

2022

Т. 14, № 3

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ



БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru



**АСПЕКТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ
ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ
УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЕВРОПЫ**

М.Д. Ерохова, М.А. Кузнецова
*ASPECTS OF INTEGRATED DISEASE
MANAGEMENT FOR POTATO UNDER
CURRENT CONDITIONS OF
SUSTAINABLE INTENSIFICATION
OF AGRICULTURE OF EUROPE*
M.D. Yerokhova, M.A. Kuznetsova

**ЭКОЛОГИЯ ПИТАНИЯ
СИВУЧА РЕПРОДУКТИВНОГО
ЛЕЖБИЩА У МЫСА КОЗЛОВА
(ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)**

**И.А. Усатов, В.Н. Бурканов,
А.М. Токранов**
*STELLER SEA LION FEEDING
ECOLOGY IN THE VICINITY
OF CAPE KOZLOVA ROOKERY,
EASTERN KAMCHATKA*
I.A. Usatov, V.N. Burkanov,
A.M. Tokranov

**ОТНОШЕНИЕ ПОДЗЕМНОЙ
БИОМАССЫ К НАДЗЕМНОЙ
ЛЕСОБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ
ЕВРАЗИИ В ГРАДИЕНТАХ
ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ**

В.А. Усольцев, И.С. Цепордей
*ROOT TO SHOOT BIOMASS RATIOS
OF FOREST-FORMING SPECIES ALONG
TEMPERATURE AND PRECIPITATION
GRADIENTS IN EURASIA*
V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey



СИВУЧ. ФОТО: ЮРИЙ СМИТЮК/ТАСС, TASS.RU



© ФОНД НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ «XXI ВЕК»
РОССИЙСКАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

БИОСФЕРА

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ
ПО ПРОБЛЕМАМ ПОЗНАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ БИОСФЕРЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ РЕСУРСОВ

Том 14, № 3

Санкт-Петербург
2022



BIOSPHERE

INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF BASIC AND APPLIED SCIENCES DEDICATED
TO COMPREHENSION AND PROTECTION OF THE BIOSPHERE AND TO USAGE OF RESOURCES THEREOF

Vol. 14, No. 3

Saint Petersburg
2022

© «XXI CENTURY» RESEARCH FOUNDATION
RUSSIAN ECOLOGICAL ACADEMY

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

EDITORIAL BOARD

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР EDITOR-IN-CHIEF
Г.С. РОЗЕНБЕРГ (ТОЛЬЯТТИ) G.S. ROZENBERG (TOGLIATTI)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF
А.Г. ГОЛУБЕВ (С.-ПЕТЕРБУРГ) A.G. GOLUBEV (SAINT PETERSBURG)

СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:**И.М. ТАТАРНИКОВА**

EDITORIAL SECRETARY:

I.M. TATARNIKOVA

ДИЗАЙН: Е.А. КОРЧАГИНА

DESIGN: YE.A. KOCHAGINA

ВЕРСТКА: Т.А. СЛАСЦЕВА

LAYOUT: T.A. SLASCHEVA

КОРРЕКТОР: Н.А. НАТАРОВА

PROOFREADING: N.A. NATAROVA

АДМИН САЙТА:**И.В. ПЕРЕСКОКОВ**

SITE ADMIN:

I.V.PERESKOKOV

В.Н. Большаков (Екатеринбург) V.N. Bolshakov (Ekaterinburg)**Л.Я. Боркин (С.-Петербург) L.Ja. Borkin (Saint Petersburg)****А.К. Бродский (С.-Петербург) A.K. Brodsky (Saint Petersburg)****Ю.С. Васильев (С.-Петербург) Yu.S. Vasilyev (Saint Petersburg)****Р.М. Вильфанд (Москва) R.M. Vilfand (Moscow)****М.Д. Голубовский (Окленд, США) M.D. Golubovsky (Oakland, CA, USA)****В.А. Драгавцев (С.-Петербург) V.A. Dragavtsev (Saint Petersburg)****М. Клявинш (Рига, Латвия) M. Klavins (Riga, Latvia)****Г.В. Жижин (С.-Петербург) G.V. Zhizhin (Saint Petersburg)****Г.А. Ивахненко (С.-Петербург) G.A. Ivakhnenko (Saint Petersburg)****Г.А. Исаченко (С.-Петербург) G.A. Isachenko (Saint Petersburg)****Н.А. Кашулин (Апатиты) N.A. Kashulin (Apatity)****С.В. Кривовичев (С.-Петербург) S.V. Krivovichev (Saint Petersburg)****Н.Н. Марфенин (Москва) N.N. Marfenin (Moscow)****М.А. Надпорожская (С.-Петербург) M.A. Nadporozhskaya (Saint Petersburg)****Ю.К. Новожилов (С.-Петербург) Yu.K. Novozhilov (Saint Petersburg)****Г.В. Осипов (Москва) G.V. Osipov (Moscow)****Я. Олексин (Курник, Польша) J. Oleksyn (Kornik, Poland)****В.А. Павлюшин (С.-Петербург) V.A. Pavliushin (Saint Petersburg)****К.М. Петров (С.-Петербург) K.M. Petrov (Saint Petersburg)****О.Н. Пугачев (С.-Петербург) O.N. Pugachev (Saint Petersburg)****Ю.А. Рахманин (Москва) Yu.A. Rakhmanin (Moscow)****В. Реген (Берлин, Германия) W. Regen (Berlin, Germany)****А.А. Редько (С.-Петербург) A.A. Redko (Saint Petersburg)****Г.А. Софронов (С.-Петербург) G.A. Sofronov (Saint Petersburg)****В.М. Тарбаева (С.-Петербург) V.M. Tarbayeva (Saint Petersburg)****И.А. Тихонович (С.-Петербург) I.A. Tikhonovich (Saint Petersburg)****Ю.Г. Тютюнник (Киев, Украина) Yu.G. Tyutyunnik (Kiev, Ukraine)****М.Д. Уфимцева (С.-Петербург) M.D. Ufimtseva (Saint Petersburg)****Г.Н. Фельдштейн (С.-Петербург) G.N. Feldstein (Saint Petersburg)****Е.Я. Фрисман (Биробиджан) Ye.Ya. Frisman (Birobijan)****О. Чертов (Бинген-на-Рейне, Германия) O. Chertov (Bingen am Rhein, Germany)****Л.П. Чурилов (С.-Петербург) L.P. Churilov (Saint Petersburg)****АДРЕС РЕДАКЦИИ:****197110, Санкт-Петербург,
Большая Разночинная ул., д. 28;****Тел./факс: (812) 415-41-61****Эл. почта: biosphaera@21mm.ru****Электронная версия:****http://21bs.ru (ISSN 2077-1460)**

POSTAL ADDRESS:

28 Bolshaya Raznochinnaya,
197110,
Saint Petersburg, Russia;

Phone/fax: +7 (812) 415-41-61;

E-mail: biosphaera@21mm.ru

Online version:

http://21bs.ru (ISSN 2077-1460)

СОДЕРЖАНИЕ

A3	СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS	175	МЕТОДОЛОГИЯ БИОГЕОСИСТЕМОТЕХНИКИ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ ПОЧВЫ (ОБЗОР)
	ТЕОРИЯ / THEORY		В.П. Калинин, А.П. Глинушкин, А.В. Свидзинский, Т.М. Минкина, Н.И. Будынков, О.Д. Филипчук, А.А. Околелова, Д.А. Макаренков
145	ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ РЯДЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ Г.С. Розенберг HOMOLOGICAL SERIES AND THEORETICAL ECOLOGY G.S. Rozenberg		BIOGEOSYSTEMIC METHODOLOGY FOR SOIL HEALTH AND PRODUCTIVITY: A REVIEW V.P. Kalinichenko, A.P. Glinushkin, A.V. Svidzinsky, T.M. Minkina, N.I. Budynkov, O.D. Filipchuk, A.A. Okolelova, D.A. Makarenkov
	ПРАКТИКА / PRACTICE		
151	МОНИТОРИНГ КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА СОВРЕМЕННОГО КОРМОПРОИЗВОДСТВА Д.А. Иванов MONITORING AS A SCIENTIFIC BASIS FOR MODERN FODDER PRODUCTION D.A. Ivanov	193	АГРОЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ – ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА И.А. Трофимов, Л.С. Трофимова, Е.П. Яковлева, А.А. Шпедт, Т.А. Асеева
156	ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ БИОЛОГИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ Л.П. Евстратова, Е.В. Николаева, Г.В. Евсеева THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF PERENNIAL GRASSES IN SOLVING THE PROBLEM OF BIOLOGIZATION OF AGRICULTURE IN THE REPUBLIC OF KARELIA L.P. Yevstratova, Ye.V. Nikolayeva, G.V. Yevseyeva		AGRO-LANDSCAPE AND ECOLOGICAL ZONING IS THE BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE IN EASTERN SIBERIA AND THE FAR EAST I.A. Trofimov, L.S. Trofimova, Ye.P. Yakovleva, A.A. Shpedt, T.A. Aseyeva
163	АСПЕКТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЕВРОПЫ М.Д. Ерохова, М.А. Кузнецова ASPECTS OF INTEGRATED DISEASE MANAGEMENT FOR POTATO UNDER CURRENT CONDITIONS OF SUSTAINABLE INTENSIFICATION OF AGRICULTURE OF EUROPE M.D. Yerokhova, M.A. Kuznetsova	200	ПРИРОДА / ПРИРОДА ЭКОЛОГИЯ ПИТАНИЯ СИВУЧА РЕПРОДУКТИВНОГО ЛЕЖБИЩА У МЫСА КОЗЛОВА (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА) И.А. Усатов, В.Н. Бурканов, А.М. Токранов STELLER SEA LION FEEDING ECOLOGY IN THE VICINITY OF CAPE KOZLOVA ROOKERY, EASTERN KAMCHATKA I.A. Usatov, V.N. Burkanov, A.M. Tokranov
163	АСПЕКТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЕВРОПЫ М.Д. Ерохова, М.А. Кузнецова ASPECTS OF INTEGRATED DISEASE MANAGEMENT FOR POTATO UNDER CURRENT CONDITIONS OF SUSTAINABLE INTENSIFICATION OF AGRICULTURE OF EUROPE M.D. Yerokhova, M.A. Kuznetsova	213	ОТНОШЕНИЕ ПОДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ К НАДЗЕМНОЙ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ В ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ В.А. Усольцев, И.С. Цепордей ROOT TO SHOOT BIOMASS RATIOS OF FOREST- FORMING SPECIES ALONG TEMPERATURE AND PRECIPITATION GRADIENTS IN EURASIA V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey
168	МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ: АНАЛИЗ, СРАВНЕНИЕ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ В.Н. Колупаева METHODS FOR STUDYING PESTICIDES MIGRATION: ANALYSIS, COMPARISON, AND RECOMMENDATIONS FOR USE IN ASSESSING THE RISK OF PESTICIDES IMPACT ON GROUNDWATER V.N. Kolupaeva	235	ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА, НЕГАТИВНО ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ХВОЙНЫХ РАСТЕНИЙ К ВРЕДИТЕЛЯМ И АФИЛЛОФОРОВЫМ ГРИБАМ С.Э. Некляев, Л.Г. Серая, Г.Е. Ларина

THE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF CURRENT CLIMATE CHANGES THAT NEGATIVELY AFFECT THE RESISTANCE OF CONIFEROUS PLANTS TO PESTS AND APHYLLOPHORALES FUNGI
S.E. Nekliayev, L.G. Seraya, G.Ye. Larina

НАСЛЕДИЕ / HERITAGE

245

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХИМИЧЕСКИХ МУТАГЕНОВ И ФЕНОТИПИЧЕСКИХ АКТИВАТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ, РАЗРАБОТАННЫЕ И.А. РАПОПОРТОМ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ)
Л.И. Вайсфельд, Н.А. Боме

THEORETICAL ASPECTS OF CHEMICAL MUTAGENS AND PHENOTYPIC GROWTH ACTIVATORS DEVELOPED BY I.A. RAPOPORT (A REVIEW)
L.Y. Weisfeld, N.A. Bome

СОБЫТИЯ И КОММЕНТАРИИ / EVENTS AND COMMENTS

254

ЛЕВ АНАТОЛЬЕВИЧ ЖИВОТОВСКИЙ (К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)
Г.О. Османова
LEV ANATOLYEVICH ZHIVOTOVSKY
(TO HIS 80TH BIRTHDAY)
G.O. Osmanova

ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ РЯДЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ¹

Г.С. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия

Эл. почта: genarozenberg@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; принята к печати 21.11.2022

Рассмотрены различные варианты параллельной изменчивости (гомологичности) экологических объектов разной природы. Показана принципиальная возможность использования закона гомологических рядов Н.И. Вавилова на уровне популяций (вариант периодической системы группового поведения популяций животных), сообществ (на примере как близких, так и отдаленных типов растительных сообществ) и теоретических конструкций современной экологии (схемы «соподчинения» основных понятий, которые призваны описать «ядро экологической теории» или «центральное понятийное звено»).

Ключевые слова: гомологическая изменчивость, популяция, сообщество видов, теоретические конструкции.

HOMOLOGICAL SERIES AND THEORETICAL ECOLOGY

G.S. Rozenberg

Institute of Ecology of Volga River Basin, Togliatti, Russia

Email: genarozenberg@yandex.ru

Different variants of the parallel variability (homology) of ecological objects referred to different classes are considered. Envisioned is an in-principle possibility of using the N.I. Vavilov's law of homological series at the levels of populations (a variant of the periodic system of group behavior of animal populations), communities (exemplified with both close and distant types of plant communities), and theoretical constructs of modern ecology (subordination schemes of the basic concepts that are meant to describe the «core of ecological theory» or «central conceptual link»).

Keywords: homological variability, population, community of species, theoretical constructs.

Понятие «гомология»² (сходство, единство или близость объектов) достаточно широко используется в естествознании – в неорганической химии (химические элементы главной подгруппы каждого вертикального столбца *Периодической системы Д.И. Менделеева*), в органической химии (вещества, сходные по химическим свойствам, – системы предельных и непредельных углеводородов), в сравнительной анатомии (органы, имеющие общее происхождение), при изучении изменчивости признаков культурных растений (*закон гомологических рядов наследственной изменчивости Н.И. Вавилова*)³. В молекулярной биологии и генетике можно усмотреть гомологии на уровне триплетов (состоят из четырех нуклеотидов), генов (семейства генов, несущих информацию о структуре родственных белков, имеют очень высокое сходство последовательностей триплетов), хромосом (одинаковый набор и по-

рядок генов) и генома (по геномному критерию родом считается группа близкородственных видов, имеющих специфический первичный геном или полиплоидный геном, состоящий из двух или более копий этого специфического первичного генома).

Гомологические ряды видов. Примеров такого рода рядов на основе параллелизма изменчивости имеется предостаточно – об этом пишет и сам Н.И. Вавилов [2, с. 52–53]; некоторые из этих примеров представлены в табл. 1. Не буду на этом долго останавливаться, так как такого рода исследования многочисленны и многообсуждаемы (см., например, [5, 6]).

Гомологические ряды популяций. Интересный вариант периодической системы группового поведения популяций животных был предложен Ю.К. Рошеским в 1978 году [12] и представлен в табл. 2. Обратим внимание на то, что эти пять уровней поведен-

¹ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3–6 октября 2022 года.

² Это понятие в биологию ввел британский зоолог и палеонтолог Ричард Оуэн (Richard Owen; 1804–1892) в 1840-е годы.

³ История появления этого закона кратко и познавательным изложена в статье В.Д. Есаковой [4].

ческой индивидуальности практически совпадают с пятью принципами усложняющегося поведения систем Б.С. Флейшмана [15, с. 22].

Ю.К. Рощевский [12] различает пять уровней поведенческой индивидуальности:

- нулевой (0) – усложнение химической организации, приведшее к возникновению на земле простейших организмов;
- кинезный (k) – конструкция моновидовых групп основана на врожденных внутриклеточных механизмах; это самый простой уровень поведенческой индивидуальности;
- инстинктивный (i) – безусловно рефлекторное поведение особей в группах с использованием сигнальных индивидуальных приспособлений; поведение таких животных «приводится» в соответствие с изменяющимися факторами среды путем естественного отбора;
- самообучаемый (d) – связан с высшей формой сигнальных приспособлений; животные самообучающегося уровня обладают перцептивной психикой;

- рассудочный (r) – высший уровень поведенческой индивидуальности; этого уровня достиг только человек.

В конструкции моновидовых групп Ю.К. Рощевский также различает пять уровней по степени усиления целостности:

- *протоинтегративный (P*, от греч. *protos* – первый) – целостность системы определяется только близостью составляющих ее особей (механическая целостность); пример – скопление муравьев-фуражиров возле только что налитого сиропа;
- *эквипотенциальный (A*, от лат. *aequus* – равный) – целостность определяется поведенческим группированием, все особи такой системы равноценны (миграционные стаи саранчи, шеренги муравьев-воинов, летящий за маткой рой пчел – примеры **Ai**, проходные строевые солдаты – пример **Ar**; **Ad** – подражание в прыжках в воду – «волна бегства» – прудовой лягушки *Rana esculenta*);
- *возвратно-дифференциальный (R*, от лат. *refero* – нести назад) – группировка особей осуществляется

Табл. 1

Примеры гомологических рядов, образованных биологическими видами*

Автор	Год	Объект изменчивости (параллельные ряды)
Фишер Э. (Fisher Ed.)	1896	Аксомицетовые и базидомицетовые грибы <i>Tuberaceae</i> и <i>Gastromycetes</i>
Шимкевич В.М. ⁴	1906	Морские членистоногие – пантоподы (морские пауки)
Соболев Д.Н.	1913	Ископаемые головоногие моллюски – гониотиты (<i>Goniatitida</i>)
Вавилов Н.И.	1920	Культурные и сорные растения
Виттенберг Г.Г.	1923	Трематоды сем. <i>Cyclocoelidae</i>
Догель В.А.	1923	Инфузории сем. <i>Ophryoscolecidae</i>
Терентьев П.В.	1923	Класс земноводных – <i>Amphibia</i>
Морозова-Водяницкая Н.В.	1925	Род зеленых водорослей <i>Pediastrum</i> Meyen
Шванвич Б.Н.	1926	Булавоусые чешуекрылые <i>Rhopalocera</i>
Добжанский Ф.Г. (Dobzhansky Th.)	1933	Жуки божьи коровки сем. <i>Coccinellidae</i>

* Ссылки приведены у Н.И. Вавилова (1967, с. 52–53).

