ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 8 2024

ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 8 2024

PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания
Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. **Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398**.
«Успехи современного естествознания» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершенных исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.
Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (**ВАК РФ**). **К2**.
Журнал ориентируется на профессиональных работников сельского хозяйства, экологов, научных сотрудников, специалистов в смежных областях знаний, занимающихся изучением наук о земле.
Основные научные направления: 1.6. Науки о Земле и окружающей среде, 2.8. Недропользование и горные науки, 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство.

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Курзанов Анатолий Николаевич, д.м.н., профессор

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Технический редактор
Доронкина Е.Н.

Корректор
Галенкина Е.С.,
Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент ***Абдулвалеев Р.Р.*** (Уфа); д.г.-м.н., проф., ***Абилхасимов Х.Б.*** (Астана); д.т.н., проф. ***Айдосов А.*** (Алматы); д.г.-м.н., проф., ***Алексеев С.В.*** (Иркутск); д.х.н., проф., ***Алоев В.З.*** (Нальчик); д.г.н., проф. ***Андреев С.С.*** (Ростов-на-Дону); д.г.н., доцент, ***Андреева Е.С.*** (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент ***Анищенко Л.Н.*** (Брянск); д.с.-х.н., проф. ***Байрамбеков Ш.Б.*** (Камызяк); д.т.н., проф. ***Бейсембаев К.М.*** (Караганда); д.т.н., проф. ***Белозеров В.В.*** (Ростов-на-Дону); д.б.н., доцент ***Белоус О.Г.*** (Сочи); д.с.-х.н., проф. ***Берсон Г.З.*** (Великий Новгород); д.г.-м.н., проф. ***Бондарев В.И.*** (Екатеринбург); д.т.н., профессор ***Галкин А.Ф.*** (Ухта); д.г.-м.н., проф. ***Гавришин А.И.*** (Новочеркасск); д.с.-х.н., ***Горбачева А.Г.*** (Пятигорск); д.с.-х.н., ***Горянин О.И.*** (Самара); д.г.-м.н., проф. ***Гусев А.И.*** (Бийск); д.с.-х.н., проф. ***Данилин И.М.*** (Красноярск); д.б.н., доцент ***Долгов А.В.*** (Мурманск); д.э.н., проф. ***Долятовский В.А.*** (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. ***Дресвянников А.Ф.*** (Казань); д.г.н., проф. ***Егорина А.В.*** (Усть-Каменогорск); д.т.н., проф. ***Ерофеев В.И.*** (Томск); д.с.-х.н., проф. ***Залесов С.В.*** (Екатеринбург); д.с.-х.н., доцент ***Захарченко А.В.*** (Томск); д.с.-х.н., проф. ***Зволинский В.П.*** (Волгоград); д.х.н., проф. ***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)

ISSN 1681-7494

Электронная версия: http://www.natural-sciences.ru
Правила для авторов: http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index
Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,775
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,368

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Телефон**	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	30.08.2024	**Дата выхода номера**	30.09.2024
Формат	60x90 1/8	**Усл. печ. л.**	6,0
Тираж	1000 экз.	**Заказ**	УСЕ 2024/8

Распространяется по свободной цене

Подписной индекс в электронном каталоге «Почта России»: П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63398**.
«Advances in current natural sciences» is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles of scientific novelty, which are the results of completed research, of a problematic or scientific-practical nature, scientific reviews.
The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (**HCC RF**). **К2**.
The journal is aimed at professional agricultural workers, environmentalists, researchers, specialists in related fields of study geosciences.
Main scientific directions: 1.6. Earth and environmental sciences, 2.8. Subsoil use and mining sciences, 4.1. Agronomy, forestry and water management.

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

DEPUTY CHIEF EDITOR
Kurzanov Anatoly Nikolaevich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

EXECUTIVE SECRETARY
Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor
Doronkina E.N.

Corrector
Galenkina E.S.,
Dudkina N.A.

EDITORIAL BOARD

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

ISSN 1681-7494

Electronic version: http://www.natural-sciences.ru
Rules for authors: http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index
Impact-factor RISQ (two-year) = 0,775
Impact-factor RISQ (five-year) = 0,368

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	440026, Penza, st. Lermontov, 3		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Telephone**	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.08.2024	**Number issue date**	30.09.2024
Format	60x90 1/8	**Conditionally printed sheets**	6,0
Circulation	1000 copies	**Order**	УСЕ 2024/8

Distribution at a free price

Subscription index in the Russian Post electronic catalog: P7816

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

ДИНАМИКА ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ

Алексеев Д.К., Примак Е.А., Канухина А.Ю., Виноградов Ф.В. 6

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА

Масляев В.Н., Маскайкин В.Н., Рычкова О.В., Амирова Д.А., Евсеев А.Д. 12

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

СТАТЬИ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Косарев А.В., Русинов А.В., Чумакова С.В., Колганов Д.А., Алексеев В.С., Моршнев А.Ю. 20

ВНУТРИСУТОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Синцова Т.Н., Опутин М.А. 30

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

СТАТЬЯ

ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ ПОСЛЕ СПЛОШНОЙ РУБКИ ОСУШЕННОГО ЕЛЬНИКА ЧЕРНИЧНОГО ВЛАЖНОГО

Богданов А.П., Цветков И.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В. 36

1.5.20 Биологические ресурсы

СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМОРФИЗМА У БЕЛОГО КЛЕВЕРА (TRIFOLIUM REPENS L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ

Шишлова М.А., Быковская Н.В. 43

CONTENTS

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

DYNAMICS OF GREEN AREAS IN SAINT PETERSBURG AND CLIMATE RISKS

Alekseev D.K., Primak E.A., Kanukhina A.Yu., Vinogradov F.V. 6

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE RELIEF FOR THE PURPOSES OF AGRICULTURAL LAND USE AND LAND MANAGEMENT

Maslyaev V.N., Maskaikin V.N., Rychkova O.V., Amirova D.A., Evseev A.D. 12

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

ARTICLES

DISTRIBUTION OF SOIL MOISTURE IN THE FIELD ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Kosarev A.V., Rusinov A.V., Chumakova S.V., Kolganov D.A., Alekseev V.S., Morshnev A.Yu. 20

INTRADAY FLUCTUATIONS IN THE WATER QUALITY ON THE KAMSKY RESERVOIR

Sintsova T.N., Oputin M.A. 30

Agricultural sciences (4.1.6. Forestry, forestry, forest crops, agroforestry improvement, greening, forest pyrology and taxation)

ARTICLE

DYNAMICS OF STAND STRUCTURE AFTER CLEAR-CUTTING AND DRAINAGE OF PICEETUM MYRTILLOSUM

Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V., Karaban A.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V. 36

1.5.20 Biological resources

ARTICLE

POLYMORPHISM STUDY IN WHITE CLOVER (TRIFOLIUM REPENS L.) DEPENDING ON THE GROWING CONDITIONS

Shishlova M.A., Bykovskaya N.V. 43

СТАТЬИ

УДК 551.588
DOI 10.17513/use.38297

ДИНАМИКА ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ

Алексеев Д.К., Примак Е.А., Канухина А.Ю., Виноградов Ф.В.

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург, e-mail: d.alekseev@rshu.ru

Цель работы заключается в анализе пространственно-временной динамики зеленых насаждений Санкт-Петербурга на основе данных дистанционного зондирования. В качестве количественного критерия использовался нормализованный разностный вегетационный индекс. Исследование проводилось на основе анализа данных мультиспектральных спутниковых снимков Landsat-7 и Landsat-8 за 2002 и 2018 гг., по результатам которого было установлено снижение показателей обеспеченности зелеными насаждениями в разных районах Санкт-Петербурга. Полученные карты растительности, построенные по данным спутниковых снимков Landsat, позволяют оценить пространственное распределение показателей озеленения и спланировать объекты городского зеленого строительства. По классификации климата Кёппена городская агломерация расположена в зоне влажного континентального климата. К опасным климатическим рискам для Санкт-Петербурга относят продолжительную жару, сильную жару, ураганы, смерчи и сильный ветер. Учитывая микроклиматические характеристики Санкт-Петербурга, сценарии влияния глобального потепления, на фоне сокращения зеленых зон и зафиксированных трендов в изменении температурного и влажностного режимов следует ожидать увеличения интенсивности и продолжительности климатических рисков весьма опасного уровня. Полученные данные могут быть полезны при городском планировании, мониторинге зеленых зон и принятии практических решений.

Ключевые слова: изменение климата, адаптация городов, устойчивое развитие, городская среда

DYNAMICS OF GREEN AREAS IN SAINT PETERSBURG AND CLIMATE RISKS

Alekseev D.K., Primak E.A., Kanukhina A.Yu., Vinogradov F.V.

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, e-mail: d.alekseev@rshu.ru

The purpose of the research study is to analyze the spational-temporal dynamics of St. Petersburg green spaces using remote sensing data. As a quantitative criterion we analyzed the normalized difference vegetation index data from multispectral satellite images of Landsat-7 and Landsat-8 for 2002 and 2018. A decrease of the green spaces supply in different areas of St. Petersburg were indicated. The obtained vegetation maps constructed from Landsat satellite images give us a possibility to estimate the spatial distribution of greening indicators and effectively plan urban green areas. The urban agglomeration is in the humid continental climate zone, according to the Köppen climate classification. Dangerous climate risks for St. Petersburg include prolonged heat waves, extreme heat, hurricanes, tornadoes and strong winds. Taking into account the microclimatic characteristics of St. Petersburg, recorded trends in temperature and humidity regimes, scenarios for the global warming impact on the city and the results of the green areas reduction we should expect an increase in the frequency of local overheating and an increase in the impact of heat waves. The data obtained can be useful in urban planning, green areas monitoring and practical decision making.

Keywords: climate change, urban adaptation, sustainable development, urban environment

Введение

С учетом возможных последствий изменения климата в РФ последнее время активно формируется система из Национального, отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации. В конце 2023 г. был утвержден Региональный план адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата. Одним из приоритетных мероприятий является развитие водно-зеленого каркаса. Важное место отводится увеличению площади особо охраняемых природных территорий, зон рекреационного назначения, зон охраны объектов природного и культурного наследия и зеленого фонда города в целом.

Санкт-Петербург занимает территорию около 1,4 тыс. км^2, на которой проживает приблизительно 6 млн чел.: 5,3 млн из них находятся непосредственно в городе, а 0,77 млн – в городах-спутниках. Плотность населения составляет порядка 4000 человек на км^2. Значительная часть населения агломерации (87%) проживает на территории, составляющей лишь 16% ее общей площади. Согласно прогнозам градостроительного развития города, к 2040 г. население увеличится до 6,5 млн чел. [1]. На фоне высоких темпов жилищного строительства и автомобилизации населения из всего спектра экологических проблем

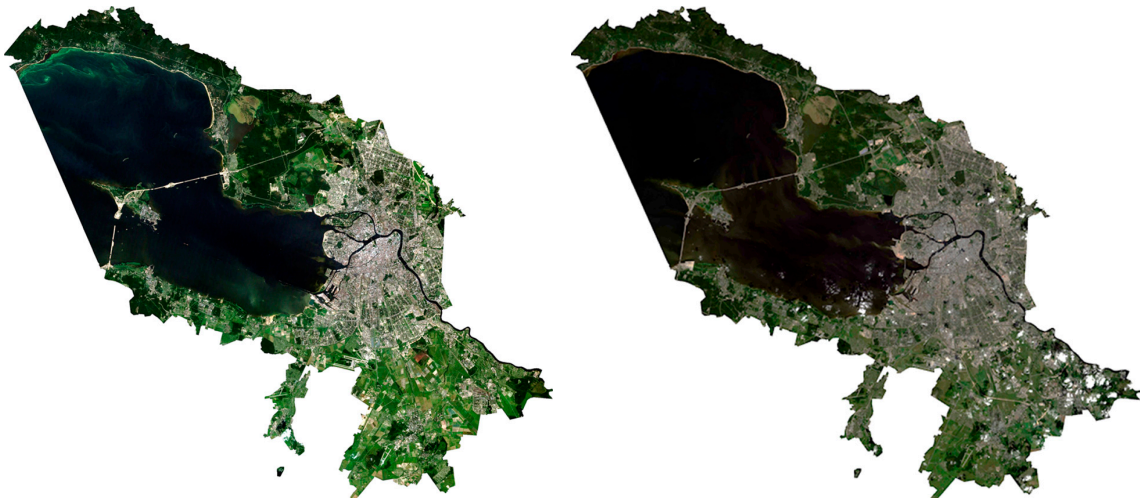
современного города, требующих решений, озеленение городской территории занимает одно из главных мест. Известно, что зеленые насаждения в современных городах играют важную роль при создании комфортной среды обитания, например снижают уровень загрязнения воздуха и эффект от городского острова тепла [2].

Впервые научный интерес к изучению озелененных территорий на микроклимат сформировался в Ленинграде в начале второй половины XX в. Например, было зафиксировано в околополуденные часы, что летом при ясной тихой погоде наблюдаются наибольшие различия температуры воздуха в зеленых насаждениях и в застройке [3]. Обычно выделяют следующие факторы воздействия зеленых насаждений на микроклимат урбанизированных территорий: радиационный баланс, скорость ветра, температурный режим, аэрозольный состав и влажность приземного слоя воздуха. В работах разных авторов неоднократно выделялись как мезоклиматические различия между городом и пригородом или между крупными районами населенного пункта, так и микроклиматические различия метеорологических величин.

Цель данного исследования заключалась в пространственно-временной оценке динамики зеленых насаждений на основе данных дистанционного зондирования.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена на основе многоспектральных изображений спутника Landsat 7 и Landsat 8 за 2002 и 2018 гг. (рис. 1), характеристики сцен представлены в таблице. Даты спутниковых сцен выбирались с учетом данных о погоде за летний период и распределения температур в первую половину вегетационного периода. Наиболее показательными были снимки от 11 июля 2002 г. и 31 июля 2018 г. Анализ пространственного распределения озелененных территорий Санкт-Петербурга и внутригородских районов проводился с использованием системы для автоматизированных геонаучных анализов SAGA GIS и геоинформационной системы QGIS.



а) *б)*

Рис. 1. Спутниковые снимки Landsat за (а) 2002 и (б) 2018 гг.

Характеристика спутниковых сцен Landsat за 2002 и 2018 гг.

Идентификатор	Источник	Дата	Характеристика погоды
LE07_L1TP_185018_20020711_20170129_01_T1	Landsat 7	11.07.2002	температура днем +28°С, температура ночью +26°С, облачно, без осадков, направление ветра С-З, скорость 1 м/с
LC08_L1TP_185018_20180731_20180814_01_T1	Landsat 8	31.07.2018	температура днем +28°С, температура ночью +26°С, ясно, без осадков, направление ветра Ю-В, скорость 2 м/с

Оценка динамики зеленых насаждений выполнена на основе простого количественного показателя, предложенного Дж. Роузом и др. в 1973 г., – нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) [4]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра. Различные типы поверхностей выделялись на основе градаций индекса NDVI [2]: высокая степень развития растительности (состояние хорошее) – 0,49–1; средняя (удовлетворительное состояние) – 0,38–0,48; низкая (угнетенное состояние) – 0,30–0,37; очень низкая (открытые почвы) – 0,18–0,29; сильно угнетенное состояние или искусственные материалы от -0,24 до 0,17 и менее -0,24 – водные объекты.

Результаты исследования и их обсуждение

В последние годы изменение климата рассматривается как один из ведущих факторов, оказывающих влияние на здоровье населения. Это происходит как напрямую через увеличение количества дней с экстремальными температурами, наводнениями, штормами и т.д., так и косвенно, через воздействие экологических или социально-экономических факторов (например, сокращение объемов качественной питьевой воды, повышение уровня загрязнения атмосферного воздуха и др.). По различным оценкам увеличение средней температуры в период с 1971 по 2000 г. составляет примерно 5,4°C. К концу XXI в. по сравнению с указанным периодом для нескольких сценариев выбросов парниковых газов увеличение средней температуры поверхности воздуха составит 2,8°C для сценария B1 и 4°C для сценариев A1B и A2, увеличение осадков для периода с 1981 по 2010 г. предполагается на 228 мм для B1, 244 мм для A1B и 262 мм для A2 [5]. На фоне возможных климатических изменений для Санкт-Петербурга прогнозируется увеличение повторяемости, интенсивности и продолжительности опасных метеорологических явлений, таких как продолжительная жара (положительные аномалии на 7°C и более, продолжительностью в течение 5 суток и более) и сильная жара (максимальная температура воздуха +35°C и выше любой продолжительностью). В региональном плане адаптации Санкт-Петербурга выделены следующие климатические риски различного уровня опасности (рис. 2) [6].

Значительную роль в снижении климатических рисков или уровня опасностей может сыграть озеленение городской территории, при этом следует учитывать не только наличие, но и качество зеленых насаждений. В планировочной структуре городов принято выделять три класса насаждений: общего, ограниченного и специального пользования. Считается, что влияние зеленых насаждений на климатические риски определяется их площадью и плотностью.

Рис. 2. Классификация климатических рисков по уровням опасности для Санкт-Петербурга

Насаждения с сомкнутыми кронами (плотность 0,9–1) оказывают наибольшее воздействие на микроклиматический режим, меньшее влияние – с ажурными (плотность 0,8–0,7) и наиболее слабое – со сквозными (полнота не более 0,6). По различным оценкам температура в насаждениях с сомкнутыми и ажурными кронами ниже на 2–2,5°С и на 1,5°С, соответственно, чем на неозелененных улицах, а при сквозных насаждениях различия не превышают 1,5°С. В зеленых насаждениях также выше относительная влажность, а скорость ветра понижена, комфортные условия в Санкт-Петербурге формируются в зеленых массивах площадью 5–8 га [4]. Для городов умеренного пояса по числу реализуемых экологических услуг преимущество следует отдавать городским лесам, при этом следует учитывать не только размерность, тип, но и локализацию относительно речных бассейнов, различных функциональных зон и кварталов с различной плотностью застройки [7].

Площадь различных поверхностей для всех районов Санкт-Петербурга и города в целом рассчитывалась по приведенной ранее классификации NDVI. На первом этапе была вычислена относительная площадь поверхностей для каждой административной единицы, далее для удобства анализа значения NDVI объединялись на два класса: от 0,3 до 1 – поверхности, покрытые растительностью независимо от состояния и от -0,24 до 0,17 – искусственные материалы. Результаты обработки данных представлены на рис. 3 и 4.

В среднем для Санкт-Петербурга в 2018 г. характерна следующая картина: на долю площади поверхностей с растительным покровом приходится 62%, искусственные поверхности занимают 29% от площади города. Наблюдается увеличение площади последней категории объектов на 8% по сравнению с 2002 г. на фоне сокращения доли категории «средняя степень развития растительности» на 3%, «высокая степень развития растительности» на 5%. По данным за 2018 г. в восьми районах доля площади искусственных поверхностей превышает 50%. Наиболее неблагоприятная ситуация наблюдается в исторических районах – Адмиралтейском, Василеостровском, Петроградском и Центральном. При этом сохраняется общая тенденция на увеличение площади искусственных покрытий по сравнению с 2002 г. во всех районах города на фоне снижения площади озелененных территорий. Наиболее благоприятная ситуация наблюдается в Курортном, Петродворцовом и Пушкинском районах, где расположены основные городские особо охраняемые природные территории и памятники природного и культурного наследия. Значительное сокращение относительной площади (%) поверхностей с растительностью (NDVI > 0,3) наблюдается в Колпинском, Красносельском, Калининском и Приморском районах.

