарьян-Мар, 2019. 130 с.

Report «About state and environmental protection of the Nenets Autonomous Okrug in 2018, Department of Natural Resources, Ecology and Agriculture of the Nenets Autonomous Okrug. Naryan-Mar, 2019. 130 p. (in Russian).

2. Мурашко О.А., Даллманн В.К. Трансформации традиционного образа жизни и питания коренного населения Ненецкого автономного округа // Вестник Московского университета. Серия XXIII. 2011. № 4. С. 4–24.

Murashko O.A., Dallman V.K. Transformations of the traditional lifestyle and nutrition of the indigenous popaltion of the Nenets Autonomous Okrug // Bulletin of Moscow University. Series XXIII. 2011. № 4. P. 4–24 (in Russian).

3. Муратов О.Э., Тихонов М.Н., Рылов М.И. Ядерно-радиационное наследие на северо-западе России: обеспечение ядерной и радиационной безопасности, роль общественности // Радиационная безопасность. 2014. № 1 (85). С. 34–45.

Muratov O.E., Tichonov M.N., Rylov M.I. Nuclear-radiation legacy in the north-west of Russia: ensuring nuclear and radiation safety, role of the public // Radiation safety. 2014. № 1 (85). P. 34–45 (in Russian).

4. Трапезников А.В., Николкин В.Н., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н. Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения Sr-90 и Cs-137 в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 3. С. 16–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-16-26.

Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N. Radiation-hygienic assessment of the concentration and distribution of Sr-90 and Cs-137 in ichthyofauna of the Ob'-Irtysh river system // Radiatcionnaya Gygiena. 2019. Vol. 12. № 3. P. 16–26 (in Russian).

5. Алимова Г.С., Уткина И.Н. Содержание Cs-137 и K-40 в донных отложениях и рыбах р. Иртыш и р. Тобол // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 9. С. 101–104.

Alimova G.S., Utkina I.N. Contents Cs-137, and K-40 in bottom sediments and in fishes of r. Irtysh and r. Tobol // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2016. № 9. P. 101–104 (in Russian).

6. Biljana Milenkovic, Jelena M. Stajic, Natasa Stojic, Mira Pucarevic, Snezana Strbac Evaluation of heavy metals and radionuclides in fish and seafood products. Chemocphere. 2019. 229. P. 324–331. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.189.

7. МУК 4.3.2503-09 Стронций-90. Определение удельной активности в пищевых продуктах: Методические указания. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии. Роспотребнадзор. 2009. 32 с.

8. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. 2002. 144 с.

9. ГОСТ 32161-2013. Продукты пищевые. Метод определения содержания Cs-137. Стандартинформ. 2013. 10 с.

10. ГОСТ 32163-2013. Продукты пищевые. Метод определения содержания Sr-90. Стандартинформ. 2013. 10 с.

11. Телелекова А.Д., Евсеев А.В. Радионуклиды в природной среде Кольского полуострова // Проблемы региональной экологии. 2014. № 5. С. 89–94.

Telelekova A.D., Evseev A.V. Radionuclides in the geosystems of the Kola Penincula // Problems of regional ecology. 2014. № 5. P. 89–94 (in Russian).

12. Hilde Elise Heldal, Andrey Volynkin, Mari Komperod, Rita Hannisdal, Hilde Skjerdal, Anne Liv Rudiord. Natural and anthropogenic radionuclides in Norwegian farmed Atlantic salmon (Salmo salar). Journal of Environmental Radioactivity. 2019. 205–206. P. 42–47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.05.002.

УДК 551.345:519.816

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАЛЕДЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Шеин Н.С., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Ефремов П.В., Слепцов О.И.

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Магистральные трубопроводы, проходящие по территории распространения криолитозоны, подвергаются влиянию различных негативных опасных геологических процессов (ОГП), таких как термокарст, пучение, эрозия, солифлюкция и иные, в том числе и наледеобразование. Цель данной статьи – исследование влияния наледеобразования на работоспособность магистральных трубопроводов на примере магистрального газопровода «Сила Сибири». Наледи – слоистые ледяные массивы, возникающие при замерзании эпизодически выливающихся грунтовых или поверхностных вод. Наледи – это особо опасное гляциальное явление, негативное влияние которого представляется: а) непредвиденным затоплением территории в холодное время года; б) кристаллизацией воды и появлением термодинамического и статического давления льда; в) образованием ледяных барьеров и увеличением количества скользких дорог, тротуаров, грунтовых покрытий; г) развитием сопутствующих опасных процессов, таких как морозное растрескивание, криогенное волнение, термоэрозия, образование нагнетаемого льда, неравномерные осадки земной поверхности и т.д. Влияние наледей отрицательно сказывается на безопасности и работоспособности магистральных трубопроводных систем, вызывает необходимость повышенных требований к материалам, конструкциям, технологиям прокладки, отрицательно воздействует на экологическую обстановку региона в случае возникновения аварийных ситуаций. В данной работе на основе экспертного анализа определены основные факторы, влияющие на процесс наледеобразования, оценена степень воздействия наледей на работоспособность магистрального трубопровода с использованием методов нечеткой логики и сформированных правил нечеткого вывода. Данный подход позволяет определить опасные участки для проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению риска появления чрезвычайных ситуаций. Также возможно смоделировать последствия аварийных ситуаций и локализовать последствия исходя из погодных условий и территории распространения.

Ключевые слова: наледи, магистральные трубопроводы, наледная опасность, подземные воды, нечеткая логика, функция принадлежности, лингвистические переменные, база нечетких правил

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ICING ON THE FUNCTIONING OF MAIN PIPELINES

Shein N.S., Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Efremov P.V., Sleptsov O.I.

Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

The main pipelines passing through the distribution area of the permafrost zone are affected by various negative processes, such as, for example, thermokarst, swelling, erosion, solifluction, etc., including ice formation. The purpose of this article is to study the effect of icing formation on the performance of trunk pipelines using the Power of Siberia trunk gas pipeline as an example. Icing is a layered ice mass formed when periodically spilling underground or surface water freezes. They are a particularly dangerous glacial phenomenon, the negative impact of which is determined by: a) unexpected flooding of the territory in the cold season; b) crystallization of water and the appearance of static and thermodynamic pressure of ice; c) the formation of ice barriers and increased slippery roads, sidewalks, ground coverings; d) the development of associated hazardous processes – cryogenic heaving, frost cracking, thermoerosion, the formation of injection ice, uneven precipitation of the day surface, etc. The influence of ice has a negative impact on the performance of main pipeline systems, causes the need for increased requirements for materials, structures, and laying technologies, and negatively affects the environmental situation of the region in the event of emergencies. In this paper, based on the application of fuzzy logic methods, the main factors affecting the process of icing are identified, the degree of influence of ice on the performance of the main pipeline is estimated, the rules of fuzzy inference are developed to minimize the effect of ice formation and identify hazardous areas for preventive measures to reduce risk emergencies.

Keywords: icing, main pipelines, ice hazard, underground water, fuzzy logic, membership function, linguistic variables, fuzzy rule base

Анализом влияния наледей на инженерные сооружения занимались различные исследователи. В [1] показано, что воздействие наледей снижает прочность инженерных сооружений и их несущую способность, также образование наледей и их активизация приводят к изменению геокриологических условий; предложена классификация наледей по морфологическим параметрам – объему, площади и мощности. В [2] рассмотрено влияние наледей и грунтовых вод на процесс формирования мерзлого массива в грунте и инженерные сооружения численными методами.

На основании практики многолетних изучений наледей, в разные годы проводившихся в районах Сибири и Дальнего Востока (в том числе Якутии и Амурской области) В.А. Алексеевым и Н.Ф. Савко [3–6], определено, что на величину формирующихся наледей и условия их развития главным образом влияют следующие климатические факторы: количество выпадающих атмосферных осадков в предшествующий наледеобразованию теплый период времени; температура зимнего воздуха, мощность снежного покрова. В соответствии с этим положением анализ межгодовой изменчивости в наших исследованиях приводится по данным факторам.

Наледи – слоистые ледяные массивы, возникающие при замерзании эпизодически выливающихся грунтовых или поверхностных вод. Наледи – это особо опасное гляциальное явление, негативное влияние которого представляется: а) непредвиденным затоплением территории в холодное время года; б) кристаллизацией воды и появлением термодинамического и статического давления льда; в) образованием ледяных барьеров и увеличением количества скользких дорог, тротуаров, грунтовых покрытий; г) развитием сопутствующих опасных процессов, таких как морозное растрескивание, криогенное волнение, термоэрозия, образование нагнетаемого льда, неравномерные осадки дневной поверхности и т.д.

Наледная опасность – это угроза жизни и здоровью человека, его экономической деятельности, работе инженерных сооружений, животному и растительному миру. Границы распространения наледной опасности обусловливаются многими факторами, включая деятельность человека. В некоторых случаях, например при сбросах бытовых и промышленных вод, строительстве дорог, плотин, застройке местности, развитие наледей вызывается намеренно. Иногда такие необдуманные мероприятия могут привести к большим стихийным бедствиям. Учет наледей и наледных процессов требуется на всех этапах бытового и инженерного освоения территории. Для этого применяют такие критерии оценки наледной опасности, как: время вероятного появления, возможность возникновения наледей в том или ином месте, длительность развития и разрушения ледяных массивов, их толщина, объем, площадь и особенности взаимодействия с хозяйственными объектами [5].

Рис. 1. Наледь на участке МГ «Сила Сибири»

Материалы и методы исследования

Наледи оказывают большой вред инженерным сооружениям, также они создают трудности при их использовании.

Факторы негативного влияния наледей: 1) закупорка льдом отверстий малых искусственных сооружений и затруднение пропуска весенних вод; 2) затопление проезжей части подходов к искусственным сооружениям и затруднение движения транспорта; 3) деформирование искусственных сооружений при образовании около них наледных бугров; 4) создание условий для размыва конусов и земляного полотна подходов, а также изменение конфигурации русла водотока при стоке весенних вод по образовавшемуся льду.

Главными условиями формирования и развития наледей являются: 1) мощность льда; 2) площадь льда; 3) источники наледеобразующих вод (надмерзлотные, подмерзлотные, русловой сток, несквозные талики, глубокий подмерзлотный сток, пластово-поровые воды таликов, ледоснеговые); 4) грунты (пески, супеси, суглинки, торф); 5) наличие наледных бугров; 6) расстояние от трубы до бугра; 7) долины рек (долины I–II–III порядка, верховья долин, горные долины).

Наледи можно классифицировать по: а) месту отложения; б) степени опасности; в) типу наледеобразующих вод; г) происхождению; д) размерам; е) длительности существования [7].

Влияние наледей отрицательно сказывается на безопасности и работоспособности магистральных трубопроводных систем, вызывает необходимость повышенных требований к материалам, конструкциям, технологиям прокладки; они отрицательно воздействуют на экологическую обстановку региона в случае возникновения аварийных ситуаций.

По степени опасности для функционирования технических сооружений наледи были классифицированы на следующие виды: слабые; средние; опасные; сильно опасные; катастрофические.