Табл. 2

Вариант периодической системы группового поведения популяций

Уровень индивидуальности	Конструктивный уровень группы				
	P	A	R	O	I
Рассудочный (r)	Pr	Ar	Rr	Or	
Самообучаемый (d)	Pd	Ad	Rd	Od	
Инстинктивный (i)	Pi	Ai	Ri	Od	
Кинезный (k)	Pk	Ak	Rk	Ok	Ik
Нулевой (0)					Io

⁴ Систему, предложенную В.М. Шимкевичем (см. табл. 1) для пантопод, правильнее назвать решетчатой, а не периодической.

по социальным функциям; поведение разных функциональных групп различно и взаимозаменяемо (**Ri** – поведение муравьев в муравейнике, **Rd** – пожалуй, самый совершенный способ группового поведения животных);

- *облигатно-дифференцированный* (**O**, от лат. *obligatus* – обязательный) – каждая социальная общность индивидуумов выполняет только один комплекс поведенческих реакций, определяющих конструкцию группы, и не может выполнять никакой другой (вариант **Od** – семья, **Oi** – полиморфизм пчел, муравьев, термитов);

- *организменный* (**I**, от лат. *individuus* – неделимый) – элементы системы (особи) перестают функционировать как самостоятельные организмы, «высокая интегрированность системы входит в такое сильное противоречие с индивидуальностью ее элементов, что полностью блокирует всякую возможность проявления у них каких-либо поведенческих реакций» [12, с. 38].

Гомологические ряды сообществ [12, 13, 17] – синтаксоны (*единица систематики растительных сообществ. – Г.Р.*) как близких, так и отдаленных типов растительных сообществ, характеризуются параллельными рядами изменчивости флористического состава. «Свойства, присущие объектам, составляющим различные типы гомологических рядов, прослеживаются также и в растительности и отражающих ее разнообразие синтаксонах. В синтаксономии под общим планом строения мы будем понимать участие во флористическом составе близких синтаксонов одних и тех же групп диагностических видов, индицирующих определенный набор факторов среды. Группы диагностических видов в данном случае выступают в качестве однотипных, повторяющихся в разных синтаксонах и более простых по отношению ко всему флористическому составу синтаксонов элементов. Если в двух или более синтаксонах имеется не одна, а несколько повторяющихся групп видов, то изменчивость таких синтаксонов может быть представлена в

Табл. 3

Гомологические ряды изменчивости у трех ассоциаций сфагновых болот*

Ассоциация	<i>Sphagno-Rhynchosporum</i>							<i>Caricetum limosae</i>							<i>Caricetum lasiocarpae</i>				
	77	11	110	76	20	92	57	66	153	146	338	110	70	23	4	3	6	19	3
Число описаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Номер синтаксона																			
Диагностические виды ассоциаций и субассоциаций																			
<i>Rhynchospora alba</i>	V	V	V	V	V	V	V	II	I	II	II	II	II						
<i>Carex limosa</i>	I	IV	I	III	I	I	II	V	V	V	IV	V	V	I	I	II	I		
<i>Carex lasiocarpa</i>	I	I		I	I		II	II	I	II	I	II	II	V	V	V	V	V	V
<i>Sphagnum pulchrum</i>	V							V	I	I	I								
<i>Sphagnum lindbergii</i>	V							I	V	I									
<i>Sphagnum fallax</i>	V							I	I	V	I	I	V	II					
<i>Sphagnum majus</i>	I	I	V					III		II	II	III	I	V					
<i>Sphagnum cuspidatum</i>	III	I	I	I	III	II	I	I	I	I	V	I	I	I	V		I		
<i>Sphagnum balticum</i>	I	III	I	II	V	I			II	I	I	II	I	III		V	I		
<i>Sphagnum papillosum</i>	III	III	II	I	I	V	I	II	I	I	I	V	I	V					
<i>Sphagnum subsecundum</i>	I	I		I	I		V	I	I										
<i>Sphagnum angustifolium</i>														III			V		

* Примечание. Субассоциации: колонки 1, 8 – *sphagnetosum pulchri*; 2, 9 – *sph. lindbergii*; 3, 10 – *sph. fallacis*; 4, 15 – *sph. maji*; 5, 17 – *sph. baltici*; 6, 12, 18 – *sph. papilloso*; 7, 13 – *sph. subsecundi*; 11, 16 – *sph. cuspidati*; 19 – *sph. Angustifolii*; римские цифры – постоянство видов в синтаксонах: I – 1–20%; II – 21–40%; III – 41–60%; IV – 61–80% и V – 81–100%; штриховка – общее проективное покрытие: без штриховки – до 25%, далее – 26–50, 51–75 и более 75%.

виде рядов с параллельно меняющимся флористическим составом, которые мы будем называть гомологическими рядами изменчивости растительных сообществ» (Соломеш, 1995, с. 427).

В качестве примера (табл. 3) рассмотрим гомологические ряды изменчивости у трех ассоциаций сфагновых болот (две первые – из Западной Европы, последняя – из северо-западных районов России [14] класса Scheuchzerio-Caricetea, порядка Scheuchzerietalia Nordh. 1936, союзов Rhynchosporion albae Koch 1926 и Caricion lasiocarpae Van. Bergh. in Lebr. et al. 1949. Каждая из трех ассоциаций имеет сходный набор субассоциаций, выделяемых по доминированию сфагновых мхов и образующих параллельные ряды изменчивости. Представленный результат достаточно нагляден, и здесь прокомментируем только одно свойство гомологических рядов – прогностическую роль, то есть способность предсказывать существование новых, еще не описанных типов растительных сообществ.

Если в классификационной системе в одной из ассоциаций выявлен полный ряд изменчивости, следует ожидать, что и другие близкие к ней ассоциации будут иметь такие же ряды. Так, в сообществах олигомезотрофных болот (см. табл. 3) ассоциации *Caricetum limosae*, описанных в Центральной и Северо-Западной Европе [16], отсутствуют субассоциации (в таблице они отмечены пунктирным овалом) *sphagnetosum maji* и *shp. baltici*, а в ассоциации *Sphagno-Rhynchosporietum* – субассоциация *sph. cuspidati*. «Возникает вопрос: связано отсутствие этих субассоциаций с какими-либо экологическими или фитосоциологическими ограничениями, или объясняется неполнотой данных? Поиск сообществ для заполнения пустующих мест в данных рядах показал, что такие синтаксоны были описаны на северо-западе России и на Южном Урале. Основанием для прогноза служит предположение, что близкие синтаксоны подчинены одному закону преобразования» [14].

Заметим, что в синтаксономии с конца 80-х годов [7; 8, с. 158] используется понятие «рефрен» (*от фр.*

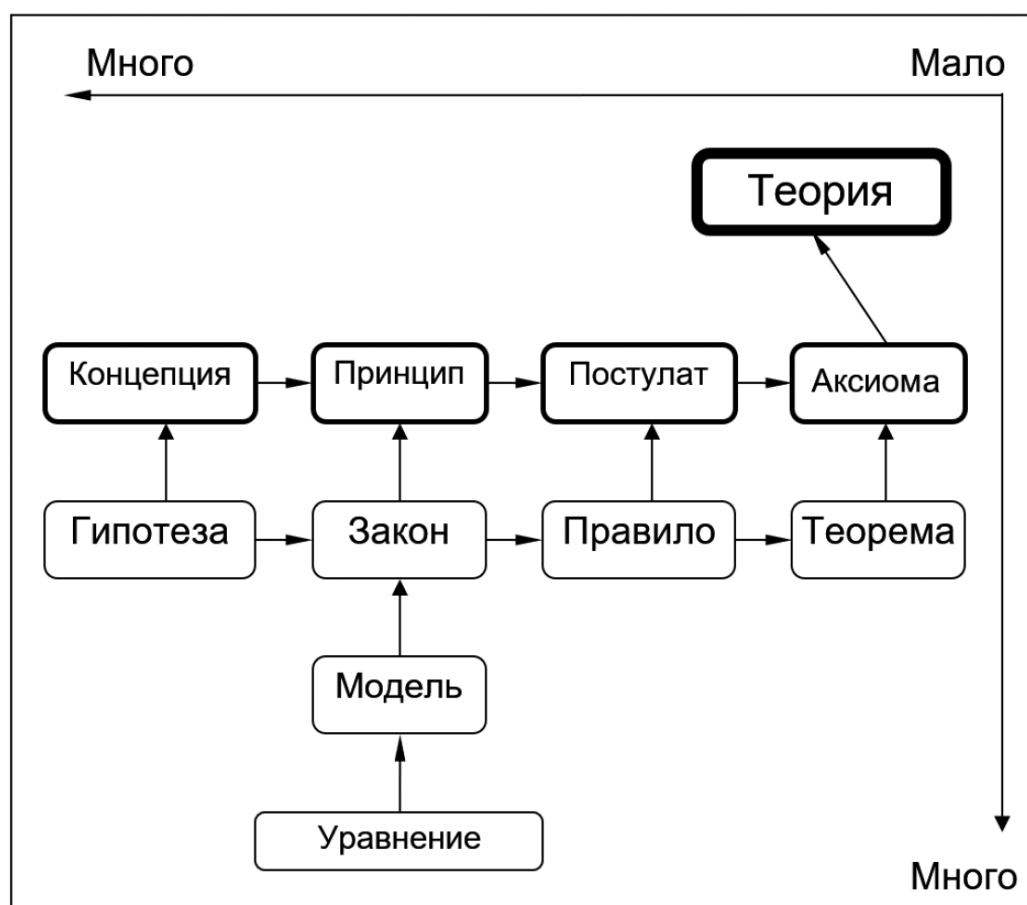


Рис. 1. Схема «сподчинения» основных понятий, которые призваны описать «ядро экологической теории» или «центральное понятийное звено»

refrain – припев) – повторяющиеся синтаксоны-аналоги в параллельных экологических рядах (например, ряды по отношению к фактору засоления при разных режимах увлажнения). В этом контексте рефрены являются полным аналогом гомологических рядов в понимании А.И. Соломеша [13, 14].

Зонально-ландшафтные гомологические ряды. Основными факторами географической зональности являются солнечная радиация и показатели количества влаги. Именно на этих параметрах основаны многочисленные индексы, оценивающие различия и сопоставляющие величины тепла и влаги в разных территориях. В настоящее время наибольшей популярностью пользуется *радиационный индекс сухости* М.И. Будыко, предложенный в 1948 году и имеющий, по мнению многих географов, наиболее общий биогеографический смысл. Имеет место концепция *периодической географической зональности Григорьева–Будыко* – со сменой физико-географических поясов аналогичные ландшафтные зоны и их некоторые общие свойства периодически повторяются. В частности, наблюдается повторение индекса Будыко [3].

Гомологические ряды общеэкологического плана. Фактически, такого рода рядами, по мнению Розенберга и соавт. [9–11], представляются схемы «соподчинения» основных понятий (рис. 1), которые призваны описать «ядро экологической теории» или «центральное понятийное звено».

Горизонтальные связи на этой схеме указывают направление возрастания «истинности» тех или иных положений теории, вертикальные – возрастание «важ-

ности», «главенства этих положений». Координатные оси указывают количественное соотношение различных понятий (очевидно, что частных уравнений будет значительно больше, чем принципов, а гипотез – больше, чем теорем). Все теоретические конструкции современной экологии составляют фундамент «теоретической экологии» и объединены в 12 основных концепций современной экологии [11].

«Обобщая сказанное, можно назвать следующие общие свойства объектов, формирующих гомологические ряды. Члены одного гомологического ряда:

- состоят из более простых однотипных элементов;
- имеют общий план строения;
- различаются между собой по составу, количеству или взаимному расположению этих элементов» (Соломеш, 1995, с. 427).

А закончить эти заметки о гомологических рядах в экологии (вид – популяция – сообщество – ландшафт – экологическая теория) хочется цитатой Н.И. Вавилова из его работы 1921 года: «Закон гомологических рядов не есть прокрустово ложе, ограничивающее изменчивость; наоборот, он вскрывает и вскрыл практически огромные возможности изменчивости, констатируя лишь, что в целом, при сопоставлении выполненных систем, путем исчерпывающего изучения всех звеньев, составляющих вид (как показано, и не только. – Г.Р.), ряды изменчивости, характерные для видов, проявляют не беспорядочный процесс, а определенные правильности, вытекающие по существу из эволюционного развития» (см. [2, с. 54–55]).

Литература

1. Вавилов НИ. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. Сельское и лесное хозяйство. 1921;(1-3):84-99.
2. Вавилов НИ. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. В кн. Вавилов НИ. Избранные труды. Т. 1. Л.: Наука; 1967. С.7-61.
3. Григорьев АА, Будыко МИ. О периодическом законе географической зональности. Доклады АН СССР. 1956;110(1):129-32.
4. Есакова ВД. Закон гомологических рядов. Известия ТСХА. 2012;(4):71-81.
5. Медников БМ. Закон гомологической изменчивости (К 60-летию со дня открытия Н.И. Вавиловым закона). М.: Знание; 1980.
6. Медников БМ. Еще раз о законе гомологических рядов в наследственной изменчивости. Природа. 1989;(7):27-35.
7. Мейен СВ. Введение в теорию стратиграфии. М.: Наука; 1989. 216 с.
8. Миркин БМ., Розенберг ГС, Наумова ЛГ. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука; 1989.
9. Розенберг ГС. К построению системы концепций современной экологии. Журн. общ. биол. 1991;52(3):422-40.
10. Розенберг ГС. Эколого-гомологические ряды разных масштабов. Изв. Самар. НЦ РАН. 2000;2(2):185-90.
11. Розенберг ГС, Мозговой ДП, Гелашвили ДБ. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии (Учебное пособие). Самара: Самарский НЦ РАН; 1999.
12. Рошчевский ЮК. Особенности группового поведения животных. Куйбышев: Куйбыш. гос. ун-т; 1978.

13. Соломеш АИ. Гомологические ряды изменчивости растительных сообществ: значение для синтаксономии. Докл. РАН. 1994;339(5):710-3.
14. Соломеш АИ. Гомологические ряды растительных сообществ: их природа и значение для классификации. Журн. общ. биол. 1995;56(4):425-35.
15. Флейшман БС. Основы системологии. М.: Радио и связь; 1982.
16. Dierssen K. Die wichtigsten Pflanzengesellschaften der Moore NW-Europas. Genève: Publ. Hors-Sér. Conservatoire Jard. Bot.; 1982.
17. Foucault B. Extention a la phytosociologie d'un concept botanique: la variation parallele. Candollea. 1994;49:121-7.
8. Mirkin BM, Rozenberg GS, Naumova LG. Slovar' Poniatiy i Terminov Sovremennoy Fitotseologii. [Dictionary of Concepts and Terms of Modern Phytocenology]. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
9. Rozenberg GS. [Towards the construction of a system of concepts of modern ecology]. Zhurnal Obshchey Biologii. 1991;52(3):422-40. (In Russ.)
10. Rozenberg GS. [Ecological-homological series of different scales]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2000;2(2):185-90. (In Russ.)
11. Rozenberg GS, Mozgovoy DP, Gelashvili DB. Ekologiya. Elementy Teoreticheskikh Konstruktsiy Sovremennoy Ekologii (Uchebnoye Posobiye). [Ecology. Elements of Theoretical Constructions of Modern Ecology (Tutotial)]. Samara: Samarskiy Nauchnyi Tsentr Rossiyskoy Akademii Nauk; 1999. (In Russ.)

References

1. Vavilov NI. [The law of homologous series in hereditary variability]. Selskoye i Lesnoye Khoziaystv. 1921;(1-3):84-99. (In Russ.)
2. Vavilov NI. [The law of homologous series in hereditary variability]. In: Vavilov NV. Izbrannyye Trudy. T. 1 [Selected Works. Vol. 1]. Leningrad: Nauka; 1967. P. 7-61. (In Russ.)
3. Grigoriev AA, Budyko MI. [On the periodic law of geographical zoning]. Doklady AN SSSR. 1956;110(1):129-32. (In Russ.)
4. Yesakov VD. [The Law of homologous series]. Izvestiya TSKhA. 2012;(4):71-81. (In Russ.)
5. Mednikov BM. [The law of homological variability (to the 60th anniversary of the discovery of the law by NI Vavilov). Moscow: Znaniye; 1980. (In Russ.)
6. Mednikov BM. [Once again about the law of homologous series in hereditary variability]. Priroda. 1989;(7):27-35. (In Russ.)
7. Meyen SV. Vvedeniye v Teoriyu Stratigrafii [Introduction to the Theory of Stratigraphy. Moscow: Nauka; 1989. 216 p. (In Russ.)
12. Roshevsky YuK. Osobennosti Gruppovogo Povedeniya Zhivontnykh. [Specific Features of Group Behavior of Animals]. Kuibyshev: Kuibyshevskiy Gosudarstvennyi Universitet; 1978. (In Russ.)
13. Solomesh AI. [Homological series of variability of plant communities: implications for syntaxonomy]. Doklady RAN. 1994;339(5):710-3. (In Russ.)
14. Solomesh AI. Homological series of plant communities: their nature and significance for classification. J. Total Biol. 1995;56(4):425-35. (In Russ.)
15. Fleishman BS. Osnovy Sistemologii. [Fundamentals of Systemology]. Moscow: Radio i Sviaz'; 1982. (In Russ.)
16. Dierssen K. Die wichtigsten Pflanzengesellschaften der Moore NW-Europas. Geneve: Publ. Hors-Sér. Conservatoire Jard. Bot.; 1982.
17. Foucault B. Extention a la phytosociologie d'un concept botanique: la variation parallele. Candollea. 1994;49:121-7.

МОНИТОРИНГ КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА СОВРЕМЕННОГО КОРМОПРОИЗВОДСТВА¹

Д.А. Иванов

Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», Москва, Россия

Эл. почта: volok234@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; принята к печати 21.11.2022

Представлены результаты мониторинга высоты сеяных трав в пределах агроландшафта в 2019–2021 годах на агроэкологическом полигоне, расположенном в пределах конечно-моренного холма. Целью работы являлось изучение влияния особенностей различных ландшафтных структур (склонов разной экспозиции, ландшафтных выделов в их пределах и пестроты почвенного покрова) на высоту растений. Исследования проводились на агроэкологической трансекте – поле, пересекающем основные ландшафтные позиции моренного холма, в 120 точках опробования, расположенных в 10 м друг от друга. Высота клевера лугового и тимopheевки луговой определялась 9 раз за время развития многолетнего травостоя с 1 по 3 год его жизни. Из результатов статистической обработки данных следует, что максимальное влияние на пространственную вариабельность высоты растений оказывает экспозиция склонов. Доказано значимое влияние ландшафтных факторов на временную динамику высоты только тимopheевки, тогда как особенности роста клевера не зависят от параметров рельефа и почв. На основе полученных результатов можно разработать систему адаптивного размещения травостоев в агроландшафте, позволяющую управлять количеством и качеством кормов.