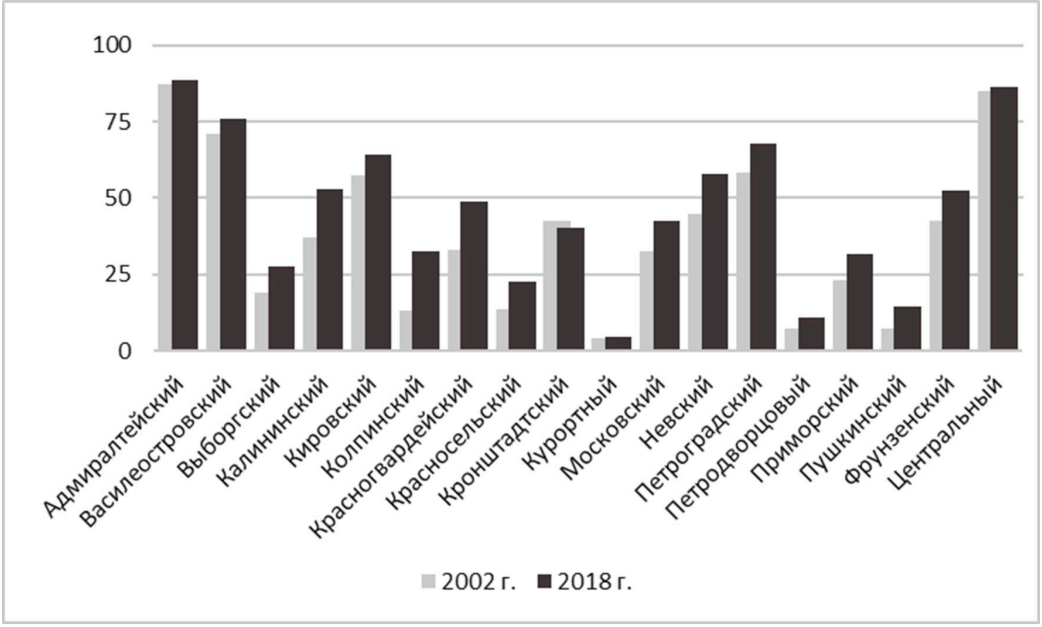


Рис. 3. Распределение относительной площади (%) искусственных поверхностей по различным районам Санкт-Петербурга за 2002 и 2018 гг. (NDVI)

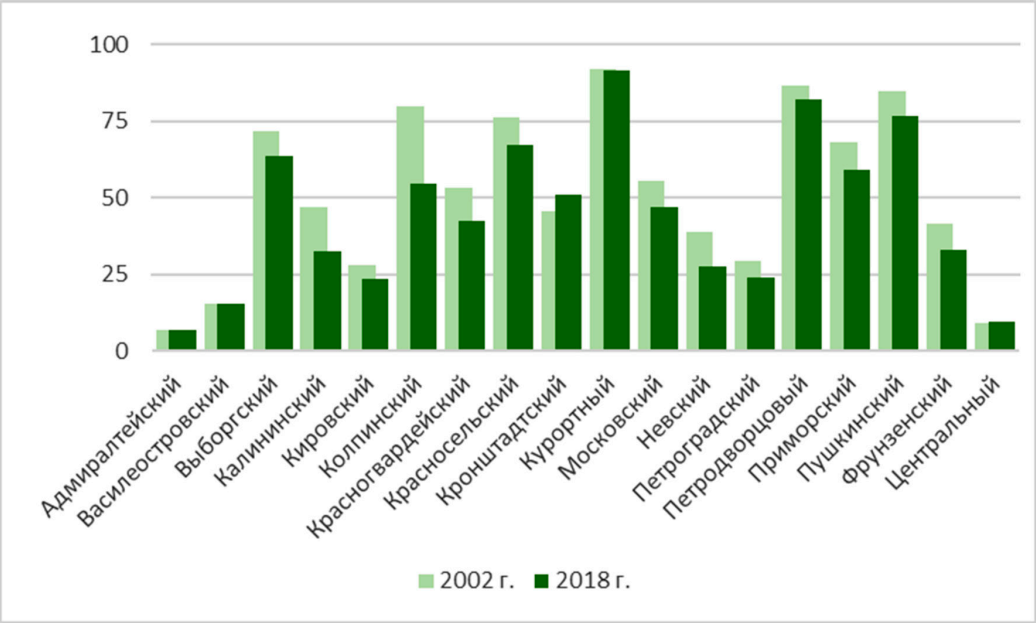


Рис. 4. Распределение относительной площади (%) поверхностей с растительностью по различным районам Санкт-Петербурга за 2002 и 2018 гг. (NDVI > 0,3)

Во многом данная ситуация связана с активной жилищной застройкой и развитием улично-дорожной сети (УДС). Например, наиболее высокая плотность УДС характерна для Адмиралтейского – 7,3, Центрального – 7,1 и Петроградского района – 6,3 км/км^2 [8]. Для пригородных районов (Курортный, Пушкинский, Колпинский) характерна низкая плотность УДС из-за менее плотной застройки, состоящей из отдельных жилых образований, соединенных сетью дорог, а для периферийных районов города, граничащих с крупными промышленными территориями, средняя плотность УДС – от 3,1 до 5 км/км^2. К таким районам относятся Калининский, Кировский, Красносельский, Красногвардейский, Московский, Выборгский и Невский.

Учитывая микроклиматические характеристики Санкт-Петербурга, сценарии влияния глобального потепления, на фоне сокращения зеленых зон и зафиксированных трендов в изменении температурного и влажностного режимов следует ожидать увеличения интенсивности и продолжительности климатических рисков весьма опасного уровня.

Высокая степень развития растительности зафиксирована в районах, расположенных на границе с Ленинградской областью. Несмотря на то, что вертикальная застройка города способствует экономии земельных участков, это приводит к резкому снижению обеспечения населения зелеными пространствами в подавляющем большинстве жилых районов. Следует увеличивать площадь охраняемых парков, резервировать незастроенные участки, постановив в качестве цели, чтобы не менее 90 % жителей имели доступ к общественным зеленым зонам (включая парки, сады, школьные дворы, территории жилых комплексов) в пределах 300 м от дома – эталон, используемый ведущими европейскими городами. Рассмотреть возможность создания зеленых зон на бывших промышленных территориях. При реализации проектов по благоустройству территории активно внедрять различные элементы зеленой инфраструктуры, такие как сады дождя, проницаемые покрытия, зеленые улицы, и крыши, создание интерактивной карты проектов зеленой инфраструктуры Санкт-Петербурга.

Важно отметить, что климатические условия Санкт-Петербурга, такие как высокая влажность, режим ветра, световой режим, могут оказывать отрицательное влияние на формирование и поддержание зеленого каркаса города. В мегаполисе в среднем бывает 62 солнечных дня в году, при этом различные негативные факторы (смог, пыль, дым, различные примеси в воздухе) могут изменять световой и тепловой режим в приземном слое, существенно изменяя микроклиматические характеристики.

Повышение культуры ведения садово-паркового хозяйства городскими службами и привлечение местных жителей к работам по благоустройству будет способствовать сохранению существующих зеленых насаждений. Перечисленные меры должны способствовать устойчивому развитию Санкт-Петербургской агломерации в сочетании с возможными климатическими изменениями.

Заключение

Распределение озелененных территорий в пределах административных границ Санкт-Петербурга по результатам анализа спутниковых снимков за 2002 и 2018 гг. крайне неоднородно. В период с 2002 по 2018 г. в Санкт-Петербурге наблюдалось сверхбыстрое возведение многоэтажных зданий, что привело к резкому увеличению численности и плотности населения, созданию новой городской инфраструктуры. К опасным климатическим рискам для Санкт-Петербурга относят продолжительную жару, сильную жару, ураганы, смерчи и сильный ветер. Учитывая микроклиматические характеристики Санкт-Петербурга, сценарии влияния глобального потепления, на фоне сокращения зеленых зон и зафиксированных трендов в изменении температурного и влажностного режимов следует ожидать увеличения интенсивности и продолжительности климатических рисков весьма опасного уровня.

Список литературы

1. Закон Санкт-Петербурга от 22.12.2005 № 728–99 (ред. от 26.12.2023) «О Генеральном плане Санкт-Петербурга» (принят ЗС СПб 21.12.2005) [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/7800202312290028 (дата обращения: 29.06.2024).

2. Низамутдинов Т.И., Колесникова Е.В., Алексеев Д.К. Влияние зеленых насаждений на динамику загрязнения воздуха в городах // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2021. № 1. С. 58–73. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.05.

3. Климат Ленинграда / Под ред. Ц.А. Швер, Е.В. Алтыкиса, Л.С. Евтеевой. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 254 с.

4. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. Vol. 1. P. 48–62.

5. Томилина О., Меньшова Ю., Савенкова Г., Богатырев И., Рябчук Д., Франк-Каменецкий Д., Павловский А. Геологические и экологические риски Санкт-Петербурга. Практические рекомендации по адаптации к климатическим изменениям. Санкт-Петербург. 2014. [Электронный ресурс]. URL: http://cliplive.infoeco.ru/dl/Mineral/reports/CLIPLIVE%20SPb%20report%20rus.pdf (дата обращения: 19.06.2024).

6. Распоряжение Правительства Санкт-Петербурга от 21.12.2023 № 25-рп «Об утверждении Регионального плана адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата». [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/7800202312290015 (дата обращения: 29.06.2024).

7. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63, Вып. 2. С. 127–146. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2018.201.

8. Колесникова Е.В., Музалевская А.А. Влияние автотранспорта на загрязнение атмосферного воздуха Санкт-Петербурга // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2024. № 1. С. 69–83. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.05.

УДК 502/504:556.18(470.345)
DOI 10.17513/use.38298

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА

Масляев В.Н., Маскайкин В.Н., Рычкова О.В., Амирова Д.А., Евсеев А.Д.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: Maslyaevvn1960@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы геоинформационной оценки рельефа для целей сельскохозяйственного землепользования и землеустройства, влияния рельефа на формирование структуры сельскохозяйственных угодий и развитие экзогеодинамических процессов (водная эрозия, оползнеобразование, заболачивание и др.) в агроландшафтах северной лесостепи Республики Мордовия, предложены рекомендации по экологической оптимизации сельскохозяйственного землепользования в условиях интенсивного развития процессов водной эрозии. Целью исследования явилась геоинформационная оценка рельефа для оптимизации сельскохозяйственного землепользования в агроландшафтах Республики Мордовия. Исследование выполнено с использованием общенаучных методов, статистического, картографического, геоинформационного, аэрокосмического методов. Выявлено значение геоморфологического каркаса территории как картографической основы для создания региональных схем землеустройства, проектов территориального и внутрихозяйственного землеустройства. На основе цифровых моделей рельефа подготовлены карты углов наклона земной поверхности, экспозиции склонов, разработана модель потенциальной опасности развития процессов водной эрозии почв. В ходе исследования выявлены общие закономерности изменения показателей вертикального и горизонтального расчленения рельефа для агроландшафтов Мордовии, выделены участки пашни агроландшафтов, которые вследствие развития негативных экзогеодинамических процессов необходимо перевести под другие виды сельскохозяйственных угодий. Результаты геоинформационного анализа рельефа способствуют совершенствованию структуры агроландшафтов и сельскохозяйственного землепользования в целом, сокращают затраты на проведение полевых почвенных обследований земель.

Ключевые слова: земельные ресурсы, сельскохозяйственное землепользование, землеустройство, рельеф, геоинформационный анализ, экзогеодинамические процессы, плакор, пойма, крутизна склона, экспозиция склона, агроландшат

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE RELIEF FOR THE PURPOSES OF AGRICULTURAL LAND USE AND LAND MANAGEMENT

Maslyaev V.N., Maskaikin V.N., Rychkova O.V., Amirova D.A., Evseev A.D.

Ogarev National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: Maslyaevvn1960@mail.ru

The article considers the issues of geoinformation assessment of relief for the purposes of agricultural land use and land management, the influence of relief on the formation of the structure of agricultural land and the development of exogeodynamic processes (water erosion, landslide formation, waterlogging, etc.) in the agro-landscapes of the northern forest-steppe of the Republic of Mordovia, offers recommendations on the environmental optimization of agricultural land use in conditions of intensive development of water erosion processes. The purpose of the study was a geoinformation assessment of the relief to optimize agricultural land use in the agricultural landscapes of the Republic of Mordovia. The study was carried out using general scientific methods, statistical, cartographic, geoinformation, and aerospace methods. The importance of the geomorphological framework of the territory as a cartographic basis for the creation of regional land management schemes, territorial and on-farm land management projects has been revealed. Based on digital terrain models, maps of the angles of inclination of the earth's surface, the exposure of slopes have been prepared, and a model of the potential danger of the development of processes of water erosion of soils has been developed. In the course of the study, general patterns of changes in the indicators of vertical and horizontal division of the relief for the agricultural landscapes of Mordovia were identified, areas of arable land were identified, which, due to the development of negative exogeodynamic processes, must be transferred to other types of agricultural land. The results of the geoinformation analysis of the relief contribute to the improvement of the agrolandscape structure and agricultural land use in general, reduce the cost of conducting field soil surveys of land.

Keywords: land resources, agricultural land use, land management, relief, geoinformation analysis, exogeodynamic processes, plakor, floodplain, slope steepness, slope exposure, agrolandscape

Введение

Рациональное использование и охрана земель в соответствии с Федеральным законом от 18.06.2001 № 78-ФЗ «О землеустройстве» являются обязательным элементом управления земельными ресурсами в нашей стране. Закон обязывает органы управления земельными ресурсами проводить инвентаризацию и мониторинг земель, вести учет качества земель. На качество земель существенное влияние оказывают рельеф местности и его элементы. Их учет

в региональных схемах землеустройства, проектах территориального (межхозяйственного) и внутрихозяйственного землеустройства создает надежный фундамент рационального землепользования. Игнорирование форм и показателей рельефа в региональном землеустройстве приводит к развитию экзогеодинамических процессов – к водной эрозии, оползнеобразованию и заболачиванию. В настоящее время идут процессы перехода сельскохозяйственного землепользования и землеустройства на цифровые технологии, активно используются геоинформационные технологии для моделирования рельефа земной поверхности [1, 2]. В последние годы данной тематике исследований посвящены работы С.А. Антонова, С.В. Перегудова [3], И.К. Лурье, М.В. Лурье [4], Т.Е. Ельшиной, Е.С. Утробиной, А.В. Сысоева [5], А.В. Мелиховой [6], С.А. Тесленка, В.Ф. Манухова, К.С. Тесленка [7], В.Г. Юферева, А.В. Мелихова, В.В. Балынова [8], С.В. Пашкова, Г.З. Мажитовой [9] и др.

Объект исследования – рельеф территории Республики Мордовия (далее – РМ).

Цель исследования – геоинформационная оценка рельефа для оптимизации сельскохозяйственного землепользования в агроландшафтах (далее – АЛ) Мордовии.

Задачи:

– изучить научные основы исследования рельефа для целей сельскохозяйственного землепользования и землеустройства;

– оценить факторы рельефообразования Республики Мордовия;

– провести геоинформационный анализ рельефа РМ;

– на основе полученных географических данных (далее – геоданных) разработать предложения по оптимизации использования земель АЛ РМ.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования использовались следующие методы исследования: общенаучные методы, статистический, картографический, геоинформационный, аэрокосмический методы. Исходными материалами послужили топографические карты и космофотоснимки открытого доступа, данные портала ФГИС ТП, ФГИС ЕГРН, материалы ООО «Мордовский научно-производственный институт инженерных изысканий» и ООО «Гипрозем С» (Саранск).

Земля – важнейшая часть окружающей среды, характеризующаяся пространством, рельефом, климатом, почвенным покровом, растительностью, недрами, водами [10]. Качество земель – совокупность плодородия, рельефа, конфигурации полей и климатических условий.

Одним из важнейших природных свойств земли является рельеф земной поверхности [11–13]. Он наряду с другими факторами определяет качество земель. Формы и элементы рельефа определяют структуру почвенного покрова. Рельеф – это источник гравитационной энергии. Во многом именно он определяет интенсивность развития экзогеодинамических процессов, оказывающих негативное влияние на качество земель.

Выделяют две группы рельефообразующих факторов: эндогенные процессы, которые связаны с тектоникой и неотектоникой, и экзогенные процессы. Геоморфологический анализ рельефа – достаточно сложный процесс. Исторически он менял свое содержание, но во все времена включал три этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

В землеустройстве геоморфологический каркас территории является основой, на которую наносятся границы почвенных разностей, границы сельскохозяйственных угодий, севооборотов, участков и полей. При построении карты геоморфологического каркаса (далее – ГК) выделяются структурные элементы рельефа. К элементам ГК территории относят: водораздельное плато, пойму, склоны, овражно-балочный комплекс – совокупность водно-эрозионных форм рельефа.

При землеустроительном проектировании обязательно учитывают особенности рельефа. Размещение угодий и севооборотов, участков увязывают с формами и элементами рельефа [14].

В ходе геоинформационного анализа рельефа определяют экспозицию склонов, площади, занятые различными формами рельефа, и некоторые другие морфологические и морфометрические показатели. Для определения вышеперечисленных геоданных очень важна точность определяемых геоморфологических показателей.

Благодаря рельефу местности и другим природным и антропогенным факторам на землях сельскохозяйственного назначения (далее – ЗСН) возможно проявление эрозионных процессов. Комплекс противоэрозионных мероприятий разрабатывается с учетом рельефа местности на следующих уровнях: региональном, муниципальном, на уровне сельскохозяйственного предприятия.

Основное назначение ГИС в землеустройстве – это создание цифровых карт рельефа, являющихся плановой основой современного землеустройства. Среди наиболее распространенных ГИС можно отметить: MapInfo, ArcInfo, ArcGIS, AutoCAD-Map, AutoMap, ГеоГраф/ГеоКонструктор, WinGIS, Панорама, ObjectLand, ArcView и др. Качество геоинформационного анализа рельефа зависит в основном от качества картографического материала. Исходными материалами для геоинформационного картографирования в нашей работе послужили топографические карты открытого доступа, размещенные в сети Internet, архивные материалы межхозяйственного и внутрихозяйственного землеустройства.

Рельеф РМ представлен водно-ледниковой равниной (далее – ВЛР), вторичной моренной равниной (далее – ВМР) и эрозионно-денудационной равниной (ЭДР). Наиболее расчлененный и сложный рельеф сформировался на юго-востоке Республики. В целом рельеф РМ благоприятен для ведения сельскохозяйственной деятельности [15–17]. К негативным процессам, осложняющим ведение земледелия, относятся водно-эрозионные процессы, оползнеобразование и заболачивание. На востоке и в центре РМ располагаются отроги Приволжской возвышенности, на западе – окраина Окско-Донской низменности. Общее падение земной поверхности отмечено на север, северо-запад.

Результаты исследования и их обсуждение

Геоинформационный анализ рельефа РМ показал, что в Республике преобладают склоны северной экспозиции. На их долю приходится 16,4% поверхности региона. Северные склоны, как правило, получают меньше тепла и более пологие по уклону, отличаются значительной протяженностью. К северным склонам прилегают склоны северо-восточной экспозиции (10,9% от площади РМ) и северо-западной экспозиции (11,9%). Склоны южной экспозиции более теплые, короткие по длине, имеют значительные уклоны поверхности. На таких склонах развиты водно-эрозионные, осыпные и оползневые процессы. На их долю приходится 12,2% поверхности региона. К склонам южной экспозиции прилегают склоны юго-восточной экспозиции (11,5%) и юго-западной экспозиции (11,3%). На склоны восточной экспозиции приходится 11,7%, на склоны западной экспозиции – 13,2% поверхности региона. В АЛ ВМР доля крутых склонов небольшая. Наибольшие площади крутосклонные поверхности занимают в АЛ, расположенных на приводораздельных пространствах ВМР и ЭДР.

Для РМ характерны высокая освоенность и распаханность земель. ЗСН в регионе занимают 63,4% от общей площади. Для территории Республики построена карта условий использования земель под пашню. На ее основе сделан вывод о нерациональном использовании некоторых земель под пашню и необходимости сокращения ее площади. Наиболее эффективное сельскохозяйственное землепользование территориально приурочено к районам, значительная территория которых находится в лугово-степных АЛ ЭДР и ВМР. Массивы пашни приурочены здесь к поверхностям до 3 градусов, территориально совпадающим с плодородными почвами: черноземами оподзоленными, выщелоченными и луговыми. Самая высокая сельскохозяйственная освоенность АЛ отмечена в Ромодановском (88,4%), Атяшевском (83,5%), Лямбирском (81,9%), Рузаевском (76,9%), Старошайговском (72,8%) муниципальных районах.

На уровне РМ и муниципального района построены карты использования земель, цифровые модели рельефа (далее – ЦМР), карты экспозиции и уклонов поверхности (рис. 1, 2).

Рельеф местности характеризуют показатели густоты овражной и балочной сети, вертикального расчленения. Рисунок овражной и балочной сети существенного отличается в АЛ региона. Наиболее низкие показатели густоты овражной и балочной сети отмечены в АЛ ВЛР. Более высокие показатели отмечены в АЛ ВМР и ЭДР. В АЛ ВМР рисунок овражно-балочной сети перистый. Распределение балок в регионе территориально неоднородно. Наиболее густая и глубокая балочная сеть сформировалась на юге и юго-востоке Мордовии в районах залегания рыхлых терригенных пород верхнего мела. В местах залегания нижнемеловых глин балки менее глубокие. В западной части региона, на террасах крупных рек Мокша, Алатырь, Сура, Сивинь распространены песчаные отложения (флювиогляциальные и древнеаллювиальные пески), в которых встречаются редкие и неглубокие балки.