В данной работе рассматривается влияние наледной опасности на участки прохождения трубопровода и производится их ранжирование по степени опасности с использованием экспертного анализа и нечеткой логики. Предложенная модель выполняется в среде Fuzzy Logic MATLAB с применением алгоритма Мамдани. Результаты показывают, что предлагаемая модель может быть использована как инструмент анализа определения степени наледной опасности на различных участках трубопровода.

Результаты исследования и их обсуждение

Для схемы нечеткого вывода в данной работе мы используем метод Мамдани. Методом активации будет MIN. Далее определим методы агрегирования подусловий. Для метода агрегирования используем операцию min-конъюнкции, в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), для метода дефаззификации – метод центра тяжести, для аккумуляции заключений правил – метод max-дизъюнкции [8].

Нечеткая модель (наледи) разрабатывалась при помощи среды MATLAB. Для этого в редакторе FIS были определены семь входных переменных: «площадь льда», «мощность льда», «источники», «грунты», «наличие наледных бугров», «расстояние от трубы до бугра», «долины рек» и одна выходная: «степень опасности». Графический интерфейс редактора FIS представлен на рис. 2.

Предложенную модель выполним в среде Fuzzy Logic MATLAB, используя алгоритм Мамдани. По умолчанию оставим параметры данной разрабатываемой нечеткой модели. Для метода агрегирования (max), метода импликации (min), логических операций (min для нечеткого логического И и max для ИЛИ) и для метода дефаззификации выберем метод центра тяжести [8–10].

Затем для каждой входной лингвистической переменной и одной выходной переменной системы нечеткого вывода определим функции принадлежности термов. Для этой цели воспользуемся редактором функций принадлежности среды Fuzzy Logic MATLAB. На рис. 3 представлен интерфейс редактора функций принадлежности для входной лингвистической переменной «грунты».

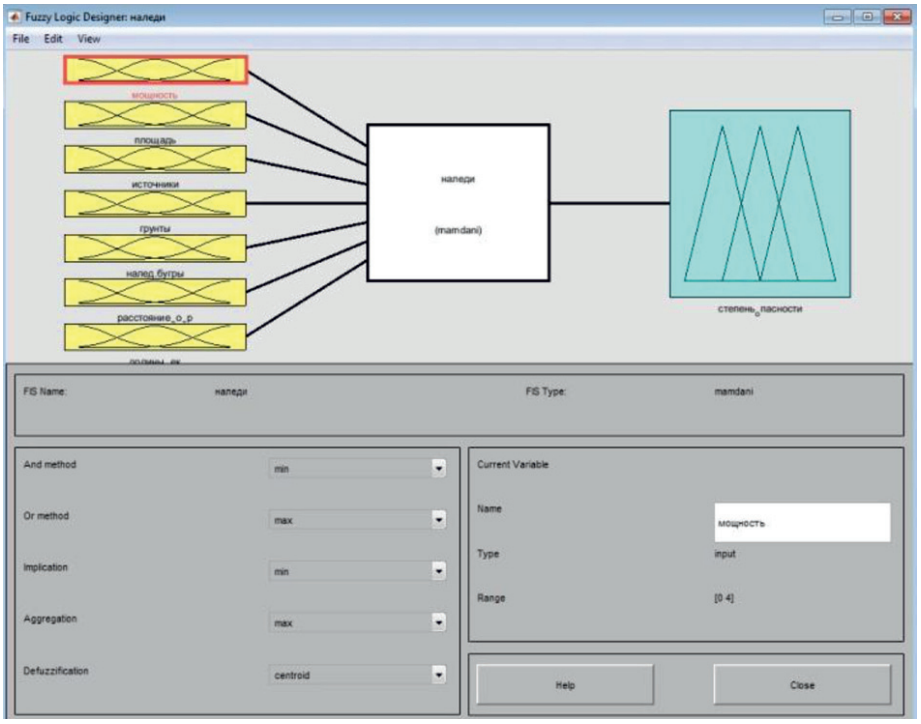


Рис. 2. Графический интерфейс редактора FIS

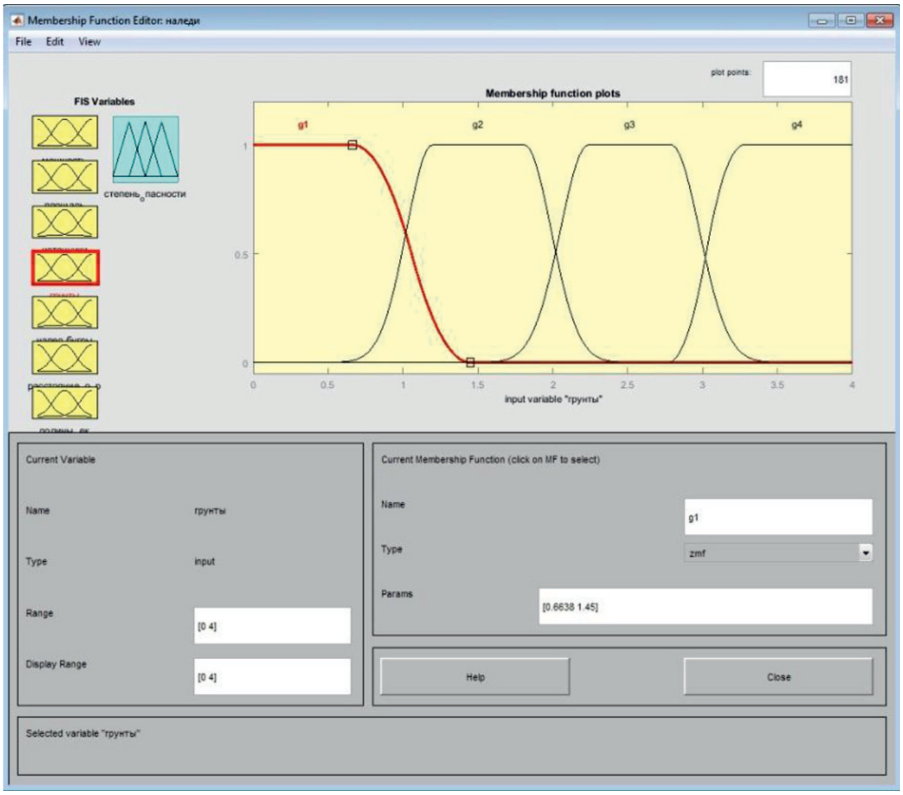


Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной «грунты»

Влияние наледной опасности на трубопровод оценивалась по шкале от 0 до 5 баллов. В качестве примера рассмотрим участок на р. Аччыгый Лэглэгэр. В результате дефаззификации при рассмотрении примера получим, что при следующих значениях факторов: мощность наледи 2,6 м; вид грунта супесь; расстояние от трубы до бугра <50 м; площадь наледи 129 482,3 м^2; наледные бугры есть; долины 1–2-го порядка; источники (подмерзлотные воды) – значение наледной опасности будет равно 4,28. Для другого примера возьмем участок на р. Эргэ: мощность наледи 0,95 м; вид грунта слабозаторфованная супесь; расстояние от трубы до бугра >50 м; площадь наледи 6063,158 м^2; наледные бугры есть; долины 1–2-го порядка; источники (глубокий подмерзлотный сток) – значение наледной опасности будет равно 2,5. Визуализация нечеткого вывода приведена на рис. 4.

На основании справочных и научно-методических материалов, а также данных, полученных из анализа опроса экспертов, была сформирована база правил. На основе экспертного анализа определены основные факторы, влияющие на процесс наледеобразования, оценена степень воздействия наледей на работоспособность магистрального трубопровода с использованием методов нечеткой логики и сформированных правил нечеткого вывода. Данный подход позволяет определить опасные участки для проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению риска появления чрезвычайных ситуаций. Нечеткая модель была выполнена с применением алгебры нечетких множеств, нечеткой логики и базы правил на этапе нечеткого вывода каждой входной лингвистической переменной, полученной в процессе фаззификации.

С использованием данного подхода были рассмотрены влияния наледной опасности на участки магистрального трубопровода (таблица).

Появление факторов наледеобразования при строительстве магистральных трубопроводов наиболее вероятно при:

а) пересечении склонов, многолетнемерзлых грунтов при расчистке просеки;

б) наличии на склонах большого количества ручьев и заболоченности;

в) недостаточном количестве водопропускных сооружений;

г) прокладке трубопроводных систем ниже глубины сезонного оттаивания;

д) нарушении стока грунтовых вод и т.п.

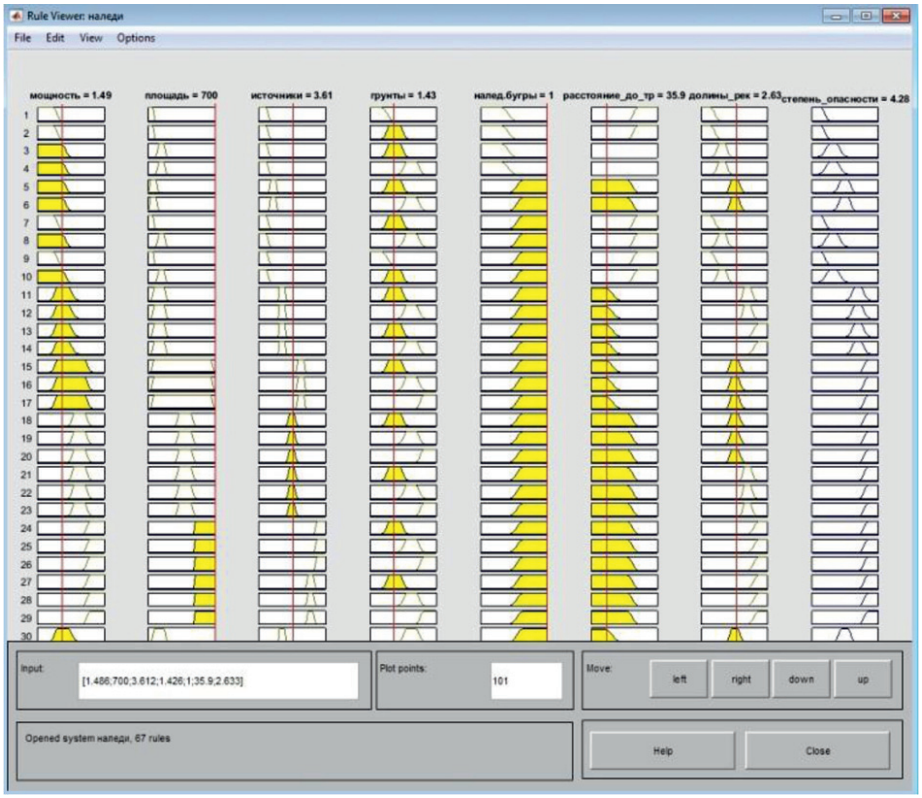


Рис. 4. Визуализация нечеткого вывода

Исходные данные участков МГ с развитием процессов наледеобразования и оценка степени интенсивности воздействия на элементы МГ

Участок	Порядок долины	Источники	Мощность наледи, м	Наледные бугры	Расстояние от трубы до бугра, м	Площадь наледи, м^2	Грунты
Аччыгый Лэглэгэр	1–2	5-6 (PM)	2,6	есть	<50	129482,3	Супесь
Улахан Лэглэгэр	1–2	3-4 (NT)	1,3	есть	<50	74769,23	Песок с примесью торфа
Тит	1	3-4 (NT)	0,75	есть	<50	15600	Супесь
Эргэ	1–2	2-3 (GPS)	0,95	есть	>50	6063,158	Слабозаторфованная супесь
Л. Бурухинский	1–2	3-4 (NT)	1	нет	–	10650	Супесь

Техногенными факторами наледеобразования часто являются искусственные сооружения, если они затрудняют пропуск воды, особенно при скоплении в них шуги [11, 12].