Ключевые слова: многолетние травы, мониторинг, агроландшафт, статистический анализ.

MONITORING AS A SCIENTIFIC BASIS FOR MODERN FODDER PRODUCTION

D.A. Ivanov

Federal Research Centre V.V. Dokuchaev Soil Science Institute

Email: volok234@yandex.ru

Sown grasses stand height was monitored in an agricultural landscape in 2019–2021. The agroecological test plot was located within a terminal moraine hill. The aim of monitoring was to study the influence of the characteristic features of various landscape structures (differentially exposed slopes, landscape sections within them, and soil cover variegation) on plant height. The studies were carried out across an agroecological transect (a field crossing the main landscape positions of a moraine hill) at 120 sample points located 10 m apart. The height of red clover and timothy grass was determined nine times during the development of the perennial herbage over 1 to 3 years of its life. The statistical treatment of data revealed that the maximum effect on the spatial variability of plant height is produced by slope exposure. A significant influence of landscape factors has been proved only for the temporal dynamics of timothy grass height, whereas the features of clover growth do not depend on relief and soils parameters. Based on the results obtained, it is possible to develop a system of adaptive placement of grass stands in an agricultural landscape making it possible to manage the quantity and quality of fodder.

Keywords: perennial grasses, monitoring, agricultural landscape, statistical analysis.

Введение

Продукционный потенциал агроландшафтов с точки зрения кормопроизводства оценивается в основном урожайностью трав, которая во многом зависит от высоты сеяных компонентов травостоя [1–3]. Однако высота растений определяется многими факторами, часто независимыми друг от друга. Это приводит к ее значительной пространственно-временной пестроте, которая осложняет процесс определения истинного продукционного потенциала геосистемы [4]. Исследование характера этой пестроты позволяет устано-

вить основные закономерности формирования продукционной способности агрогеосистемы, факторы, ее определяющие, пределы ее колебаний и другие параметры, позволяющие характеризовать территорию по ее главному для человека критерию – возможности производить биомассу [5]. Знание особенностей пространственно-временной вариабельности высоты трав позволяет также разработать алгоритм ее прогнозирования во времени и пространстве, на основе которого могут быть созданы ландшафтно-мелиоративные системы земледелия различных территорий [6].

¹ По материалам сообщения на Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», Москва, 3–6 октября 2022 года.

Современным методом исследования пространственно-временной вариабельности высоты трав является ее долговременный мониторинг в пределах агроэкологических стационаров, наиболее полно выполняющийся в режиме ландшафтно-полевого опыта (ЛПО) [7]. Целью данной работы является выявление факторов природной среды, определяющих особенности пространственно-временной динамики высоты сеяных трав в различных ландшафтных и агроклиматических условиях в пределах агроэкологического стационара Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (ВНИИМЗ).

Методика

Долговременный мониторинг высоты клевера лугового (ВИК 7) и тимофеевки луговой (ВИК 9) клеверотимофеечных травостоев 1–3 годов жизни проводили в 2019–2021 годах на агроэкологическом стационаре ВНИИМЗ, расположенном в пределах конечно-моренного холма в 4 км к востоку от г. Тверь. Холм, относительной высотой 15 м, состоит из плоской вершины, северного пологого склона, крутизной 2–3°, южного более крутого склона (3–5°) и межхолмных депрессий (северной и южной) [7]. Почвообразующие породы на территории стационара – двучленные отложения. На южном склоне пахотные горизонты почв имеют песчаный и супесчаный гранулометрический состав, мощность легкого наноса местами превышает 1,5 м. На вершине и северном склоне пахотные горизонты сложены супесью и легким суглинком, мощность легкого кроющего наноса колеблется около 1 м, местами в межхолмной депрессии морена выходит на поверхность. В нашем опыте различия в экспозиции склонов определяет не только разницу в прогреве территории, но и неоднородность гранулометрического состава почв, что во многом определяется генезисом конечно-моренных образований [8].

Почвенный покров представлен вариацией-мозаикой дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв, развивающихся на двучленных отложениях различной мощности [9].

Исследования проводились на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – узком поле, пересекающем все микроландшафтные позиции конечно-моренного холма: транзитно-аккумулятивные агромикрорландшафты (АМЛ) нижних частей склонов и межхолмных депрессий, характеризующиеся аккумуляцией элементов питания из намывных и грунтовых вод; транзитные АМЛ, расположенные в центральных частях склонов, в которых господствует латеральный ток влаги; элювиально-транзитные местоположения верхних частей склонов, где наряду с латеральным током влаги присутствует ее вертикальное перемещение по почвенному профилю и элювиально-аккумулятивный ландшафт вершины, в пределах которого происходит вертикальное промы-

вание почвенного профиля и локальная аккумуляция влаги в микропонижениях (блюдцах).

Трансекта состоит из 7 продольных полос (шириной 7,2 м, длиной 1300 м), каждая из которых засеяна отдельной культурой зерноотрубного севооборота. Технология выращивания культуры однотипна по всей полосе. Изучаемый агроценоз был образован вследствие посева овса сорта «Аргамак» и трав клевера и тимофеевки 2 мая 2019 года. Покровный посев развивался без внесения удобрений, кроме одноразовой подкормки аммиачной селитрой в фазу кущения в дозе 1 ц/га. Следует отметить, что 5 июня 2019 года он был обработан гербицидами (Линтаплант) в дозе 1,5 л на гектар, 25 августа 2019 года произведена уборка овса. Учет высоты растений осуществлялся девять раз за вегетацию: 30 мая, 1 июля, 21 августа и 10 октября 2019 года, 1 июня, 24 июня и 13 октября 2020 года, а также 6 июня и 10 августа 2021 года в 120 точках, регулярно расположенных по трансекте на расстоянии 10 м одна от другой. Площадь учетной делянки – 1 м². Травостои 1 и 2 годов пользования эксплуатировались в одноукосном режиме без внесения удобрений.

Результаты мониторинга обрабатывали при использовании программного пакета STATISTICA 12. Применялась функция Partial least squares (PLS), которая позволяет оценить зависимость вариабельности высоты растений в каждый тур наблюдений от экологических условий разномасштабных структурных образований в пределах агроландшафта. Наиболее крупными частями в пределах конечно-моренной гряды являются склоны разной экспозиции. В пределах склонов располагаются агромикрорландшафты. Самыми мелкими структурными частями являются пятна почв разной степени заболоченности и микроструктурные отдельности почвенного покрова. Использовался также метод корреляционного анализа для выявления влияния агроклиматических условий и возраста травостоя на степень воздействия разнообразных ландшафтных структур на временную вариабельность высоты трав.

Результаты и обсуждение

Средняя, в пределах агроландшафта за все время наблюдений, высота клевера составила 24,6 см, а тимофеевки – 33,0 см, то есть сообщество многолетних трав после уборки покровной культуры (овса) представляет собой многоярусный агроценоз, в котором в первом ярусе доминирует тимофеевка, во втором – клевер, а в третьем – внедрившиеся виды. Высота тимофеевки колеблется в пространстве трансекты ($V = 49,8\%$), меньше, чем высота клевера (64,8%), что говорит о сильной зависимости бобовых, находящихся во втором ярусе, от степени освещенности и от конкуренции с другими растениями.

Усредненные, по турам обследования, результаты расчетов PLS показаны на рис. 1.

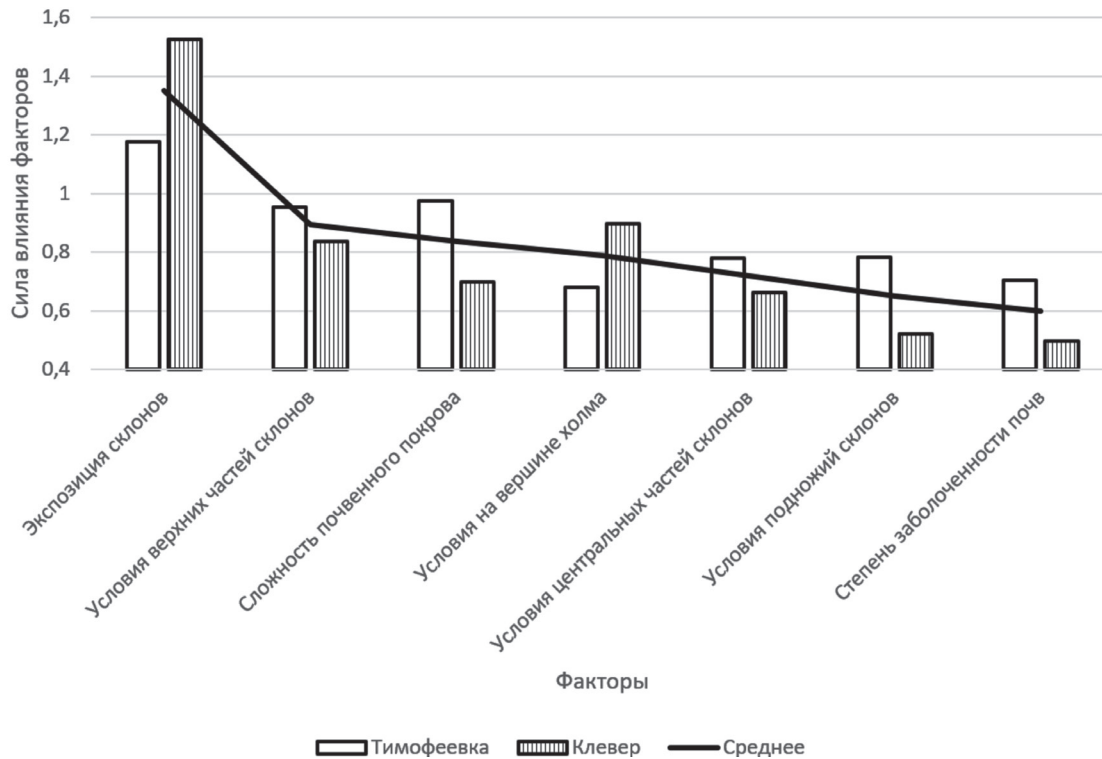


Рис. 1. Влияние факторов ландшафтной среды на пространственное колебание высоты сеяных трав

Характер пространственного изменения высоты сеяных трав в пределах агроландшафта моренного холма в наибольшей степени зависит от экспозиции склонов вследствие их сильных различий по освещенности и гранулометрическому составу почв, причем на высоту клевера этот структурный параметр ландшафта действует сильнее, чем на высоту тимофеевки, что объясняется дефицитом освещенности во втором ярусе агроценоза. Пространственная вариабельность микрорельефа, увлажнения и других характеристик почв в элювиально-аккумулятивном агромикрорландшафте вершины холма (в местоположении с наименьшим дефицитом освещенности) также сильнее влияет на пространственную пестроту высоты клевера. Другие изученные структурные параметры агроландшафта сильнее влияют на колебания в пространстве высоты тимофеевки. Значительно сильнее, по сравнению с клевером, тимофеевка откликается на характер чередования почв с различной заболоченностью, на вариабельность микрорельефа и свойств почв подножий склонов и на пестроту почвенного покрова в пределах всего агроландшафта.

Корреляционный анализ зависимости средней высоты растений от характера изменчивости во времени силы влияния на нее факторов, включенных в модель PLS, показал, что временная динамика высоты клевера

от него достоверно не зависит. Это можно объяснить тем, что на бобовые сильно влияют биогеоэцотические связи, которые заглушевают влияние эдафических факторов на процессы роста и развития. Временная динамика высоты тимофеевки, господствующей в первом ярусе агроценоза, значительно сильнее зависит от изменчивости влияния на нее экологических условий разнообразных частей агроландшафта. Коэффициенты корреляции между средними значениями высоты растения в каждом туре обследования и силой воздействия в это время на нее со стороны экологических условий на вершине холма ($r = -0,80$) превышают [0, 67] и могут считаться статистически значимыми.

Пузырьковая диаграмма, показывающая совокупное влияние экологических условий вершины, верхних и средних частей склонов на высоту тимофеевки, показана на рис. 2. Видно, что по мере увеличения степени влияния экологических условий местоположений на пространственное колебание высоты сеяных злаков, высота тимофеевки снижается (уменьшается размер пузырьков). Диаграммы показывают также, что влияние верхних частей склонов на высоту трав значительно сильнее, чем транзитов. Однако в диапазоне силы влияния транзитов большей 1 наблюдается резкое снижение высоты тимофеевки.

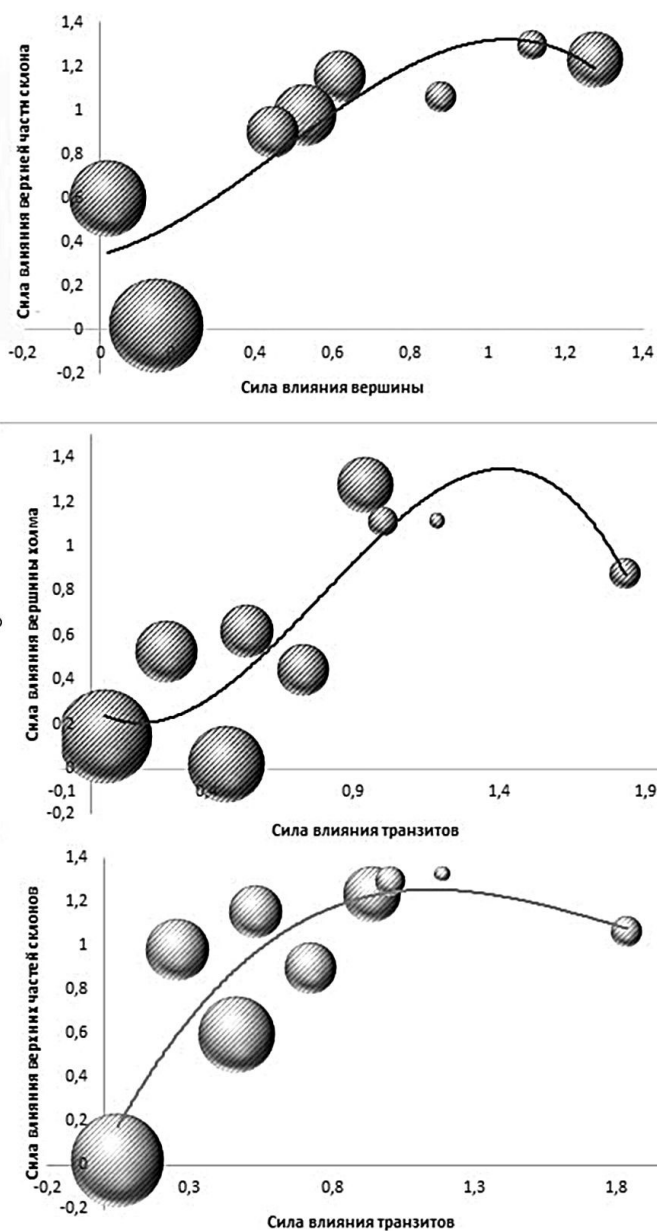


Рис. 2. Диаграмма зависимости высоты тимфеевки от экологических условий различных частей склонов

Изменение силы влияния экологических условий местоположений на высоту трав во времени обусловлено в основном динамикой агроклиматических условий, прежде всего влажности почв и непостоянства фитоценотических взаимосвязей в агроценозе, характер которых также во многом зависит от увлажнения. Другие эдафические факторы (пестрота почвенного покрова, микрорельеф и так далее) оста-

ются неизменными вследствие того, что расположение точек опробования в пространстве не меняется. Увеличение силы влияния экологических условий вершины, верхних и средних частей склонов холма на высоту трав наблюдается по мере уменьшения степени атмосферного увлажнения, когда почвы на верхних гипсометрических отметках высыхают, вследствие испарения, вертикального оттока по профилю, поверхностного и внутрипочвенного латерального сброса (самодренажа) влаги, гораздо быстрее, чем на подножьях. Нелинейный характер трендов на рис. 2 показывает, что в засушливых условиях наблюдается резкое снижение роста тимфеевки на склонах и вершине холма.

Выводы

Агроценоз клеверотимфеичного травостоя имеет трехъярусную структуру, в которой сеяные злаки образуют верхний ярус, бобовые - средний, а сорные виды – надземный. Конкуренция за освещенность и межвидовая борьба обуславливают большую пространственную вариабельность высоты клевера по сравнению с тимфеевкой.

Максимальное влияние на пространственную пестроту высоты сеяных трав оказывает экспозиция склонов, определяющая не только степень освещенности травостоя, но и гранулометрический состав почв. По сравнению с тимфеевкой, вариабельность высоты клевера значительно сильнее зависит от экспозиции склонов и экологических условий вершины холма. Тимфеевка сильнее откликается на степень заболоченности почв, общей пестроты их свойств, а также на экологические условия подножий.

Временная динамика высоты клевера не обнаруживает достоверных зависимостей от колебания экологических условий в пределах различных структурных подразделений агроландшафта, вследствие сильного влияния на нее разнообразных фитоценотических взаимодействий. Высота тимфеевки заметно зависит от временных колебаний состояния природной среды вершины холма, верхних и средних частей склонов, которая во многом обусловлена степенью увлажнения. Уменьшение количества осадков приводит к снижению высоты сеяных злаков в этих местоположениях.