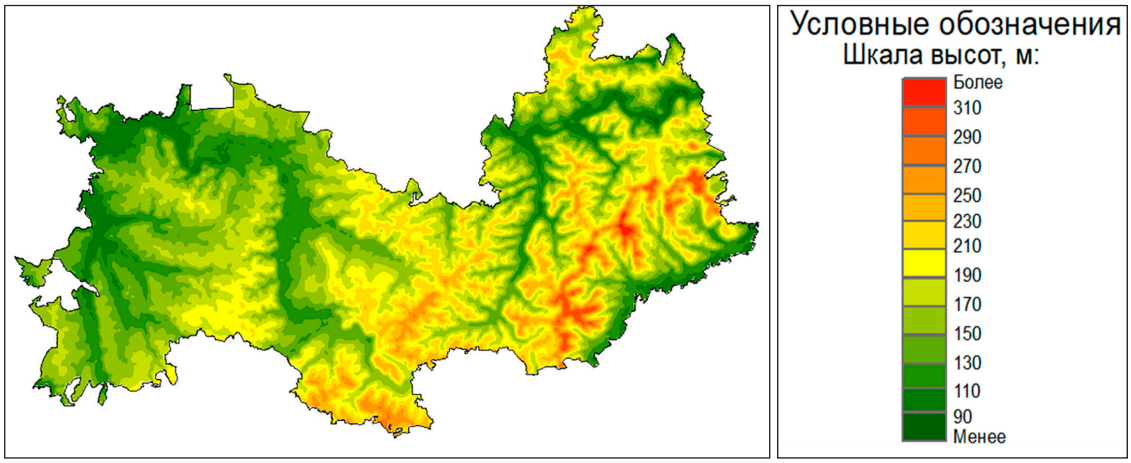


Рис. 1. ЦМР на территорию РМ

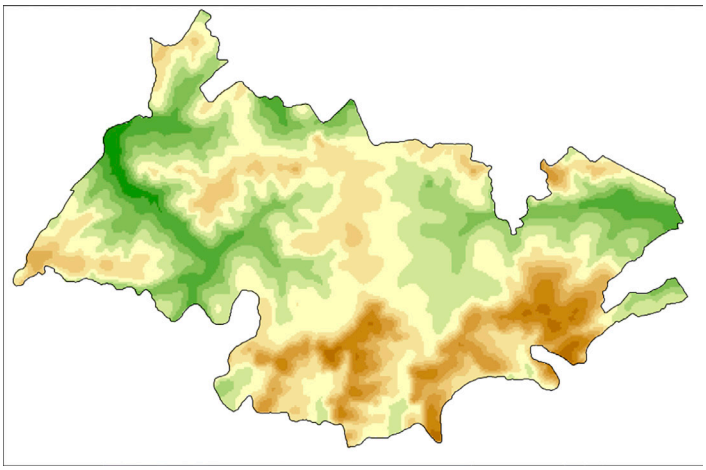


Рис. 2. ЦМР на территорию Атяшевского муниципального района РМ

Рис. 3. Модель потенциала развития эрозии на территорию Атяшевского муниципального района РМ

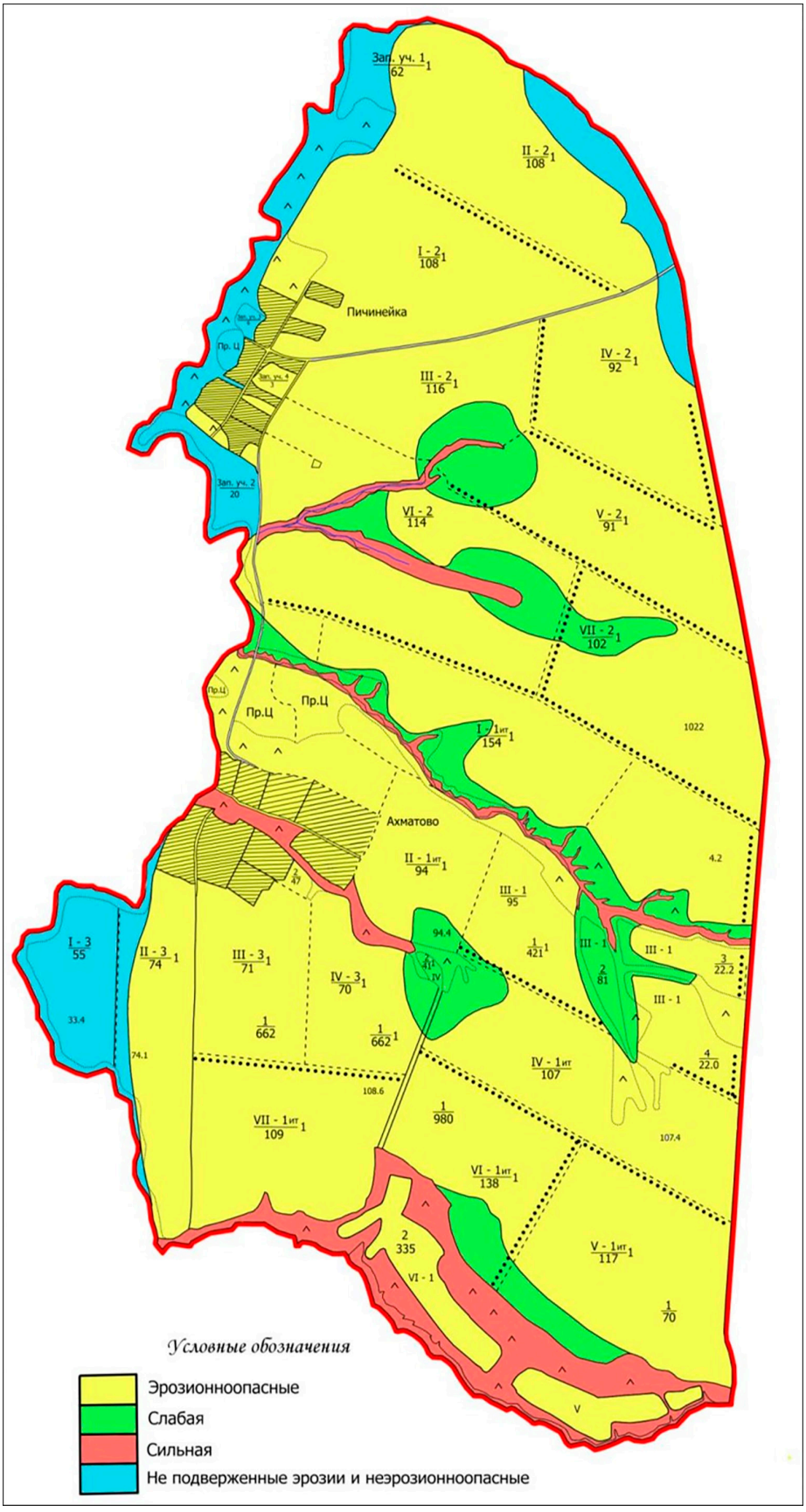


Рис. 4. Картограмма эродированности земель ОАО «Агрофирма "Искра"»

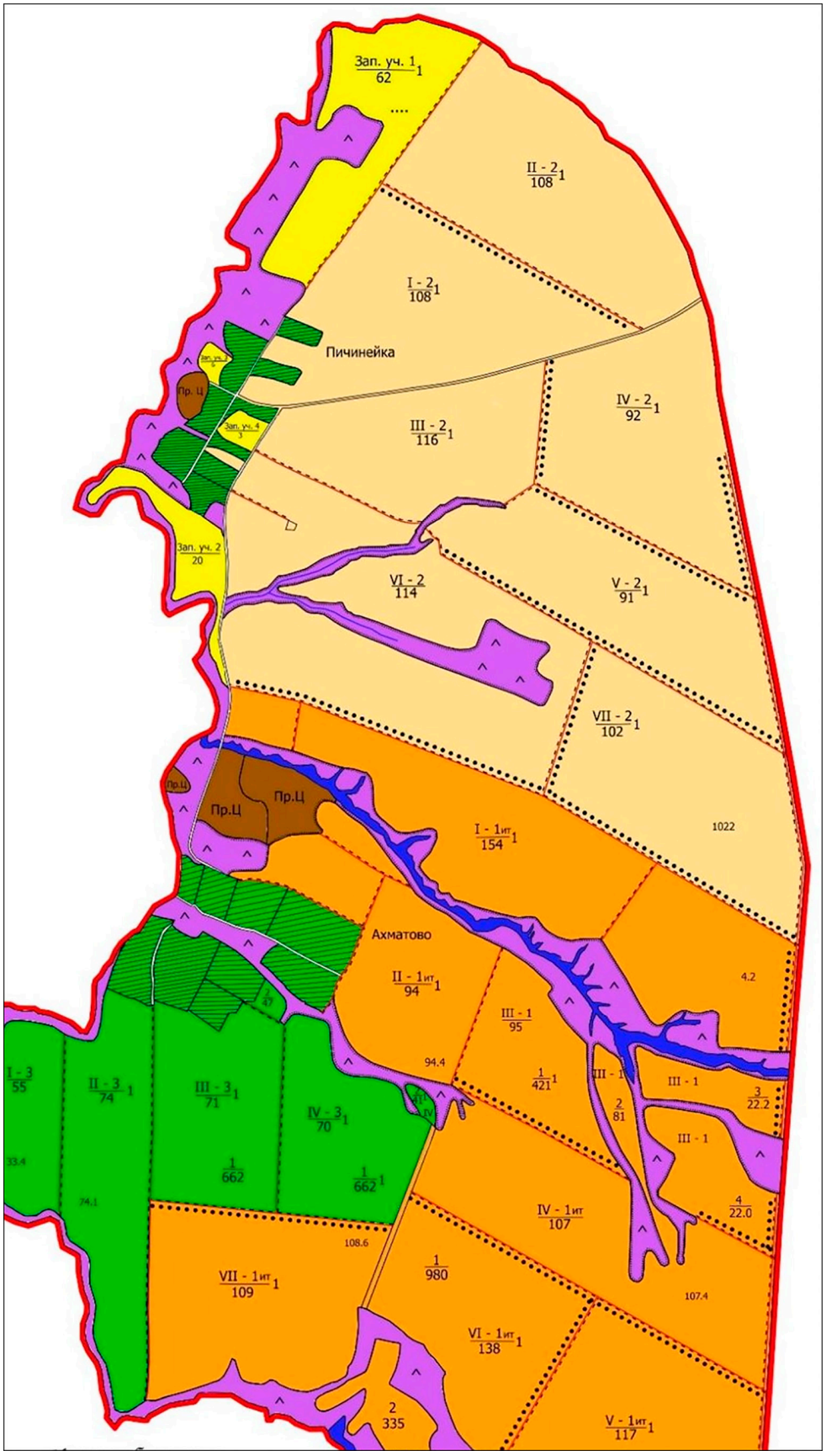


Рис. 5. Схема внутрихозяйственного землеустройства ОАО «Агрофирма “Искра”»

Различия в густоте овражной сети объясняются главным образом интенсивностью хозяйственной деятельности человека. Сведение лесов последние три столетия, распашка слабоустойчивых к процессам водной эрозии серых лесных почв привели к развитию плоскостного стока и оврагообразованию. В АЛ ВМР и ЭДР отмечены самые высокие показатели овражного расчленения, достигающие в отдельных бассейнах малых рек значений 1,5–2,5 км/км^2. В АЛ ЭДР наблюдается самая высокая корреляционная зависимость между густотой овражной и балочной сетью (коэффициент Пирсона более 0,9). В АЛ ВМР эта зависимость снижается. Наименьшие значения взаимозависимости между коэффициентами овражной и балочной сети отмечены в АЛ ВЛР (коэффициент Пирсона менее 0,4).

Самые высокие показатели вертикального и горизонтального расчленения рельефа отмечены в левобережье Штырмы (площадь бассейна 469 км^2), Мал. Сарки (322 км^2), Мал. Кши (265 км^2), в верховьях Пишли (133 км^2), Картлея (63,7 км^2), Потижа (221 км^2), Сеитьмы (451 км^2), Шадымки (143 км^2), Сезелки (159 км^2), Карная (375 км^2), Кандарши (54,7 км^2), Кури (75 км^2) , Гремячки (49,1 км^2), в бассейне Лаши (142 км^2), Чеберчинки (560 км^2), Промзы (127 км^2), Вежне (110 км^2), Инелея (69,7 км^2), Иссеры (81,7 км^2), руч. Аморда (10 км^2). Вертикальный врез в этих АЛ составляет более 100 м, в отдельных бассейнах он превышает 120 м.

На уровне Атяшевского муниципального района разработана модель потенциала развития эрозии на основе геоинформационной оценки рельефа (рис. 3).

Геоинформационный анализ рельефа показал, что наибольшая опасность проявления водно-эрозионных процессов отмечается на юге и юго-востоке муниципального района. На севере и северо-востоке района опасность развития эрозионных процессов низкая.

На уровне отдельного сельскохозяйственного предприятия созданы ЦМР, почвенная карта, картограмма эрозии почв (рис. 4), карты экспозиции склонов и уклонов поверхности. С учетом рельефа и качества почв выделены агропроизводственные группы земель. Разработаны комплекс противоэрозионных мероприятий и схема внутрихозяйственного землеустройства (рис. 5).

Заключение

Таким образом, в ходе исследования произведены оценка факторов рельефообразования и геоинформационный анализ рельефа Мордовии. Созданы ЦМР и производные от них картографические модели, отражающие особенности рельефа. Выявлены общие закономерности изменения вертикальной и горизонтальной расчлененности рельефа АЛ РМ. На основе полученных геоданных разработаны предложения по оптимизации использования земель АЛ РМ. Наиболее благоприятны для сельскохозяйственного использования под пашню придолинные АЛ ВМР и ЭДР. Пойменные АЛ наиболее рационально использовать под сенокосы и выращивание овощных культур. Под пастбища можно использовать земли овражно-балочного комплекса, земли с малопродуктивными почвами. В ходе исследования выявлены участки пашни АЛ, которые вследствие развития негативных экзогеодинамических процессов необходимо перевести под другие виды сельскохозяйственных угодий. Результаты геоинформационного анализа рельефа способствуют совершенствованию структуры АЛ и сельскохозяйственного землепользования в целом, сокращают затраты на проведение полевых почвенных обследований земель.

Список литературы

1. Маркова О.И., Тикунов В.С. Новые технологии для современной геоинформатики // ИнтерКарто. интерГИС. 2022. Т. 28, № 1. С. 5-34.

2. Багаевская В.В., Вершинин В.В., Мартынов Д.Ю. Цифровизация землеустройства на основе многофункциональной земельно-информационной системы и геоинформационных технологий: результаты инноваций и проблемы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1 (391). С. 4–7.

3. Антонов С.А., Перегудов С.В. Сравнение цифровых моделей рельефа // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 3. С. 65–86.

4. Лурье И.К., Лурье М.В. Моделирование 3-D-изменеий рельефа местности вследствие склоновой эрозии // Геодезия и картография. 2023. Т. 84, № 3. С. 35–42.

5. Ельшина Т.Е., Утробина Е.С., Сысоев А.В. Визуализация цифровой модели рельефа гор на веб-картах // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 1 С. 145–155.

6. Мелихова А.В. Геоинформационный анализ рельефа Астраханского Заволжья // Природные системы и ресурсы. 2023. Т. 13, № 1. С. 39–43.

7. Тесленок С.А., Манухов В.Ф., Тесленок К.С. Цифровое моделирование рельефа Республики Мордовия // Геодезия и картография. 2019. № 80 (7). С. 30-38.

8. Юферев В.Г., Мелихов А.В., Балынова В.В. Геоинформационный анализ рельефа Кумо-Манычской впадины // Природные системы и ресурсы. 2022. Т. 12, № 2. С. 67–76.

9. Пашков С.В., Мажитова Г.З. Применение ГИС-технологий и аэрофотосъемки для геоинформационного картографирования и моделирования рельефа агроландшафтов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 82–95.

10. ГОСТ 26640-85 (СТ СЭВ 4472-84) Земли. Термины и определения. [Электронный ресурс]. URL: https://internet-law.ru/stroyka/text/28900/ (дата обращения: 20.07.2024).

11. Пашков С.В., Мажитова Г.З., Тесленок С.А. Картографирование агроландшафтов колочной лесостепи на основе геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Земли // Географический вестник. 2021. № 1 (56). С. 162–172.

12. Барсукова Г.Н., Деревенец Д.К., Липилин Д.А., Антипцева Ю.О., Волкова Т.А. Учет природно-климатических, почвенных и экологических особенностей природных ландшафтов Краснодарского края при переходе к адаптивно-ландшафтной системе земледелия // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16, № 1. С. 44–52.

13. Трапезникова О.Н. Геоэкологическая концепция агроландшафта // Известия Русского географического общества. 2014. № 1. С. 73–85.

14. Волков С.Н., Папаскири Т.В., Черкашина Е.В., Дедова Э.Б., Краснянская Е.В. Планирование и проектирование агролесомелиоративных мероприятий в землеустроительной документации: монография / под ред. С.Н. Волкова. М.: ГУЗ, 2024. 320 с.

15. Масляев В.Н., Гунин А.А., Курочкин Д.В., Вавилин Д.А., Евсеев А.Д. Комплексная оценка агроландшафтов для оптимизации землепользования // Московский экономический журнал. 2024. № 3. С. 273–287.

16. Байчурин М.Р., Кустов М.В., Масляев В.Н., Тесленок С.А. Геоэкологическая типизация земель агроландшафтов Мордовии с использованием ГИС-технологий // Астраханский вестник экологического образования. 2022. № 1 (67). С. 4–14.

17. Зарубин О.А., Рычкова О.В., Агеева А.Р. Функциональное геоэкологическое зонирование метагеосистем региона (на примере Республики Мордовия) // Успехи современного естествознания. 2023. № 9. С. 28–34. DOI: 10.17513/use.38099.

СТАТЬИ

УДК 631.92:633
DOI 10.17513/use.38299

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Косарев А.В., Русинов А.В., Чумакова С.В., Колганов Д.А., Алексеев В.С., Моршнев А.Ю.

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов, e-mail: aleteia@inbox.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru, dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, morshnev199@mail.ru

Целью работы являлось изучение пространственного распределения объемной влажности поля методом дистанционного зондирования Земли. Материалом исследований явились спутниковые космоснимки Landsat_8_9, на основе которых были построены карты распределения вегетационных индексов, а также распределение объемной влажности поля. В качестве объекта исследования было выбрано поле вблизи пос. Степное левобережья Саратовской области. Обработка матрицы высот и картографирование полученного материала проводились с помощью кроссплатформенной программной системы QGIS. Были изучены особенности распределения нормализованного вегетационного индекса растительности, нормализованного разностного индекса, почвенно-скорректированного вегетационного индекса. Регрессионный анализ зависимости объемной влажности от величины нормализованного вегетационного индекса растительности позволил построить картограмму распределения влажности за период с 2022 по 2024 г. В 2022–2023 гг. нормализованный относительный индекс растительности показывал высокий уровень активности растительного покрова благодаря благоприятным погодным условиям, достаточным осадкам и питательным веществам в почве. В 2024 г. значения нормализованного вегетационного индекса растительности снизились до отрицательных, что связано с понижением среднесуточной температуры во время сева. Значения почвенно-скорректированного вегетационного индекса для Саратовского Заволжья за исследуемый период снижались за счет проводимых агротехнических мероприятий. Влажность почвы за наблюдаемый период имеет тенденцию к возрастанию.

Ключевые слова: вегетационные индексы, влажность почвы, поле, агротехника

DISTRIBUTION OF SOIL MOISTURE IN THE FIELD ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Kosarev A.V., Rusinov A.V., Chumakova S.V., Kolganov D.A., Alekseev V.S., Morshnev A.Yu.