Заключение

На основании литературно-справочных данных и экспертного опроса, с использованием данных из БД геотехнического

мониторинга были определены основные факторы, влияющие на процесс наледеобразования, и сформулированы критерии оценки опасности участка МТ при интенсивном воздействии наледей на инженерные сооружения. С применением полученных критериев опасности были сформированы правила нечеткого вывода. Данный подход оценки влияния процесса наледеобразования на участках трубопровода помогает оценить степень влияния наледеобразования на элементы магистрального газопровода с целью проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению источников риска на разных участках. Безопасность магистральных трубопроводов определяется наличием современных методов диагностики состояния трубопроводных конструкций в условиях меняющегося рельефа и методами оценки его влияния на работоспособность конструкций.

Работа выполнена при поддержке программы НИР № АААА-А17-117040610321-2.

Список литературы / References

1. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского госуниверситета. 2016. Т. 22. № 10. С. 30–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-10-30-40.

Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. The effects of icings on engineering facilities // Vestnik Zabaykal'skogo gosuniversiteta. 2016. V. 22. № 10. P. 30-40 (in Russian).

2. Permyakov P.P., Vinokurova T.A. Popov G.G. Effect of Ice on the Heat-Moisture Regime of Soil Foundation of Gas Pipeline. International science and technology conference «FarEastCon-2019» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 753 (2020) 052005. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052005.

3. Алексеев В.Р., Савко Н.Ф. Теория наледных процессов. М.: Наука, 1975. 205 с.

Alekseev V.R., Savko N.F. Theory of icing processes. M.: Nauka, 1975. 205 p. (in Russian).

4. Алексеев В.Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера земли. 2017. Т. XXI. № 6 С. 65–75. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(65-75).

Alekseev V.R. Aufeis areas in river valleys: engineering development problems // Kriosfera zemli. 2017. V. XXI. № 6. P. 65–75 (in Russian).

5. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 256 с.

Alekseyev V.R. Icings Novosibirsk: Nauka, 1987. 256 p. (in Russian).

6. Алексеев В.Р. Наледеведение. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2007. 438 с.

Alekseyev V.R. Icing science. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2007. 438 p. (in Russian).

7. Меренцова Г.С., Медведев Н.В. Образование наледей и борьба с ними на автомобильных дорогах и искусственных сооружениях // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3. № 3. С. 64–71.

Merentsova G.S., Medvedev N.V. The formation of icings and control on roads and artificial structures // Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2017. V. 3. № 3. P. 64–71 (in Russian).

8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 736 p. (in Russian).

9. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Книга по требованию, 2012. 312 с.

Averkin A.N. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models. M.: Kniga po trebovaniyu, 2012. 312 p. (in Russian).

10. Зак Ю.А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии. М.: URSS, 2013. 349 с.

Zak Yu.A. Decision-making in the context of fuzzy and blurry data: Fuzzy technologies. M.: URSS, 2013. 349 p. (in Russian).

11. Горбунова Л.Н., Панова З.Н. Анализ методов и средств борьбы с наледью и сосульками // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8. С. 206–209.

Gorbunova L.N., Panova Z.N. Analysis of the techniques and means of fight with icing and icicles // Vestnik KrasGAU. 2012. № 8. P. 206–209 (in Russian).

12. Алексеев В.Р., Чжан Р.В. Криогенные строительные материалы. Якутск: Изд. Института мерзлотоведения СО РАН, 2011. 66 с.

Alekseev V.R., CHzhan R.V. Cryogenic building materials. Yakutsk: Izd. Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2011. 66 p. (in Russian).

УДК 911.9:551.435.627

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГЕОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Зарубин О.А., Мучкаева Н.С., Юнкман Е.С.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: yamashkin56@mail.ru

Статья посвящена решению научной задачи оценки устойчивости геосистем и прогнозирования экзогеодинамических процессов. Прогнозирование оползневых процессов выполняется на основе предположения о том, что будущие природно-техногенные чрезвычайные ситуации с высокой вероятностью могут произойти в тех же условиях, в которых они проявлялись в прошлом. Раскрываемый в статье алгоритм прогнозирования возникновения оползневых процессов проводится в четыре основных этапа: сбор и подготовка данных, систематизация данных, построение пространственных моделей, оценка результатов. Экспериментальные исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проведены на базе тестового научно-исследовательского полигона «Мордовия», который включает краевые части лесостепных геосистем Приволжской возвышенности в лесной провинции пластовой Окско-Донской низменности. Характеристика индикаторов и анализ интенсивности проявления процессов оползнеобразования приводятся на основе иерархического структурирования геосистем на уровнях класса (подкласса), группы, типа и рода геосистем. В работе показано, что сопряженный анализ карт ландшафтных метрик и ландшафтных рисунков позволяет оптимизировать оперативную диагностику развития экзогеодинамических процессов, а автоматизацию данного процесса целесообразно проводить посредством формирования ансамблей классификаторов, путем последовательного решения задач: формирование набора моноклассификаторов, определение алгоритма метаклассификатора, обучение моно- и метаклассификаторов, оценка эффективности ансамбля и его отдельных мономоделей. Применение ансамблей позволяет оперативно анализировать геосистемы с целью анализа развития природных и природно-техногенных процессов и явлений. Апробация ансамблей на ряде научно-исследовательских полигонов показала точность выделения территорий с оползневыми процессами более 85%.

Ключевые слова: обучение ансамблей, машинное обучение, геосистемы, оползни, пространственно-временное прогнозирование

SPATIAL-TEMPORAL PREDICTION OF LANDSLIDE PROCESSES BASED ON THE GEOSYSTEM APPROACH

Yamashkin A.A., Yamashkin S.A., Zarubin O.A., Muchkaeva N.S., Yunkman E.S.

Mordovian National Research Ogarev University, Saransk, e-mail: yamashkin56@mail.ru

The article is devoted to solving the scientific problem of assessing the stability of the geological environment and forecasting exogeodynamic processes is determined by the increasing number of occurrence of complex natural and technological emergencies. The prediction of landslide processes is based on the assumption that future natural-technological emergencies are highly likely to occur under the same conditions in which they occurred in the past. The algorithm for predicting the occurrence of landslide processes disclosed in the article is carried out in four main stages: collecting and preparing data, systematizing data, building spatial models, and evaluating results. Experimental studies using Earth remote sensing data (ERS) were carried out on the basis of the Mordovia test polygon, which includes the marginal parts of forest-steppe geosystems of the Volga Upland in the forest province of the Oksko-Don lowland. The characteristics of indicators and the analysis of the intensity of the manifestation of landslide formation processes are given on the basis of hierarchical structuring of geosystems at the level of a class (subclass), group, type and kind of geosystems. It is shown in the work that a coupled analysis of landscape metric maps and landscape drawings can optimize the operational diagnostics of the development of exogeodynamic processes, and it is advisable to automate this process by forming ensembles of classifiers, by successively solving problems: forming a set of monoclassifiers, defining a metaclassifier algorithm, training mono-and metaclassifiers , evaluation of the effectiveness of the ensemble and its individual monomodels. The use of ensembles allows you to quickly analyze geosystems in order to analyze the development of natural processes and phenomena. Testing of ensembles at a number of research polygons showed the accuracy of the allocation of territories with landslide processes of more than 85%.

Keywords: ensemble training, machine learning, geosystems, landslides, spatio-temporal prediction

Актуальность оценки устойчивости геологической среды и прогнозирования экзогеодинамических процессов (ЭГП) определяется возрастающим числом возникновения сложных природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. Решение задачи по минимизации последствий эколого-социально-экономических проблем может быть достигнуто путем внедрения в науку и практику региональных географических информационных систем (ГИС), обеспечивающих сбор, обработку, систематизацию, прогнозирование и своевременное представление данных о состоянии геотехнических систем для принятия конкретных управленческих решений.

Такая постановка проблемы предполагает решение следующих задач: 1) разработка методики ГИС-картографирования условий возникновения и развития процессов; 2) разработка алгоритмов геоинформационного анализа и синтеза данных по объектно-структурному строению литогенной основы геосистем; 3) выявление пространственно-временных закономерностей проявления процессов; 4) обоснование схемы геоэкологического зонирования региона по вероятности возникновения чрезвычайных природно-техногенных ситуаций.

Прогнозирование ЭГП выполняется на основе предположения о том, что будущие природно-техногенные чрезвычайные ситуации с высокой вероятностью могут произойти в тех же условиях, в которых они проявлялись в прошлом. Поэтому важную роль играют оценка пространственной взаимосвязи между факторами различной природы и предыдущие эпизоды возникновения.

Материалы и методы исследования

В последние десятилетия исследователи разработали множество методов создания прогнозных карт регионов. Эти подходы основаны на использовании искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, деревьев принятия решений, логистической регрессии, машин опорных векторов [1–3]. Их эффективность можно улучшить, используя методы создания систем ансамблей блоков машинного обучения для классификации [4].

Анализ геосистем на основе систем глубокого машинного обучения применяется в решении практических задач: прогнозирования чрезвычайных процессов и явлений, мониторинга окружающей среды. Применение машинного обучения позволяет снизить стоимость исследований благодаря точной экстраполяции измерений. Обучение ансамблей предполагает использование объединенных алгоритмов машинного анализа.

Алгоритм прогнозирования возникновения ЭГП может быть проведен с использованием ансамблей в четыре основных этапа: 1) сбор и подготовка данных; 2) систематизация данных; 3) построение пространственных моделей; 4) оценка результатов моделирования (рис. 1).

Процесс *сбора и подготовки данных* должен опираться на данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также документальные материалы цифровых инфраструктур пространственных данных (ИПД) [5]. К факторам, отражающим развитие ЭГП, следует отнести морфометрические (уклон, высота, кривизна профиля) и морфологические характеристики рельефа, тектонику, геологию и гидрогеологию, климат и гидрологический режим поверхностных вод, тип почвенного и растительного покрова, землепользование, геотехнические системы и плотность этих объектов. После ревизии исходная информация должна быть подготовлена для формирования нормализованных наборов данных, пригодных для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения, построения и проверки моделей.

Систематизация данных. Учитывая многофакторность происхождения ЭГП, их индикация решается путем разработки синтетической карты геосистем. Результаты проектирования ГИС «Мордовия» показали, что в исследовании закономерностей развития ЭГП перспективно использование таксонов геосистем, предложенных В.А. Николаевым [6], – система, класс, группа, тип, род и вид геосистем (таблица).