Для управления высотой сеяных трав в режиме адаптивно-ландшафтного земледелия рекомендуется травостой с преобладанием клевера размещать на северных склонах холмов, в ареалах распространения относительно тяжелых почв, а для регуляции высоты тимфеевки нужно применять двойное регулирование водно-воздушного режима почв вершин и склонов холмов.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Кирюхин СВ, Зарьянова ЗА. Соотношение высоты травостоя различных видов трав с их кормовой продуктивностью при многолетнем использовании. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2021;38(2):115-22.
2. Касаткина НИ, Нелюбина ЖС. Особенности роста и развития многолетних трав на основе клевера лугового тетраплоидного. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019; 3(20):247-55.
3. Жумадилова ЖШ, Идрисова ДТ, Абдиева КМ, Таутенов ИА, Тодерич КН. Мелиоративная и кормовая ценность многолетних трав на засоленных почвах казахстанского Приаралья. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018;12(2):287-92.
4. Иванова НН, Капсамун АД, Амбросимова НН. Кормовая и средообразующая роль пастбищных травостоев в условиях осушаемых почв Центрального Нечерноземья. *Кормопроизводство*. 2019;(4):14-7.
5. Иванов ДА. Виды динамики состояния мелиорированных агроландшафтов. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018;4(65):4-18.
6. Иванов ДА, Ковалев НГ. Ландшафтно-мелиоративные системы земледелия (прикладная агрогеография). Тверь: Издатель А.Н. Кондратьев; 2017.
7. Иванов ДА, Корнеева ЕМ., Салихов РА, Петрова ЛИ, Пугачева ЛВ, Рублюк МВ. Создание ландшафтного полигона нового поколения. *Земледелие*. 1999;(6):15-6.
8. Борзов АА. Геоморфология Калининской области. *Ученые записки МГУ*. 1938;(23):6-54.
9. thereof]. *Zernobobovye i Krupianye Kultury*. 2021;38(2):115-22. (In Russ.)
2. Kasatkina NI, Neliubina ZhS. [Growth and development characteristics of perennial grass stands based on tetraploid clover]. *Agrarnaya Nauka Yevro-Severo-Vostoka*. 2019;20(3):247-55. (In Russ.)
3. Zhumadilova ZhSh, Idrisova DT, Abdiyeva KM, Tautenov IA, Toderich KN. [Ameliorative and fodder value of perennial grasses on saline soils of saline soils near Aral Sea in Kazakhstan]. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy*. 2018;12(2):287-92. (In Russ.)
4. Ivanova NN, Kapsamun AD, Ambrosimova NN. [The fodder and environmental roles of pasture grass stands under conditions of drainage soils of Central Non-Chernozem Area]. *Kormoproizvodstvo*. 2019;(4):14-7. (In Russ.)
5. Ivanov DA. [Types of dynamics of ameliorated landscape conditions]. *Agrarnaya Nauka Yevro-Severo-Vostoka*. 2018;65(4):4-18. (In Russ.)
6. Ivanov DA, Kovalev NG. *Landshaftno-Meliorativnye Sistemy Zemledeliya (Prikladnaya Agrogeografiya)*. Tver: Izdatel A.N. Kondratyev; 2017. (In Russ.)
7. Ivanov DA, Korneyeva YeM, Salikhov RA, Petrova LI, Pugacheva LV, Rubliuk MV. [Development of a new-generation landscape testing area]. *Zemledeliye*. 1999;(6):15-6. (In Russ.)
8. Borzov AA. [Geomorphology of Kaliniskaya Oblast]. *Uchenye Zapiski MGU*. 1938;(23):16-54. (In Russ.)
9. Bulgakov DS, Rukhovich DI, Shishkonakova EA, Vilchevskaya EV. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia. *Eurasian Soil Sci*. 2018;51(4): 448-59. (In Russ.)

Общий список литературы/List of references

1. Kiriukhin SV, Zaryanova ZA. [Relationships between the heights of different grass stands and their fodder yields during long-time use

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ БИОЛОГИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ¹

Л.П. Евстратова*, Е.В. Николаева, Г.В. Евсеева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия

* Эл. почта: levstratova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; принята к печати 11.11.2022

Одно из направлений биологизации земледелия в условиях Карелии – широкое использование многолетних трав, которые являются источником получения кормов и выполняют важную экологическую функцию. При двухкосном режиме скашивания зеленой массы изучены урожайность и протеиновая продуктивность одно- и трехвидовых травостоев с участием клевера лугового *Trifolium pratense*, козлятника восточного *Galega orientalis*, люцерны изменчивой *Medicago varia* Mart, костреца безостого *Bromus inermis*, тимофеевки луговой *Phleum pratense* без применения минеральных удобрений и при внесении $N_{45}P_{60}K_{90}$. Наибольшей продуктивностью (т/га) выделялся клевер (сухая масса – до 8,6, сырой протеин – 1,51), а также люцерна + клевер + тимофеевка (9,4 и 1,32 соответственно). Ежегодное весеннее использование минеральных удобрений вызвало несущественное увеличение урожайности биомассы клевера, что исключает необходимость их внесения. Для биологизации северного земледелия рекомендовано возделывание (два-три года) чистого травостоя клевера лугового, а также трехвидового агрофитоценоза с участием этого вида, люцерны изменчивой и тимофеевки луговой (шесть-семь лет). На пастбище бобово-злаковые многолетние травостои за пятилетний период накапливают в почве до 9,0 т/га укосных, корневых остатков с содержанием общего азота до 113,0 кг/га, чем способствуют небольшому увеличению содержания гумуса и снижению кислотности почвы.

Ключевые слова: одновидовые, смешанные многолетние травостои, продуктивность, биологизация земледелия.

THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF PERENNIAL GRASSES IN SOLVING THE PROBLEM OF BIOLOGIZATION OF AGRICULTURE IN THE REPUBLIC OF KARELIA

L.P. Yevstratova, Ye.V. Nikolayeva, G.V. Yevseyeva

Karelian Research Centre, the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Email: levstratova@yandex.ru

One of approaches to biologization of agriculture in Karelia is a widespread use of perennial grasses, which are a source of fodder and perform important ecological functions. We compared yield and protein productivity (tons/hectare) of one- and three-species grass stands including foxtail clover *Trifolium pratense*, eastern galega *Galega orientalis*, alfalfa *Medicago varia* Mart, smooth brome grass *Bromus inermis*, and timothy *Phleum pratense* grown without mineral fertilizers or with $N_{45}P_{60}K_{90}$ using the two-cut mode of mowing the green mass. Clover (dry weight up to 8.6, crude protein 1.51), as well as alfalfa + clover + timothy (9.4 and 1.32, respectively) featured the highest productivity. The annual spring application of mineral fertilizers caused but an insignificant increase in the yield of clover biomass, which suggests that there is no need for their application. For the biologization of a northern agriculture, it is recommended to cultivate (for two to three years) a pure grass stand of red clover, as well as a three-species stand including clover, alfalfa and timothy (six to seven years). In a pasture, legume-cereal perennial grass stands accumulate in the soil up to 9.0 ton/hectare of mowing root residues, total nitrogen content being up to 113.0 kg/ha over a five-year period, thus contributing to a slight increase in humus content and a decrease in soil acidity.

Keywords: single-species, mixed perennial herbage, productivity, biologization of agriculture.

¹ По материалам, представленным на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова и 300-летию Российской академии наук. Москва, 3–6 октября 2022 г.

Введение

Биологизация земледелия как составная часть программы экологизации сельского хозяйства [1] включает широкое применение органических удобрений, сидератов, а также увеличение в севообороте доли многолетних трав, которые чрезвычайно важны не только для формирования высокого урожая биомассы с целью заготовки кормов в повышении плодородия почв, но и для оптимизации их фитосанитарного состояния и активизации микробиологических процессов [2].

Многолетние травы имеют большое экологическое значение. Их почвозащитная роль заключается в формировании мощного травостоя, надежно укрывающего поверхностный слой от ливней и ветра, и хорошо развитой корневой системы, укрепляющей почву [3].

В условиях ограничения материальных и энергетических ресурсов возникает необходимость увеличения в структуре посевов удельного веса различных представителей семейства бобовых для реализации их биологического потенциала без затрат на приобретение дорогостоящих азотных удобрений [4, 5]. В севообороте бобовые культуры рассматриваются как мощный биологический фактор интенсификации земледелия и энергосбережения [2].

В мировой практике широко применяют смешанные посевы многолетних бобовых и злаковых трав, и при правильном подборе компонентов по видовому и сортовому составу они имеют существенное преимущество перед одновидовыми посевами [6, 7]. Поливидовые травостои характеризуются более высокими показателями урожайности и качества растительного сырья за счет лучшего использования питательных веществ почвы, влаги и солнечной энергии благодаря различному строению надземных органов и корневой системы растений [8–10]. В бобово-злаковом агроценозе возрастает суммарная площадь листьев, усиливается интенсивность фотосинтеза. С ее увеличением у бобового растения возрастает и азотфиксация, так как эти процессы находятся в тесной взаимосвязи [11]. Ценность бобовых и злаковых многолетних трав связана также с их комплексным воздействием на плодородие почвы [12]. Кроме накопления азота бобовыми растениями злаковый компонент одновременно создает и оставляет в почве большую массу хорошо разветвленной корневой системы. За 14-летний период использования наибольшую подземную массу (10,3–12,4 т/га сухого вещества) формируют люцерна изменчивая, а также кострцово-тимофеечный травостой на фоне внесения азотных удобрений [13]. Регулярное использование последних вызывает подкисление почвенного раствора, поэтому для оптимизации экологического состояния почв представляет интерес более широкое применение бобовых трав. И корни, и продукты их разложения положительно влияют на структуру почвы, ее гумусовый баланс и азотный

фонд [3]. Исследованиями С.Т. Эседуллаева [12] на дерново-подзолистых почвах Верхневолжья установлено, что укосно-корневые остатки (УКО) козлятника (16,6 т/га), люцерны (19,2) и клевера (10,2 т/га) богаты азотом. В одновидовом посеве первой культуры аккумулируется 315 кг/га общего и 236 кг/га симбиотического азота, второй – 338 и 187, третьей – 156 и 130 кг/га. Люцерна превосходила козлятник в накоплении УКО в 1,4, клевер – в 2,3 раза, симбиотического азота – в 1,25 и 2,27 раза соответственно.

В современном кормопроизводстве Карелии основная причина низкой доли бобовых компонентов в травостоях – преимущественное использование клевера лугового, отличающегося коротким периодом хозяйственного использования (2–3 года). Поэтому перспективно выращивание интродуцированных бобовых культур – люцерны изменчивой и козлятника восточного. Сорты люцерны нового поколения, созданные селекционерами Всероссийского научно-исследовательского института кормов им. В.Р. Вильямса, менее чувствительны к кислым почвам, сохраняются в травостоях значительно дольше – от 7 до 8 лет. На мелиорированных сельскохозяйственных угодьях Карельской государственной сельскохозяйственной опытной станции (2006–2019) травостой с включением *Medicago varia* Mart. (сорты Селена, Пастбищная 88, Агния, Таисия) обеспечили с 1 га урожайность сухой массы 7,6–8,5 т, сбор сырого протеина – 0,97–1,1 т по сравнению с клевером луговым – 6,1 и 0,64 соответственно [13].

Большой интерес представляет и козлятник восточный *Galega orientalis* Lam, который характеризуется высокой экологической пластичностью и кормовой ценностью. Преимущество выращивания заключается в его долголетию (12 лет и более). Однако эта культура медленно развивается в год посева и малопродуктивна в первые два года пользования. Хорошие результаты козлятник восточный показывает при возделывании его в смешанных травостоях с включением клевера лугового, который, наоборот, отличается высокой урожайностью в вышеуказанный период развития.

Конструирование высокопродуктивных и экологически устойчивых агрофитоценозов на основе широкого использования видов и сортов бобовых и злаковых многолетних трав, адаптированных к конкретным почвенно-климатическим условиям, является одним из элементов перехода к органическому сельскому хозяйству.

Цель работы – изучить продуктивность одновидовых, смешанных многолетних травостоев, выделить лучшие из них на естественном фоне питания и с внесением минеральных удобрений для обоснования эффективности отдельных элементов биологизации земледелия в условиях Карелии.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на базе лаборатории агротехнологий «Вилга» ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».

Объектом изучения явились одно- и трехвидовые травостой с использованием клевера лугового – *Trifolium pratense* L. (сорт Добряк), козлятника восточного – *G. orientalis* (Юбиляр), люцерны изменчивой – *M. varia* (Благодать), костреца безостого – *Bromopsis inermis* Leys. (Воронежский 17), тимофеевки луговой – *Phleum pratense* L. (Олонекская местная).

Опыт был заложен в 2018 году, посев рядовой, без покрова. Семена бобовых культур предварительно обрабатывали специфическими для каждого вида штаммами ризоторфина: 339⁶ (клевер), 415⁶ (люцерна), К-2 (козлятник). Считается, что нитрагинизация семян бобовых культур является резервом увеличения количества фиксированного азота [2].

Многолетние травы выращивали в естественных условиях (контроль) и ежегодного однократного внесения $N_{45}P_{60}K_{90}$ в начале весеннего отрастания трав.

Периоды вегетации растений (2018–2021) были неоднородны по метеорологическим показателям. В год посева благоприятный комплекс абиотических факторов среды способствовал росту и развитию многолетних трав. При двукратном отчуждении урожай зеленой массы растений в первой половине полевого сезона 2019 года формировался на фоне повышенной температуры воздуха и дефицита влаги, а во второй – недостаточной тепло- и избыточной влагообеспеченности. В последующие годы ресурсы тепла и влаги распределялись крайне неоднородно: оптимальные условия во время роста и развития надземной массы до первого укоса сочетались с недостатком влаги – до второго.

Почва опытного поля – дерново-подзолистая, легкосуглинистая. По показателю углерода в органическом веществе почвы содержание гумуса – 3,53%, подвижных форм калия – от 280 до 301 и фосфора – от 250 до 439 мг/кг, рН 5,2–5,3.

Исследования проведены по методикам полевого опыта [14]. Учетная площадь делянки – 10 кв. м, повторность четырехкратная, размещение вариантов в опыте – рандомизированное. Со второго года жизни растений двукратно учитывали урожай зеленой массы сплошным способом в начале бутонизации бобовых и фазе массового колошения злаковых трав. С учетом связи между содержанием сырого протеина в продукции растениеводства и азота в почве [15] в вариантах опыта рассчитывали протеиновую продуктивность одного гектара.

Биохимические показатели определяли на оборудовании Центра коллективного пользования КарНЦ РАН (спектрофотометр СФ-2000, атомно-абсорбционный спектрофотометр АА-7000, потенциометр Анион

4100, весы Sartorius CP1245). Обработку экспериментальных данных проводили на персональном компьютере с использованием программного пакета Excel.

Результаты и обсуждение

Урожайность надземной вегетативной массы многолетних трав является интегральным показателем, зависящим от комплекса абиотических факторов среды, биологических особенностей компонентов моно- и поливидовых травостоев, способности бобовых культур к азотфиксации, фона питания растений и др. Минеральные удобрения повышают фотосинтетическую активность растений, улучшают их рост и развитие. Злаковые травы наиболее отзывчивы на внесение азотных, а бобовые – фосфорных и калийных удобрений. Фосфор как составная часть АТФ участвует в азотфиксации атмосферного азота. Калий способствует передвижению углеводов из листьев к расположенным на корневой системе ризобияльным клубенькам, увеличивая азотфиксирующую способность бактерий. В процессе аккумуляции азота из воздуха происходит его накопление в биомассе растений и почве [16].

В первый год пользования трав среди бобовых представителей наибольшей интенсивностью роста, фитocenотической активностью и урожайностью сухой массы характеризовался клевер луговой (табл. 1).

На фоне использования удобрений урожай кормовой массы за два укоса существенно превышал в одновидовых травостоях *G. orientalis*, *M. varia*, *B. inermis*, а также клеверо-тимофеечных травосмесей с участием одного из последних видов, в основном, за счет *T. pratense*. Наиболее высокая протеиновая продуктивность с гектара (табл. 2) установлена в одновидовом посеве клевера лугового, а также комбинированных травостоях с добавлением в клеверо-тимофеечную смесь козлятника восточного или люцерны изменчивой. Полученные данные согласуются с выводами Т.И. Володиной с соавт. [15] о высоком сборе протеина при возделывании бобовых и злаковых многолетних трав на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, особенно на фоне применения удобрений.

Во второй год пользования среди одновидовых травостоев по урожайности за два укоса выделился клевер луговой на фоне $N_{45}P_{60}K_{90}$, однако прибавка от этого агроприема недостоверна. Внесение удобрений оказало существенное влияние на формирование остальных чистых посевов. С улучшением режима питания смешанных агроценозов высокие значения продуктивности, достоверно превышающие показатели контроля, получены в варианте люцерна + клевер + тимофеевка. В других гетерогенных травостоях урожай приближался к уровню одновидового посева клевера лугового. По протеиновой продуктивности независимо от фона питания выделился травостой *T. pratense*.

Урожайность сухой биомассы моно- и гетерогенных многолетних агроценозов на разном фоне питания (2019–2021), т/га

Видовой состав трав	Фон**	Год пользования								
		первый			второй			третий		
		1-й укос	2-й укос	за два укоса	1-й укос	2-й укос	за два укоса	1-й укос	2-й укос	за два укоса
Козлятник восточный	1	1,2	1,2	2,4	4,0	2,6	6,6	3,7	2,4	6,1
	2	3,6*	1,5	5,1*	5,3*	2,9	8,2*	4,1	2,1	6,2
Клевер луговой	1	3,4	3,5	6,9	3,8	4,5	8,3	3,6	3,2	6,8
	2	5,5*	2,9	8,3	4,9*	3,7*	8,6	4,2	2,1	6,3
Люцерна изменчивая	1	1,5	0,8	2,3	2,2	1,5	3,7	3,1	2,6	5,7
	2	3,3*	0,9	4,2*	4,2*	1,8	6,0*	4,4	2,8	7,2
Тимофеевка луговая	1	2,6	0,6	3,2	3,3	–	3,3	2,9	–	2,9
	2	3,7	0,8	4,5	5,9*	–	5,9*	5,1	–	5,1
Кострец безостый	1	2,6	1,2	3,8	3,6	1,2	4,8	2,5	1,4	3,9
	2	4,6*	2,0	6,6*	4,8*	1,6	6,4*	4,4	1,5	5,9
Козлятник + клевер + тимофеевка	1	3,4	2,8	6,2	4,6	3,4	8,0	4,8	2,8	7,6
	2	5,5*	3,0	8,5*	6,1*	2,8*	8,9	6,9	2,1	9,0
Козлятник + клевер + кострец	1	4,3	3,3	7,6	4,7	3,7	8,4	4,4	2,8	7,2
	2	5,4	2,1*	7,5	4,5	3,3	7,8	5,6	2,5	8,1
Люцерна + клевер + тимофеевка	1	4,2	2,9	7,1	4,4	3,4	7,8	4,7	2,7	7,4
	2	6,7*	2,7	9,4*	5,6*	3,6	9,2*	5,9	2,4	8,3
Люцерна + клевер + кострец	1	4,2	3,4	7,6	4,9	3,7	8,6	4,8	2,8	7,6
	2	5,4	3,2	8,6	5,2	3,5	8,7	5,2	2,8	8,0
НСР ₀₅ для фона		1,6	1,1	1,8	0,9	0,5	1,0	–	–	–

* Достоверные отклонения от контроля на 5%-м уровне значимости.

** 1 – без внесения удобрений (контроль), 2 – N₄₅P₆₀K₉₀.

Несмотря на колебания погодных условий третьего года пользования трав (2021) использование удобрений положительно повлияло на ростовые процессы только злаковых видов. Однако ко второму укосу тимофеевка луговая не достигла оптимальных линейных показателей для скашивания травостоя. Максимальную продуктивность одного гектара среди одновидовых посевов обеспечил клевер луговой без удобрений, а поливидовых – козлятник + клевер + тимофеевка на фоне внесения удобрений. По содержанию сырого протеина в растительной надземной массе одновидовые агроценозы бобовых превосходили злаковые.