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, e-mail: aleteia@inbox.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru, dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, morshnev199@mail.ru

The purpose of the work was to study the spatial distribution of the volumetric humidity of the field by remote sensing of the Earth. Materials and methods of research. The material of the research was satellite images of Landsat_8_9, on the basis of which maps of the distribution of vegetation indices, as well as the distribution of the volume moisture of the field, were constructed. The field near the village of Stepnoye on the left bank of the Saratov region was chosen as the object of the study. The elevation matrix was processed, and the resulting material was mapped using the cross-platform QGIS software system. Results and discussion. The features of the distribution of the normalized vegetation vegetation index, the normalized difference index, and the soil-adjusted vegetation index were studied. Regression analysis of the dependence of volume humidity on the value of the normalized vegetation vegetation index made it possible to build a cartogram of humidity distribution for the period from 2022 to 2024. In 2022-2023, the normalized relative vegetation index showed a high level of vegetation cover activity due to favorable weather conditions, sufficient precipitation and nutrients in the soil. The values of the normalized vegetation vegetation index decreased to negative in 2024, which is due to a decrease in the average daily temperature during sowing. The values of the soil-adjusted vegetation index for the Saratov Trans-Volga region for the period under study decreased due to the agrotechnical measures taken. Soil moisture for the observed period tends to increase.

Keywords: vegetation indices, soil moisture, field, agricultural technology

Введение

Обеспечение и контроль необходимого уровня влажности почвы, особенно на засушливых территориях, является в настоящее время одной из актуальных задач агротехники и агротехнологии. Контроль уровня влажности может осуществляться как *in situ*, с помощью датчиков, так и с помощью дистанционных технологий, к которым относятся дистанционные методы мониторинга агроэкосистем. Исследованию дистанционного зондирования Земли как способа

оценки влажности на основе моделей взаимодействия земной поверхности с атмосферой посвящено значительное количество работ [1]. С использованием различных методов дистанционного зондирования можно получить информацию о влажности поверхности земли в различных географических областях. Для измерения влажности почвы обычно применяют микроволновые радиометры, так как на частоте f = 1–2 ГГц имеется сильная связь между влажностью почвы на глубине 5 см и яркостной температурой. Также оценку влажности почвы можно провести с помощью дистанционного зондирования на видимом/инфракрасном спектре путем измерения вегетационного индекса NDVI на видимом/ближнем инфракрасном диапазоне и поверхностной температуры почвы (lst) в термальном диапазоне [2]. Известна бистатическая схема дистанционной оценки влажности с помощью измерения коэффициента отражения в свободном пространстве на фиксированном угле зондирования [3]. Данный метод позволяет оценивать влажность почвы в толщине до 5 см. Важной задачей при этом является обеспечение процедуры компенсации отражения сигнала от водяных паров атмосферы, которая может быть проведена на основе зависимости спектра отражения от влажности [4]. Гиперспектральные и мультиспектральные космоснимки, на основе которых производится оценка влажности полей, являются одним из важнейших источников данных в точном земледелии [5]. Предлагается способ определения влажности грунта через использование метода пространственной интерполяции известных данных, полученных из космических снимков [6]. Эти данные могут быть обработаны путем линейной корреляции спутниковых данных с наземными наблюдениями в отдельных точках с известными координатами. Микроволновой диапазон применяется не только для оценки уровня влажности почв, но и для отслеживания ее сезонной динамики [7]. Методы дистанционного зондирования, такие как тепловые, оптические, активные и пассивные микроволновые измерения, позволяют осуществлять точные исследования в области оценки влажности почвы и ее урожайности [8]. В течение последних нескольких десятилетий использование космического зондирования для измерения влажности почвы, включая зондирование в различных диапазонах электромагнитных волн, таких как видимый свет, инфракрасный свет, тепловое излучение, микроволны и другие, стало все более популярным [9]. Отмечается вклад почвенного органического углерода в формирование влажности почвы и проводится коррекция спектрального отклика в гиперспектральном дистанционном зондировании почвенной влаги [10]. Известен метод дистанционной оценки влажности почвы, как DL-MME, сочетающий технологию синтетической апертуры, использующей радиолокационные сигналы (SAR) и оптические методы, реализованные на базе Sentinel_1 и Sentinel_2. Его преимуществами перед имеющимися являются устойчивость к выбору модели и устойчивость к калибровке модели в течение вегетационного периода [11]. Получение точной информации о содержании органических веществ в почве становится все важнее из-за изменений окружающей среды. Модель нового байесовского подхода к выводу, называемого интегрированной вложенной аппроксимацией Лапласа со стохастическим дифференциальным уравнением в частных производных (INLA-SPDE), может использоваться для картирования почвы, основанного на индексах влажности почвы и вегетационных индексах [12]. Дистанционное зондирование помогает получить данные об индексах влажности почвы. В исследовании показано, что использование INLA-SPDE с индексами влажности почвы и переменными FTD обеспечивает более точное картографирование почвы, чем случайный лес. В результате точность картографирования повысилась на 25% с использованием оптимальной комбинации ковариант [13].

Таким образом, сочетание данных из микроволновых радиометров, видимого/инфракрасного спектра и термального диапазона позволяет получить полную картину влажности почвы в определенной географической области. Эти методы дистанционного зондирования являются эффективными инструментами для мониторинга влажности почвы на больших территориях, таких как сельскохозяйственные угодья или лесные массивы. Кроме того, данные о влажности почвы, полученные с помощью дистанционного зондирования, могут быть использованы для прогнозирования урожайности и оптимизации земледелия. Анализ изменений влажности почвы в течение времени позволяет выявить тенденции и понять динамику ее изменений в различных климатических условиях. Важно отметить, что применение методов дистанционного зондирования для измерения влажности по-

чвы требует высокой точности калибровки и валидации данных, чтобы обеспечить достоверность результатов. Также необходимо учитывать различные факторы, такие как тип почвы, рельеф местности и климатические условия, которые могут повлиять на интерпретацию полученных данных.

В целом использование различных методов дистанционного зондирования для оценки влажности почвы поможет в улучшении понимания процессов, происходящих на поверхности земли, и способствует развитию современных методов агрономии и экологии.

Цель исследования – изучение пространственного распределения объемной влажности поля методом дистанционного зондирования Земли. Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

а) измерены значения влажности почвы в отдельных точках поля;

б) изучено распределение нормализованного вегетационного индекса растительности (NDVI), нормализованного разностного индекса (NDMI), почвенно-скорректированного вегетационного индекса (SAVI) на территории поля;

в) построена картограмма распределения влажности на территории поля.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись каштановые почвы поля в окрестностях пос. Степное, расположенного в левобережье Саратовской области. Данные о влажности почвы и о значениях вегетационных индексов относились к 2022–2024 гг. Измерение влажности почвы в отдельных точках поля осуществлялось с помощью емкостного датчика CAPACITIVE Soil Moisture Sensor v1.2. Принцип действия датчика следующий. При изменении влажности почвы изменяется его емкостная проводимость. В зависимости от влажности среды, в которую погружены зонды датчика, выходное напряжение всегда будет изменяться в диапазоне от 1,36 (для почвы с влажностью 100%) до 2,75 V (для почвы с влажностью 0%). Потребляемый ток при этом будет всегда равен значению 5 mA. Данные передаются со всех датчиков на станцию, где подвергаются автоматизированной обработке.

В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования авторами применялись мультиканальные снимки, полученные спутником Landsat 8. Обработка данных SRTM и картографирование полученного материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0). При этом выбрана географическая система координат WGS 84 EPSG 4326. Статистическая обработка полученных данных реализована в программном комплексе Statistica (версия 10). Для интерпретации полученных данных применялся метод одноканального псевдоцветного изображения [14].

Стандартизованный индекс различий увлажненности (NDMI) характеризует уровень влажности в растительности и применяется для оценки аридности и почвенного газообмена. Он определяется в соответствии с формулой

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}, \quad (1)$$

где NIR и SWIR – показатели эффективности отражения в ближнем и коротковолновом инфракрасном спектральных каналах соответственно в мультиканальном снимке.

Нормализованный относительный индекс растительности NDVI определяется в соответствии с формулой

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2)$$

где NIR и RED – соответственно показатели эффективности отражения в ближнем и красном каналах в мультиканальном снимке.

Почвенный вегетационный индекс определяется в соответствии с формулой

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \cdot (1 + L), \quad (3)$$

где L – коэффициент облиственния, L = [0;1], L = 0 для наибольшего индекса облиственния, L = 1 для наименьшего, авторами применялось оптимальное значение L = 0,5. Данный индекс позволяет минимизировать влияние яркости почвы на отражательную способность растений [15].

Результаты исследования и их обсуждение

В 2022–2023 гг. значения индекса NDVI свидетельствовали о достаточно высокой активности растительности в окрестностях поселка. Это может быть связано с благоприятными погодными условиями, достаточным количеством осадков и питательных веществ в почве.

Однако в 2024 г. ситуация с индексом NDVI изменилась. Значения индекса снизились до отрицательных значений, что указывает на ухудшение условий для рас-

тительности. По всей видимости, сказался фактор понижения температуры, из-за которого пришлось перенести посевные мероприятия.

Такие изменения в значениях индекса NDVI важно отслеживать и анализировать, так как они могут давать ценную информацию о состоянии экосистемы и ее устойчивости к изменениям в окружающей среде. На основе этих данных можно принимать решения о необходимости охраны природы, устойчивого использования ресурсов и принятия мер для сохранения биоразнообразия (рис. 1).

Значения индекса NDMI находились в диапазонах: 0,007–0,391 – для 2022 г., (-0,189) – 0,364 – для 2023 г., (-0,233–0,419) – для 2024 г. (рис. 2). Поведение индексов NDMI и вегетационных индексов можно объяснить через особенности физиологических процессов в растениях. Недостаток влаги приводит к снижению гидратации тканей, что неблагоприятно сказывается на показателях NDMI. В то же время индекс вегетации снижается менее значительно, так как растущие растения продолжают фотосинтез и сохраняют свою зеленую массу. Весенние месяцы, начало основного вегетационного периода озимой пшеницы, также сопровождаются заметными изменениями параметров NDMI и вегетационных индексов. Весенние засухи или нехватка осадков в первую очередь отражаются в индексе влажности NDMI, так как растения испытывают водный стресс и их способность к транспирации снижается.

Вегетационные индексы на начальном этапе остаются высокими, поскольку растения продолжают активно развиваться при наличии определенных запасов влаги в почве. Однако продолжительный недостаток влаги, типичный для засушливого Поволжья, приводит к снижению и вегетационных индексов, так как растения начинают терять зеленую массу, замедляя фотосинтез и другие метаболические процессы. Важным аспектом становится мониторинг параметров почвенной влаги и погодных условий, чтобы при необходимости проводить корректирующие агротехнические мероприятия, такие как орошение или внесение мульчи для сохранения влаги в почве.

Анализ временных рядов индексов NDMI и вегетационных индексов позволяет отслеживать текущее состояние посевов и прогнозировать возможные риски снижения урожайности. Современные методы дистанционного зондирования и анализа больших данных обеспечивают более точное и своевременное принятие агротехнических решений, направленных на минимизацию негативных последствий дефицита влаги для сельскохозяйственных культур. Значения почвенно-скорректированного вегетационного индекса (SAVI) находились в диапазонах: 0,414–0,966 – для 2022 г., 0,119–0,964 – для 2023 г. (рис. 3).

Эти значения указывают на достаточное удержание влаги в почве для поддержания роста растительности. В 2024 г. значения SAVI резко упали до диапазона от -4.647 до -0.213 (рис. 3). Эти отрицательные значения индекса указывают на критическую ситуацию с растительностью и почвенной влагой.

Также этот факт может объясняться понижением среднесуточной температуры в начале июня. Такой диапазон значений может указывать на деградацию почв и снижение способности растительности удерживать влагу.

Синхронизация наблюдений за индексом SAVI с метеорологическими данными и информацией о состоянии водных ресурсов может дать более точное понимание причин изменений в состоянии растительности. Дополнительный анализ может также включать изучение различных агротехнических методов и их влияния на уровень влажности почвы. Эти меры могут помочь не только в идентификации причин изменений, но и в разработке стратегий для улучшения условий для растительности в будущем.

В конечном итоге регулярный мониторинг индекса SAVI и других связанных параметров играет важную роль в управлении земельными ресурсами и обеспечении устойчивого развития экосистем. В условиях изменения климата и непредсказуемых погодных условий важно применять комплексный подход для поддержания здорового состояния почвы и растительности, что, в свою очередь, способствует более стабильной экосистеме и снижает негативное воздействие на сельское хозяйство и общую экологическую ситуацию в регионе.

С помощью датчика влажности почвы CAPACITIVE Soil Moisture Sensor v1.2 были произведены замеры влажности почвы в шести точках поля, расстояние между которыми было 150–400 м. На основе этих данных было получено регрессионное соотношение между влажностью почвы h (об.%) и индексом NDVI:

$$h = 45,261e^{1,4485\times NDVI}. \quad (4)$$

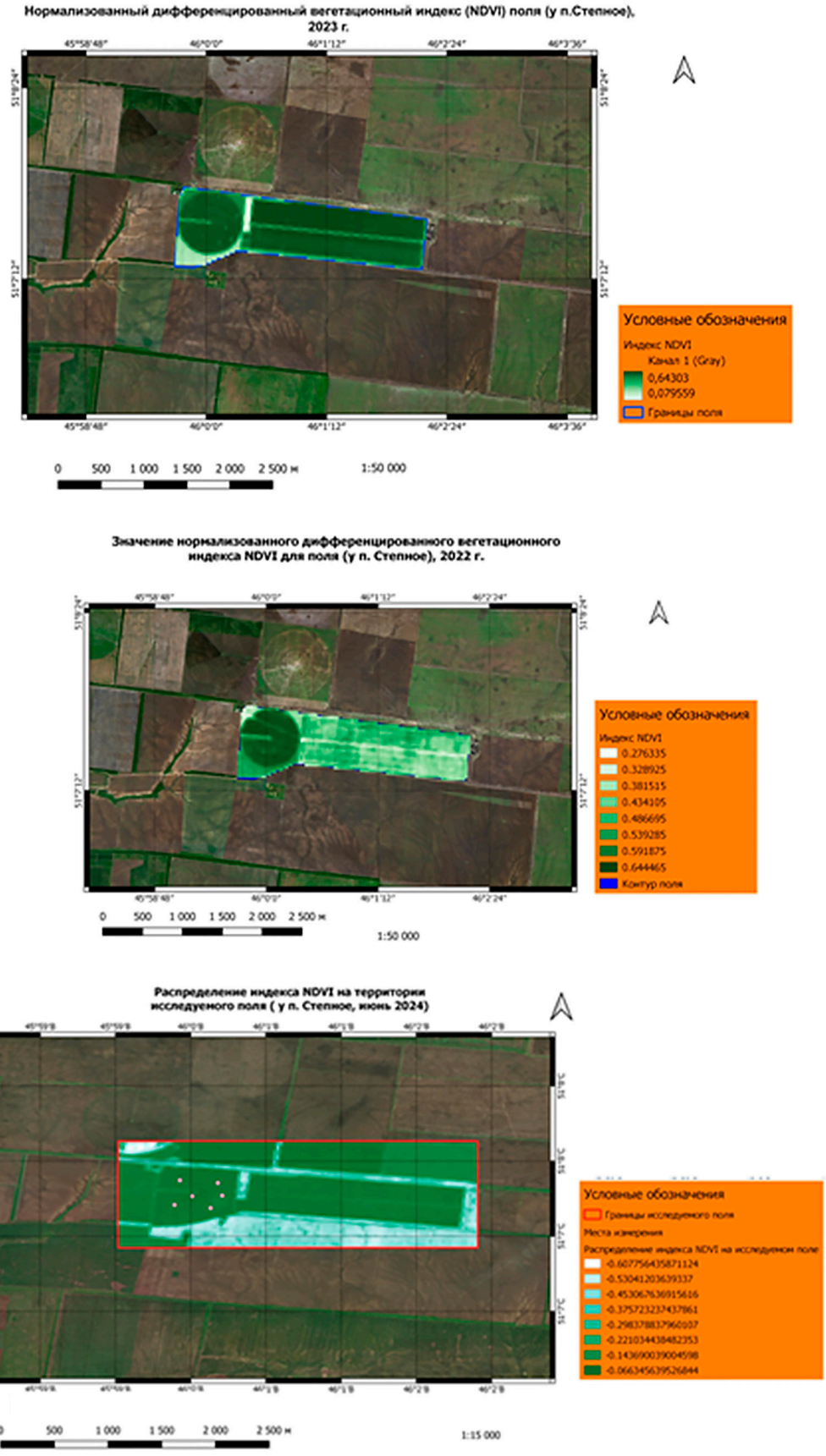


Рис. 1. Распределение индекса NDVI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

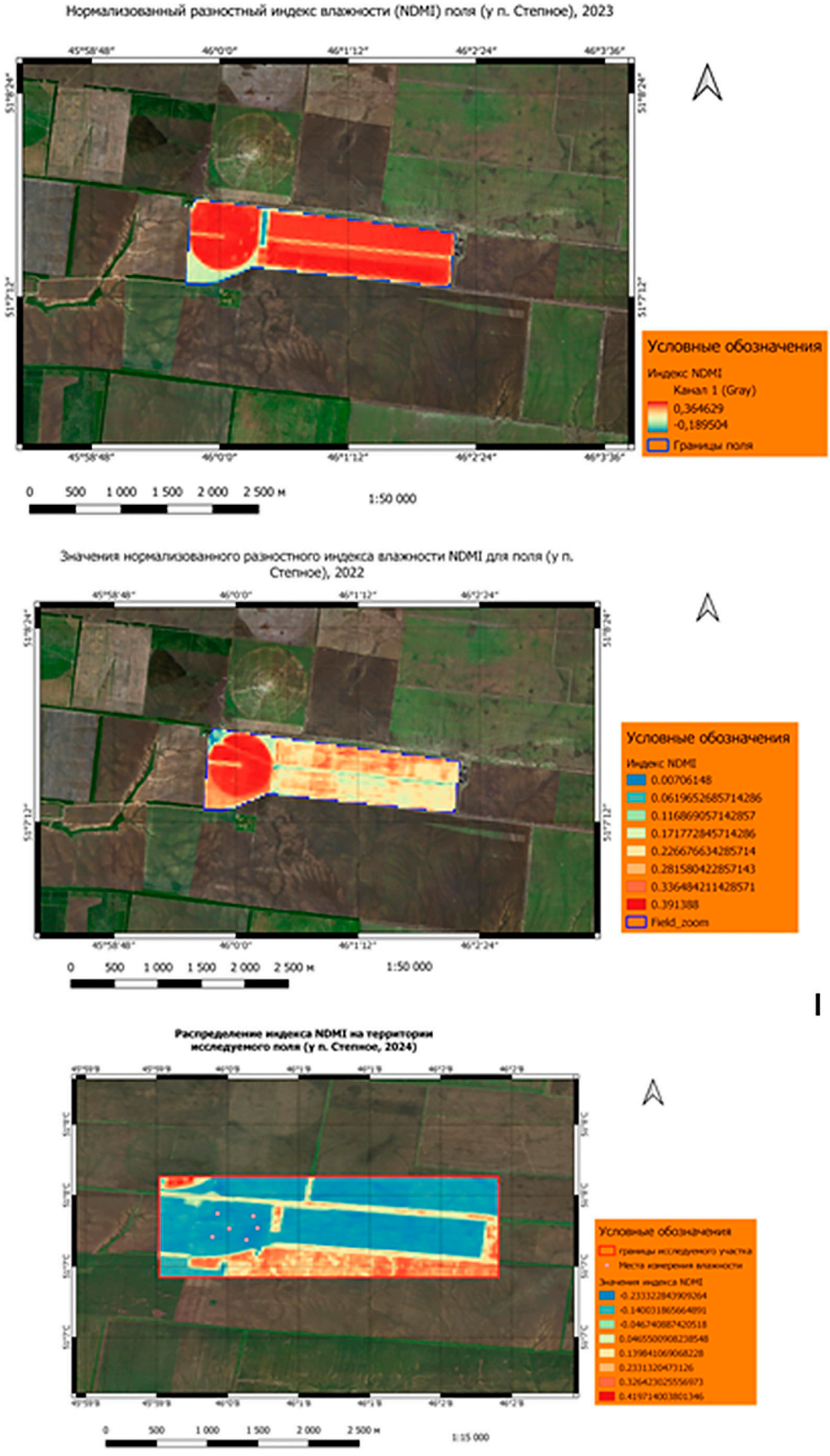


Рис. 2. Распределение индекса NDMI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