Таксоны геосистем

Таксон	Геосистемные процессы, индикаторы экзогеодинамических процессов
Система	макроклимат (арктические, субарктические, бореальные и др.); определяют особенности развития геоэкологических процессов: выветривание, экзогеодинамика геолого-геоморфологических процессов, гидрогеодинамика и гидрогеохимия подземных вод, гидрологические, почвообразовательные процессы, биологический круговорот, вероятность проявления климатогенных чрезвычайных ситуаций
Класс	тектоника и отличающиеся по возрасту и динамике развития макроформы формы рельефа, определяющие типы и интенсивность развития экзогеодинамических процессов
Группа	тип водного и водно-геохимического режима
Тип	развитие почвообразовательных и биологических процессов, распространение типов почв и классов растительных формаций
Род	морфоскульптурные формы рельефа и развитие экзогеодинамических процессов (эрозионных, карстовых, суффозионных, оползневых и т.д.)
Вид	факторально-динамическая структура местопроизрастаний и растительности на топологическом уровне

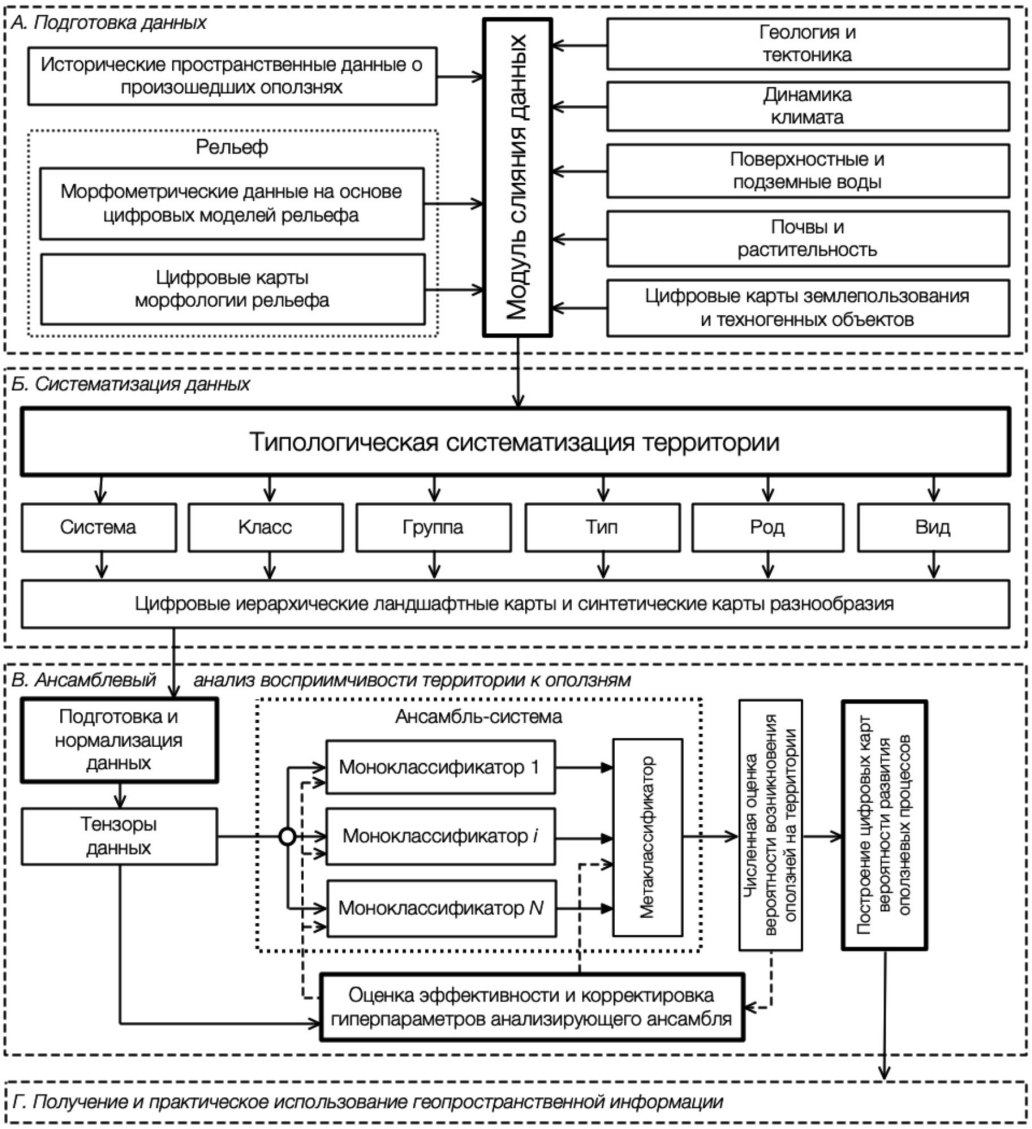


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования возникновения экзогеодинамических процессов

Иерархическое структурирование и анализ геосистем ориентированы на выделение литогидрогенных геосистем – генетически однородных, территориально-смежных образований, обосабливающихся под действием определенного режима поверхностных и подземных водных потоков, обусловливающих развитие определенного спектра экзогеодинамических, почвообразовательных и биогенных процессов. Диагностика литогидрогенных геосистем основывается на системном анализе грунтовых и межпластовых вод междуречных пространств, с учетом комплекса дешифровочных признаков стратиграфо-генетических водопроводящих горизонтов и их частей, локализации водопроявлений, элементов гидрографической сети разных порядков. Структура литогидрогенных систем формирует пространственные взаиморасположения и взаимосвязи потоков подземных вод – областей питания, транзита и разгрузки.

Построение пространственных моделей целесообразно осуществлять ансамблевыми методами с целью оптимизации входных данных с последующей классификацией территории с использованием алгоритмов машинного обучения. Моделирование ЭГП основывается на построении ансамблевых систем машинного обучения, предполагающих объединение нескольких классификаторов в систему для повышения точности

проводимой классификации земель на основе материалов космической съемки. Базовыми структурными элементами ансамбля классификаторов являются набор отдельных моноклассификаторов (глубоких нейросетевых моделей различной архитектуры и глубины, деревьев принятия решений, линейных классификаторов) и метаклассификатор – системный модуль, принимающий на вход данные моноклассификаторов для принятия конечного решения о принадлежности анализируемой территории конкретному классу. Результаты обучения моделей были использованы для разработки карт вероятности проявления природно-техногенных чрезвычайных ситуаций.

Оценка результатов моделирования проведена на системе тестовых данных посредством расчета матриц ошибок и метрик эффективности и ошибочности. На этом этапе проверяются и важнейшее свойство обучаемого ансамбля – способность к обобщению, и качество анализа на новых данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Полигон «Мордовия» расположен в суббореальных семигумидных (лесостепных) геосистемах пластово-ярусной Приволжской возвышенности. Лесостепные геосистемы контрастно переходят в лесную провинцию водно-ледниковых равнин пластовой Окско-Донской низменности.

В качестве основных источников информации использовались многозональные космические снимки и крупномасштабные топографические карты. Пространственная база данных оползневых процессов включила характеристики 1370 оползней. Каждому оползню в атрибутивной таблице присваивалось значение ширины, длины, глубины, экспозиции и абсолютной отметки. База данных по водопроявлениям включила информацию по 3 315 истокам, 2 808 родникам, 865 мочажинам.

Систематизация данных для установления пространственных закономерностей проявления процессов проводилась с использованием цифровой модели рельефа, синтетической карты геосистем и тематических карт природных компонентов.

С целью создания систем ансамблей блоков машинного обучения для классификации проведена типология оползневых геосистем. По совокупности признаков выделены: оползни-блоки, оползни-оплывины, оползни-срывы, вязкопластические оползни, оползни сдвига-течения, оползни сдвига. Среди морфологических признаков их диагностики особую ценность представляет географическое соседство, формирующее ландшафтный рисунок [7]. Кроме природных факторов, на его формирование оказывает влияние тип хозяйственного освоения территории.

Выделение *классов геосистем* основывается на картографировании морфоструктур с учетом выделения форм рельефа, сформированных при ведущей роли эндогенных процессов. Задача выделения морфоструктур сводится к ландшафтной индикации тектонических структур, геолого-литологического строения, рельефа, гидрографической сети и т.д. Результаты картографирования показали, что наименее подвержены оползнеобразованию возвышенные (выше 245 м) останцово-водораздельные массивы осевой части Приволжской возвышенности, где оползни встречаются единично. Преобладающая часть оползневых геосистем располагается в высотном интервале от 120 до 250 м, с максимальной концентрацией на абсолютных отметках 141–210 м. Следует обратить внимание на то, что аналогичную закономерность имеет распространение родников. Возвышенные участки (более 250 м) отличаются малым родниковым стоком (рис. 2).

Из морфоструктурных элементов на многозональных космических снимках наиболее отчетливо выделяются линеаменты. В геодиагностике развития ЭГП они рассматриваются как зоны с повышенной трещиноватостью горных пород, коллекторы движения подземных вод. Для выявления закономерностей природной дифференциации по результатам дешифрирования линеаментов проектируется карта их густоты с последующим сопоставлением со структурно-тектонической картой, составляемой на основе интерпретации геофизических данных.

На исследуемом полигоне значительная активность ЭГП характерна для областей преобладания ортогональных систем линеаментов (рис. 3). Преобладание коротких штрихов на космическом снимке может свидетельствовать о том, что данная область является потенциальной для активного развития процессов. Важно отметить общие закономерности распространения оползневых процессов – приуроченность к склонам юго-западных, южных и юго-восточных экспозиций и коренным бортам долин рек, которые формируют зоны разгрузки межпластовых вод.

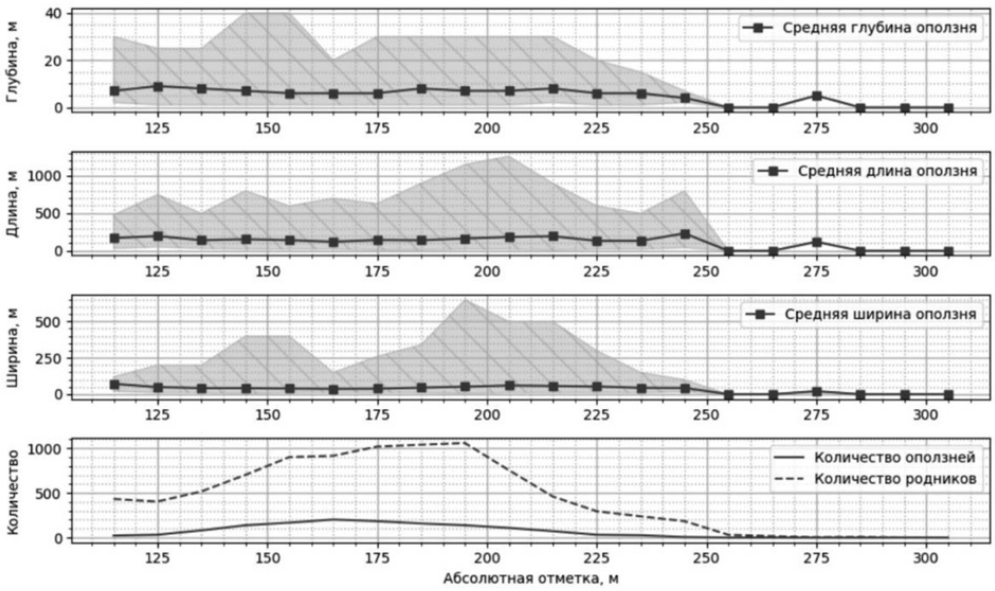


Рис. 2. Общие закономерности развития оползневых процессов

Рис. 3. Линеаменты на карте оползневых процессов

Группы геосистем отражают элементы зон фильтрации подземных вод – областей питания, транзита и разгрузки. В структуре природной дифференциации это находит выражение в формировании геосистем с разной степенью увлажненности. Поэтому при выявлении закономерностей распространения групп геосистем (элювиальных, супераквальных, аквальных) в первую очередь обращается внимание на характер изменения увлажненности. Оползневые процессы хорошо индицируются по ландшафтным рисункам, существующим в зонах выклинивания грунтовых вод на склонах, формирующих субгидроморфные и гидроморфные факторально-динамические ряды фаций.