Значение многолетних трав для улучшения почвы показано нами на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. В течение пяти лет выращивания бобово-злаковых многолетних травостоев на пастбищных угодьях накопилось 7,1–9,0 т/га укосных и корневых остатков при содержании общего азота – 83,4–113,0 кг/га. Эти агрофитоценозы способствова-

ли также увеличению содержания гумуса на 0,4% и снижению кислотности почвенного раствора на 0,2 единицы рН_{сол}.

Выводы

В условиях Карелии среди одновидовых посевов многолетних трав с учетом уровня питания растений максимальной продуктивностью характеризуется клевер луговой (сухой массы до 8,3–8,6 т/га, сырого протеина 1,43–1,51 т/га), а среди бобово-злаковых травостоев – люцерна + клевер + тимофеевка (7,8–9,4 т/га, 1,10–1,32 т/га, соответственно). Применение N₄₅P₆₀K₉₀ не оказало существенного влияния на урожай сухой массы клевера лугового, что свидетельствует о нерациональности использования минеральных удобрений при выращивании этой культуры в чистом виде. Интродуцированные виды – козлятник восточный и люцерна изменчивая – в первые годы жизни растений уступают по продуктивности клеверу луговому. Ввиду этого, при конструирова-

Протеиновая продуктивность одновидовых и смешанных агроценозов (2019–2021), т/га

Видовой состав трав	Фон*	Год пользования								
		первый			второй			третий		
		1-й укос	2-й укос	Два укоса	1-й укос	2-й укос	Два укоса	1-й укос	2-й укос	Два укоса
Козлятник восточный	1	0,21	0,23	0,44	0,71	0,53	1,24	0,72	0,36	1,08
	2	0,58	0,32	0,90	0,83	0,57	1,40	0,82	0,28	1,10
Клевер луговой	1	0,54	0,74	1,28	0,72	0,71	1,43	0,55	0,69	1,24
	2	0,83	0,63	1,46	0,74	0,77	1,51	0,72	0,34	1,06
Люцерна изменчивая	1	0,15	0,12	0,27	0,23	0,29	0,52	0,38	0,39	0,77
	2	0,37	0,13	0,50	0,35	0,36	0,71	0,59	0,31	0,90
Тимофеевка луговая	1	0,19	0,05	0,24	0,17	–	0,17	0,22	–	0,22
	2	0,26	0,07	0,33	0,37	–	0,37	0,43	–	0,43
Кострец безостый	1	0,21	0,1	0,31	0,26	0,09	0,35	0,16	0,10	0,26
	2	0,51	0,17	0,68	0,36	0,07	0,43	0,29	0,06	0,35
Козлятник + клевер + тимофеевка	1	0,49	0,56	1,05	0,55	0,42	0,97	0,59	0,32	0,91
	2	0,75	0,54	1,29	0,65	0,31	0,96	0,73	0,32	1,05
Козлятник + клевер + кострец	1	0,55	0,53	1,08	0,61	0,62	1,23	0,46	0,43	0,89
	2	0,71	0,34	1,05	0,59	0,41	1,00	0,62	0,21	0,83
Люцерна + клевер + тимофеевка	1	0,49	0,61	1,10	0,36	0,46	0,82	0,67	0,37	1,04
	2	0,73	0,47	1,20	0,68	0,64	1,32	0,63	0,24	0,87
Люцерна + клевер + кострец	1	0,44	0,50	0,94	0,49	0,49	0,98	0,59	0,27	0,86
	2	0,56	0,53	1,09	0,52	0,46	0,98	0,47	0,18	0,65

* 1 – без внесения удобрений (контроль); 2 – $N_{45}P_{60}K_{90}$.

нии высокопродуктивных и экологически устойчивых агроценозов целесообразно в состав травосмеси включать злаковый и два бобовых компонента, различающихся по продуктивному долголетию, качеству растительного сырья и способности повышать почвенное плодородие. В решении вопросов биологизации северного земледелия перспективно выращивание одновидового травостоя клевера лугового до трех лет, а также травосмеси с добавлением к нему люцерны изменчивой и тимофеевки луговой для увеличения продолжительности использования трав до семи лет.

В агроклиматических условиях республики бобово-злаковые многолетние травостои на пастбище за пять лет накапливают 7,1–9,0 т/га укосных, корневых остатков, при содержании общего азота 83,4–113,0 кг/га, способствуют небольшому увеличению содержания гумуса и подщелачиванию почвенного раствора.

Материалы подготовлены в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы). Код (шифр) научной темы FMEN – 2022-0013, Рег. № НИОКТР 122031000202-1.

Литература

Русскоязычная литература

1. Кирюшин ВИ. Проблема экологизации земледелия в России (Белгородская модель). Достижения науки и техники АПК. 2012;(12):3-9.
2. Цветков МЛ, Лысенко ЛМ. Элементы биологизации в земледелии Алтайского края: монография. Барнаул: АЗБУКА; 2019.
3. Борисова ЕЕ. Роль в севооборотах многолетних трав. Вестник НГИЭИ. 2015;(7):12-9.
4. Исаков АН, Лукашов ВН. Роль бобовых трав и бобово-злаковых травосмесей в создании кормовой базы и биологизации земледелия. Природообустройство. 2018;(3):105-9. DOI 10.26897/1997-6011/2018-3-105-109.

5. Павлова СА, Пестерева ЕС, Захарова ГЕ, Кузьмина АВ. Возделывание многолетних бобово-злаковых травосмесей на зеленый конвейер в условиях Центральной Якутии. *Аграрная наука*. 2019;(2):64-6. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-322-2-64-66.
6. Бобылев ВС. Факторы, влияющие на подбор компонентов травосмеси многолетних трав. *Вестник Курской ГСХА*. 2021;(9):41-2.
7. Дьяченко ВВ, Дронов АВ, Дьяченко ОВ. Высокоурожайные бобово-мятликовые травосмеси для агроклиматических условий юго-западной части Центрального региона. *Земледелие*. 2016;(7):31-5.
8. Вагунин ДА, Иванова НН, Амбросимова НН. Многолетние травостои на основе новых сортов козлятника восточного и интенсивных видов злаковых трав. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019;(6):97-100. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.021>.
9. Лукашов ВН, Исаков АН. Продуктивное долголетие козлятника восточного и травосмесей с его участием. *Земледелие*. 2017;2:26-8.
10. Богатырева ЕВ, Корельская ЛА, Фоменко ПА, Щекутыева НА. Продуктивность люцерны изменчивой в одновидовых и смешанных посевах и сравнительная оценка силоса из люцерны в чистом виде и в смеси с бобовыми и злаковыми травами в условиях Вологодской области. *Молочнохозяйственный вестник*. 2019;4:8-28.
11. Кононов АС. Физиология процесса азотфиксации и фотосинтез в гетерогенном посеве. *Бюллетень Брянского отделения русского ботанического общества*. 2013;1:42-50.
12. Эседуллаев СТ. Влияние одновидовых и смешанных посевов многолетних трав на плодородие дерново-подзолистой почвы и продуктивность последующих культур. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019;6:29-35.
13. Смирнов СН, Евстратова ЛП, Евсеева ГВ. Возделывание люцерны изменчивой (*Medicago varia* Mart.) в составе бобово-злаковых травосмесей в условиях Европейского Севера. *Кормопроизводство*. 2018;11:23-6.
14. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. Москва; 1997.
15. Володина ТИ, Чухина ОВ, Демидова АИ. Потребление азота, сбор протеина культурами севооборота под влиянием минеральной и органических систем удобрений. *Молочнохозяйственный вестник*. 2019;4(36):31-45.
16. Козырева МЮ, Басиева ЛЖ. Формирование симбиотического аппарата люцерны в зависимости от типа азотного питания. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020; 15.1(57):10-6. DOI 10.12737/2073-0462-2020-10-16.
- Общий список литературы/List of references**
1. Kiryushin VI. [The problem of ecologization of agriculture in Russia (Belgorod model)]. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*. 2012;(12):3-9. (In Russ.)
 2. Tsvetkov ML, Lysenko LM. *Elementy Biologizatsii v Zemledelii Altayskogo Kraya*. [Elements of Biologization of Agriculture in Altai Territory]. Barnaul: Azbuka; 2019. (In Russ.)
 3. Borisova YeYe. [Role of perennial grasses in crop rotations]. *Vestnik NGIEI*. 2015;(7):12-9. (In Russ.)
 4. Isakov AN, Lukashov VN. [The role of legumes and legume-cereal grass mixtures in the creation of a fodder base and biologization of agriculture]. *Prirodoobustroystvo*. 2018;(3):105-9 DOI 10.26897/1997-6011/2018-3-105-109. (In Russ.)
 5. Pavlova SA, Pestereva YeS, Zakharova GYe, Kuzmina AV. [Cultivation of perennial legume-cereal grass mixtures on a green conveyor in the conditions of Central Yakutia]. *Agrarnaya Nauka*. 2019;(2):64-6 DOI: 10.32634/0869-8155-2019-322-2-64-66. (In Russ.)
 6. Bobylev VS. [Factors influencing the selection of components of the herb mixture of perennial herbs]. *Vestnik Kurskoy GSKhA*. 2021;(9):41-2. (In Russ.)
 7. Dyachenko VV, Dronov AV, Dyachenko OV. [High-yielding bean-bluegrass grass mixtures for agro-climatic conditions of the southwestern part of the Central region]. *Zemledeliye*. 2016;(7):31-5. (In Russ.)
 8. Vagunin DA, Ivanova NN, Ambrosimova NN. [Perennial herbage based on new varieties of Eastern goat and intensive types of grasses]. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal*. 2019;(6):97-100. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.021>. (In Russ.)
 9. Lukashov VN, Isakov AN. [Productive longevity of goat's rue and grass mixtures with its participation]. *Zemledeliye*. 2017;2:26-8. (In Russ.)
 10. Bogatyreva YeV, Korelskaya LA, Fomenko PA, Shekutyeva NA. [The productivity of variable alfalfa in single-species and mixed crops and a comparative assessment of silage from alfalfa in its pure form and mixed with legumes and cereal grasses in the conditions of the Vologda region]. *Molochnokhoziaystvennyi Vestnik*. 2019;4:8-28. (In Russ.)
 11. Kononov AS. [Physiology of the process of nitrogen fixation and photosynthesis in heterogeneous

- sowing]. Biulleten Brianskogo Otdeleniya Russkogo Botanicheskogo Obschestva. 2013;1:42-50. (In Russ.)
12. Esedullayev ST. [Influence of single-species and mixed crops of perennial grasses on the fertility of soddy-podzolic soil and the productivity of subsequent crops]. Vestnik Kurskoy Gosudarstvennoy Selskokhoziaystvennoy Akademii. 2019;6:29-35. (In Russ.)
 13. Smirnov SN, Yevstratova LP, Yevseyeva GV. Cultivation of alfalfa (*Medicago varia* Mart.) as part of legume-grass mixtures in the conditions of the European North. Kormoproizvodstvo. 2018;11:23-6. (In Russ.)
 14. Metodicheskiye Ukazaniya po Provedeniyu Polevykh Rabot s Kormovymi Kulturami. [Guidelines for Conducting Field Experiments with Fodder Crops]. Moscow; 1997. (In Russ.)
 15. Volodina TI, Chukhina OV, Demidova AI. [Nitrogen consumption, protein harvesting by crop rotation under the influence of mineral and organic fertilizer systems]. Molochnokhoziaystvennyi Vestnik. 2019;4(36):31-45. (In Russ.)
 16. Kozyreva MYu, Basiyeva LZh. [Formation of the symbiotic apparatus of alfalfa depending on the type of nitrogen nutrition]. Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2020;15.1(57):10-6. DOI 10.12737/2073-0462-2020-10-16. (In Russ.)



АСПЕКТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЕВРОПЫ¹

М.Д. Ерохова, М.А. Кузнецова,

ФБГНУ Всероссийский НИИ фитопатологии, Большие Вяземы, Московская область, Россия

Эл. почта: maria.erokhova@gmail.com; mari.kuznetsova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; принята к печати 25.11.2022

В последнее время в европейских странах ужесточается нормативная база, регулирующая применение средств защиты сельскохозяйственных культур, в том числе картофеля; сокращается ассортимент разрешенных пестицидов (особенно токсичных пестицидов I и II класса ВОЗ), а также уменьшается максимально допустимые остаточные количества пестицидов в растениеводческой продукции. В связи с этим в ЕС и Великобритании начала широко использоваться интегрированная защита растений от вредных организмов, позволяющая постепенно снизить уровень инфекции в почве и растениях при меньшем числе обработок и уменьшении доз средств защиты растений, особенно при небольшой степени развития заболеваний, что позволяет получать растениеводческую продукцию с меньшим содержанием остаточных количеств пестицидов. Базой для широкого использования интегрированной защиты в европейских странах служат национальные планы интегрированной защиты. В статье приводится информация об использовании интегрированной защиты картофеля от болезней.

Ключевые слова: интегрированная защита растений от болезней, картофель, севооборот, покровная культура, технология смешанного посева, биофумигация, здоровье почвы, здоровье растений.

ASPECTS OF INTEGRATED DISEASE MANAGEMENT FOR POTATO UNDER CURRENT CONDITIONS OF SUSTAINABLE INTENSIFICATION OF AGRICULTURE OF EUROPE

M.D. Yerokhova, M.A. Kuznetsova,

All-Russian Research Institute of Plant Pathology, Bolshie Viazemy, Moscow Region, Russia

Email: maria.erokhova@gmail.com, Email: mari.kuznetsova@gmail.com

Regulations related to application of plant protection products (PPPs) to crops, especially for potatoes, are becoming stricter in European countries, the range of authorized pesticides (especially toxic WHO classes I and II pesticides) as well as their maximum residual levels (MRLs) in food products being reduced. Due to this, the integrated pest management (IPM) approach is increasingly used in the EU and the UK, making it possible to reduce infection levels in soils and plants whilst providing for a decrease in the sprays and dosages of PPPs, especially when inoculum density is low. As a result, the residual levels of pesticides are reduced in food products. The use of IPM in the EU is based on national IPM plans (national action plans). The present paper provides information on IPM implementation to potatoes.

Keywords: integrated pest management, potato, crop rotation, cover crop, intercropping, biofumigation, organic matter, soil health, plant health.

В последние годы в европейских странах на основе результатов анализа рисков, выполненного экспертами Европейского агентства по безопасности продуктов питания EFSA, происходят уменьшение максимально разрешенных остаточных количеств пестицидов (мг/кг) в растениеводческой продукции и отзыв разрешений на применение многих средств защиты растений в целях обеспечения населения продуктами питания с меньшим количеством остаточных количеств химических препаратов, а также для большей заботы об окружающей среде и здоровье почв². В ближайшее десяти-

летие в Европе ожидается еще большее снижение ассортимента разрешенных препаратов для защиты растений из-за еще большего ужесточения законодательства, регламентирующего их использование в ЕС. Так было отозвано разрешение на применение многих фунгицидов: фенамидона с 2018 г., хлороталонила с 2019 г., манкоцеба с 2021 г., фамоксадона с 2021 г. и инсектицидов зета-циперметрина – с 2020 г., альфа-циперметрина – с 2021 г.² Стоит отметить, что в Европе при выращивании органической продукции стали в качестве фунгицидов и бактерицидов более широко

¹ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3–6 октября 2022 года.

² EU (2021). EU Pesticides Database (https://ec.europa.eu/food/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en).

применять препараты на основе меди, несмотря на то что в последнее время обнаружена их токсичность для многих почвенных микроорганизмов, земляных червей и водной микробиоты, что в долгосрочной перспективе сказывается на плодородии почвы. Несмотря на это, многие препараты меди (гидроксид меди, оксид меди, оксихлорид меди) пока имеют разрешение на использование до 2025 г. в ЕС².

В связи с принятыми ограничениями в области применения средств защиты растений существующая стратегия защиты нуждается в альтернативных методах борьбы с вредными организмами.

Также важно отметить, что во многих странах участились случаи возникновения резистентности к применяемым препаратам в популяциях вредителей, фитопатогенов и сорных растений. Так сообщается о возникновении резистентности у *Phytophthora infestans* к металаксилу (группа по FRAC A1-4) в Дании, Германии и Великобритании, беналаксилу (A1-4) во Франции, к флуазинаму (C5-29) во Франции; у *Alternaria solani*, *A. alternata* – к азоксистробину (C3-11) в Австрии, Бельгии, Дании, Германии, Нидерландах. Информация по данным из стран ЕС размещена в Базе данных ЕОКЗР о случаях резистентности (EPPO Database on Resistance Cases)³.

Поэтому в большинстве европейских стран широкое применение нашла интегрированная защита сельскохозяйственных культур от вредителей, фитопатогенов, нематод и сорных растений. По определению ФАО ООН, интегрированная защита растений от вредных организмов основывается на комплексном применении агротехнических, организационно-хозяйственных, физических, агротехнических биологических и химических методов борьбы с ними, позволяющая держать популяции вредных для растений организмов ниже экономически значимого уровня и приемлемыми для агроценоза. Для снижения роста численности популяции вредных организмов интегрированная защита растений от вредителей также включает мониторинг их популяций, прогноз и диагностику на начальных стадиях поражения/заражения. Применение данной стратегии настолько широко в европейских странах, что в соответствии с директивой ЕС по созданию планов для устойчивого применения пестицидов (128/2009/ЕС) страны ЕС обязаны выработать, утвердить и применить национальные планы действий, фактически означающих национальные планы по интегрированной защите⁴. Данные планы должны предоставлять альтернативные химическому методу приемы и создаваться при участии заинтере-

сованной общественности. По последним опубликованным данным за 2020 г.⁵ более чем 90% сельхозпроизводителей в Великобритании пользуются планом интегрированной защиты от вредных организмов, разработанным либо организациями в Великобритании, либо агрономами своего хозяйства.

В основе любого плана интегрированной защиты, как правило, стоит правильно выстроенный севооборот, который позволяет прерывать жизненный цикл у многих фитопатогенов через создание неблагоприятных условий для их развития (при отсутствии подходящего растения-хозяина). Так, в Великобритании 100% производителей сельскохозяйственных культур, участвовавших в опросе об использовании интегрированной защиты в своем хозяйстве, применяли данный прием⁵. Наибольшее влияние севооборот как способ снижения уровня инфицирования оказывает на те фитопатогены, которые сохраняются в растительных остатках, в почве, а также в сорной растительности и «волонтерных» растениях. По европейским данным, оптимальная минимальная периодичность выращивания картофеля на поле – это 1 раз в пять лет⁵. Также, по мнению европейских ученых, почва, в которой выращивался картофель, имеет особое значение в распространении картофельных цистообразующих нематод, *Verticillium dahlia*, *Sclerotinia* spp., *Alternaria* spp., *Phytophthora* spp. (ооспоры) и *Rhizoctonia* spp.⁶. В меньшей степени севооборот снижает численность популяции фитопатогенов, которые распространяются по воздуху и с семенным и посадочным материалом. Для фитопатогенов, которые сохраняются в живых растениях, отсутствие растения-хозяина может означать гибель, но если они способны сохраняться и в семенном и посадочном материале, для уничтожения фитопатогенов (кроме вирусов, виридов и фитоплазм) необходимо проводить обработку семенного и посадочного материала средствами защиты растений и/или использовать здоровый семенной и посадочный материал.