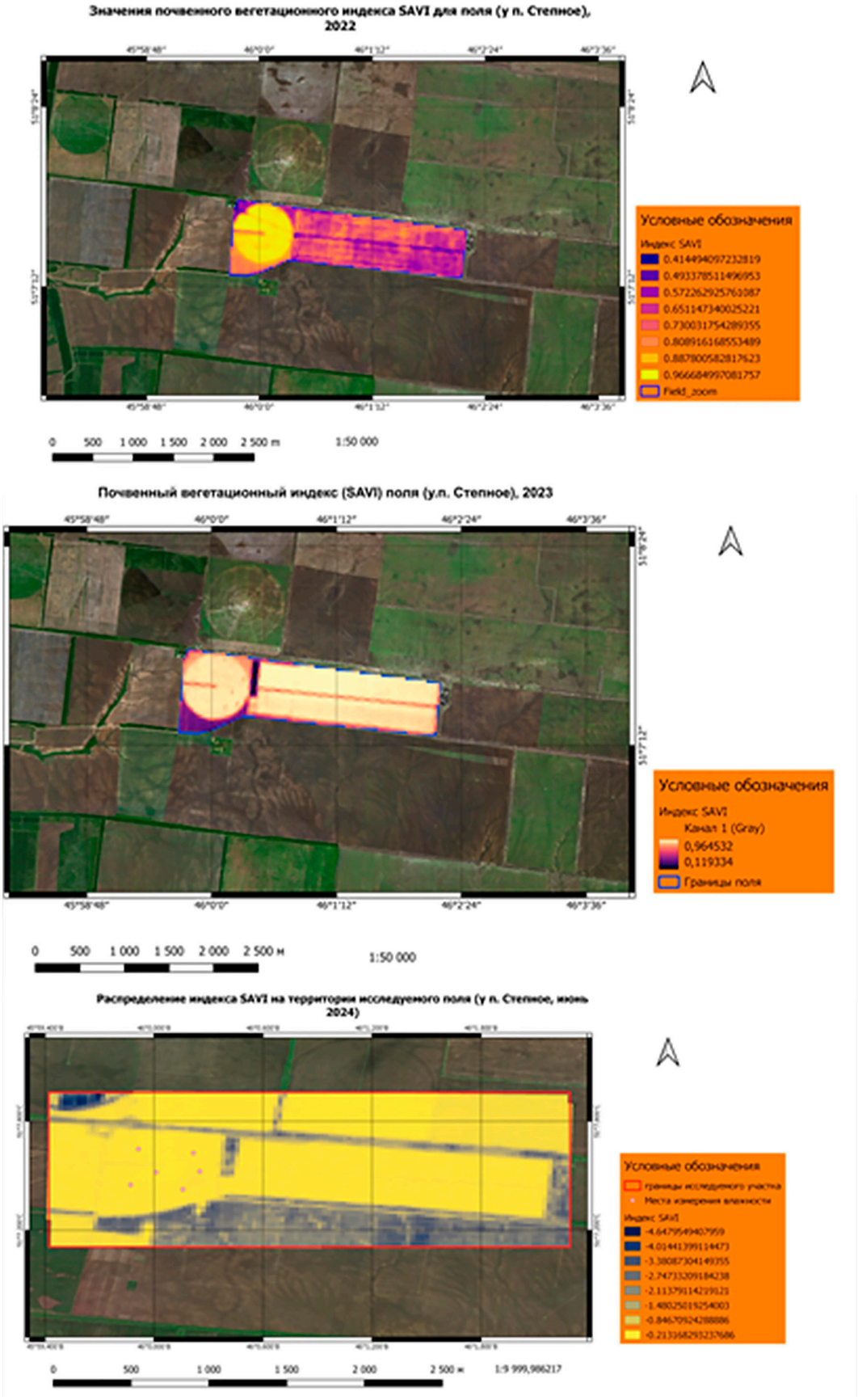


Рис. 3. Распределение индекса SAVI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

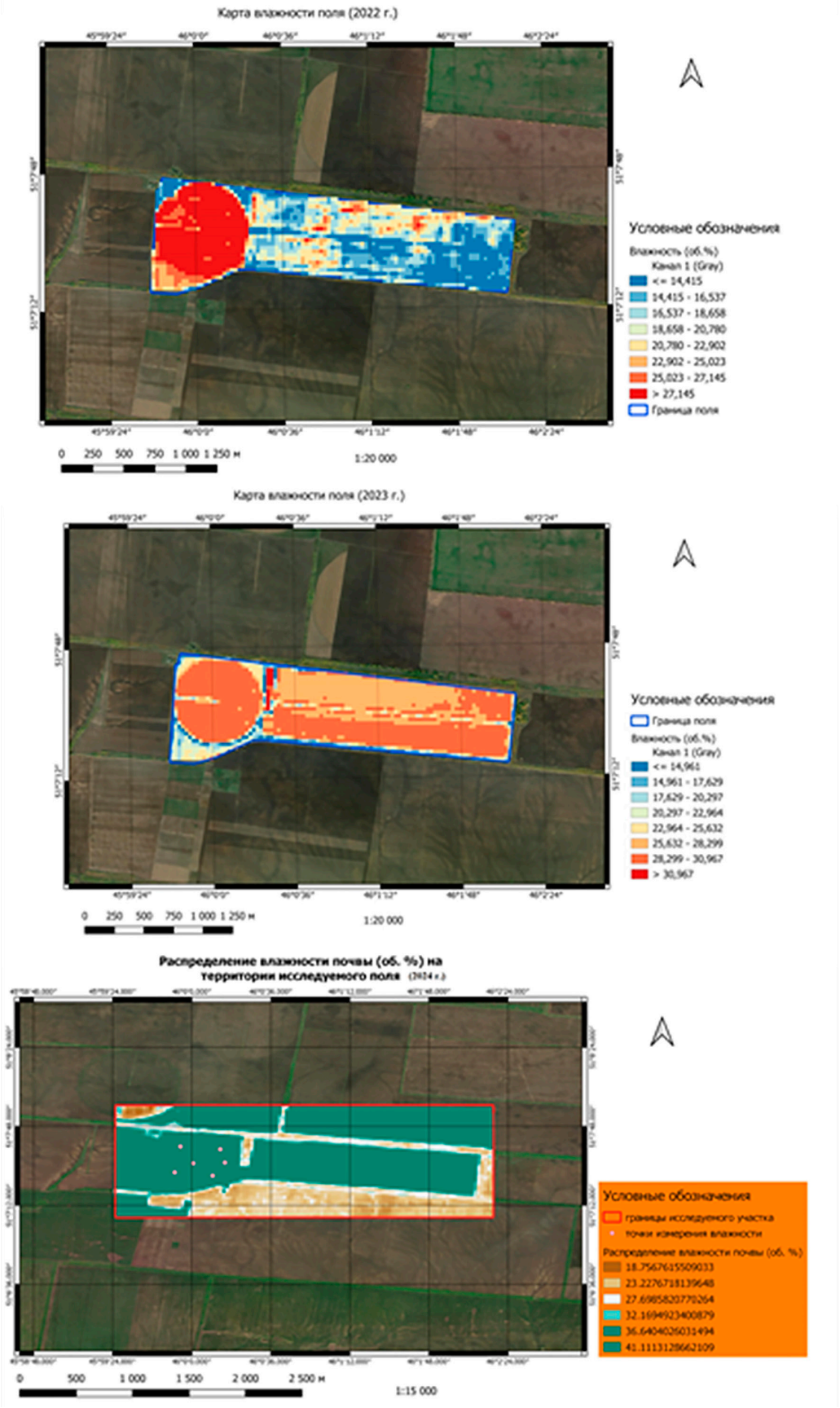


Рис. 4. Распределение влажности почвы (об.%) по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

На его основе методом растровой алгебры рассчитан растр распределения влажности почвы по территории поля (рис. 4).

Результаты исследования, основанные на методах растровой алгебры, также указывают на значительное повышение уровня влажности почвы на протяжении наблюдаемых лет. В 2022 г. значения остановились в диапазоне 14,41–22,00 %, в 2023 г. диапазон увеличился до 14,96–30,00 %, а к 2024 г. достиг отметки 36,62–41,11 %. Таким образом, можно утверждать, что проводимые мероприятия по управлению водными ресурсами обеспечили существенное улучшение условий для роста растений, что, в свою очередь, может способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур на этом участке. Данная тенденция возрастания влажности почвы на территории поля свидетельствует о позитивном воздействии гидромелиоративных мероприятий, таких как создание систем капельного орошения, прокладка оросительных каналов и установка водозаборов. Эти меры способствуют равномерному распределению влаги по всей площади поля, что критически важно в условиях засушливого климата. Особенно заметным становится увеличение влажности в зоне, прилегающей к окружности, что можно объяснить концентрированным подведением воды в данное местоположение. Кроме того, полученные данные позволяют рассматривать данное поле как потенциальный пример для внедрения аналогичных гидромелиоративных технологий на других территориях с похожими климатическими условиями. Интенсивное увеличение показателей влажности почвы говорит о высокой эффективности применяемых методов.

Более высокое увлажнение почвы, особенно в периферийной зоне окружности, может также способствовать созданию микроклимата, способствующего более равномерному распределению влаги и предотвращению ее чрезмерной потери через испарение.

Следует отметить, что проводимые действия по улучшению водного баланса на поле не только поддерживают устойчивое аграрное производство, но и создают предпосылки для более продуманного и эффективного использования водных ресурсов. Успешное внедрение данных технологий фиксирует положительный опыт, который может быть использован в других агроклиматических зонах, испытывающих дефицит влаги. Важность продолжения аналитики и мониторинга изменений влажности почвы на таких объектах играет ключевую роль в стратегическом управлении водными ресурсами на региональном уровне.

Выводы

1. В 2022–2023 гг. индекс NDVI показывал высокую активность растительного покрова, что связано с хорошими погодными условиями, достаточным количеством осадков и питательных веществ в почве. Растения были зелеными и густыми, указывая на хорошую урожайность и разнообразие видов. Однако в 2024 г. значения NDVI снизились до отрицательных, что сигнализирует об ухудшении условий для растительности. Это может быть следствием понижения среднесуточной температуры, совпавшего с началом сева.

2. В 2022–2024 гг. значения индекса NDMI варьировались следующим образом: 0,007–0,391 в 2022 г., (-0,189)–0,364 в 2023 г. и (-0,233)–0,419 в 2024 г. Колебания NDMI и вегетационных индексов объясняются физиологическими процессами в растениях. Недостаток влаги снижает гидратацию тканей и влияет на NDMI сильнее, чем на вегетационные индексы, все еще идет фотосинтез.

3. Значения SAVI для Саратовского Заволжья в разные годы следующие: 2022 г. – 0,414–0,966, 2023 г. – 0,119–0,964, 2024 г. – (-4,647)–(-0,213). В Саратовском Заволжье повышенный SAVI может указывать на сложные условия для растительности, вызванные аридизацией климата.

4. В 2022–2024 гг. значения индекса NDMI варьировались следующим образом: 0,007–0,391 в 2022 г., (-0,189)–0,364 в 2023 г. и (-0,233)–0,419 в 2024 г. Колебания NDMI и вегетационных индексов объясняются физиологическими процессами в растениях. Недостаток влаги снижает гидратацию тканей и влияет на NDMI сильнее, чем на вегетационные индексы, так как все еще идет фотосинтез.

5. Значения SAVI для Саратовского Заволжья в разные годы следующие: 2022 г. – 0,414–0,966, 2023 г. – 0,119–0,964, 2024 г. – (-4,647)–(-0,213). В Саратовском Заволжье повышенный SAVI может указывать на сложные условия для растительности, вызванные аридизацией климата.

6. Результаты исследования на основе метода растровой алгебры показывают увеличение влажности почвы за наблюдаемые годы. В 2022 г. значения влажности находились в пределах 14,41–22,00 %, в 2023 г. – 14,96–30,00 %, а в 2024 г. достигли 36,62–

41,11 %. Это указывает на позитивное влияние мероприятий по управлению водными ресурсами, таких как капельное орошение, оросительные каналы и водозаборы, обеспечивающие равномерное распределение влаги на поле. Особенно заметно увеличение влажности в периферийной зоне, что связано с концентрированным подведением воды.

Таким образом, дальнейшие исследования в этом направлении важны и актуальны. Комплексное использование данных, таких как индекс SAVI наряду с другими показателями, позволит точнее выявлять проблемы и находить оптимальные решения, направленные на долгосрочное улучшение экологических и сельскохозяйственных условий в регионе.

Список литературы

1. Музылев Е.Л. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов участков суши: обзор публикаций // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 5. С. 561–584.

2. Данзиев Р.М., Литвинов Н.Ю. Анализ неопределенности дистанционных оценок влажности почвы с целью достоверного предсказания наводнений // Геодезия и картография. 2017. Т. 78, № 11. С. 60–64.

3. Музалевский К.В. Дистанционное измерение влажности в поверхностном слое минеральной почвы на двух частотах // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 1. С. 1–23. [Электронный ресурс]. URL: http://jre.cplire.ru/jre/jan20/7/text.pdf (дата обращения: 20.06.2024). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.1.7

4. Искендерзаде Э.Б., Асадов Х.Г., Алиева А.Д., Литвинов Н.Ю. Спектральный метод определения содержания влаги в почве // Геодезия и картография. 2022. Т. 83, № 8. С. 33–38.

5. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Прудкий А.С., Кожаев Ю.П., Феоктистова В.М. Использование дистанционного зондирования при мониторинге полей в точном земледелии // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 8. С. 485–492.

6. Даргейко Л.Ф., Сахацкий А.И., Федоровский А.Д. Оценка влажности почвы по космическим снимкам дистанционного зондирования Земли на основе метода пространственной интерполяции Колмогорова // Геоинформатика. 2008. № 4. С. 49–51.

7. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Дымбрылов Ж.Б., Чимитдоржиев Т.Н. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.

8. Akash M., Kumar P.M., Bhaskar P., Deepthi P.R., Sukhdev A. Review of estimation of soil moisture using active microwave remote sensing technique // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2024. Vol. 33. P. 101–118. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101118.

9. Mohanty B.P., Mishra D., Sehgal V. Soil Moisture Remote Sensing: Satellite Retrieval, Geophysical Controls, and Applications // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-96026-7.00033-3.

10. Jiang R., Sui Y., Zhang X., Lin N., Zheng X., Li B., Zhang L., Li X., Yu H.Estimation of soil organic carbon by combining hyperspectral and radar remote sensing to reduce coupling effects of soil surface moisture and roughness // Geoderma. 2024. Vol. 444. № 116874. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116874.

11. Sedighi A., Hamzeh S., Alavipanah S.K., Naseri A.A., Atkinson P.M. Ensembles of multiple models for soil moisture retrieval from remote sensing data over agricultural areas: A deep learning-based framework // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2024. Vol. 35. № 101243. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101243.

12. Huang J., Malone B.P., Minasny B., McBratney A.B., Triantafilis J. Evaluating a Bayesian modelling approach (INLA-SPDE) for environmental mapping // Science of the Total Environment. 2017. № 609. P. 621–632.

13. Yang Ch., Yang L., Zhang L., Zhou Ch. Soil organic matter mapping using INLA-SPDE with remote sensing based soil moisture indices and Fourier transforms decomposed variables // Geoderma. 2023. Vol. 43. № 116571. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116571.

14. Буйлов В.Н., Косарев А.В., Чумакова С.В., Мавзовин В.С. Исследование влияния физико-климатических факторов Саратовской области на урожайность сои методом дистанционного зондирования Земли // Успехи современного естествознания. 2023. № 4. С. 7–14. DOI: 10.17513/use.38017.

15. Badrul H.N.H., Hashim N., Saraf N.M., Talib N. Monitoring of rice growth phases using multi-temporal Sentinel-2 satellite image // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Т. 1051, № 1. 012021.

УДК 556.555.7
DOI 10.17513/use.38300

ВНУТРИСУТОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Синцова Т.Н., Опутин М.А.

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Цель исследования – оценка колебаний изменчивости показателей качества воды и ее химического состава, имеющая принципиальное значение для решения широкого круга задач, связанных с охраной природы и ее рациональным использованием. При этом, как правило, рассматриваются и анализируются сезонные, месячные колебания. Это было связано, в первую очередь, с особенностями действующей системы мониторинга. Переход на автоматизированные системы измерений дает возможность исследовать и анализировать значительно более короткопериодные процессы, такие как межсуточные и внутрисуточные колебания. В настоящее время эти колебания показателей качества воды в водохранилищах являются недостаточно исследованным явлением, хотя они играют важную роль как в формировании потребительских свойств воды, так и в обеспечении экологической безопасности водных объектов. В первую очередь, данные колебания особенно актуальны для водных объектов, расположенных в зонах активного техногенеза, являющихся важнейшими источниками водоснабжения крупнейших промышленных комплексов. В статье рассматриваются процессы, фиксируемые на участке Камского водохранилища, непосредственно прилегающем к Камской ГЭС. На данном участке качество забираемой воды в зимний период характеризуется ярко выраженными межсуточными и внутрисуточными колебаниями, обусловливаемыми значительными изменениями расходов сброса воды в нижнем бьефе.

Ключевые слова: водохранилища, колебания, качество воды, водоснабжение, вертикальная стратификация

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

INTRADAY FLUCTUATIONS IN THE WATER QUALITY ON THE KAMSKY RESERVOIR

Sintsova T.N., Oputin M.A.

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

The aim of the study is to assess the fluctuations in the variability of their chemical composition indicators, which is of fundamental importance for solving a wide range of problems related to their protection and rational use. In this case, as a rule, seasonal and monthly fluctuations are considered and analyzed. This was due, first of all, to the features of the current monitoring system. The transition to automated measurement systems makes it possible to study and analyze much shorter-period processes, such as inter- and intra-day fluctuations. Currently, these fluctuations in water quality indicators in reservoirs are an insufficiently studied phenomenon, although they play an important role both in shaping the consumer properties of water and ensuring the environmental safety of water bodies. First of all, these fluctuations are especially relevant for water bodies located in zones of active technogenesis, which are the most important sources of water supply for the largest industrial complexes. The article discusses the processes recorded in the section of the Kama Reservoir, directly adjacent to the Kama Hydroelectric Power Station. In this area, the quality of withdrawn water in winter is characterized by pronounced inter- and intra-day fluctuations, caused by significant changes in water discharge rates in the downstream.

Keywords: reservoirs, fluctuations, water quality, water supply, vertical stratification

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (registration number R&D: 124020500053-6).

Введение

Колебания качества воды в водохранилищах представляют значительный как практический, так и теоретический интерес. При этом традиционно основное внимание уделяется сезонным, а также междугодовым колебаниям [1]. Однако в последние годы в связи с совершенствованием систем наблюдений значительное внимание стало уделяться более короткопериодным, в том числе и внутрисуточным, колебаниям [2-4].

Внутрисуточные колебания играют принципиально важную роль в обеспечении устойчивости функционирования систем как питьевого, так и промышленного водопользования [5, 6]. В силу своего генезиса они достаточно локальны, в то же время они, в отличие от более быстропротекающих процессов, не могут быть устранены путем создания некоторых усреднительных емкостей.

Кратковременность рассматриваемых процессов делает практически невозмож-

ным их исследование с использованием традиционных схем оценки измеряемых поллютантов в воде, с применением традиционных химических методов определения. Необходим переход на физические способы измерений. В настоящее время эти схемы измерений очень активно разрабатываются. Весьма эффективным способом измерений содержания лимитирующих показателей качества воды является измерение удельной электропроводности воды. Данный показатель, с одной стороны, очень тесно связан с макрокомпонентным составом воды, с другой стороны, современные технологии позволяют его очень удобно определять в автоматическом режиме.

Естественно, для практического применения необходимы построение и оценка соответствующих регрессионных зависимостей между содержанием лимитирующего показателя качества воды и удельной электропроводностью. Как правило, эти зависимости при условии температурной компенсации характеризуются высокой надежностью.

Погрешность данного соотношения определяется, в первую очередь, стабильностью их относительных концентраций в формировании суммарной минерализации воды. Существенный интерес представляет оценка возможной погрешности. Так как метрологическая погрешность измерения удельной электропроводности воды весьма мала и ее относительная величина составляет σ ~ 0,01, то основные неопределенности формируются непостоянным параметром изменчивости $P_i = C_i / M$, где C_i – содержание *i*-ингредиента; M – минерализация воды. В общем случае при достаточно полном учете всех значимых макрокомпонентов имеем

$$\sum_{i=1}^{N} P_i = 0,$$

где N – общее количество рассматриваемых ингредиентов.

В этом случае средняя квадратическая погрешность соотношения должна составлять:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N}\left(Cv_{Pi}^2 \cdot \sum_{j=1}^{N}\left(1 - R_{ij}^2\right)\right).$$

Нетрудно видеть, что соотношение (1) будет минимально, если при $\max P_i\, Cv_{Pi} \to 0$, а $R_{ij} \to 1$.