На уровне *тип* геосистем основной акцент делается на анализе структуры контуров, отражающих генезис, эволюцию и современное состояние типов почв и растительных формаций. ГИС-моделирование ориентируется на поиск закономерностей взаимодействия зональных и азональных геосистем. Так, например, в северной лесостепи Приволжской возвышенности хорошо выражена склоновая смена лугово-степных и лесных геосистем [8]. Зона границы типов ландшафтов отличается наиболее активным развитием оползневых процессов.

Закономерности дифференциации ландшафтной оболочки на уровне *род* геосистем определяются морфоскульптурными формами рельефа и слагающими их отложениями. Функционирование геосистем на исследованном полигоне обусловливается субгоризонтальным залеганием карбонатных, терригенных и кремнисто-карбонатных коренных горных пород. Выделенная особенность определяет этажность разгрузки подземных вод. Конкретизация информатизации о литолого-генетическом строении и его влиянии на ЭГП проводится на топологическом уровне, с привлечением прямых, косвенных и комплексных дешифровочных признаков по сублитоморфным рядам геосистем.

Обособление родов геосистем в подклассе возвышенной эрозионно-денудационной равнины пластово-ярусной Приволжской возвышенности во многом определяется доминированием геосистем останцово-водораздельных массивов с абсолютными отметками до 334 м, образующих дугообразный водораздел Суры и Алатыря. С запада и северо-запада они ограничиваются уступом высотой до 60–80 м и крутизной 10–15°, местами до 40°. Водораздельные поверхности плоские и плоско-выпуклые, пересекаются корытообразными понижениями (седловинами), к которым протягиваются верховья временных водотоков. Выделяются следующие роды геосистем:

– кремнисто-карбонатных пород (опоки с линзами диатомитов и трепелов) палеогена; высокая трещиноватость горных пород и эрозионная расчлененность формируют однопластовую область фильтрации водных потоков открытого дренирования с ярко выраженным родниковым стоком и перетоком в нижележащий водоносный горизонт; единичные родники в верховьях ручьев и рек малодебитные, плотность оползней в этой области наименьшая;

– карбонатных пород (мела и мергеля) верхнемелового возраста, перекрываемых на значительных пространствах породами палеогена и маломощными делювиальными суглинками; наличие водоупорных горизонтов в подошве обусловливает активную разгрузку вод; фильтрация водных потоков отражается в развитии суффозионно-карстовых процессов, а в краевых частях геосистем – оползневых и эрозионных;

– волнистые поверхности придолинных склонов, сложенные карбонатными и кремнисто-карбонатными породами с маломощным чехлом делювиальных суглинков – преобладают латеральные потоки вод из смежных водоносных горизонтов; дебиты родников – 1,0–2,5 л/с, для литогидрогенных систем характерна повышенная активность эрозионных и оползневых процессов.

В подклассе вторичных моренных равнин краевой части пластово-ярусной Приволжской возвышенности преобладают водоразделы высотой 230–250 м. Литогидрогенные системы формируются в терригенных песчано-глинистых породах мезо-кайнозойского возраста, в толще которых формируются серии водоносных горизонтов. Водообильность горизонтов слабая, удельный дебит – 0,005–0,25 л/с. Основные реки, рассекающие равнину, образуют среднерусский тип рисунка речной сети. Верховья рек имеют вид щелевидных крутопадающих балок и оврагов с высотой склонов до 10–16 м, на отдельных участках 25–30 м. Долины рек асимметричны, с крутыми склонами южной и пологими склонами северной экспозиции. Доминируют литогидрогенные системы:

– приводораздельные склоны, сильно изрезанные овражно-балочными системами; питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетока из других водоносных горизонтов; геосистемы отличаются значительным распространением оползневых форм, при значительном варьировании плотности и их размеров; наиболее типично проявление оползнеобразования и дефлюкции на фронтальных склонах, вдоль границы пород различного литологического состава, обусловливающих формирование источников мочажинного типа;

– волнистые поверхности придолинных склонов, сложенные делювиальными суглинками; питание осуществляется за счет подтока вод из смежных водоносных горизонтов, разгрузка гравитационных вод происходит посредством латерального оттока.

Роды геосистем в *подклассе водно-ледниковых равнин* пластовой Окско-Донской низменности, протягивающихся по центральной части бассейна реки Вад, правобережью Мокши и левобережьям Алатыря и Суры, определяются флювиогляциальными и древнеаллювиальными песками. Доминируют пологоволнистые сглаженные поверхности с всхолмленно-грядовыми дюнными морфоскульптурами. Основные водоразделы располагаются преимущественно на абсолютных высотах 180–220 м. Водораздельные склоны пологие, коренные борта долин изрезаны балками и оврагами. Доминирует однопластовая область фильтрации открытых потоков; подземные воды высачиваются в днищах водосборных воронок балок, в подрусловые потоки долин рек.

В литогидрогенных геосистемах долин крупных и средних рек разгрузка водоносных горизонтов осуществляется по коренным бортам и руслам рек. Долинные геосистемы отличаются наибольшей динамичностью развития ЭГП. Реки протекают в широких долинах с пологими террасированными склонами с выработанным продольным профилем равновесия. Исключение составляет участок долины р. Сивини при пересечении ею Сивиньской структуры, где в русле на земную поверхность выходят каменноугольные известняки. Оползни приурочены к коренным бортам долин, пересекающим их балкам и оврагам. Развиты преимущественно оползни типа оплывин с неровной бугристой поверхностью, с невысокими (до 1,5–2 м) стенками срыва. Возникают оползни-оплывины при значительной увлажненности пород в зонах выхода на дневную поверхность верхнеюрских и нижнемеловых отложений. По коренным бортам долин развиты блоковые оползни. Их поверхность имеет ступенчатое строение, с неровными, наклоненными вглубь склона площадками. Стенки срыва прямолинейны, обрывисты или слегка выположены. Высота их от 5–6 до 15 м.

Таким образом, подземные воды вымывают, выщелачивают, размягчают породы, создают дополнительные нагрузки. Фильтрация водных потоков от области питания к зонам разгрузки формирует характерный ландшафтный рисунок – отдельные крупные балки, террасовидные и циркообразные формы рельефа, крупные трещины, стенки отрыва, валы выпирания, бугристость, застойные скопления воды, заболоченные участки, деформация дорог.

При оперативной диагностике оползневых процессов по космическим снимкам весьма эффективно использование ландшафтных метрик: индекс уникальности (I_o), индекс относительного богатства (I_r), индекс ландшафтной сложности (I_c), суммарный коэффициент расчлененности (K), энтропийная мера разнообразия (коэффициент Шеннона) (H) (рис. 4). Данный процесс включает выбор ландшафтных метрик и территориальных носителей информации, расчет, шкалирование (с выделением низкого, среднего, высокого и очень высокого уровней) и геоинформационное моделирование.

Сопряженный анализ ландшафтных метрик и проявлений процессов развития ЭГП показал, что наибольшая плотность расположения оползней характерна для зон с очень высокими значениями параметров I_o, I_r, I_c, K, H. Плотность расположения оползней здесь выше в среднем в 2,43 раза, чем в зонах с низким уровнем, в 1,77 раза, чем в зонах со средним уровнем, и в 1,67 раза, чем в зонах с высоким уровнем. Наибольшее превышение плотностных значений очень высокого уровня над низким характерно для индексов I_r, I_c (оба – в 2,85 раза) и K (в 2,20 раза).

Привлечение карт ландшафтных метрик к процедурам инструментального дешифрирования космических снимков позволяет оптимизировать оперативную диагностику развития ЭГП. Автоматизацию данного процесса и повышение его эффективности целесообразно проводить посредством формирования ансамбля классификаторов [9]. Общий алгоритм технологического процесса включает: формирование системы классификаторов, обучение моно- и метаклассификатора, оценка эффективности классификации ансамбля в целом и мономоделей в частности. Процесс обучения моноклассификаторов зависит от архитектуры и параметров модели классификации и проводится на основе набора данных, подготовленного с использованием системы тестовых полигонов.

Оценка эффективности классификаторов ансамбля основывается на метриках матриц ошибок, которые становятся исходными данными для настройки метаклассификатора. Принятие решения метаклассификатором целесообразно осуществлять методом взвешенного голосования, причем веса следует определить на основе рассчитанных метрик точности. На основе весовых коэффициентов формируется матрица эффективности ансамбля: строки соответствуют определяемым классам, а столбцы –

моноклассификаторам. Каждое значение элемента выстраиваемой матрицы равно эффективности классификатора в выявлении земель определенных свойств и категорий. Затем проводится оценка эффективности метаклассификатора и всего ансамбля для формирования представления о качестве предложенной модели детекции оползневых территорий.

С точки зрения временных затрат и требований к производительности аппаратного обеспечения предлагаемая методика формирования ансамблей показывает средний результат, в некоторых случаях опережая системы, реализованные на основе беггинга и бустинга, обучаясь и проводя классификацию земель за конечное предсказуемое время. Анализ характеристик эффективности моноклассификаторов и ансамбля в целом говорит о том, что точность решения, принятого ансамблем, в большинстве случаев близка к эффективности самого точного классификатора ансамбля, при этом в некоторых случаях превышает ее.

Выводы

Синтетическое картографирование иерархической организации геосистем оптимизирует диагностику взаимодействий зональных и азональных факторов, установление закономерностей ландшафтной дифференциации и развитие ЭГП. В зоне взаимодействия лесостепных геосистем пластово-ярусной Приволжской возвышенности и лесных ландшафтов пластовой Окско-Донской низменности проявляются общие закономерности развития ЭГП. Наиболее активное развитие оползневых процессов наблюдается в зоне границы луговостепных и лесных типов ландшафтов.