Также важным остается использование для посадки устойчивых к основным заболеваниям сортов картофеля, а также здорового посадочного материала, в котором в лабораторных условиях подтверждено отсутствие фитопатогенов. Использование в сортовом конвейере сортов картофеля с высоким баллом устойчивости к болезням может существенно снизить развитие заболеваний и отложить их начало [3] тем самым снизить интенсивность применения фунгицидов (число обработок и норму расхода) и даже позволяет не проводить обработки в условиях низкого развития заболеваний, а также в неблагоприятных для развития заболеваний условиях. Выращивание нескольких сор-

³ EPPO (2022). EPPO Database on Resistance Cases (<https://resistance.eppo.int/>)

⁴ Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. 2009; L309:71-86.

⁵ FERA (2022). Pesticide usage survey report. Integrated pest management on arable crops in England & Wales, 2020.

⁶ Best4Soil (2020). Crop rotation: practical information. <https://www.best4soil.eu/>

тов в хозяйстве с разным баллом устойчивости позволяет не только снижать стоимость программы защиты, но и уменьшать вероятность появления резистентности к фунгицидам у фитопатогенов из-за меньшего риска преодоления расоспецифической устойчивости.

При выращивании картофеля огромное значение имеет правильный выбор сорта. По последним опубликованным данным Великобритании, за 2020 г. 99% сельхозпроизводителей учитывают сортовые особенности и качество семенного и посадочного материала⁵. В европейских странах для облегчения взаимодействия селекционеров и картофелеводов создаются онлайн-базы данных по сортам картофеля. В Великобритании уже существует онлайн-база данных по сортам картофеля (Potato Variety Database), в которую занесена информация о сертифицированных в Великобритании сортах картофеля [2]. В ней представлены, помимо основных характеристик сортов, данные по устойчивости, выраженные от 1 до 9 по балльной шкале устойчивости к основным заболеваниям и картофельным цистообразующим нематодам. Сообщается, что данные по сортовой устойчивости получены в независимых испытаниях, финансируемых агентством AHDB Potatoes (в настоящий момент там представлены последние данные за 2018 г.)⁷. Данные испытания большей частью фокусировались на заболеваниях, снижающих качество кожуры у клубней картофеля⁷. Сорта, для которых независимых испытаний не проводилось, специально отмечаются в базе данных⁷. С 2016 г. у селекционеров появилась возможность представлять информацию о своих сортах для размещения (с соблюдением их прав) в данной базе данных⁷. Такая информация, полученная от селекционеров, помечается в ней особым образом (в виде метки «Характеристики, предоставленные селекционерами»)⁷. Информация из данной базы доступна для любого заинтересованного лица и позволяет выбрать сорт/сорта картофеля сразу по нескольким критериям с отображением информации на одном экране, что весьма удобно. Информацию из базы данных о выбранном сорте/сортах можно выгрузить в таблицу Excel. Стоит отметить, что за веб-дизайн сайта, на котором размещена база данных, отвечает Шотландское агентство по сельскохозяйственным наукам (SASA).

Для снижения уровня инфекции, вызываемой фитопатогенами, распространяющимися с семенным и посадочным материалом, необходимо использовать для посадки семенные клубни, в которых в лабораторных условиях подтверждено отсутствие фитопатогенов. Для многих регулируемых вредных организмов (в том числе распространяющихся с семенным и посадочным материалом) экспертами Европейской и Средиземноморской организации по карантину и защите растений (ЕОКЗР) разработаны диагностические стандарты (из серии PM 7). Поэтому весьма желательно использовать

⁷ AHDB (2022). Potato Variety Database. <https://potatoes.agricrops.org/>

сертифицированный посадочный материал – в Великобритании весь семенной картофель должен быть сертифицирован. Также, если производитель выращивает и использует сортовой семенной картофель, выращенный в собственном хозяйстве, то он должен заплатить Британскому обществу селекционеров растений за использование оригинальных сортов в целях финансирования создания новых сортов. В рамках схемы выплат британским селекционерам растений от производителей Британским обществом растительных селекционеров поддерживается перечень сортов, за разведение которых производитель должен платить.

Для лучшей обеспеченности растущего картофеля макро- и микроэлементами, а также органическим веществом в Великобритании рекомендуется применять отдельные решения о внесении минеральных и органических удобрений для каждого поля согласно концепции точного земледелия. Для определения потребности в питательных веществах рекомендуется определять агрохимические показатели почвы (рН, содержание фосфора, калия и магния) каждые 3-5 лет. В Великобритании для такого анализа существует сеть агрохимических лабораторий. По последним опубликованным данным, в Великобритании за 2020 г. 99% сельхозпроизводителей проводят химический анализ почвы, но только 38% – определение ее биологических показателей⁸.

По результатам проведенного анализа и полученных показателей почва получает определенный индекс (табл. 1).

Целевыми показателями почвы являются следующие: рН почвы 6,5 (5,8 на торфяных почвах), индекс по Р – 2; наименьший индекс по калию – 2 (2-); индекс по магнию – 2.

В Великобритании существуют рекомендации по внесению P_2O_5 , K_2O , MgO в почву с разными индексами по питательным элементам при планируемой урожайности 50 т/га (табл. 2)⁹. Считается, что почвы с индексами 0 и 1 наиболее отзывчивы на внесение минеральных удобрений (фосфата, калия и магния)⁹. Норма внесения калийных удобрений при планируемой урожайности больше, чем 50 т/га, может быть скорректирована путем простых подсчетов (рекомендуемая норма внесений K_2O в зависимости от индекса (кг/га) + (разница в урожайности (т) × 5,8 кг/т)⁹. Например, при индексе по калию 1, рекомендации по калийному удобрению при ожидаемом уровне урожайности 70 т/га составляют $330 + (20 \times 5,8) = 446$ кг K_2O /га⁹.

По рекомендациям⁹, в Великобритании фосфор должен вноситься весной. Там, где требуется внесение более чем 300 кг/га K_2O , следует вносить половину осенью

⁸ British Society of Plant Breeders (2022). <https://www.bspb.co.uk/seed-declarations/potatoes/>

⁹ Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB) (2021) Nutrient Management Guide (RB209); sections 2, 5. <https://ahdb.org.uk/rb209>

Табл. 1

Классификация результатов анализа почвы содержанию по Р, К и Mg (мг/л) в индексы

Индекс	Фосфор	Калий	Магний
0	0–9	0–60	0–25
1	10–15	61–120	26–50
2	16–25	121–180 (2-) 181–240 (2+)	51–100
3	26–45	241–400	101–175
4	46–70	401–600	176–250
5	71–100	601–900	251–350
6	101–140	901–1500	351–600
7	141–200	1501–2400	601–1000
8	201–280	2401–3600	1001–1500
9	Свыше 280	Свыше 3600	Свыше 1500

Табл. 2

Рекомендуемые нормы внесения минеральных удобрений при планируемой урожайности 50 т/га

	Индекс по фосфору, калию, магнию				
	0	1	2	3	4
	кг/га				
P ₂ O ₅	250	210	170	100	0
K ₂ O	360	330	300	150	0
MgO	120	80	40	0	0

и половину весной. На легких песчаных почвах калийное удобрение должно вноситься при вспашке. Полезно отметить, что уровень обеспеченности основными минеральными удобрениями земель, занятых под выращивание, в Великобритании значительно выше, чем в России: в 2017 г. в РФ внесено 12,2551 кг/га, в 2018 г. – 12,4918 кг/га; в Великобритании в 2017 г. – 169,8043, в 2018 г. – 169,7909¹⁰. При этом вынос с урожаем основных питательных элементов в РФ в 2017 г. составил 28,142 кг/га, в 2018 г. – 24,8072 кг/га¹⁰. В Великобритании же вынос питательных элементов с урожаем составил в 2017 г. 87,2174 кг/га, в 2018 г. – 79,85 кг/га¹⁰. При этом в Великобритании также много вносится органических удобрений под сельскохозяйственные культуры: в 2017 г. – 82,614 кг/га, в 2018 г. – 83,0077 кг/га¹⁰. В РФ внесение органических удобрений составило 9,3596 кг/га в 2017 г., в 2018 г. – 9,4013 кг/га¹⁰. Меньшая обеспеченность минеральными и органическими удобрениями в РФ обуславливает меньшую среднюю урожайность картофеля (т/га) по сравнению с таковой у Великобритании: в нашей стране в 2018 г. она составила 17,05, в 2019 г. – 17,82, в 2020 г. – 16,64; в Великобритании – в 2018 г. она составила 36,14, в 2019 г. – 36,85, в 2020 г. – 38,87¹⁰. Также очевидно, что меньшая обеспеченность минеральными и органическими удобрениями земель,

занятых под выращивание сельскохозяйственных культур, в РФ повышает риск снижения плодородия почвы при выращивании современных высокопродуктивных сортов сельскохозяйственных культур.

В последнее время в европейских странах активно (в особенности при выращивании органической продукции на небольших фермах) стало применяться междурядное выращивание двух или более видов растений [4], позволяющее в условиях монокультуры сокращать накопление вредителей и фитопатогенов в почве, снижать эрозию почвы, а также бороться с сорной растительностью, используя аллелопатические взаимодействия растений.

Расчетная норма точного внесения органических удобрений зависит от вида самого удобрения, типа почвы, погодных условий, а также от количества вносимых минеральных удобрений⁹. Считается, что совместное внесение минеральных и органических удобрений дает большую прибавку урожая, чем внесение только минеральных⁹. В целом, внесение органических удобрений не только увеличивает содержание органического вещества в почве, но и улучшает структуру почвы, тем самым улучшая рост корней, самого растения, потребление влаги, а также микробиологическую активность почвы и устойчивость к водной и ветровой эрозии.

¹⁰ FAO (2022). FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>)

В последнее время в европейских странах помимо навоза от сельскохозяйственных животных (птицы, крупного рогатого скота, свиней) начал широко использоваться компост (термофильный и вермикомпост)⁹.

Для обеззараживания почвы и снижения в ней уровня инфицирования используют, помимо биофумигации, выращивания определенных сидератов (например, для этой цели широко используются растения из семейства крестоцветные [1] и сорго (*Sorghum vulgare*). В Европе альтернативой выращиванию самих растений в целях биофумигации применяется заделка в почву гранул BioFence (гранулы *Brassica carinata*). Для эффективности применения таких гранул рекомендуется использовать укрывной материал и хорошее увлажнение почвы.

В последнее время в мире набирает свою популярность выращивание покровных культур. Так по последним опубликованным данным в Великобритании за 2020 г. 70% сельхозпроизводителей выращивают покровные культуры в своих хозяйствах [4]. Известно, что выращивание покровных культур способствует не только обогащению почвы органическим веществом, стимуляции ее микробиологической активности, включая рост микоризных грибов, улучшению структуры почвы, уменьшению эрозии почвы, сдерживанию роста сорняков но и повышению мобильности и лучшей усвояемости некоторых питательных веществ¹¹. Так, например, выращивание люпина и гречихи за счет органических кислот из корневых выделений данных растений улучшает подвижность фосфора в почве, что улучшает его усвояемость у последующей культуры¹¹.

Рациональное и взвешенное применение средств защиты растений в растениеводстве в РФ, в частности в

картофелеводстве, позволит обеспечить население качественными продуктами питания, а также будет способствовать обеспечению продовольственной безопасности страны, активно занимающейся выращиванием сельскохозяйственных культур. Это также повысит привлекательность отечественной растениеводческой продукции как экспортного товара в европейские страны, в которых существует строгая регламентация содержания остаточных количеств пестицидов в растениеводческой продукции. Стоит отметить, что в европейских странах в последнее время начало активно использоваться ультрамалое опрыскивание.

Современная интегрированная защита картофеля от болезней должна строиться на поддержании здоровья почвы и на отсутствии фитопатогенов в ней, что достигается выращиванием сидератов в качестве покровных и биофумигирующих культур [1], а также сохранением высоких уровней органического вещества за счет внесения органических удобрений, а также на поддержании здоровья растений (через выращивание смеси сортов, включающей сорта с высоким баллом устойчивости к фитопатогенам), а при промышленном традиционном выращивании картофеля в условиях эпифитотий – также использованием химической защиты, основанной на результатах мониторинга популяций фитопатогенов и применением систем принятия решений для прогноза вероятности вспышки заболеваний. Для успешности интегрированной защиты необходимо, чтобы ее принципам следовало как можно большее число участников в технологической цепочке выращивания картофеля (как крупными агрохолдингами, так и небольшими фермерскими хозяйствами и личными подсобными хозяйствами).

Литература

1. Ерохова МД, Кузнецова МА. Биофумигация почвы растениями из семейства Капустные. Защита и карантин растений. 2021;(8):39-40. DOI: 10.47528/1026-8634_2021_8_39.
2. Ерохова МД. Опыт Великобритании в защите картофеля от бактериозов. Достижения науки и техники АПК. 2022; 36(2):8-13. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_2_8.
3. Andrivon D, Lucas J-M, Ellissèche D. Development of natural late blight epidemics in pure and mixed plots of potato cultivars with different levels of partial resistance. Plant Pathol. 2003; (52):586-94.
4. Dupuis B, Cadby J, Goy G, Tallant M, Derron J, Schwaerzel R, Steinger T. Control of potato virus Y (PVY) in seed potatoes by oil spraying, straw mulching and intercropping. Plant Pathol. 2017;66:960-9.

References

1. Yerokhova MD, Kuznetsova MA. [Soil biofumigation by brassica green manure crops]. Zashita i Karantin Rasteniy. 2021;(8):39-40. DOI: 10.47528/1026-8634_2021_8_39. (In Russ.)
2. Yerokhova MD, Kuznetsova MA. [UK experience in potato protection against bacterial diseases]. Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK 2022;36(2):8-13. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_2_8. (In Russ.)
3. Andrivon D, Lucas J-M, Ellissèche D Development of natural late blight epidemics in pure and mixed plots of potato cultivars with different levels of partial resistance. Plant Pathol. 2003;52:586-94.
4. Dupuis B, Cadby J, Goy G, Tallant M, Derron J, Schwaerzel R, Steinger T. Control of potato virus Y (PVY) in seed potatoes by oil spraying, straw mulching and intercropping. Plant Pathol. 2017;66:960-9.

¹¹ Horticulture Development Company (2010). Green manures – effects on soil nutrient management and soil physical and biological properties (<https://projectbluearchive.blob.core.windows.net/media/Default/Horticulture/Publications/Green%20manures%20%E2%80%93%20effects%20on%20soil%20nutrient%20management%20and%20soil%20physical%20and%20biological%20properties.pdf>)

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ: АНАЛИЗ, СРАВНЕНИЕ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ³

В.Н. Колупаева

ФГБНУ ВНИИ фитопатологии, Большие Вяземы, Московская область, Россия

Эл. почта: amulanya@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; принята к печати 25.11.2022

Загрязнение грунтовых вод пестицидами затронуло все страны на всех континентах. Важной задачей исследователей и регулирующих органов всех стран является разработка методов и инструментов, позволяющих прогнозировать риски применения пестицидов для грунтовых вод. В настоящей статье рассмотрены общепринятые методы изучения миграции пестицидов, проведен их анализ с точки зрения применимости для оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды. На примерах показано, что имеющиеся методы можно разделить на две категории – прямые и косвенные. Косвенные методы (индексы подвижности или полевые исследования транспорта пестицидов) позволяют сравнивать миграционную способность молекулы пестицида или определять глубину проникновения пестицида в почву. Прямые методы (моделирование, лизиметрические исследования и мониторинг) разрешают определять концентрации пестицида в стоке грунтовых вод или грунтовых водах, что делает их полезными при оценке риска применения пестицидов. Так, сравнивая полученные концентрации в воде с допустимыми пороговыми значениями, можно определить уровень риска пестицида. Примеры расчета индексов подвижности говорят о том, что их оценки различаются между собой. Недостатки полевых опытов миграции связаны с аналитическими проблемами и краткосрочностью исследования. Моделирование миграции пестицидов является эффективным инструментом, позволяющим в краткие сроки получить концентрации пестицидов в водном стоке и определить пестициды, способные в изучаемых условиях загрязнять грунтовые воды. Расчеты показали, что для 40 пестицидов из 180 разрешенных к применению в РФ прогнозные концентрации составляют более 1 мкг/л. Вторым методом, позволяющим прямое определение концентраций в стоке, являются лизиметрические опыты. Многолетнее изучение миграции 4 пестицидов показало, что все токсиканты мигрируют за пределы почвенного профиля. Третьим пригодным инструментом является мониторинг пестицидов в грунтовых водах. Развитие и распространение этого способа контроля пестицидов в грунтовых водах является важной задачей регулирующих органов и научного сообщества РФ на ближайшее время.

Ключевые слова: пестициды, грунтовые воды, миграция, сорбция, модели поведения пестицидов, лизиметр, мониторинг.

METHODS FOR STUDYING PESTICIDES MIGRATION: ANALYSIS, COMPARISON, AND RECOMMENDATIONS FOR USE IN ASSESSING THE RISK OF PESTICIDES IMPACT ON GROUNDWATER

V.N. Kolupaeva

All-Russian Research Institute of Phytopathology, Bolshiye Viazemy, Moscow Region, Russia

Email: amulanya@gmail.com

Groundwater pollution with pesticides has affected every country on every continent. An important challenge for researchers and regulatory bodies in all countries is to develop methods and tools for predicting the risks to groundwater that are associated with pesticide use. In this paper, the generally accepted methods for studying pesticides migration are reviewed and analyzed from the point of view of their applicability for assessing the risk of pesticides impact on groundwater. Using examples, it is shown that the available methods may be divided into two categories, direct and indirect ones. The indirect methods (mobility indices and field studies of pesticide migration) make it possible to compare the migration ability of a pesticide molecule and to determine the depth of penetration of the pesticide into the soil. The direct methods (modeling, lysimetric studies, and monitoring) provide for the determination of pesticide concentrations in groundwater or groundwater leachate, which makes such methods useful in assessing the risk of pesticide use. Thus, by comparing the measured pesticide concentrations in water with acceptable threshold values, it is possible to determine the risk level of a pesticide. Examples of calculating the mobility indices indicate that their estimates differ from each other.

³ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3–6 октября 2022 года.

Disadvantages of migration field experiments are related to analytical problems and to the short duration of a study. Modeling the migration of pesticides is an effective tool that makes it possible to quickly determine pesticides concentration of in water runoff and to identify the pesticides that can pollute groundwater under specific soil and climatic conditions. Calculations show that for 40 pesticides out of 180 licensed for use in the Russian Federation, their predicted concentrations exceed 1 µg/l. The second method that allows to directly determine concentrations in leachate is lysimetric experiments. A long-term study of the migration of 4 pesticides showed that all toxicants migrate beyond the soil profile. A third useful tool is pesticides monitoring in groundwater. Further development and dissemination of this method for controlling pesticides in groundwater is an important task for the regulatory authorities and the scientific community of the Russian Federation in the near future.

Key words: pesticides, groundwater, migration, sorption, pesticide fate model, lysimeter, monitoring.

Введение

На Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2022 году были определены глобальные риски для человечества на ближайшие 10 лет – экономические, геополитические, социальные, технологические и экологические: на 7 месте стоит ущерб окружающей среде, причиняемый человеком. Ранее в 2015 году всеми государствами-членами ООН были приняты 17 целей в рамках «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», в которой сформулирован 15-летний план по их достижению. И цель номер 6 – это обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов.

Несмотря на все предпринимаемые меры по предотвращению загрязнения грунтовых вод, в них регулярно обнаруживают пестициды и их метаболиты. Эффект от мероприятий по снижению риска для подземных вод от пестицидов наступает очень медленно. Так, например, в Швеции по результатам двадцатилетнего мониторинга пестицидов в грунтовых и поверхностных водах на фоне мероприятий по минимизации риска применения пестицидов для здоровья и окружающей среды выяснилось, что количество образцов с концентрациями пестицидов выше 0,5 мкг/л постепенно снижалось в поверхностных водах, в то время как в грунтовых водах не было отмечено заметное снижение концентраций и частоты встречаемости пестицидов. Авторы объясняют этот факт более коротким путем поступления токсикантов в поверхностные воды, а также недостаточностью принимаемых для предотвращения загрязнения грунтовых вод мер [1-3].

Кроме того, пестициды являются единственными из всех загрязнителей, которые преднамеренно вносятся в почву человеком, поэтому имеется возможность контролировать и регулировать этот процесс. Анализ литературных данных позволил определить 24 пестицида, которые чаще всего обнаруживают в грунтовых водах. Из них 11 веществ запрещены к использованию в РФ, а 13 применяются в сельском хозяйстве, среди них значатся широко применяемые бентазон, изопротурон, МЦПА, тербутилазин, имидаклоприд, клопиралид, метрибузин, хлоротолурон. Именно в отношении последних должны предприниматься усилия, чтобы не допустить их попадания в грунтовые воды.

Целью настоящей работы было проанализировать современные методы изучения миграции пестицидов, сравнить их между собой, выделить наиболее информативные, позволяющие определять пестициды с высоким риском для грунтовых вод с учетом всех факторов их применения.

Материалы и методы исследования

Расчет индексов подвижности

Коэффициент сорбции K_d определяется как распределение пестицида между твердой и жидкой фазами в равновесном состоянии: $C_s = K_d \times C_{aq}$, где C_s – концентрация адсорбированного пестицида, C_{aq} – концентрация пестицида в жидкой фазе, K_d – коэффициент адсорбции.

Индекс *GUS* оценивает вероятность миграции пестицида на основании параметров сорбции (K_{oc}) и разложения (DT_{50}): $GUS = \log(DT_{50}) \cdot (4 - \log(K_{oc}))$.

SCI-GROW рассчитывается пошагово с использованием ряда логарифмических и экспоненциальных зависимостей в зависимости от величины и DT_{50} и K_{oc} .

Моделирование миграции пестицидов

При проведении расчетов полагали, что пестициды вносят в почву путем опрыскивания (без культуры) в максимальной рекомендованной дозе ежегодно в течение 20 лет. В результате моделирования рассчитывали средневзвешенные годовые концентрации пестицидов на глубине 1 м за 20 лет, которые далее ранжировали в порядке возрастания для определения 80%-го перцентиля погодных условий (или 90%-го перцентиля уязвимости всех возможных почвенных и погодных ситуаций, где 80%-й перцентиль почвенных свойств был определен экспертами при разработке стандартных сценариев).

Лизиметрический эксперимент

Лизиметрический опыт проводили в 2015-2020 годах. В июне на поверхность лизиметров вносили пестициды с помощью ранцевого опрыскивателя в максимальной рекомендованной икратно увеличенной дозах. Воду отбирали по мере заполнения мерных сосудов круглогодично.

Результаты и обсуждение

В процессе регистрации препаративной формы пестицида происходит его всестороннее изучение с целью экологической оценки. Под экологической оценкой пестицида понимается процедура установления его опасностей и рисков применения. Под опасностью пестицида понимают способность загрязнять окружающую среду и наносить вред живым организмам. Мерой экологической опасности пестицида часто служат классы в различного рода классификациях. Понятие экологического риска содержится в статье 1 Федерального закона «Об охране окружающей среды», согласно которой это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности. Экологический риск пестицида – вероятность проявления его экологической опасности в реальных условиях окружающей среды и регламента применения [4-5].

Все методы изучения миграции пестицидов могут быть разделены на две категории: первая – это методы определения опасности миграции (косвенные методы, когда экспозицию пестицида не определяют или определяют в почве, в результате исследования получают значения индексов подвижности или глубину миграции токсиканта в почве), вторая – это методы, позволяющие определить концентрацию пестицидов в водном стоке, они являются одним из этапов оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды.

Наиболее простым показателем подвижности пестицида в системе почва-вода является коэффициент сорбции K_d , который определяется как распределение пестицида между твердой и жидкой фазами в равновесном состоянии. Значение коэффициента сорбции пестицида зависит от структуры его молекулы и определяет степень его сорбционной способности, но также учитывает свойства почвы. Степень подвижности вещества определяют с помощью классификации по величине константы сорбции, нормированной на содержание органического вещества. В настоящее время коэффициент сорбции – самый понятный и удобный показатель подвижности пестицидов [6].

Агрегированный индекс GUS оценивает вероятность миграции пестицида в грунтовые воды на основании параметров сорбции (K_{oc}) и разложения (DT_{50}). Он был разработан путем анализа графиков зависимости логарифма периода полуразложения DT_{50} от логарифма K_{oc} для подвижных, неподвижных и средне-подвижных соединений с последующей проверкой по данным мониторинга содержания пестицидов в грунтовых водах [7]. В настоящее время этот индекс также широко используется.

Скрининговая модель SCI-GROW [8] была разработана на основе данных многочисленных полевых регистрационных испытаний пестицидов в США. Она представ-

ляет собой эмпирически набор регрессионных уравнений. С 1997 по 2011 год она использовалась Агентством по охране природы (EPA) США для грубой скрининговой оценки концентраций пестицидов в грунтовых водах, однако позже была заменена имитационной моделью PRZM. Кроме K_{oc} и DT_{50} (как и в GUS), в SCI-GROW учитывается также норма расхода препарата.

В табл. 1 показаны индексы подвижности для 19 пестицидов с высоким миграционным потенциалом. Как видно из таблицы, индексы K_{oc} и SCI-GROW занижают миграционную опасность по сравнению с индексом GUS. Также все индексы не учитывают влияние погодных условий на миграцию.

Миграцию пестицидов также изучают в полевых условиях. В качестве показателя подвижности используют максимальную глубину миграции или же центр масс распределения пестицида. Однако по нашим данным [9] и данным других авторов [10], глубина проникновения пестицида в почву редко превышает 30 см. Вместе с тем известно, что эти же вещества часто обнаруживают в грунтовых водах. Это говорит о том, что однолетнего полевого эксперимента недостаточно для оценки подвижности пестицида; ограничения метода анализа часто не позволяют определять пестициды в нижних горизонтах; наличие движения пестицида по так называемым преимущественным путям миграции приводит к тому, что вещество движется с током воды по трещинам и макропорам, не задерживаясь в почвенной толще, и попадает сразу в водный сток.

Таким образом, индексы подвижности не учитывают, как правило, влияние климатических факторов на судьбу пестицида в окружающей среде, а полевые методы имеют свои значительные ограничения, которые снижают информационную ценность этих данных.

Вторая категория методов имеет своей целью определение концентраций пестицидов непосредственно в стоке грунтовых вод или в самих грунтовых водах. Она включает в себя такие методы, как моделирование миграции пестицидов, лизиметрические опыты и мониторинг.

Моделирование пестицидов является эффективным и современным инструментом для оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды, так как экспериментальными полевыми испытаниями невозможно охватить все разнообразие почвенно-климатических условий регионов, где применяются пестициды. Математическое моделирование передвижения пестицидов в грунтовые воды – это первый этап оценки их миграционного риска. Он необходим для определения риска миграции пестицида в конкретном регионе и принятия решения о необходимости более детального изучения его перемещений в лизиметрических и мониторинговых исследованиях. В Европейском союзе для этой цели используются 4 математические модели: MACRO, PEARL, PRZM и PELMO, в РФ – модель PEARL.

Величины индексов подвижности пестицидов

	Вещество	K_{oc} или K_{foc}	GUS	SCI-GROW, мкг/л
Гербициды	Бентазон	55	3,74	1,64
	Имазетапир	52	6,19	2,32
	Клопиралид	5	5,06	0,82
	Метамитрон	78	2,70	0,69
	МЦПА	74	2,94	0,30
	Напропамид	839	2,68	0,33
	Тербутилазин	231	3,07	0,29
	Топрамезон	171	4,13	0,43
	Хлоридазон	120	3,14	1,02
Фунгициды	Боскалид	772	2,66	0,14
	Гимексазол	57	2,63	0,52
	Оксадиксил	36	5,75	15,38
	Прохлораз	500	3,06	0,24
	Фенаримол	734	3,23	0,10
	Флуопиколид	321	3,63	0,36
	Флуопирам	279	4,97	3,60
	Флутриафол	205	4,20	0,58
Инсектициды	Имидаклоприд	225	3,74	0,31
	Тиаметоксам	56	4,69	0,53
	Хлорантранилипрол	362	4,00	0,18

	очень подвижный, подвижный по K_{oc} ; подвижный по GUS, SCI-GROW
	среднеподвижный по K_{oc} ; умеренно подвижный по GUS, SCI-GROW
	малоподвижный, неподвижный по K_{oc} ; малоподвижный по GUS, SCI-GROW

Были проведены расчеты концентраций в стоке для 180 пестицидов (это практически все действующие вещества, разрешенные для применения в РФ). Расчет концентраций проводили для сценария «Москва» с помощью модели PEARL и определяли средневзвешенные годовые концентрации пестицидов на глубине 1 м.

Расчет показал, что прогнозная концентрация для 40 пестицидов превысила 1 мкг/л, а для 19 составила более 10 мкг/л. Следует сказать, что это высокие концентрации с учетом того, что в ЕС допустима концентрация 0,1 мкг/л [11]. В РФ концентрации в питьевой воде принято сравнивать с гигиеническими нормативами – ПДК в воде [12], которые варьируют в пределах от 0,2 до 1000 мкг/л. Для 19 пестицидов прогнозная концентрация превысила уровень ПДК. Здесь нужно отметить, что расчет проводился для стандартного сценария Москва, который входит в четверку наиболее уязвимых сценариев из 9 разработанных нами [13].

Следующим методом исследования миграции пестицидов являются лизиметрические исследования. Иерархически они стоят выше моделирования и в от-

сутствии мониторинга способны поставлять качественные сведения о концентрации пестицидов в стоке грунтовых вод на глубине нижней границы данного устройства. Лизиметрические опыты максимально приближены к природным условиям, но, как и любой метод, наряду с очевидными достоинствами имеют свои недостатки. Так, например, в лизиметрах наблюдается пристеночный эффект, связанный с движением воды возле стенок монолита. Эта проблема решается путем выбора оптимального соотношения высоты лизиметра к длине его основания при сохранении структуры и влажности почвы [14]. Также на результаты лизиметрического опыта (объем водного стока и концентрация пестицида в элюате) накладываются отпечаток индивидуальные особенности строения порового пространства почвенного монолита: в соседних лизиметрах эти показатели могут отличаться. К числу преимуществ лизиметрических опытов можно отнести контроль условий на верхней и нижней границах, возможность составления водного баланса и послышного наблюдения температуры и влажности. Эти достоинства делают такие эксперименты полезными для

сбора экспериментальных данных для калибровки и валидации моделей поведения пестицидов.

В ходе многолетнего эксперимента, который проходит с 2015 года в Больших лизиметрах МГУ, изучали движение 4 пестицидов – циантранилипрола, паклобутразола, метрибузина и С-метолахлора. Пестициды вносили в почву в установленные регламентом сроки без растений в рекомендованной, а также вкратно увеличенной нормах применения. Установлено, что каждый из этих пестицидов был обнаружен в лизиметрическом стоке в обоих вариантах использования (табл. 2) [15, 16]. Причем следует отметить, что максимальная вероятность выноса пестицида за пределы почвенного профиля наблюдалась в первые 1-1,5 месяца после его применения. Обнаруженные концентрации пестицидов в стоке не превысили значений ПДК, принятых в РФ [17].

Мониторинг представляет собой комплексную систему наблюдений за состоянием окружающей среды и является наиболее информативным инструментом контроля пестицидов [18]. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды в РФ в 1995 г.» определяет мониторинг в РФ как «комплекс выполняемых по научно обоснованным программам наблюдений, оценок, прогнозов, разрабатываемых на их основе рекомендаций и вариантов управленческих решений, необходимых и достаточных для обеспечения управления состоянием окружающей природной среды и экологической безопасностью». Ведомством, ответственным за экологический мониторинг пестицидов в почвах и поверхностных водах РФ, является Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Но мониторинг пестицидов в грунтовых водах практически отсутствует (в 2020 году воды были отобраны из 4 разрезов глубиной до 2 м, в перечне определяемых пестицидов только 16 наименований, и только 3 из них разрешены к применению в настоящее время). Сейчас перечень действующих веществ, по которым проводится мониторинг, нуждается в пересмотре и обновлении. Так, В.Н. Кузьмич с соавт. [19] отмечают, что в список «веществ в системе мониторинга Гидромета входит 48 наименований пестицидов, из которых 21 запрещен к применению в РФ. Этот список не пере-

считывался с 1993 года" Как указывают авторы, в целом, системы регулирования и мониторинга качества воды основаны на принципе «что умеем определять, тем и управляем».

Правительством РФ установлен в 2015 году «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования». Среди более 300 токсикантов в перечне правительства имеется 15 пестицидов для контроля в воде (альдрин, атразин, гексахлорбензол, ГХЦГ, 2,4-Д, дильдрин, каптан, карбофос, ДДТ и его метаболиты, прометрин, симазин, трифлуралин, ТХАН, фозалон). Логика формирования обоих этих перечней (Гидромета и Правительства) не ясна. В перечне ничтожное количество пестицидов, разрешенных к применению в РФ в настоящее время, в них отсутствуют пестициды из списка чаще всего обнаруживаемых в грунтовых водах и не представлена ясная процедура отбора соединений для контроля. Формирование перечня пестицидов для приоритетного контроля и пострегистрационного мониторинга в грунтовых водах, планирование и разработка программы мониторинга, а также его осуществление требует масштабных усилий специалистов разного профиля, поддержки и финансирования на государственном уровне.

Выводы

Проведенный обзор современных методов изучения миграции пестицидов на основании исследований, проводимых в ФГБНУ ВНИИФ, а также другими авторами, позволил выделить два типа исследований: опыты без и с определением экспозиции пестицидов в водном стоке. Прямые методы определения экспозиции пестицидов в стоке грунтовых вод, в отличие от косвенных (индексы подвижности, глубина распределения в почве), позволяют определить уровень риска, на основании сравнения концентрации с допустимыми пороговыми значениями. Расчеты с помощью имитационной модели PEARL показали, что из 180 действующих веществ для 19 прогнозная концентрация выше ПДК. Многолетнее изучение миграции 4 пестицидов в лизиметрах показало, что все исследованные действующие вещества были обнаружены в стоке грунтовых вод

Табл. 2

Концентрация пестицидов в лизиметрическом стоке и ПДК_{вод.}

Пестицид	Концентрация (максимальная), мкг/л	Концентрация (средняя), мкг/л	ПДК _{вод.} , мкг/л
Циантранилипрол	2,6	0,6	100
Паклобутразол	2,5	0,5	-
Метрибузин	14	0,6	100
С-метолахлор	9,1	0,5	20

на глубине 1,5 м. Их гигиенический риск оценен как низкий. Анализ действующих в РФ мониторинговых мероприятий свидетельствует об их малом объеме и о необходимости пересмотра перечня анализируемых пестицидов с учетом актуального объема их применения, предварительных исследований под-

вижности и токсичности. Средства для финансирования мониторинга могут быть получены путем реализации принципа «загрязнитель платит» (polluter pays principle), зарекомендовавшем себя в качестве наиболее эффективного способа решения проблем загрязнения окружающей среды.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Adielsson S, Törnquist M, Kreuger J. Pesticide monitoring at the catchment scale in Sweden. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza*; 2007. P. 743-9.
2. Törnquist M, Kreuger J, Adielsson S. Occurrence of pesticides in Swedish water resources against a background of national risk-reduction programmes - results from 20 years of monitoring. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza*; 2007. P. 770-7.
3. Steffens K, Jarvis N, Lewan E, Lindström B, Kreuger J, Kjellström E, Moeys J. Direct and indirect effects of climate change on herbicide leaching — A regional scale assessment in Sweden. *Sci Total Environ.* 2015;514:239-49.
4. Швыряев АА, Меньшиков ВВ. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе. М.: Изд-во МГУ, 2004.
5. Горбатов ВС, Матвеев ЮМ, Кононова ТВ. Экологическая оценка пестицидов: источники и формы информации. *АГРО XXI.* 2008;1:7-9.
6. Потапов ИС, Горбатов ВС. Количественные закономерности сорбции имидаклоприда почвами. *Агрохимический вестник.* 2010;3:35-7.
7. Gustafson D. Hazards assessment; Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ Toxicol Chem.* 1989;8:339-57.
8. Estes TL, Pai N, Winchell MF. Comparison of predicted pesticide concentrations in groundwater from SCI-GROW and PRZM-GW models with historical monitoring data. *Pest Manag Sci.* 2016;72:1187-201.
9. Belik A, Kokoreva A, Kolupaeva V. Migration of cyantraniliprole in fractured soils: calibration of pesticide leaching model by using experimental data. *E3S Web of Conferences.* 2020;169:01008.
10. Сметник АА, Спиридонов ЮЯ, Шейн ЕВ. Миграция пестицидов в почвах. М.; 2005.
11. Колупаева ВН. Формирование перечня пестицидов для их мониторинга в грунтовых водах. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018;29(3):93-106.
12. Синицына ОО, Хамидулина ХХ, Турбинский ВВ, Трухина ГМ, Башкетова НС, Гильденскильд ОА, Амплеева ГП. Гигиеническое нормирование различных видов вод на современном этапе. *Гигиена и санитария.* 2022;101(10):1151-7.
13. Kolupaeva V, Gorbatov V, Nukhina I. Ecological zoning and assessment of the vulnerability of agricultural regions of the Russian Federation to groundwater pollution by pesticides. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2020;578:012037.
14. Умарова АБ. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. Автореферат дисс... докт. биол.наук. М.ж 2008.
15. Kolupaeva VN, Kokoreva AA, Belik AA, Pletenev PA. Study of the behavior of the new insecticide cyantraniliprole in large lysimeters of the Moscow State University. *Open Agriculture.* 2019;4(1):599-607.
16. Kolupaeva V, Kokoreva A, Bondareva T. The study of metribuzin migration in lysimeters. *E3S Web of Conferences.* 2020;175.
17. Kolupaeva VN, Belik AA, Kokoreva AA, Astaikina AA. Risk assessment of pesticide leaching into groundwater based on the results of a lysimetric experiment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications.* 2019; 012023.
18. Черногаева ГМ, Малеванов ЮА, Журавлева ЛР. Мониторинг загрязнения окружающей среды в Российской Федерации: организация наблюдений, обобщение и распространение информации. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2015;26(2):129-38.
19. Кузьмич ВН, Пономарева ЛС, Скурлатов ЮИ. Проблемы химической безопасности водных экосистем и новые подходы к оценке качества воды. *Химическая и биологическая безопасность.* 2015;(1-2):95-102.