Однако высокая связность между величиной удельной электропроводности и содержанием конкретного ингредиента является подтверждением высокой устойчивости, стабильности химического состава $Cv_{ji} \to 0$.

При анализе рассматриваемых колебаний ключевой является проблема установления механизмов, обусловливающих наличие таких достаточно быстро протекающих колебаний химического состава воды, так как гидрологические процессы, тем более в зимний период, характеризуются значительной инерционностью.

В зонах активного техногенеза наиболее естественно связывать подобные кратковременные процессы, в первую очередь, с несанкционированным, недекларируемым отведением сточных вод при различных аварийных и нештатных ситуациях.

Однако данные явления, как правило, носят нерегулярный характер, при этом современные технологии позволяют достаточно эффективно вычленять, идентифицировать возможные несанкционированные воздействия на водные объекты. Поэтому значительно больший интерес представляет установление связей этих колебаний с внутриводоемными процессами.

Так как данные колебания наблюдаются в водных объектах только при формировании в них устойчивой стратификации водных масс с отчетливо выраженной границей раздела сред, при этом представляется вполне естественным связать эти колебания качества воды с факторами, влияющими на положение границы раздела этих сред.

Цель исследования состоит в анализе особенностей формирования внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище.

Материал и методы исследования

Основной водозабор питьевой воды г. Перми – ЧОС – расположен непосредственно ниже зоны слияния рек Сылва и Чусовая, находящихся в подпоре от плотины Камской ГЭС (рис. 1). В ранее проведенных исследованиях была выявлена [7-9] характерная особенность данного района водохранилища – водные массы в зимний период характеризуются значительной вертикальной неоднородностью. В придонных горизонтах транспортируются более плотные воды, характеризующиеся повышенной жесткостью воды р. Сылва, достигающей 13–14 единиц, а в приповерхностных горизонтах – менее плотные воды р. Чусовой с меньшей жесткостью воды [10].

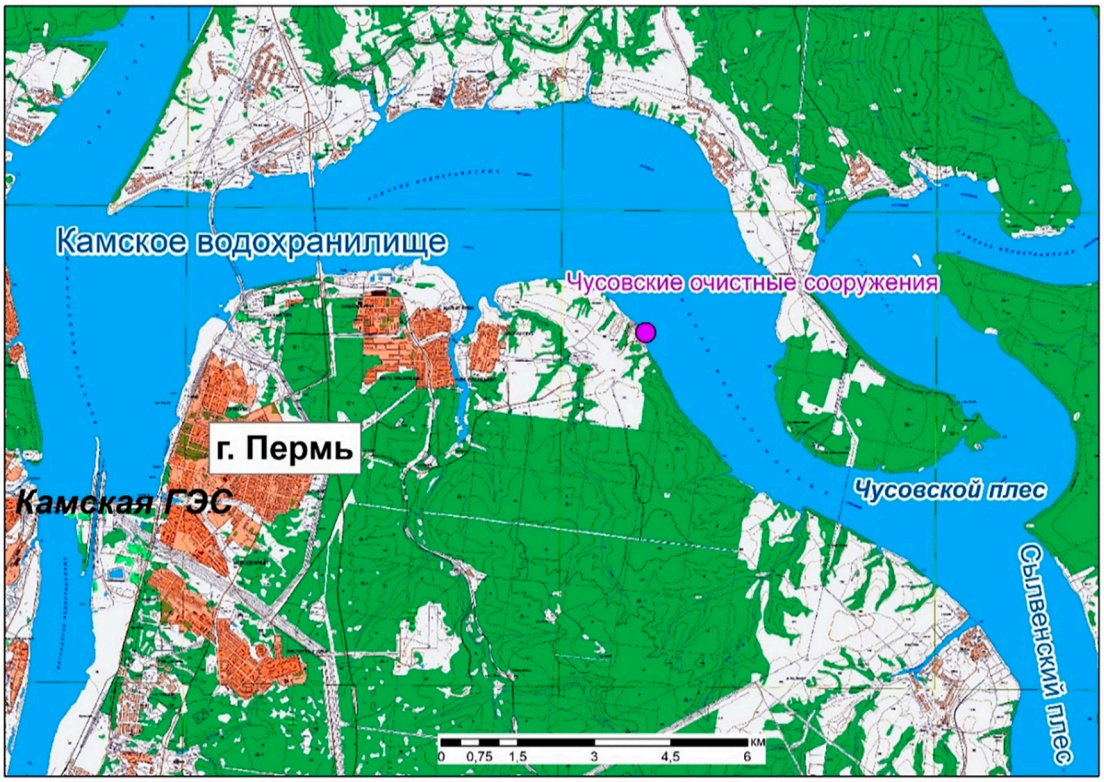


Рис. 1. Исследуемый участок реки Камы (Камского водохранилища)

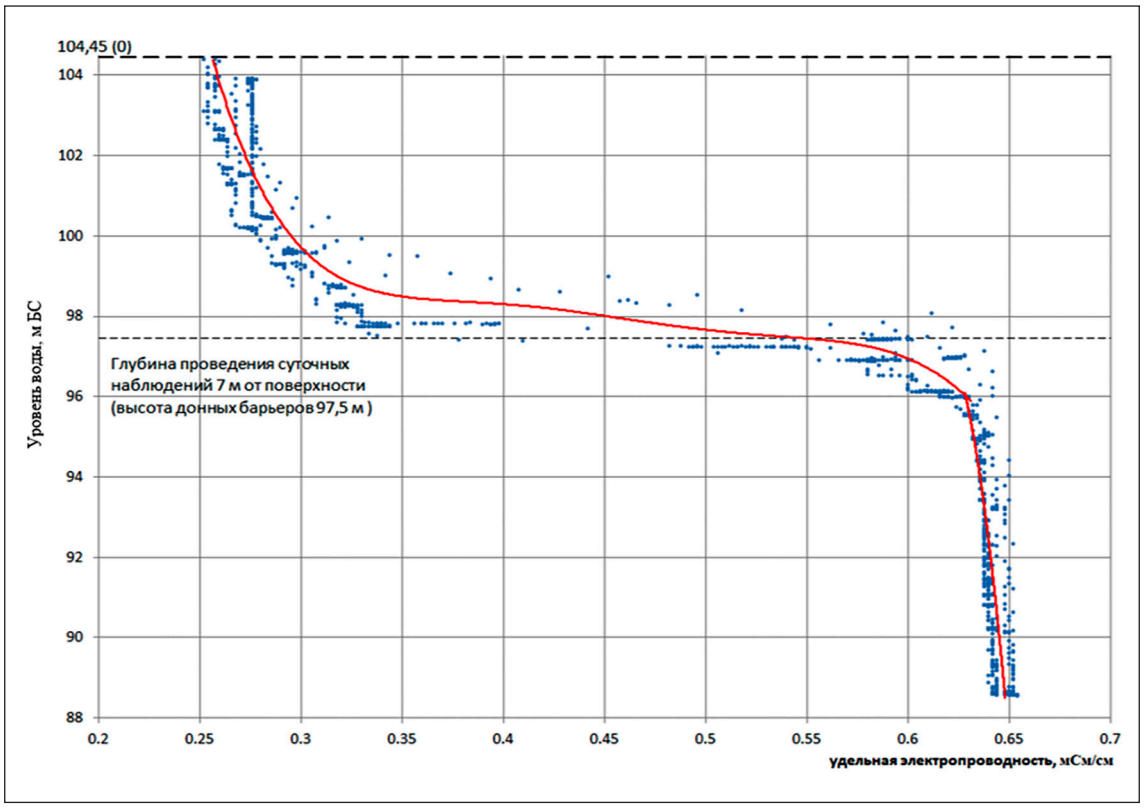


Рис. 2. Изменение по глубине удельной электропроводности воды в районе ЧОС (28 января 2021 г.)

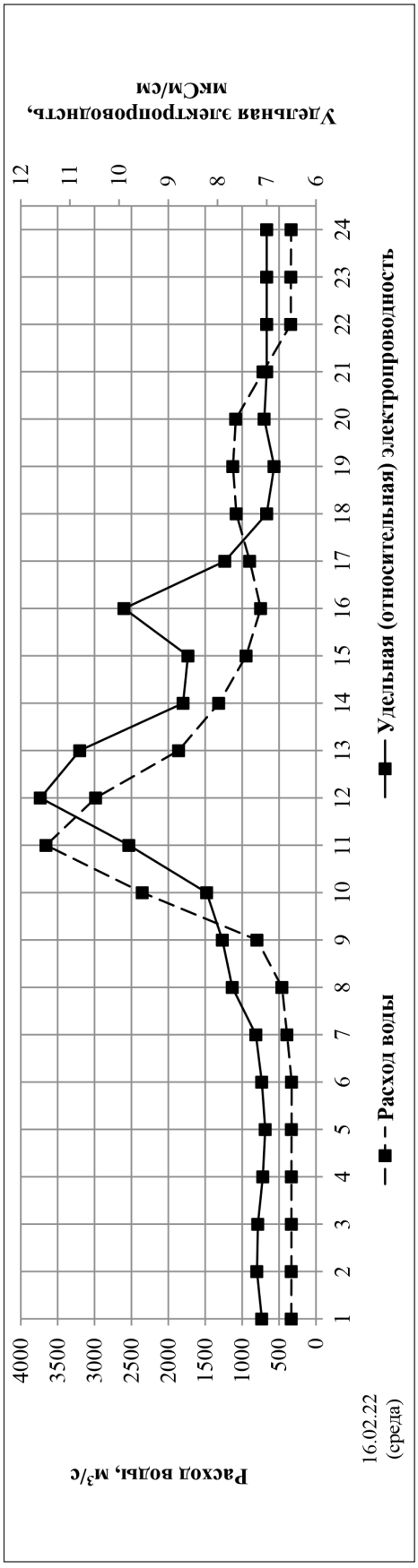


Рис. 3. График внутрисуточных колебаний характерных значений расходов воды и удельной электропроводности

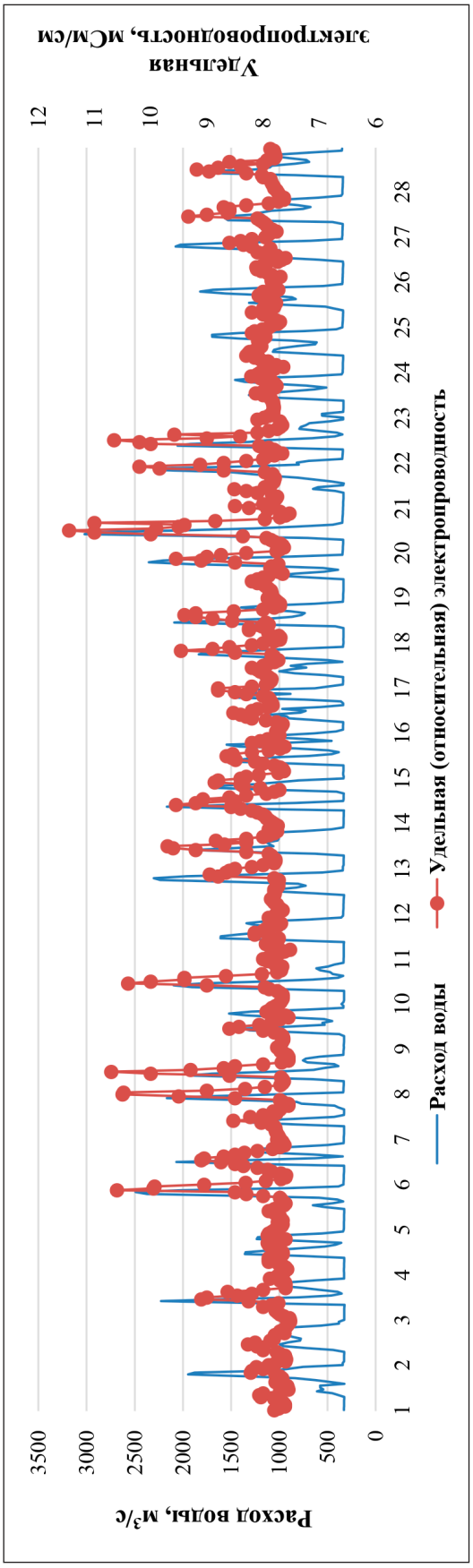


Рис. 4. Синхронный график изменений расхода воды и удельной электропроводности (февраль 2022 г.)

Высокая закарстованность водосборной территории р. Сылвы обусловливает не только повышенную жесткость ее воды, но и повышенную минерализацию и плотность по сравнению с водой р. Чусовой. Данные различия становятся особенно заметными в период зимней межени, когда эти реки переходят преимущественно на подземный режим питания. В зоне слияния рек наблюдается отчетливая вертикальная стратификация водных масс с устойчивой границей раздела. Для снижения жесткости забираемой воды был предложен селективный забор воды путем создания донных барьеров на оголовки водозабора [8, 11]. При этом высота донного барьера близка к высоте расположения границы водных масс – к так называемому слою скачка, где наблюдается резкое изменение качества воды.

Близость данного участка к плотине Камской ГЭС (расстояние до гидроузла составляет примерно 16 км) обусловливает значительное влияние на гидродинамический режим исследуемого участка водоема в связи с неравномерностью сбросов воды из верхнего бьефа ГЭС в нижний (резкие изменения сбросных расходов воды через плотину гидроузла) [10].

Жесткость воды является лимитирующим показателем на рассматриваемом водозаборе ЧОС, поскольку водные массы, приходящие по р. Сылва, высокоминерализованы из-за закарстованности речного бассейна. Однако [10] общая минерализация воды, как и жесткость, являясь химическим показателем, требует для своего определения достаточно сложной процедуры. Поэтому при проведении полевых исследований значительно удобнее использовать непосредственно измеряемый показатель – удельную электропроводность воды. Основным преимуществом применения данного показателя является, как уже отмечалось, удобство его определения при наличии очень хорошей линейной связи его с минерализацией [10] и жесткостью воды.

Результаты исследования и их обсуждение

Большинство крупных ГЭС из-за особенностей их регулирования, в первую очередь, ориентированы на снятие внутрисуточных неравномерностей потребления электроэнергии. В таком режиме работает и Камская ГЭС. Резкие изменения расходов сброса воды в нижнем бьефе порождают в верхнем бьефе внутренние волны на границе раздела водных масс. Так как высота донных барьеров, определяющих эффективность селективного отбора воды, достаточно близка к границе раздела водных масс, возмущения, связанные с неравномерностью сбросов, отчетливо отражаются на качестве забираемой воды. Представленные рисунки 3, 4 наглядно демонстрируют особенности регулирования характерных значений расходов воды и удельной электропроводности через гидроузел Камской ГЭС.

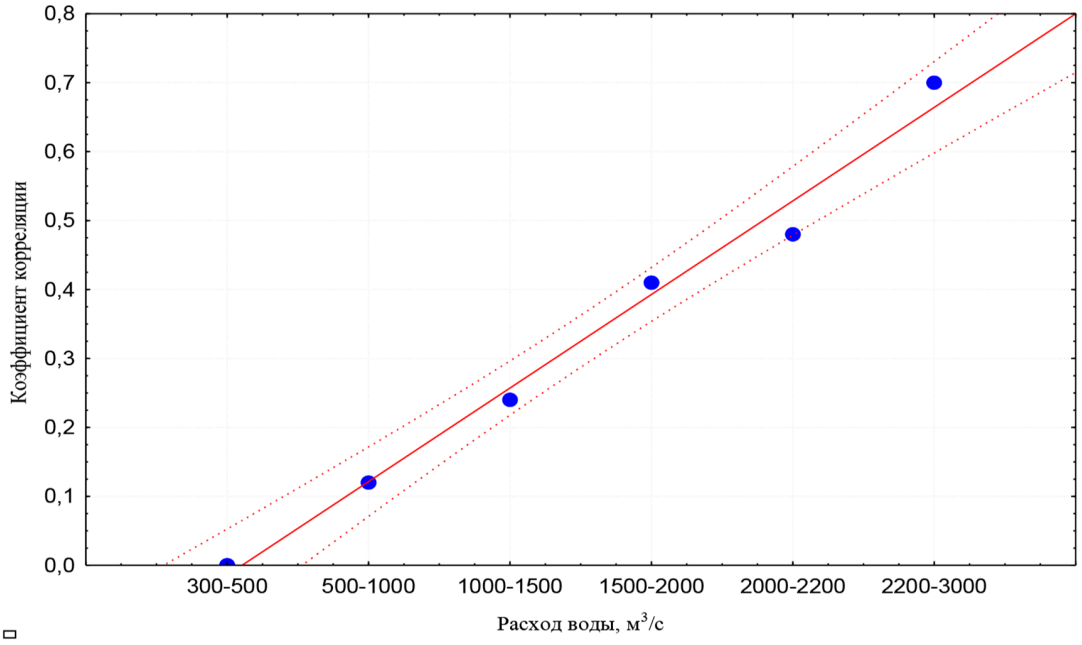


Рис. 5. Зависимость между коэффициентом корреляции (расход воды – удельная электропроводность) от диапазона рассматриваемых расходов воды

В то же время принципиальное влияние на качество забираемой воды оказывают значительные сбросы воды в нижний бьеф гидроузла Камской ГЭС. При малых сбросах воды влияние практически отсутствует.

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициентов корреляции Пирсона между удельной электропроводностью воды и расходами сбросов. Как следует из рисунка 5, при колебаниях сбросов воды ниже 1500–2000 м^3/с данная связь статически слабая, в то же время при расходах более 2020 м^3/с она становится весьма существенной.

Рассматриваемая особенность отражает существенный нелинейный характер формируемых на границе раздела водных масс внутренних волн. Данные внутрисуточные колебания качества воды существенны и требуют принятия эффективных мер по минимизации их влияния.

Заключение

Внутрисуточные колебания качества воды могут оказывать существенное влияние как на формирование потребительских свойств воды, так и на экологическую безопасность водных объектов. Поэтому они представляют как практический, так и теоретический интерес.

Необходимым условием для формирования данных локальных колебаний является наличие вертикальной стратификации водных масс, формирующихся вследствие слияния двух рек с существенно различными плотностными характеристиками воды.

Вертикальная стратификация водных масс с устойчивой границей раздела формируется при плотностном числе Фруда $Fr_\rho<1$. При наличии вертикальной стратификации внутрисуточные колебания проявляются в виде внутренних волн, формируемых на границе раздела водных масс. На нижнем участке в районе ЧОС внутренние волны на границе раздела водных масс вызываются резкими колебаниями сброса воды в нижнем бьефе водохранилища, на верхнем участке колебания обусловлены внутриводоемными процессами, связанными как с регулированием уровенного режима водохранилища, так и с колебаниями притока воды к водохранилищу.

Список литературы

1. Bor Aslı, Elçi Şebnem Impacts of construction of dam on the flow regimes and water quality: A case study from Turkey // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. P. 4069–4086.–4086, (2022)

2. Розенталь О.М., Синцова Т.Н. Динамика физических показателей качества воды (на примере исследования р. Уссури) // Экологические системы и приборы. 2024. № 3. С. 3-13. DOI: 10.25791/esip.3.2024.1434.

3. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Синцова Т.Н. Особенности внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды в Камском водохранилище // Горное эхо. 2023. № 3 (92). С. 14-26.

4. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. 2020. № 3. С. 34-46.

5. Чалов С.Р., Морейдо В.М., Денисова И.С., Солоников И.А. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5, № 1. С. 59-74.

6. Розенталь О.М., Тамбиева Дж.А. Волновая динамика качества речной воды // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491, № 1. С. 82–86.

7. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Тиунов А.А. Особенности течений в верхних бьефах крупных ГЭС, связанных с неравномерностью пропуска через них воды // Горное эхо. 2020. № 1 (78). С. 12-15.

8. Лепихин А.П., Вениционов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды КарНЦ РАН. 2021. № 4. С. 53-63. DOI: 10.17076/lim1419.

9. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol. 2014. Vol. 508. P. 328-342. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.

10. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Синцова Т.Н. Особенности внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды в Камском водохранилище // Горное эхо. 2023. № 3 (92). С. 14-26.

11. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 3. С. 27-28.

СТАТЬЯ

УДК 631.6:630*221.01
DOI 10.17513/use.38301

ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ ПОСЛЕ СПЛОШНОЙ РУБКИ ОСУШЕННОГО ЕЛЬНИКА ЧЕРНИЧНОГО ВЛАЖНОГО

Богданов А.П., Цветков И.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В.

ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Архангельск, e-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru

Целью исследования является изучение динамики структуры древостоя после сплошной рубки, а также пройденного гидротехнической мелиорацией в ельнике черничном влажном. Для изучения закономерностей роста и динамики структуры насаждений под воздействием природных и антропогенных факторов обследована постоянная пробная площадь, пройденная сплошной рубкой и осушением соответственно 37 и 38 лет назад. Для оценки эффективности проведения рубки с целью заготовки древесины и анализа динамики роста древостоя с рубкой и без рубки проведено обследование контрольной пробной площади, осушенной 38 лет назад без проведения сплошной рубки. По результатам полевого обследования получена таксационная характеристика древостоя на пробе и на контрольном участке. На месте вырубки сформировался смешанный елово-березовый древостой, на контроле сформировался чистый ельник черничный влажный. Проведена оценка состояния гидролесомелиоративной сети на территории объекта исследования. Доля удовлетворительного состояния осушителей составляет 30%. В результате исследования сделан вывод о неудовлетворительном состоянии осушительной сети на объекте исследования. Многолетние исследования являются основой для разработки модели прогнозирования результатов планируемых лесохозяйственных мероприятий в лесных экосистемах на переувлажненных землях. Рассмотрена структура древостоя до рубки оставленной части древостоя, а также древостоя в настоящее время. По результатам полевых работ получены данные о динамике таксационных показателей за период наблюдения.

Ключевые слова: ельник черничный влажный, ход роста, гидролесомелиорация, структура древостоя

Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства «Разработка цифровой имитационной модели динамики экологического состояния и продуктивности лесных экосистем на переувлажненных землях под воздействием природных и антропогенных факторов» (регистрационный номер: 122020300230-5).

DYNAMICS OF STAND STRUCTURE AFTER CLEAR-CUTTING AND DRAINAGE OF PICEETUM MYRTILLOSUM

Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V., Karaban A.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V.

Northern Scientific Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, e-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru

The aim of the study is to study the dynamics of the structure of the stand after continuous logging and hydraulic reclamation in the blueberry wet spruce forest. To study the patterns of growth and dynamics of the structure of plantations under the influence of natural and anthropogenic factors, a permanent test area was surveyed, passed through continuous logging and drainage 37 and 38 years ago, respectively. To assess the effectiveness of logging for the purpose of harvesting wood and to analyze the dynamics of stand growth with and without logging, a survey of a control sample area drained 38 years ago without continuous logging was conducted. According to the results of the field survey, the taxational characteristics of the stand on the sample and on the control site were obtained. A mixed spruce-birch stand was formed at the cutting site, and a clean blueberry wet spruce forest was formed at the control site. The assessment of the state of the hydroforestry network on the territory of the research object was carried out. The proportion of satisfactory condition of the dehumidifiers is 30%. As a result, a conclusion was made about the unsatisfactory condition of the drainage network at the research facility. Long-term research is the basis for the development of a model for predicting the results of planned forestry activities in forest ecosystems on wetlands. The structure of the stand before the felling, the abandoned part of the stand, as well as the stand at the present time, is considered. Based on the results of field work, data on the dynamics of taxation indicators for the observation period were obtained.

Keywords: Piceetum myrtillosum, growth course, hydromelioration, stand structure

The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state task of the Northern Scientific Research Institute of Forestry to conduct applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency "Development of a digital simulation model of the dynamics of the ecological state and productivity of forest ecosystems on overmoistened lands under the influence of natural and anthropogenic factors" (registration number: 122020300230-5).

Введение

Повышение продуктивности лесов является одним из базовых принципов ведения лесного хозяйства. Повышения продуктивности заболоченных лесов возможно достичь путем проведения гидролесомелиорации переувлажненных лесов и организации рационального ведения хозяйства в них. На избыточно увлажненных землях необходимо регулирование влажности в корнеобитаемом слое почвы до уровня влажности свежих почв путем прокладки дренирующих борозд и ухода за ними. В настоящий момент отсутствует региональная нормативно-правовая база, регламентирующая особенности ведения лесного хозяйства на осушенных землях. В Правилах ухода за лесами [1] содержится раздел «Уход за лесами путем проведения агролесомелиоративных и иных мероприятий», часть которого содержит основные положения гидролесомелиорации. Одним из мероприятий по противопожарному обустройству лесов является проведение работ по гидромелиорации [2]. Правила лесовосстановления [3] отражают позитивные изменения в оценке роли мер по проведению осушительных мероприятий для решения проблем лесовосстановления. Обзор литературных источников показывает, что осушение переувлажненных земель значительно повышает продуктивность лесов [4].

Почвенные ресурсы в Архангельской области на 35,8% представлены торфяными болотными и торфянистыми почвами [5, 6], что говорит о высокой степени заболоченности лесного фонда. Для повышения продуктивности заболоченных земель необходимо проведение гидролесомелиорации, что является важной задачей современных научных исследований. Согласно данным лесного учета, площадь осушенных лесов в Архангельской области составляет 292,5 тыс. га [7, с. 20], поэтому эти участки могут играть важную роль в ресурсном обеспечении лесной отрасли.

Целью исследования является изучение динамики структуры древостоя после сплошной рубки, а также пройденного гидротехнической мелиорацией в ельнике черничном влажном.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели исследования выполнена лесоводственная оценка древостоя и определено состояние осушительной сети на объекте исследования. Работы направлены на выявление особенностей формирования осушенных лесов с проведением сплошной рубки и без для разработки модели прогнозирования состояния осушенных лесов.

Для прогнозирования лесоводственной эффективности осушения необходима разработка модели состояния дренажных каналов. Без ухода и реконструкции системы эффективность проведенных мер по осушению снижается. Под руководством доктора сельскохозяйственных наук А.М. Тараканова разработана имитационная модель для прогнозирования технического состояния гидролесомелиоративной сети, позволяющая разработать соответствующий прогноз вероятности нормального функционирования каналов. На объекте исследования давность лесоосушения составляет 37 лет. По результату визуальной оценки состояние гидротехнических сооружений определено как неудовлетворительное. По результатам натурного осмотра нормальное функционирование по прошествии 37-летнего периода составляет 30%, что согласуется с результатами работ в данном направлении [8, 9, 10]. Причинами снижения эффективности и состояния каналов являются разрушение от прохода лесозаготовительной техники, оставление порубочных остатков в них, уменьшение глубины каналов из-за заиления и обрушения стенок [9].

Для получения таксационной характеристики древостоя проведены полевые работы на постоянной пробной площади и на контроле. Перечень работ, проводимых на пробных площадях, определялся целью и задачами исследования. Таксационная характеристика элементов древостоя необходима для изучения динамики хода роста насаждения, товарной и сортиментной структуры. При проведении полевых и камеральных работ придерживались требований отраслевого стандарта «Площади пробные лесоустроительные» (1984). Для оценки состояния гидролесомелиоративной сети использована методика ФБУ «СевНИИЛХ» [4]. Оценку состояния осушительных каналов проводили путем сравнения глубины каналов в момент обследования с проектируемой величиной в момент их создания.

Расстояние между каналами на объекте исследования составляет 90 м. Проективная глубина каналов, согласно архивным данным, составляет 0,55–0,65 м.

Для ограничения пробных площадей на местности при проведении работ использовали нитевой измеритель WalkTax.

Рис. 1. Расположение пробных площадей:
а – расположение объектов исследования на карте Open Street Map;
б – схема расположения ПП внутри 35-го квартала Звозского участкового лесничества

Для определения географических координат поворотных точек проб применяли GPS-навигатор Garmin 62. Полученные координаты в дальнейшем использовали для создания схемы расположения опытных объектов в ГИС QGIS. Для получения суммы площадей сечений, измерения среднего диаметра и других таксационных параметров на каждой пробной площади проведен сплошной перечет диаметров деревьев. В процессе перечета определяли категорию технической годности деревьев с разделением на деловые, полуделовые и дровяные. В отдельную ведомость заносили сухостойные деревья. Диаметры деревьев измерены на высоте 1,3 м от шейки корня с точностью до 0,1 см. Для исключения повторного перечета или пропуска каждое дерево отмечали мелом. Измерение высот деревьев проводили для определения разряда высот и средней высоты элементов древостоя. Работы осуществляли при помощи высотомера Suunto PM-5/1250 с точностью измерения ±0,1 м. Высоты деревьев измеряли у 10–15 деревьев из числа деловых, распределенных пропорционально количеству стволов каждой ступени толщины. Для определения запаса использованы разрядные таблицы, применяемые в районе исследования [11, с. 94]. Расположение пробных площадей приведено на рисунке 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Объектом исследования являются лесные насаждения на переувлажненных землях, пройденные гидротехнической мелиорацией. Объект исследования находится в составе гидролесомелиоративного стационара, в который входят 33, 34, 35, 36,43, 44, 45 кварталы Звозского участкового лесничества, Емецкого лесничества. По материалам лесоустройства 1995 года осушенная площадь стационара составляет 2495 га. Из общей осушенной площади 64% занимают сосняки, 36% – ельники. Сотрудниками Архангельского института леса и лесохимии (в настоящее время ФБУ «СевНИИЛХ») заложены постоянные пробные площади на территории, где спланированы и в последующем проведены работы по гидротехнической мелиорации и рубке различного назначения.

Таблица 1

Таксационная характеристика изучаемых древостоев

№ пп (год)	Тип леса	Бонитет	Ярус	Состав	Возраст, лет	Среднее		Число стволов шт/га	Полнота	Запас, $м^3$/га
						высота, м	диаметр, см			
1 (1984) до рубки	Е. чер. вл.	Va	I ярус	7Е	220	13,8	17,8	546	0,8	94
				2Е	160	11,6	14,0	260		23
				1Б	100	13,8	17,8	123		21
			Итого по I ярусу					929	0,8	138
			II ярус	10Е	100	7,6	8,5	643	0,2	17
Итого								1149	1,0	155
1 (2024)	Е. чер. вл.	V	I ярус	7Е	77	12	14,9	953	0,71	121
				3Б	40	11,7	8,3	1520	0,39	53
Итого								2473	1,1	174
Контроль (2024)	Е. чер. вл.	V	I ярус	8Е	160	14,3	16,1	1127	0,85	187
				2Б	60	12,7	10,7	613	0,25	37
Итого								1740	1,1	224

* Осушен в 1986 году, сплошная рубка в 1987 году с сохранением 2-го яруса ели и подроста 9Е1Б 1,7 м 3,0 тыс. шт./га

А

Б

Рис. 2. Общий вид изучаемых древостоев:
А древостой на Контроле; Б древостой со сплошной рубкой

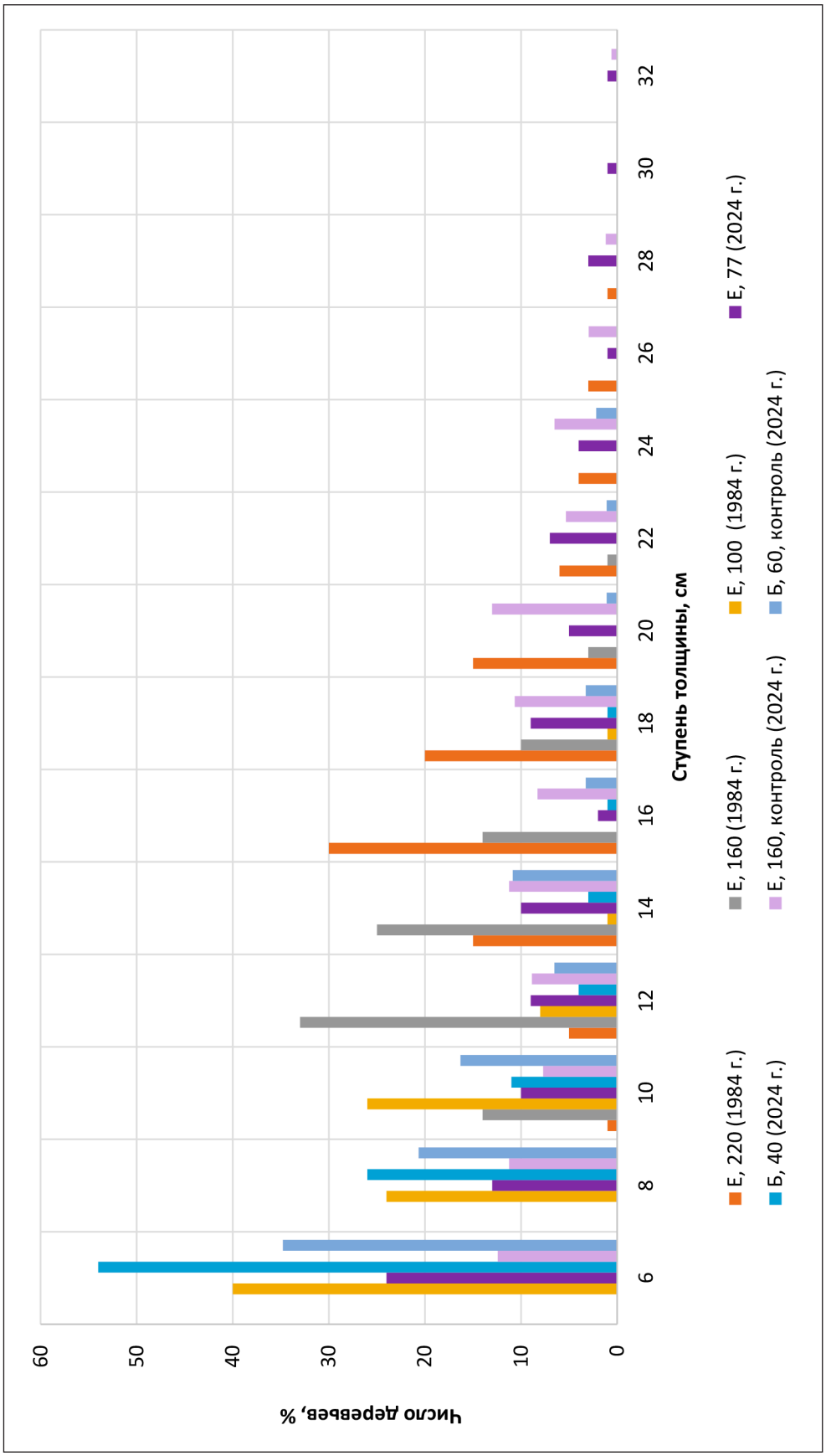


Рис. 3. Распределение деревьев на пробной площади по возрастным поколениям и ступеням толщины

Для изучения реакции древостоев на осушение и особенностей хода роста по высоте, диаметру и запасу в ельнике черничном влажном, пройденном сплошной рубкой, по результатам долговременного мониторинга на пробных площадях проведены полевые работы. Пробная площадь № 1 распложена в 11-м выделе 35-го квартала Звозского участкового лесничества, Емецкого лесничества. Территория ПП-1 осушена в 1986 году. Через год после осушения, в 1987 году, территория пробной площади ПП-1 пройдена сплошной рубкой с сохранением тонкомера и подроста ели. Для оценки таксационной характеристики на ПП-1 проведено повторное обследование в 2024 году. В качестве контроля в 35-м квартале 3-м выделе Звозского участкового лесничества выбрана пробная площадь, осушенная в 1986 году без проведения сплошной рубки. Таксационные характеристики пробной площади ПП-1 и контроля за период наблюдения приведены в таблице 1.

На рисунке 2 приведен приведены фотографии изучаемых древостоев при проведении обследования в 2024 году.

В таблице 2 приведено распределение деревьев на пробной площади по возрастным поколениям и ступеням толщины на ПП-1 и контроле.

До проведения рубки (табл. 2) в изучаемом ельнике черничном влажном перестойная часть ели по числу стволов составляет 70% и по запасу древесины – 76%. Перестойные деревья ели (160–220 лет) сосредоточены в основном (63%) в ступенях толщины 16–28 см. Во втором ярусе на 99% ель представлена в тонкомерных ступенях толщины (6–14 см).

В 2024 году только 66% от количества деревьев расположено в тонкомерных ступенях толщины (6–14 см), что говорит о сохранении и успешном росте деревьев, оставленных после сплошной рубки в 1987 году. Оставление подроста и второго яруса ели может существенно повысить эффективность лесовосстановления на вырубках в таежной зоне европейской части страны, предотвратит смену пород на мягколиственные и сократит оборот рубки [12].

Изменение количества деревьев по ступеням толщины характеризует распределение (структуру) и динамику древостоя с течением времени. Распределение числа деревьев ели по ступеням толщины приведено на рисунке 3.

Проведен статистический анализ на нормальность распределения еловой части древостоя на контроле в 2024 году путем проведения теста χ^2 (*Chi-square test)*. В случае если $p>0,05$, то можно сделать вывод о том, что анализируемое распределение не отличается от нормального. В нашем случае с распределением диаметров ели получаем $p=0,00006$, что не подтверждает гипотезу о нормальности распределения этих данных. Сделан вывод о том, что распределение значений диаметров ели на контроле статистически отличается от нормального распределения.

Таблица 2

Распределение деревьев на пробной площади
по возрастным поколениям и ступеням толщины на ПП-1 и контроле

Ярус	Порода	Возраст, лет	Число деревьев шт./га	В том числе по ступеням толщины, %													
				6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
ПП-1																	
I ярус*	Е	220	546	0	0	1	5	15	30	20	15	6	4	3	1	0	0
	Е	160	260	0	0	14	33	25	14	10	3	1	0	0	0	0	0
II ярус*	Е	100	643	40	24	26	8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I ярус**	Е	77	953	24	13	10	9	10	2	9	5	7	4	1	3	1	1
	Б	40	1520	54	26	11	4	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Контроль без рубки**																	
I ярус	Е	160	1127	12	11	8	9	11	8	11	13	5	7	3	1	0	1
	Б	60	613	35	21	16	7	11	3	3	1	1	2	0	0	0	0

* по результатам работ в 1984 году.
** по результатам работ в 2024 году.

Проведен статистический анализ на нормальность распределения еловой части древостоя на пробе со сплошной рубкой при обследовании в 2024 году. Для теста χ^2 получаем p=0,00001, что также не подтверждает гипотезу о нормальности распределения этих данных.

Визуальная оценка структуры еловой части древостоя поколения 160–220 лет в 1984 году позволила сделать вывод о нормальном распределении. Однако в результате проведенного теста χ^2 (p=0,01) эта гипотеза была отклонена, поэтому сделан вывод о достоверном отличии изучаемого распределение от нормального.

Выводы

1. Выявлены особенности хода роста по высоте, диаметру и запасу в ельнике черничном влажном, пройденном сплошной рубкой, по результатам долговременного мониторинга на пробных площадях. Показана динамика структуры древостоя после сплошной рубки осушенного ельника черничного влажного. Проведена оценка на нормальность распределения ели в изучаемых древостоях с помощью теста χ^2.

2. Данные по запасу показали, что среднепериодический прирост еловой части древостоя, пройденного сплошной рубкой, за 37 лет составил 2,8 м^3/га. В древостое, где не проведена сплошная рубка, среднепериодический прирост еловой части составил 0,86 м^3/га, что говорит о значительно большей скорости увеличения древесной массы. Преобладание стволов ели как по запасу, так и по числу говорит об успешном естественном возобновлении ели на вырубке. Оставленный второй ярус с запасом 17 м^3 ели, а также сохраненный подрост позволили сформировать еловый древостой без смены пород и длительного периода возобновления. Общий запас 174 м^3 древесины на месте сплошной рубки превосходит данные из таблиц хода роста для 5-го класса бонитета ельника черничного влажного.

3. Сформирован высокопродуктивный смешанный елово-березовый древостой, что говорит о возможности вести заготовку древесины на осушенных землях.

4. По результатам оценки состояния осушительной сети сделан вывод о неудовлетворительном ее состоянии. Ухудшение состояния каналов произошло из-за уменьшения глубины и зарастания осушителей. Ухудшение состояния каналов и функционирования сети негативно влияет на пропускную способность каналов и препятствует проективной работе системы осушения. Лесоводственная оценка показывает, что формируемые древостои не утратили устойчивость, а уровень отпада соответствует естественной динамике древостоя в процессе роста.

Список литературы

1. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июля 2020 г. N 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами». [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012180022 (дата обращения: 08.06.2024).

2. Лесной кодекс Российской Федерации (в ред. Федеральных законов от 13.05.2008 N 66-ФЗ Статья 53.1. Предупреждение лесных пожаров Статья 53.1 изменена с 1 января 2024 г. [Электронный ресурс]. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102110364 (дата обращения: 08.06.2024).

3. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений» (Зарегистрирован 18.12.2020 № 61556). [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012180052 (дата обращения: 08.06.2024).