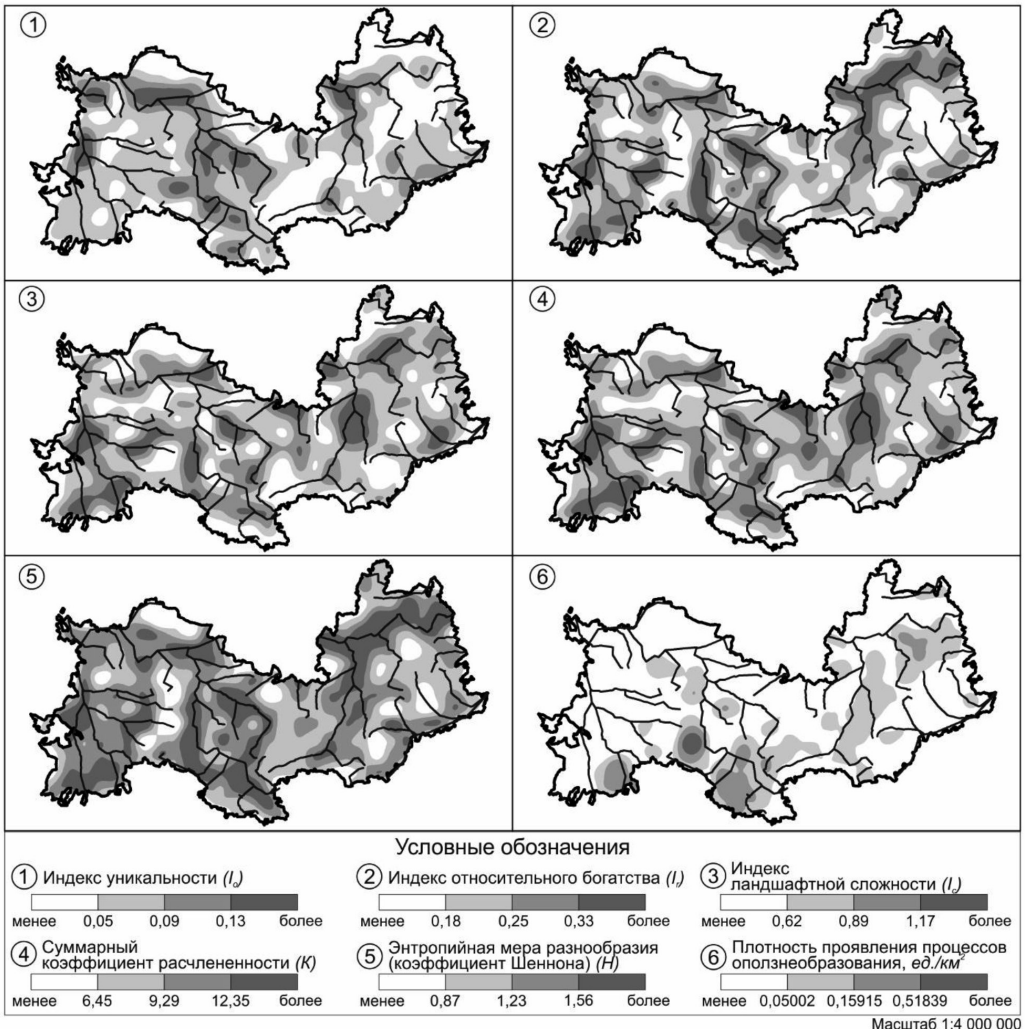


Рис. 4. Ландшафтные метрики на уровне род геосистем и плотность проявления процессов оползнеобразования

Ведущую роль в развитии ЭГП имеют литогидрогенные системы. Подземные воды вымывают, выщелачивают, размягчают породы, создают дополнительные нагрузки. Фильтрация водных потоков от области питания к зонам разгрузки формирует зоны накопления, транспортировки и разгрузки. Каждой зоне соответствуют характерный рисунок геосистем. Зоны наиболее активного развития ЭГП согласуются с распространением солифлюкционных, делювиально-солифлюкционных, делювиальных и гляциальных образований.

При оперативной диагностике состояния, динамики геосистем перспективно сочетание их синтетического картографирования с расчетами ландшафтных метрик: индекс уникальности, индекс относительного богатства, индекс ландшафтной сложности, суммарный коэффициент расчлененности, энтропийная мера разнообразия (коэффициент Шеннона). Построенная на основе ландшафтных метрик серия карт позволяет количественно диагностировать главные процессы функционирования геосистем: 1) влагооборот; 2) перенос минерального вещества и геохимический круговорот; 3) энергообмен. Участки с высокими значениями ландшафтных метрик сопряжены с ареалами активного развития ЭГП.

Наиболее устойчивыми к внешним воздействиям являются останцовые массивы, сложенные «бронирующими» опоками и песчаниками палеогенового возраста, обеспечивающими сохранение крутых склонов. Развитие ЭГП сводится к формированию относительно малоактивных эрозионных форм. В геосистемах водоразделов, сложенных верхнемеловыми карбонатными породами, развиваются суффозионно-карстовые и эрозионное процессы. Наиболее активно ЭГП развиваются на нижних вогнутых участках склонов в зоне контакта лесных и лугово-степных геосистем. В приводораздельных частях преобладают мелкие блоковые оползни, ниже по склону – оплывинные.

Применение ансамблей позволяет оперативно анализировать геосистемы с целью анализа развития ЭГП. Анализ метрик эффективности моноклассификаторов и ансамбля показал, что точность решения, принятого ансамблем, как правило, находится на уровне наиболее точного классификатора. В некоторых случаях применение ансамбля классификаторов показывает лучший результат. Их апробация на ряде научно-исследовательских полигонов демонстрирует точность выделения территорий с оползневыми процессами более 85 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70055.

Список литературы / References

1. Pradhan B. An Assessment of the use of an advanced neural network model with five different training strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. Journal of Data Science. 2011. Vol. 9. P. 65–81. DOI: 10.6339/JDS.2011.09(1).658.

2. Wang Y., Wang X., Jian J. Remote Sensing Landslide Recognition Based on Convolutional Neural Network. Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 1. P. 1–12. DOI: 10.1155/2019/8389368.

3. Shabi H., Khezri S., Ahmad B.B., Allahvirdiasl H. Application of Satellite images and fuzzy set theory in Landslide hazard Mapping in Central Zab basin. IOSR Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 1. Iss. 4. P. 17–24. DOI: 10.9790/4861-0141724.

4. Polikar R. Ensemble learning. Ensemble machine learning. Springer, Boston, MA, 2012. P. 1–34. DOI: 10.1007/978-1-4419-9326-7_1.

5. Lee J., Kang M. Geospatial Big Data: Challenges and Opportunities. Big Data Research, 2017. Vol. 2 (2). P. 74–81.

6. Николаев В.А. Ландшафтоведение. М.: Изд. МГУ, 2000. 94 с.

Nikolaev V.A. Landscape Science. M.: Izd. MGU, 2000. 94 p. (in Russian).

7. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.

Viktorov A.S. Landscape Figure. M.: Mysl, 1986. 179 p. (in Russian).

8. Ямашкин А.А., Новикова Л.А., Ямашкин С.А., Яковлев Е.Ю., Уханова О.М. Пространственная модель ландшафтов западных склонов Приволжской возвышенности // Вестник Удмуртского университета. Серия. Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25. № 3. С. 124–132.

Yamashkin A.A., Novikova L.A., Yamashkin S.A., Yakovlev E.Yu., Ukhanova O.M. Spatial model of landscapes of Volga Upland western slopes // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya. Biologiya. Nauki o Zemle. 2015. V. 25. № 3. P. 124–132 (in Russian).

9. Yamashkin S., Radovanovic M., Yamashkin A., Vukovic D. Using ensemble systems to study natural processes. Journal of Hydroinformatics. 2018. Vol. 20 (4). P. 753–765. DOI: 10.2166/hydro.2018.076.

ОБЗОРЫ

УДК 624.195

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ В ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ

[1]Гоппе В.Р., [2]Вохмин С.А., [2]Урбаев Д.А.

[1]ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, e-mail: vrhoppe@mail.ru;
[2]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: urbaev2011@mail.ru

В настоящей статье приведены воздействия, на которые рассчитываются тоннельные конструкции. Также описываются требования к ним в связи с уникальностью и повышенной ответственностью транспортных тоннелей. Обозначены следующие принципы конструирования деформационных швов в транспортных тоннелях: заложение в конструкцию шва обоснованной и достаточной его ширины, применение материалов шва с достаточной амплитудой деформации на сжатие и растяжение, учёт объемных деформаций самого транспортного сооружения, учёт изменчивости горно-геологических условий по длине сооружения, обеспечение эксплуатационной надёжности конструкций швов путём разработки и соблюдения регламентов производственных процессов. Обозначена проблема недостаточной защиты в конструкции традиционного деформационного шва от проникновения через него в тоннель грунтовых вод. Рассмотрены современные гидроизоляционные материалы для применения в конструкциях швов. Представлено сочетание неблагоприятных факторов, учёт которых позволяет рассчитать ширину деформационного шва. Приведена методика определения расчётного расстояния между антисейсмическими швами в монолитной железобетонной обделке и обоснована корректировка данного параметра с учётом технологии производства работ по бетонированию. Предложены принципиальные конструктивные решения для деформационных швов в конструкциях монолитных и сборных тоннельных обделок. Обозначены условия, при которых применение деформационных швов в сборной высокоточной тоннельной обделке нецелесообразно. Приведены факторы, от которых зависит количество и конструкция деформационных швов при их применении в сборной высокоточной тоннельной обделке. Представлены конструктивные и технологические особенности расстановки деформационных швов в обделке протяженных тоннелей с учетом температурных факторов. В выводе подчёркнута важная роль деформационных швов как элемента тоннельной конструкции, также обозначена недостаточная освещенность рассматриваемого вопроса в технической и нормативной литературе.

Ключевые слова: деформационный шов, транспортный тоннель, надёжность, продольная деформация, тоннельная обделка, горное давление, дорожное покрытие

PRINCIPLES FOR THE DESIGN OF DEFORMATION SEAMS IN THE TRANSPORT TUNNELS

[1]Goppe V.R., [2]Vokhmin S.A., [2]Urbaev D.A.

[1]Russian University of transport, Moscow, e-mail: vrhoppe@mail.ru;
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: urbaev2011@mail.ru

This article shows the effects on which tunnel structures are calculated. Requirements to them due to uniqueness of increased responsibility of transport tunnels are also described. The following principles of construction of deformation seams in transport tunnels are indicated: laying in the structure of the seam of reasonable and sufficient width, application of the materials of the seam with a sufficient amplitude of deformation for compression and tension, taking into account volumetric deformations of the transport tunnel itself, taking into account variability of mining and geological conditions along the length of the tunnel, ensuring operational reliability of the structures of the seams by means of development and compliance with the regulations of production percentages. For reliable operation within the limits of the required life, some structural and technological solutions are proposed for the arrangement of deformation seams in transport tunnels, as to the most important and responsible elements of the tunnel structure. Denotes problem of insufficient protection of the traditional design of the deformation seams from penetrating there through in the tunnel groundwater.The modern waterproofing materials for use in seams constructions.The structure of the traditional deformation seam is shown, the problem of insufficient protection against penetration of groundwater into the tunnel through it is indicated. A combination of adverse factors is presented, which take into account allows calculating the width of the deformation seam.The technique of determining the calculated distance between the antiseismic seams in the lining and a monolithic reinforced concrete substantiated this adjustment parameter in view of production technology concreting works. Principal design solutions are proposed for deformation seams in structures of monolithic and prefabricated tunnel support. The conditions under which the use of deformation seams in a high-precision tunnel support is impractical are indicated. The factors on which the number and design of deformation seams during their application in a high-precision tunnel support are dependent are given. The design and technological features of the arrangement of deformation joints in the enclosure of long tunnels are presented taking into account temperature factors. The output underlined the important role of the deformation seams as a structural element of the tunnel, as indicated by the lack of brightness of the issue at technical and regulatory literature.

Keywords: deformation seams, transport tunnel, reliability, longitudinal strain, tunnel support, rock pressure, road surface

Конструкции обделок тоннелей должны быть запроектированы и сооружены таким образом, чтобы они обладали достаточной надежностью при возведении и эксплуатации с учетом при необходимости также и особых динамических и термических воздействий.

Основным свойством, определяющим надежность строительных конструкций и сооружений в целом, является безотказность их работы, способность сохранять заданные эксплуатационные качества в течение определенного срока службы.

Транспортные тоннели в большинстве, в соответствии с положениями нормативных документов, относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности. Это требует, для обеспечения их надежности и долговечности, не только безусловного выполнения обязательных для применения норм проектирования, строительства и содержания указанных тоннелей, но и специальных подходов к отдельным (особо ответственным) элементам конструкций тоннельных обделок.

Действующие нормативные документы, а также опыт проектирования и сооружения подземных объектов требует устраивать деформационные швы, отсекающие определенные участки сооружения друг от друга.

В нормативных документах и технической литературе по подземному строительству деформационным швам – ответственнейшим элементам тоннельного сооружения – уделено неоправданно мало внимания.

Деформационные швы в монолитной железобетонной тоннельной обделке

Тоннельные обделки – это статически неопределимые системы. Поэтому при изменении температуры конструкции, при усадке бетона конструкции, при неравномерной осадке основания, при несимметричном отпоре породы по бокам выработки тоннеля в конструкции обделки возникают внутренние усилия, которые могут приводить к трещинообразованию или разрушению частей конструкции – при этом может быть нарушена водонепроницаемость и несущая способность конструкции тоннельной обделки.

В конструкции тоннельной обделки деформационный шов – это определенной ширины поперечный перпендикулярный продольной оси тоннеля разрез конструкции его обделки. Шов разделяет тоннельную обделку на отдельные блоки (секции). В этих отдельных блоках деформации практически не зависят от деформаций соседнего блока (секции) – обделка в отдельных блоках может деформироваться в разной степени и без разрушений.

Деформационные швы обеспечивают адаптацию работы тоннельной обделки в системе «крепь-массив» при воздействии стохастических факторов, способных вызвать опасные внутренние усилия, которые могут снизить несущую способность конструкций.

Железобетонные конструкции с изменением температуры деформируются – укорачиваются либо удлиняются, а вследствие усадки бетона укорачиваются. При неравномерной осадке основания части конструкций стремятся сместиться в разных направлениях.

Главные функции конструкции деформационных швов: они должны быть водонепроницаемыми и способными работать без повреждений (оставаться водонепроницаемыми при смещении смежных участков (секций) тоннелей в различных направлениях: растяжение-сжатие, сдвиг, кручение).

Для этого разрабатываются и совершенствуются различные конструктивные элементы, позволяющие дополнять друг друга и взаимно страховать надежность всей конструкции деформационного шва.

Конструктивно герметизация деформационных швов в большинстве случаев обеспечивается вставками из упругих полимерных материалов.

Кроме того, могут дополнительно предусматриваться полимерные уплотнительные шнуры и гидрошпонки (рисунок) [1].

В процессе проектирования, строительства и содержания готового тоннельного сооружения в конструкциях деформационных швов в некоторых случаях допускаются ошибки и брак.

При проектировании это:

– заложенная в конструкцию недостаточная ширина шва (ширина поперечного разреза конструкции);

– применение для заполнения шва материалов с недостаточной амплитудой деформативности (растяжения-сжатия);

– не учёт объемных деформаций в сооружении (деформаций кручения, сдвига, «клавишного эффекта» и т.п.);

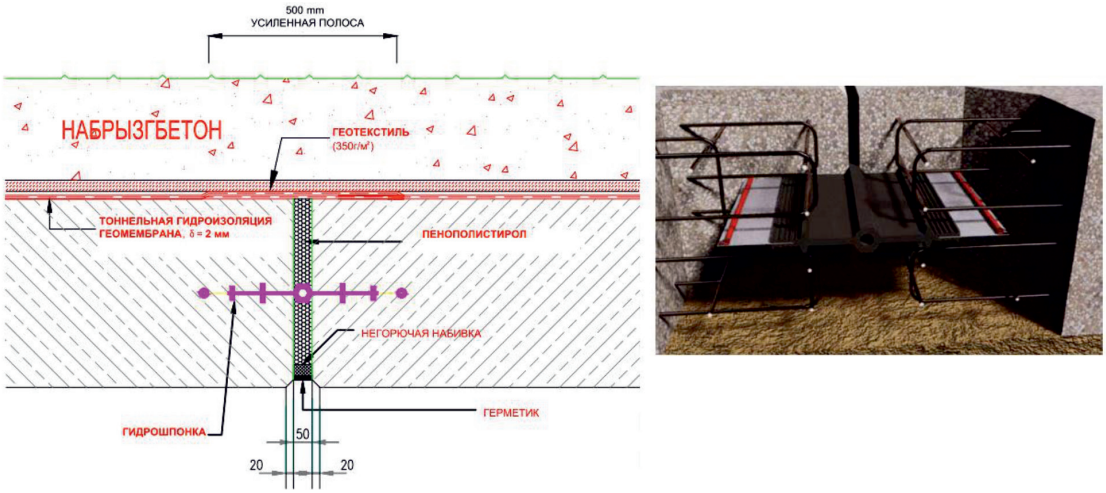
– не учёт при расстановке деформационных швов геологических аномалий и резких изменений физико-механических свойств горных пород по длине сооружения;

– отсутствие в проектной документации или неполнота требований к обеспечению эксплуатационной надежности конструкций (в частности, деформационных швов);

– и др.

При строительстве это [2]:

– нарушения и отклонения от проектных решений в части обеспечения проектной ширины деформационных швов;



Вариант узла деформационного шва в монолитной ж.б. тоннельной обделке (справа вид расположения гидрошпонки)

– применение для заполнения деформационных швов материалов, не соответствующих проектным решениям;

– не учёт при расстановке деформационных швов реальных инженерно-геологических условий по длине сооружения в соответствии с исполнительной геологической съемкой (не учет аномалий и резких изменений физико-механических свойств горных пород, выявленных при строительстве);

– и др.

При содержании это:

– отсутствие или неполнота исполнительной документации тоннельного сооружения;

– ненадлежащее ведение мониторинга (инженерных систем и горно-экологического) тоннельного сооружения.

В таких случаях часто деформационные швы становятся местом, через которое внутрь тоннеля проникают грунтовые и пластовые воды, т.е. водонепроницаемость швов необходимым образом не обеспечивается [3–5].

Кроме того, неправильно сконструированные или некачественно выполненные деформационные швы могут способствовать возникновению в секциях тоннельной обделки дополнительных внутренних усилий, которые не учитывались в расчетах – что, в свою очередь, может привести к трещинообразованию в конструкции, нарушению водонепроницаемости тела тоннельной обделки, а в дальнейшем к потере несущей способности конструкции [6].

Для расчета ширины разреза тоннельной обделки деформационным швом необходимо учесть максимально неблагоприятное сочетание факторов, действующих одновременно и вызывающих деформации конструкции обделки [7].

Для определения расстояния между антисейсмическими швами (L, м) в монолитной ж.б. тоннельной обделке можно использовать формулу по [5]:

$$L = \frac{\delta_{\text{сейсм}} c_1 T_0}{4\pi A},$$

где c_1 – скорость продольных сейсмических волн в грунте, м/с; T_0 – преобладающий период сейсмических колебаний массива, определяемый в процессе изыскания, с; A – возможная максимальная амплитуда колебаний массива, см, определяемая в процессе изысканий; $\delta_{\text{сейсм}}$ – допускаемое конструкцией шва продольное смещение смежных участков тоннеля относительно друг друга при расчетном сейсмическом воздействии, см.

Для снижения величины деформаций ползучести и усадки бетона могут быть применены различные подходы. Один из них – применение фибробетона при сооружении конструкции тоннельной обделки. Такое армирование применяется как в качестве дополнения к традиционному армированию конструкций стержневой арматурой, так и в качестве самостоятельного решения для тоннельных конструкций. Армирование несущих конструкций фиброй повышает морозостойкость и огнестойкость конструкции, трещиностойкость бетона конструкции, придает конструкции вязкость и стойкость от хрупкого разруше-

ния. Другой подход – применение новой конструкции температурно-усадочного шва, позволяющей исключить применение деформационных швов [8].

Учет дополнительного наложения температурной деформации бетона также необходим в некоторых случаях. При этом значима величина максимального возможного перепада температур. Если такой перепад относительно невелик и вероятность землетрясения с максимальной магнитудой также невелика, то совместный их учет приведет к излишнему конструктивному запасу – ширина деформационного шва будет завышена [9].

С другой стороны, так как конструкция деформационного шва должна допускать взаимные продольные смещения смежных участков обделки при их деформациях без силового воздействия секций обделки друг на друга, фактическая ширина шва должна быть увеличена.

Из опыта расчетов этой величины ширина деформационного шва $\Delta_{дш}$ составляет 40–50 мм (рисунок).

Касательно конструкции антисейсмических деформационных швов следует отметить, что они должны обеспечивать независимую подвижность секций тоннельных обделок во всех направлениях: продольные, поперечные и вращательные перемещения [10–11]. Это необходимо, т.к. сейсмические волны (растяжения-сжатия и сдвига) практически могут воздействовать по любым направлениям [12–14].

Деформационные швы в сборной высокоточной тоннельной обделке

В настоящее время при сооружении тоннелей при помощи тоннелепроходческих щитовых комплексов особенно широко применяются сборные высокоточные железобетонные тоннельные обделки [15–17], применяются также на отдельных участках (в особо тяжелых инженерно-геологических условиях, а также на участках сопряжений тоннеля с вспомогательными притоннельными сооружениями) тюбинговые чугунные и стальные обделки.

Из практики проектирования таких тоннельных обделок известно, что устраивать в них деформационные швы целесообразно в следующих случаях [18–20]:

– в местах изменения жесткости конструкции тоннельных обделок, в местах примыкания к основному тоннелю притоннельных сооружений и т.п.) – т.е. на стыке железобетонной обделки с тюбинговой, на стыке тоннельной обделки с конструкцией притоннельного сооружения;

– в зонах возможных тектонических сдвигов окружающего тоннель массива;

– в зонах деформаций от неравномерного воздействия горного давления или в зонах локальных осадок основания тоннельного сооружения и других подобных явлений.