4. Тараканов А.М., Симаков А.А., Капистка В.В., Дворяшин А.В. Особенности ведения лесного хозяйства на осушаемых землях // Наука – лесному хозяйству Севера: Сборник научных трудов ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» / Ответственный редактор: Н.А. Демидова. Архангельск: ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», 2019. С. 9-18.

5. Столбовой В.С. Единый государственный реестр лесных почв России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2018. № 6. С. 102-109. DOI: 10.1134/S2587556618060158.

6. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Почвы субъектов Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://egrpr.esoil.ru/content/adm/adm29.html (дата обращения: 08.07.2024).

7. Тараканов А.М. Рост осушаемых лесов и ведение хозяйства в них. Архангельск: Сев. НИИ лесного хоз-ва, 2004 (ГУП Соломбальская тип.). 228 с.

8. Федотов И.В. Эффективность осушения лесов в Архангельской области и рекомендации по ее улучшению // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 463-466. DOI: 10.12737/7027.

9. Федотов И.В. Мониторинг состояния осушаемых лесов и ведение хозяйства в них на примере Архангельской области: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2017. 22 с.

10. Федотов И.В., Третьяков С.В., Ильинцев А.С. Влияние гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 214. С. 131-140.

11. Лесотаксационный справочник по северо-востоку Европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской области и республики Коми) / Федеральное агентство лесного хозяйства, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»; сост.: канд. с.-х. наук Войнов Г.С. и др. Архангельск: ОАО ИПП Правда Севера, 2012. 672 с.

12. Татарников Д.В., Дерюгин А.А. Многолетние стационарные исследования в южнотаежных фитоценозах Ярославской области // Успехи современной биологии. 2020. Т. 140, № 6. С. 616-623. DOI: 10.31857/S0042132420060083.

СТАТЬЯ

УДК 574.21
DOI 10.17513/use.38302

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМОРФИЗМА У БЕЛОГО КЛЕВЕРА (*TRIFOLIUM REPENS L.)* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ

Шишлова М.А., Быковская Н.В.

ФГАОУ ВО Дальневосточный федеральный университет (Школа педагогики), Владивосток, e-mail: shishlova1@rambler.ru

Показана целесообразность использования белого клевера (*Trifolium repens L.*) в качестве биоиндикатора загрязнения территории. Был проведен анализ взаимосвязи фенотипического разнообразия растений *Trifolium repens L.* и степени антропогенной нагрузки на территории. Путем изучения частоты встречаемости отдельных фенов клевера белого ползучего в популяциях был изучен морфогенетический полиморфизм гена V, который отвечает за формирование белого рисунка на листьях. Колебания в частотах установили для таких фенов, как: «пятно отсутствует», «полное пятно», «разорванное пятно», «разорванное высокое пятно», «центральная верхняя точка», «большое сплошное пятно у основания», «низкое треугольное пятно у основания». Исследования проводились более 20 лет на территории городского парка г. Уссурийска Приморского края. В статье проведен сравнительный анализ фенотипического разнообразия у белого клевера во временной промежуток 10 лет. Полученные данные свидетельствуют о потенциале используемого метода для мониторинга качества окружающей среды и его значимости для оценки уровня антропогенного воздействия на экосистему. Полученные и обработанные результаты имеют практическое значение в области популяционной генетики. Фактический материал может быть использован не только на занятиях по дисциплине «Генетика» у студентов, но и на уроках биологии в средней школе в разделе «Общая биология» в теме «Генетика».

Ключевые слова: генетика, полиморфизм, множественный аллелизм, «седые» пятна у белого клевера, антропогенная нагрузка

POLYMORPHISM STUDY IN WHITE CLOVER (*TRIFOLIUM REPENS L.*) DEPENDING ON THE GROWING CONDITIONS

Shishlova M.A., Bykovskaya N.V.

School of Education Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: shishlova1@rambler.ru

The expediency of using white clover (*Trifolium repens L.*) as a bioindicator of pollution of the territory is shown. The analysis of the relationship between the phenotypic diversity of *Trifolium repens L.* plants and the degree of anthropogenic load on the territory was carried out. By studying the frequency of occurrence of individual phenes of white creeper clover in populations, the morphogenetic polymorphism of gene V, which is responsible for the formation of a white pattern on leaves, was studied. Frequency fluctuations were established for such hair dryers as: «no spot», «full spot», «torn spot», «torn high spot», «central upper point», «large solid spot at the base», «low triangular spot at the base». The research has been conducted for more than 20 years on the territory of the city park of Ussuriysk, Primorsky Krai. The article provides a comparative analysis of the phenotypic diversity of white clover in a time period of 10 years. The data obtained indicate the potential of the method used to monitor environmental quality and its importance for assessing the level of anthropogenic impact on the ecosystem. The results obtained and processed are of practical importance in the field of population genetics. The actual material can be used not only in classes on «Genetics» for students, but also in biology lessons in high school in the section «General Biology» in the topic «Genetics».

Keywords: polymorphism, multiple allelism, «gray» spots in white clover, anthropogenic load

Введение

Клевер белый (*Trifolium repens L.)* с его разнообразием фенотипов является отличным индикатором изменений в окружающей среде под воздействием антропогенных факторов. Этот вид растений не только отражает наличие мутаций в своих генах, но и оценивает мутагенную активность почвы, на которой он растет. Исследования в этой области помогают не только контролировать состояние экосистем, но и принимать меры по их восстановлению [1, 2].

Клевер белый для Приморского края является заносным одичавшим растением, которое растет на лугах, лесных опушках, по дорогам, берегам рек, у жилья. Относится к влаголюбивым растениям, хорошо растет при достаточном и даже обильном увлажнении [3].

В течение многих лет выполняется исследование полиморфизма по «седым» пятнам у белого клевера в популяциях г. Уссурийска и Приморского края [4]. Авторами была разработана лабораторная работа «Изучение множественного аллелизма по “седым”

пятнам у клевера белого» с использованием исследовательского метода для студентов биологического направления.

Множественный аллелизм представляет собой одно из главных явлений в наследственной изменчивости организма. Разнообразные состояния одного гена возникают в результате мутаций. Поскольку у диплоидных организмов может быть только две аллели из серии множественных аллелей, то в значительной степени увеличивается комбинативная изменчивость организмов. В основе генетического полиморфизма лежит множественный аллелизм, который является неотъемлемым механизмом генетического гомеостаза популяций. В результате популяционный генофонд характеризуется целостностью и сбалансированностью.

Целью исследования стало изучение фенотипического разнообразия в популяциях белого клевера.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) ознакомиться с явлением множественного аллелизма, наследованием в серии множественных аллелей;

2) изучить полиморфизм по «седым» пятнам у белого клевера;

3) определить фенотипическое разнообразие популяции белого клевера в городском парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске Приморского края;

4) сравнить фенотипическую структуру популяции белого клевера в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске в 2013 г. и в 2023 г.

Материалы и методы исследования

Известно, что полиморфизм – одновременное существование в популяции двух и более резко отличающихся типов организмов. Полиморфизм имеет генетическую основу (генный, хромосомный, внеядерный). Одним из базовых механизмов генетического полиморфизма является множественный аллелизм.

Мутацией определяется переход гена из одного аллельного состояния в другое. Если исходная нормальная аллель *A* мутирует в рецессивную аллель *a*, имеет место прямая мутация. В том случае, когда мутантная аллель *a* превращается в исходную нормальную аллель *A*, происходит явление обратных мутаций. Однако, как показало исследование генетики аллелей, процесс их мутирования отнюдь не ограничивается взаимопревращением *A* в *a* ($A \rightarrow a$, $a \rightarrow A$). Было выяснено, что мутации могут давать целый ряд разных состояний этого гена (A^1, A^2, A^3, A^4...и т.д. и a^1, a^2, a^3, a^4...и т.д.) – серию множественных аллелей [5]. Множественный аллелизм – это наличие трех и более аллельных состояний гена. Компаундом называют комбинацию в гетерозиготе двух разных аллелей из набора множественных аллелей. В компаунде одна аллель может доминировать над другой или они могут быть кодоминантны. В ряду аллелей устанавливают и указывают, какая аллель над какой аллелью доминирует [6].

Явление множественного аллелизма встречается в природе и увеличивает полиморфизм популяций, тем самым играет свою роль в процессе эволюции.

У растений по принципу множественного аллелизма функционирует механизм самонесовместимости при опылении. При этом пыльца не может прорастать на рыльцах цветков конкретных генотипов. Гаметофитная самонесовместимость известна у более 10 тысяч покрытосеменных растений и обусловлена генами пыльцевых зерен. Данная система несовместимости определяется у многих растений серией множественных аллелей гена *S*, (S^1, S^2, S^3, S^4, S^5, S^6 и т.д.) – даже до нескольких сотен у некоторых цветковых растений. Механизм несовместимости работает так: у диплоидных клеток пестика в наличии две аллели из серии; а в гаплоидных пыльцевых зернах в наличии одна аллель гена *S*. Если в клетках пестика и в пыльцевом зерне содержится одинаковая аллель, то формирование пыльцевой трубки не происходит [7; 8, с. 51].

Множественный аллелизм по гену белоглазия наблюдается и у плодовой мушки. Мушка дрозофила имеет ген белоглазия (white), множественные мутации которого определяют разный цвет глаз в гомозиготе и в гетерозиготе с различной комбинацией мутантных аллелей. Вот некоторые из мутантных аллелей *white*:

w^{co} – коралловый цвет глаз;
w^{bl} – кровавый;
w^{e} – эозиновый;
w^{ch} – вишневый;
w^{a} – абрикосовый;
w^{h} – медовый;
w^{bf} – темно-желтый;
w^{t} – слабоокрашенный;
w^{p} – пурпурный;
w^{i} – слоновая кость;
w – белый [8, с. 424].

У многих млекопитающих ген *C* (*color*) имеет серии аллелей, например у кроликов:

C – дикий тип, c^{ch} – шиншилловая окраска, c^{h} – гималайская окраска, c^{a} – альбинос [8, с. 425].

Множественный аллелизм по группам крови наблюдается у животных и человека. Так, по механизму множественных аллелей наследуются 4 группы крови в системе АВО у людей.

Ген *I* в системе АВО имеет три различных состояния: I^A, I^B, I^o. Две аллели I^A, I^B доминируют над третьей аллелью I^o, но по отношению друг к другу они равноценны, кодоминантны, обе проявляются фенотипически у гетерозиготы I^AI^B. Различные генотипы по гену *I* детерминируют 4 группы крови: I (О) группа – генотип I^oI^o, II (А) группа – генотипы I^AI^A или I^AI^o, III (В) группа – генотипы I^BI^B или I^BI^o, IV (АВ) – генотип I^AI^B [8, с. 427].

У клевера белого, или ползучего (*Trifolium repens L.*) выявлен генетический полиморфизм по показателю наличия или отсутствия «седого» пятна (называют также светлым, белым пятном) на простых листиках в тройчатом листе, по особой конфигурации пятна. На непохожесть листьев по «седому» пятну влияет серия множественных аллелей гена *V*, а именно:

V – полное пятно;

V^H – полное высокое пятно;

V^B – разорванное пятно;

V^{BH} – разорванное высокое пятно;

V^P – центральная верхняя точка;

V^F – большое сплошное пятно у основания;

V^L – низкое треугольное пятно у основания;

v – пятно отсутствует.

Выделяют 11 или больше аллелей данного гена. Кроме 8 общепринятых, авторами учитывается V^M – m-образное пятно. В «седом» рисунке можно увидеть доминирование одной из аллелей в компаунде, у некоторых гетерозигот – кодоминирование. Все аллели доминантны по отношению к рецессивной аллели *v*.

В гистологических исследованиях было установлено, что проявление белого рисунка обусловлено появлением палисадных клеток с небольшим количеством хлоропластов или их отсутствием. Получается, что палисадные клетки уменьшаются в объеме в области рисунка, вытягиваются меньше, межклеточное пространство оказывается больше, чем в зеленой части листа. У других видов клевера есть белые пятна, как у клевера красного, у которого меньше число вариантов пятен. Установлено, что у клевера красного возникновение светлого рисунка зависит от неодинаковой скорости роста палисадных и эпидермальных клеток. В результате палисадные клетки больше подвергаются воздействию солнечного излучения, которое вызывает разрушение хлорофилла [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Для изучения полиморфизма рисунка листьев клевера авторы провели сбор материала в популяции на поле в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске в 2023 г. Собирали по одному тройчатому листу с каждого из тысячи растений, далее листья высушивали и наклеивали на гербарную бумагу. Листья клевера пронумеровывали и определяли рисунок на каждом листе. А также использовали гербарные материалы студенческих сборов за 2013 г. Затем провели анализ соотношения разных фенотипов в серии множественных аллелей гена *V*.

Непосредственно можно видеть только фенотипы, а не генотипы или гены. Генетическую изменчивость определенных популяций чаще всего предпочтительнее выявлять, используя частоты аллелей, а не генотипов, потому что несхожих аллелей чаще всего гораздо меньше, следовательно, генотипов больше. Количество генотипов определяли по формуле:

$$\frac{n(n+1)}{2},$$

где n – число встретившихся в выборке аллелей. Число гомозиготных генотипов соответствует n.

Для расчета числа гетерозиготных генотипов использовали формулу [9, с. 99]:

$$\frac{n(n-1)}{2}.$$

При статистической обработке данных применяли критерий Стьюдента. Для выведения статистической ошибки использовали общепринятую формулу [9, с. 99].

Количество различных аллелей гена *V* в популяции в парке в 2023 г. составляет 9, следовательно, в данной популяции

число разных генотипов: $\frac{9(9+1)}{2}=45$,

число гетерозиготных генотипов: $\frac{9(9-1)}{2}=36$,

гомозиготных генотипов: 9.

Проследим динамику полиморфизма в популяции белого клевера на поле в городском парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске от 2013 г. к 2023 г. (таблица).

Частота фенотипов с разными «седыми» пятнами в популяции белого клевера на поле в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске в 2013 г. и 2023 г., %

Фенотип	Популяция 2013 г.	Популяция 2023 г.
Пятно отсутствует	9,4±0,9	3,7±0,6
Полное пятно	36,4±1,5	49,6±1,6
Полное высокое пятно	9,6±0,9	9,7±0,9
Разорванное пятно	1,4±0,4	3,7±0,6
Разорванное высокое пятно	0,3±0,2	1,8±0,4
Центральная верхняя точка	32,8±1,5	16,4±1,2
Большое сплошное пятно у основания	0	4,1±0,6
Низкое треугольное пятно у основания	0,2±0,1	0,6±0,2
m-образное пятно	9,9±0,9	10,4±1,0

Примечание: «___» – значения, отличающиеся между выборками 2013 г. и 2023 г. по критерию Стьюдента при $p<0,05$.

В эти годы наиболее часто встречаются такие фены, как: «полное пятно», «центральная верхняя точка» (таблица).

В 2013 г. отсутствует «большое сплошное пятно у основания».

Наибольшее разнообразие фенов авторы установили в 2023 г. – 9. Меньшее количество фенов обнаружили в 2013 г. – 8 (таблица).

Колебания в частотах установили для таких фенов, как: «пятно отсутствует», «полное пятно», «разорванное пятно», «разорванное высокое пятно», «центральная верхняя точка», «большое сплошное пятно у основания», «низкое треугольное пятно у основания».

Редко встречающимися являются «низкое треугольное пятно у основания» и «большое сплошное пятно у основания». Растения клевера с этими пятнами имеют больше клеток, лишенных хлорофилла, следовательно, такие растения менее жизнеспособны по сравнению с другими.

Итак, полиморфизм по признаку «наличие/отсутствие» «седого» пятна сохраняется в течение 10 лет в популяции на поле в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске.

Выводы современного исследования подтверждаются результатами ранее проводившегося исследования полиморфизма в популяции в парке «Зелёный остров» в 2001 г. в Уссурийске [4].

Ряд исследователей предлагают использовать полиморфизм по белым рисункам на листьях у *Trifolium repens*, базирующийся на множественном аллелизме гена *V*, для биоиндикации загрязнения на территориях произрастания [10, 11]. Предположительно, что на урбанизированных территориях мутагенное действие поллютантов вызывает увеличение количества исследуемых фенов в популяциях *Trifolium repens*. Следовательно, фенетический полиморфизм у белого клевера можно использовать для оценки загрязнения окружающей среды [12, 13].

Выводы

В результате проведенной работы авторы пришли к следующим выводам.

1. Показано, что полиморфизм у белого клевера по наличию или отсутствию белых (или так называемых седых) пятен на листьях, по особой конфигурации пятен детерминирован серией из 9 множественных аллелей гена *V*.

2. Выявлена низкая частота встречаемости фенов «низкое треугольное пятно у основания» и «большое сплошное пятно у основания». Растения с такими пятнами имеют больше клеток, лишенных хлорофилла, следовательно, такие растения менее жизнеспособны.

3. Анализ фенотипической структуры популяции белого клевера на поле в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске показал большее разнообразие фенов в 2023 г. по сравнению с 2013 г. Установлено 9 фенов (соответственно, 45 генотипов) в 2023 г. Установлено 8 фенов (соответственно, 36 генотипов) в 2013 г., отсутствует фен «большое сплошное пятно у основания».

4. Популяция белого клевера в парке «Зелёный остров» в г. Уссурийске характеризуется фенетическим полиморфизмом.

Полученные и обработанные результаты имеют практическое значение в области популяционной фенетики.

Фактический материал может быть использован на лабораторном занятии по ге-

нетике «Изучение множественного аллелизма по “седым” пятнам у клевера белого» для студентов биологического направления, а также на уроках биологии в средней школе в разделе «Общая биология» в теме «Генетика». Результаты исследований по изучению полиморфизма белого клевера в природных популяциях используются для проведения экскурсии у студентов и школьников, которая даст возможность продемонстрировать проявление генетически закономерных изменений в природе, находить и констатировать факты, требующие пояснений с позиций генетики, видеть разнообразную изменчивость живых организмов.

Список литературы

1. Бекузарова С. А., Шабанова И.А. Клевер – биоиндикатор тяжелых металлов // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51, № 3. С. 297-301.

2. Степанова Л. П., Яковлева Е.В., Писарева А.В. Экологическая оценка степени фитотоксичности почв антропогенно-трансформированных территорий // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 10-15.

3. Скалозуб О. М. Географическое распространение и фитоценотическая приуроченность растений рода клевер в Приморском крае // Аграрный вестник Приморья. 2021. № 3 (23). С. 11-14.

4. Быковская Н.В., Боровик Г.В. Множественный аллелизм в популяциях клевера ползучего в г. Уссурийске // Животный и растительный мир Дальнего Востока: сб. науч. тр. Вып. 9. Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2005. С. 105-111.

5. Горшкова Т.А. Оценка возможности использования клевера ползучего (*Trifolium repens* L.) для биоиндикации антропогенного нарушения среды // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1. С. 69-73.

6. Нахаева В.И., Александрова Т.В., Рубцова А.В. Генетический полиморфизм в популяциях Trifolium repens, произрастающих в различных условиях окружающей среды г. Омска // Успехи современного естествознания. 2015. № 1. С. 49-53.

7. Сергеева В.В., Кресамова А.А., Андреева Ю.С. Trifolium repens (L.) ─ биоиндикатор загрязнения окружающей среды (на примере г. Краснодара) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 6-2. С. 18-26.

8. Инге-Вечтомов С.Г. Генетика с основами селекции: учебник для студентов высших учебных заведений. СПб.: Изд-во Н-Л, 2010. 718 с.

9. Моисейкина Л.Г., Турдуматов Б.М., Кузнецова О.В., Гладких М. Ю. Генетика и биометрия. Элиста: Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, 2017. 166 с.

10. Лозинская О.В., Русак Н.Ю., Мельнов С.Б. Оценка экологического состояния урбоценозов на основе полиморфизма листовой пластинки *Trifolium repens L.* // Экологический вестник. 2014. № 2. С. 102-108.

11. Седых Л.О., Новикова Е.А., Латышева Е. В., Фролова Л.А. Клевер ползучий как модельный объект при изучении внутриаллельного взаимодействия в серии множественных аллелей // Наука и Образование. 2020. Т. 3, № 2. URL: https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/1704/1703 (дата обращения: 15.05.2024).

12. Левицкий С.Н. Генетический полиморфизм в популяциях Trifolium repens, произрастающих в условиях различной антропогенной нагрузки территорий // Фундаментальные исследования. 2013. № 4-1. С. 108-111.

13. Сергеева В.В., Кресамова А.А., Андреева Ю.С. Trifolium repens (L.) ─ биоиндикатор загрязнения окружающей среды (на примере Г. Краснодара) //Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 6-2. С. 18-26.