Расстановка равномерно вдоль тоннеля температурных и антисейсмических деформационных швов в случае применения сборных тоннельных обделок нецелесообразна – конструкция тоннельной обделки в данном случае обладает достаточной податливостью, чтобы воспринять деформации от соответствующих воздействий.

Таким образом, при проектировании тоннельных сооружений со сборными обделками расстановка и конструкция деформационных швов в каждом случае индивидуальна и зависит от инженерно-геологических условий заложения сооружения, а также от компоновки сооружения.

Следует отметить, что в отечественной технической литературе по тоннелестроению до настоящего времени не освещалась тема индивидуального конструирования деформационных швов для транспортных тоннелей, сооружаемых при помощи тоннелепроходческих щитовых комплексов.

На наш взгляд, в этой области тоннелестроительной науки имеется пробел, который требует проработки (восполнения).

Расстановка деформационных швов в тоннельной обделке с учетом температурных факторов

Правильно выполненные и технически обоснованным образом расположенные в тоннельном сооружении деформационные швы во многом обеспечивают его эксплуатационные качества, надежность и долговечность всего тоннельного сооружения [21–23].

В целом качественно спроектированная и качественно сооружённая тоннельная обделка должна быть сухой. Но если несущая конструкция обделки будет удовлетворять этому условию, а деформационные швы нет, то очень быстро эксплуатационные качества тоннеля будут резко снижены, резко возрастут затраты на содержание и текущий ремонт.

Целесообразно для каждого тоннельного сооружения применять ряд типовых конструкций деформационных швов, рассчитанных на разный тип смещений и на разную амплитуду смещений.

Как уже указывалось выше, учет расчетных продольных температурных деформаций тоннельной обделки также необходим [24].

Целесообразно в период строительства фиксировать температурные показатели окружающей среды, температурные показатели твердеющего бетона конструкции обделки. Параметры очередного устанавливаемого деформационного шва необходимо назначать с учетом возможной разности температур тоннельной обделки в течение года [25]. Необходимо, таким образом, в процессе строительства иметь несколько типов деформационных швов для одного и того же тоннеля.

Известно, что для протяженных тоннелей характерна различная (непостоянная) амплитуда температур в течение года в зависимости от близости обделки к порталу или к вентиляционному стволу.

На входных (припортальных) участках тоннелей и на участках, смежных с вентиляционными стволами (это наиболее проблемные участки по температурным деформациям), конструкции деформационных швов должны быть особенно стойкими как к пониженным температурам, так и к повышенным, а также к внутридневным колебаниям температур, от положительных к отрицательным.

Следует также и при сооружении тоннелей при помощи тоннелепроходческих щитовых комплексов учитывать в период строительства температурные показатели окружающей среды, температурные показатели конструкции сборной обделки в момент ее монтажа.

В данном случае при проектировании необходимо определить точные параметры поперечной и продольной податливости сборной обделки и, с их учетом, определять необходимость установки деформационного шва в конструкцию обделки.

Параметры очередного устанавливаемого деформационного шва необходимо также назначать с учетом возможной разности температур тоннельной обделки в течение года. Необходимо, таким образом, в процессе строительства и здесь иметь несколько типов деформационных швов для одного и того же тоннеля.

Выводы

1. Правильно выполненные и технически обоснованным образом расположенные в тоннельном сооружении деформационные швы – это элементы в тоннельном сооружении, которые обеспечивают нормальные условия его эксплуатации, безотказную работу и исправное состояние на протяжении жизненного цикла объекта (проектного срока службы сооружения).

2. В нормах, обязательных для применения при проектировании и строительстве тоннельных сооружений, необходимо предусмотреть дополнительные требования к конструкциям деформационных швов.

3. Индустриальное производство деформационных швов и их элементов, а также разработка специальных конструкций для подземных сооружений – это направление для организации новых специализированных производств и развития отрасли подземного строительства.

Список литературы / References

1. Гоппе В.Р. Деформационные швы в автодорожных тоннелях // Метро и тоннели. 2012. № 3. С. 30–34.

Goppe V.R. Deformation seams in road tunnels// Metro and tunnels. 2012. № 3. P. 30–34 (in Russian).

2. Рекомендации по применению конструкций деформационных швов с резиновыми компенсаторами при строительстве и ремонте пролетных строений автодорожных мостов и путепроводов / Гипродорнии. Сост. В.И. Шестериков. М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1986. 45 с.

Recommendations on the use of structures of expansion joints with rubber expansion joints in the construction and repair of spans of road bridges and overpasses / Giprodornii. Sost. V.I. Shesterikov. M.: TSBNTI Minavtodora RSFSR, 1986. 45 p. (in Russian).

3. Гоппе В.Р. Строительство тоннелей. Учебное пособие. М.: МИИТ, 2016. 437 с.

Goppe V.R. Construction of tunnels. Manual. M.: MIIT, 2016. 437 p. (in Russian).

4. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Введ. 2011-09-01. М.: ИПК. Изд. стандартов, 2011. 18 с.

5. Смирнова Г.О. Нормативная документация и порядок применения новых строительных материалов в метро- и тоннелестроении // Подземные горизонты. 2019. № 21. С. 12–15.

Smirnova G.O. Regulatory documentation and procedure for application of new construction materials in metro- and tunnel construction // Podzemnyye gorizonty. 2019. № 21. P. 12–15 (in Russian).

6. Конных А.А., Меркин В.Е., Кезин А.С. Тоннель с отрицательной в зимний период температурой воздуха в его внутренней части // Патент РФ № 2706496. Патентообладатель ПАО «Мостотрест». 2019. Бюл. № 32.

Konny A.A., Merkin V.E., Kezin A.S. Tunnel with negative air temperature in its inner part in winter // Patent of the Russian Federation № 2706496. Patent holder of PJSC Mostotrest. 2019. Bulletin No. 32 (in Russian).

7. Фролов Ю.С., Иванес Т.В. Механика подземных сооружений. СПб.: ПГУПС, 1993. 102 с.

Frolov Y.S., Ivanes T.V. Mechanics of underground structures. SPb.: PGUPS, 1993. 102 p. (in Russian).

8. Пассек В.В., Антонов Е.А., Меркин В.Е., Величко В.П., Иванова Н.М., Гиренко И.В. Температурно-усадочный шов // Патент РФ № 2299946. 2007. Бюл. № 15.

Passek V.V., Antonov E.A., Merkin V.E., Velichko V.P., Ivanov N.M., Girenko I.V. Temperature-shrinkage seam // Patent of the Russian Federation № 2299946. 2007. Bulletin No. 15 (in Russian).

9. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009. 68 с.

Methodological guidelines for integrated mining and environmental monitoring during the construction and operation of transport tunnels. M.: URAN IPKON RAN, NIPII «Lenmetrogiprotrans», 2009. 68 p. (in Russian).

10. Тешаев У.Р., Хасанов Н.М., Абдужабаров А.Х. Сейсмостойкость конструкций водопропускных сооружений и подземных переходов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 205–209.

Teshaev U.R., Khasanov N.M., Abduzhabarov A.H. Seismic resistance of water-passage structures and underground crossings // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. № 1 (60). P. 205–209 (in Russian).

11. СП 14.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. Введ. 2011-05-20. М.: ФГУП ЦПП. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200084534 (дата обращения: 28.05.2020).

12. Yashiro K., Fachibara N., Kajima Y., Nonomura M., Asakura T. Model test on behavior of tunnels under deformation of the ground upon earthquake. Proceedings of tunnel engineering. 2007. JSCE (5). P. 63–71.

13. Руководство по расчёту и проектированию транспортных тоннелей для районов с повышенной сейсмичностью. М.: Министерство строительства и ЖКХ РФ, 2018. 165 с.

Guidance on the calculation and design of transport tunnels for areas with increased seismicity. M.: Ministerstvo stroitel'stva i ZHKKH RF, 2018. 165 p. (in Russian).

14. Розенвассер Г.Р., Петрук В.В., Букань А.П. Концепция защиты дренажно-коммуникационного тоннеля от влияния сейсмических воздействий // Метро и тоннели. 2003. № 3. С. 36–42.

Rosenwasser, G.R., Petruk V.V., Bukan A.P., Concept of Protection of Drainage and Communication Tunnel from Seismic Impacts // Metro and tunnels. 2003. № 3. P. 36–42 (in Russian).

15. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. М.: Минрегион, 2012. [Электронный ресурс]. URL: https://docinfo.ru/sp/sp-120-13330-2012/ (дата обращения: 28.05.2020).

16. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97. М.: Минрегион, 2012. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200095544 (дата обращения: 28.05.2020).

17. Herrenknecht Tunnelling Systems [Electronic resource] URL: https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/segment-production-systems (date of access: 14.05.2020).

18. Положение по проведению строительного контроля при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства. М.: ОАО «Научно-технический центр «Промышленная безопасность», 2009. 19 с.

Regulation on the construction control during construction, reconstruction, overhaul of capital construction facilities. M.: OAO «Nauchno-tekhnicheskiy tsentr «Promyshlennaya bezopasnost'», 2009. 19 p. (in Russian).

19. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*. Введ. 2012-06-30. М.: ФГУП ЦПП. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200095524 (дата обращения: 28.05.2020).

20. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Введ. 2011-12-29. М.: ФГУП ЦПП. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200095246 (дата обращения: 28.05.2020).

21. Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=148719&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.6528414365517419#07495292799192497 (дата обращения: 28.05.2020).

Federal Law of December 30, 2009 No. 384-ФЗ «Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures» [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=148719&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.6528414365517419#07495292799192497 (date of access: 28.05.2020) (in Russian).

22. Постановление Правительства РФ от 21.06.2010 г. № 468 «О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства». [Электронный ресурс]. URL: http://base.garant.ru/12176727/ (дата обращения: 28.05.2020).

Decree of the Government of the Russian Federation of June 21, 2010 No. 468 «On the Procedure for Conducting Construction Control during the Construction, Reconstruction and Overhaul of Capital Construction Facilities». [Electronic resource]. URL: http://base.garant.ru/12176727/ (date of access: 28.05.2020) (in Russian).

23. Постановление Правительства РФ от 26.12.2014 г. № 1521 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [Электронный ресурс]. URL: https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/b10/perechen-1521.pdf (дата обращения: 28.05.2020).

Decree of the Government of the Russian Federation of December 26, 2014 No. 1521 «On approval of the list of national standards and codes of rules (parts of such standards and codes of rules), the application of which on a mandatory basis ensures compliance with the requirements of the Federal Law» Technical Regulation on the Safety of Buildings and constructions». [Electronic resource]. URL: https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/b10/perechen-1521.pdf (date of access: 28.05.2020) (in Russian).

24. Vokhmin S.A., Teshaev U.R., Padamata S.K., Trebush Y.P., Khasanov N.M. Assessment of defectsin mountain roadway tunnel due to various and operational factors – Istiqlol (Republic of Tajikistan). Of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. 2018. vol. 5. no. 431. P. 76–85. DOI: 10.32014/2018.2518-170X.11.

25. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Введ. 2013-01-01. М.: ФГУП ЦПП. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200095546 (дата обращения: 28.05.2020).