Общий список литературы/Reference List

1. Adielsson S, Törnquist M, Kreuger J. Pesticide monitoring at the catchment scale in Sweden. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza; 2007. P. 743-9.*
2. Törnquist M, Kreuger J, Adielsson S. Occurrence of pesticides in Swedish water resources against a background of national risk-reduction programmes – results from 20 years of monitoring. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza; 2007. P. 770-7.*
3. Steffens K, Jarvis N, Lewan E, Lindström B, Kreuger J, Kjellström E, Moeys J. Direct and indirect effects of climate change on herbicide leaching – A regional scale assessment in Sweden. *Sci Total Environ.* 2015;514:239-49.
4. Shvyriayev AA, Menshikov VV. *Otsenka Riska Vozdeystviya Zagryazneniya Atmosfery v Issleduemom Regione.* Moscow: MGU; 2004. (In Russ.)
5. Gorbatov VS, Matveev YUM, Kononova TV. [Ecological assessment of pesticides: Information sources and forms]. *AGRO XXI.* 2008;1:7-9. (In Russ.)
6. Potapov IS, Gorbatov VS. [Quantitative regularities in imidacloprid sorption by soils]. *Agrohimiicheskiy Vestnik.* 2010;3:35-7. (In Russ.)
7. Gustafson D. Hazards assessment; Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ Toxicol Chem.* 1989;8:339-57.
8. Estes TL, Pai N, Winchell MF. Comparison of predicted pesticide concentrations in groundwater from SCI-GROW and PRZM-GW models with historical monitoring data. *Pest Manag Sci.* 2016;72:1187-201.
9. Belik A, Kokoreva A, Kolupaeva V. Migration of cyantraniliprole in fractured soils: calibration of pesticide leaching model by using experimental data. *E3S Web of Conferences.* 2020;169:01008.
10. Smetnik AA, Spiridonov YuYa, Shein YeV. *Migratsiya Pestitsidov v Pochvkah.* Moscow; 2005. (In Russ.)
11. Kolupaeva VN. [Compilation of an inventory of pesticides for their monitoring in groundwaters]. *Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem.* 2018;29(3):93-106. (In Russ.)
12. Sinitsyna OO, Khamidulina KhKh, Turbinskiy VV, Trukhina GM, Bashketova NS, Gildenskiold OA, Ampleyeva GP. [Current hygienic norm setting for different water types]. *Gigiyena i Sanitariya.* 2022;101(10):1151-7. (In Russ.)
13. Kolupaeva V, Gorbatov V, Nukhina I. Ecological zoning and assessment of the vulnerability of agricultural regions of the Russian Federation to groundwater pollution by pesticides. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2020;578:012037.
14. Umarova AB. *Preimushchestvennye Potoki Vlagi v Pochvakh: Zakonomernosti Formirovaniya i Znachenie v Funktsionirovanii Pochv.* PhD Thesis. Moscow; 2008. (In Russ.)
15. Kolupaeva VN, Kokoreva AA, Belik AA, Pletenev PA. Study of the behavior of the new insecticide cyantraniliprole in large lysimeters of the Moscow State University. *Open Agriculture.* 2019;4(1):599-607.
16. Kolupaeva V, Kokoreva A, Bondareva T. The study of metribuzin migration in lysimeters. *E3S Web of Conferences.* 2020;175.
17. Kolupaeva VN, Belik AA, Kokoreva AA, Astaikina AA. Risk assessment of pesticide leaching into groundwater based on the results of a lysimetric experiment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications.* 2019; 012023.
18. Chernogayeva GM, Malevanov YuA, Zhuravleva LP. [Monitoring of environmental pollution in the Russian Federation: the organization of surveillance and the synthesis and dissemination of information]. *Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem.* 2015;26(2):129-38. (In Russ.)
19. Kuz'mich VN, Onomareva LS, Skurlatov YuI. [The problems of the chemical safety of aqueous ecosystems and the novel approaches to water quality assessment]. *Khimicheskaya i Biologicheskaya Bezopasnost'.* 2015;(1-2):95-102. (In Russ.)

МЕТОДОЛОГИЯ БИОГЕОСИСТЕМОТЕХНИКИ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ ПОЧВЫ (ОБЗОР)¹

В.П. Калиниченко^{1,2}, А.П. Глинушкин²,
А.В. Свидзинский³, Т.М. Минкина⁴, Н.И. Будынков²,
О.Д. Филипчук², А.А. Околелова⁵, Д.А. Макаренков⁶

¹Институт плодородия почв юга России, Персиановка, Ростовская область, Россия;

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Большие Вяземы, Московская область, Россия; ³Берлинский медицинский университет Чарите, Берлин, Германия; ⁴Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия; ⁵Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия;

⁶Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Россия

Эл. почта: kalinitch@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; принята к печати 14.11.2022

Устаревший принцип имитации природных явлений в современном природопользовании обуславливает конфликт «биосфера – технология», ухудшающий условия ведения аграрного производства.

Предложено научно-технологическое направление «биогосистемотехника» как система не повторяющих закономерности природы напрямую (не имеющих прямых аналогов в природе) технических решений и технологий агрономии и защиты окружающей среды. Разработан и апробирован в длительных стационарных экспериментах принцип мелiorации почвы агроценозов посредством фрезерной обработки иллювиального горизонта 20–45 см. Однократная внутрпочвенная фрезерная обработка улучшает физико-химические, технологические и агробиологические параметры почвы, обеспечивает комфортный субстрат мелких и средних искусственных агрегатов почвы для геобионтов и растений. Разработан принципиально новый привод внутрпочвенного фрезерного рабочего органа, который обеспечивает снижение тягового сопротивления в 5–10 раз, повышение энергетической эффективности в два раза. В стандартной ирригации расход воды в 4–15 раз превышает потребность культивируемых растений и обуславливает деградацию гидрологического режима почвы и ландшафта. Предложена внутрпочвенная импульсная континуально-дискретная парадигма увлажнения. Питание растений происходит относительно концентрированным почвенным раствором, а устьичный аппарат растения функционирует в режиме регулирования. Улучшаются условия питания растений, повышается продуктивность, расход воды сокращается в 5–20 раз. Биогосистемотехника обеспечит приоритетное действие полимикробных сообществ и биопленок и улучшит функционирование гуминовых веществ и круговорот органического вещества почвы. Безопасный для экосферы дисперсный рециклинг минеральных и органических отходов, включая продукт газификации, предложено проводить одновременно с внутрпочвенным фрезерованием слоя 20–45 (30–60) см, что оптимизирует круговорот питательных элементов. Для защиты растений от фитопатогенов разработана внутрпочвенная импульсная дискретная система внесения биопрепаратов и пестицидов. Биогосистемотехника – это управляемая коэволюция биосферы и техносферы, ослабляющая фитопатогенную нагрузку на агроценоз и способствующая обеспечению продовольственной безопасности РФ.

Ключевые слова: биогосистемотехника, внутрпочвенное фрезерование, внутрпочвенное импульсное континуально-дискретное увлажнение, внутрпочвенный рециклинг отходов, внутрпочвенная импульсная дискретная система внесения биопрепаратов и пестицидов.

BIOGEOSYSTEMIC METHODOLOGY FOR SOIL HEALTH AND PRODUCTIVITY: A REVIEW

V.P. Kalinichenko^{1,2}, A.P. Glinushkin², A.V. Svidzinsky³, T.M. Minkina⁴, N.I. Budynkov²,
O.D. Filipchuk², A.A. Okolelova⁵, D.A. Makarenkov⁶

¹Institute of Fertility of Soils of South Russia, Persianovka, Russia; ²All-Russian Phytopathology Research Institute, Big Vyazemy, Russia; ³Humboldt University Charite Hospital, Berlin, Germany; ⁴Southern Federal University,

¹ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3-6 октября 2022 г.

Rostov-on-Don, Russia; ⁵Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia; ⁶Institute of Chemical Reagents and High Purity Chemical Substances of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

Email: kalinitch@mail.ru

The outdated principle of imitation of natural phenomena in modern nature management causes the conflict "biosphere vs. technology", which worsens conditions for agricultural production. A scientific and technological approach "Biogeosystem Technique" is developed as a system of technical solutions and technologies for agronomy and environmental management that do not reproduce the laws of nature directly (have no direct analogies in nature). In particular, the principle of soil reclamation by milling a 20- to 45-cm illuvial horizon has been developed and tested in long-term field experiments. A new drive for the subsoil milling that has been developed provides for a 5- to 10-fold reduction in traction resistance and a two-fold increase in energy efficiency. With standard irrigation, water consumption is 4–15 times higher than the cultivated plants' requirements for water. This disproportion causes degradation of soil hydrological regime and landscape. An intrasoil pulse continuous-discrete moistening paradigm is proposed. Nutrition for plants is provided using a relatively concentrated soil solution, and the stomatal apparatus of a plant functions in a regulation mode. This improves plant nutrition, increases plant productivity, and reduces water consumption 5–20 times. The Biogeosystem Technique approach will ensure the priority of the effects of polymicrobial communities and biofilms and improve the function of humic substances and soil organic matter. A dispersed recycling of mineral and organic wastes, including gasification product, during intrasoil milling of a layer of 20–45 (30–60) cm, which is safe for the ecosphere, is developed to optimize the circulation of nutrients. To protect plants from phytopathogens, an intrasoil pulsed continuous-discrete system for application of biological products and pesticides is developed. Biogeosystem Technique provides for a controlled co-evolution of the biosphere and the technosphere, thus reducing the phytopathogenic burden of an agroecosystem and helping to ensure the food security of the Russian Federation.

Keywords: Biogeosystem Technique, intrasoil milling, intrasoil pulsed continuous-discrete moistening, intrasoil waste recycling, intrasoil pulsed discrete system for biological preparations and pesticides applying.

Введение

Устаревший принцип современного природопользования, заключающийся в имитации природных явлений с целью удовлетворения потребностей пользователя, обуславливает все усиливающийся конфликт «биосфера – технология» [1]. Распространение вредителей и болезней, включая микозы растений, является результатом неудовлетворительных условий развития растений на всех стадиях органогенеза. Несовершенство технологий управления развитием агроценоза снижает резистентность растений к фитопатогенам. Это ослабляет продовольственную безопасность страны. Возможности индустриальной эксплуатации биосферы исчерпаны. Тем не менее, продолжается недальновидное лоббирование устаревших имитационных технологий промышленности, сельского хозяйства, охраны окружающей среды. Это плодит отходы, деградацию и опустынивание земель, все большее распространение приобретают микозы растений.

На имеющейся технической и технологической базе реализовать устойчивую стратегию развития и обеспечить здоровье растений, кардинальное преодолеть распространение патогенеза растений невозможно. Поскольку в имитационном природопользовании выбор технологии и технических средств ее осуществления ориентирован на минимизацию затрат, то неполное знание отклика природной системы на ее технологическое возмущение оборачивается многочисленными рисками, прямым и отсроченным ущербом окружающей среде, и большими затратами вместо искомой экономии средств [2, 3]. Природо-

пользователю средней квалификации современный технологический уровень представляется достаточным. В результате этого недальновидного подхода, под сомнением оказываются коэволюционное развитие человечества, техносферы и биосферы, и сама эпоха ноосферы [4–6]. Стремление к краткосрочной выгоде исключает создание биологически ориентированной экономики [7]. Термин «ноосфера» преимущественно просто используют в качестве фигуры речи, при этом сохраняя текущую парадигму развития, которая уже более не работоспособна. Более того, имеется опасность ухудшения ситуации, поскольку вместо принятия основанных на новом знании о долгосрочной гармонизации взаимоотношений «биосфера – технология» предлагают частичную модернизацию технологии в рамках устаревшей парадигмы развития, основанной на стремлении к краткосрочной окупаемости вложений. Призывы получить преференции нового уровня от природопользования, основанные на более высоком уровне копирования природы, являются ложными. Природоподобные технологии не могут быть копированием, во-первых, по определению. Во-вторых, они должны быть подобны некоторым проявлениям природы, которые только еще надлежит выбрать на основе квалифицированной эвристической интуиции, но никак при этом не копировать природу. Не этого примитивного подхода ждет природа от своего «венца творения». В настоящее время «венец» неверно понимает замысел природы. Этот замысел вовсе не в том, чтобы давать преференции человечеству за то, что оно

самонадеянно уродует экосферу. На этом примитивном пути поиска большей частью ложных материальных благ любой ценой очень скоро можно повторить путь биологических видов, которые обитали на Земле, но канули в небытие как больше не представляющие интереса для природы. Современные технологии преимущественно являют собой результат Managerial shirking – управленческого уклонения (более точный перевод с английского – отлынивание менеджеров) от принятия и продвижения новаций в пользу краткосрочной экономической выгоды на основе устаревших технологий. Этот подход, дестабилизируя природу, не позволяет преодолеть современный конфликт биосфера–технология, не позволяет повысить производство, при этом существенно ускоряя вероятность наступления неблагоприятного исхода для Homo sapiens на Земле.

Плодородные земли человек всегда занимал в первую очередь, а затем уничтожал урбо- и техно- инфраструктурой. Потеря земель угрожающе нарастает. До 42 % ресурсов Земли утрачено [8]. До 60 % экосистем нарушено [9, 10]. За историю землепользования человечество уничтожило более двух миллиардов гектаров плодородных почв – больше площади современного земледелия [11].

Следует пытаться в технологии хотя бы немного приблизиться к замыслу природы, и только после этого ожидать результата от собственного, в меньшей степени, чем раньше противоречащего природе, принципиально нового технологического развития. В качестве новой парадигмы развития нами предложено научно-технологическое направление «биогеосистемотехника» [12].

Биогеосистемотехника принципиально отличается от современной парадигмы развития тем, что вместо прямой имитации явлений природы предлагает поиск и продуктивное использование ниш развития [13], которые Природа оставляет человеку для достижения гармоничного развития. Не имеющих прямых аналогов в природе научно-технических решения могут быть более продуктивными, чем копирование Природы. Здесь – коренное отличие Биогеосистемотехники от Sustainable Development, Green Economy, NBIC (Roco and Bainbridge, 2002) [14], НБИКС [15], которые декларируют отсроченные обещания предпочтений от копирования природы. Возможности биогеосистемотехники обоснованы на современном междисциплинарном научном уровне и показаны в практике. Биогеосистемотехника – это принципиально новые природоподобные технические средства и технологии обеспечения устойчивой высокопродуктивной эволюции и здоровья почвы, сохранения пресной воды, рециклинга отходов, прироста уровня использования ФАР, улучшения условий органогенеза растений и их резистентности к фитопатогенам, качества жизни и труда [16].

В рамках биогеосистемотехники разработаны пути создания принципиально новых биогеосистем для повышения продовольственной безопасности, причем с возможностью улучшения здоровья почвы, растений, животных и человека [17–19].

Методология исследований

Научно-техническое обоснование биогеосистемотехники выполнено на основании изучения геофизических, химических, физико-химических свойств почвы лабораторным и полевым методами. Проведено моделирование управления агрегатной композицией почвы в почвенном канале, моделирование увлажнения почвы и переноса вещества в почвенных колонках, математическое моделирование биогеохимического цикла вещества [20–23]. Выполнены многолетние производственные экспериментальные почвенно-мелиоративные исследования на стационарных участках на черноземах и каштановых почвах [24]. Применены стандартные методы изучения почвы [25], а также собственные методические подходы, модели и программы [26]. Трансцендентальный методологический подход биогеосистемотехники основан на применении квалифицированной эвристической интуиции при синтезе принципиально новых артефактов техники.

Результаты и их обсуждение Управление структурой и агрегатной системой почвы

Биосфера создана микроорганизмами. Органическое земледелие в его стандартном виде не обеспечивает масштабный микробиологический процесс в почве. Расширенное воспроизводство плодородия не достигается. Особенно показателен в этом отношении тот факт, что азотфиксация имеет место только на уровне стагнации сложившегося низкого уровня продуктивности почвы, а расширенное продуцирование азота в почве не наблюдается [27, 28]. Именно такой результат может быть вне сомнений. Ведь до органического земледелия та же почва много лет эксплуатировалась в рамках индустриального земледелия. Биологическая эволюция такой почвы по сценарию деградации обуславливает относительно низкий производственный результат органического земледелия.

Стандартная и мелиоративная обработка слоя почвы от 0–5 до 0–120 см орудиями с пассивными рабочими органами [29, 30] не улучшает структуру и архитектуру почвы. После стандартной механической обработки крупноблочная структура почвенного профиля сохраняется долгое время, корневая система растения не имеет возможности полноценного развития в разорванном почвенном континууме (рис. 1).

Фрезерование верхнего слоя почвы обуславливает уплотнение подпахотного слоя почвы. Почва стано-



вится более склонной к развитию эрозии [32]. При использовании беспашотной (no-till) технологии почва уплотняется. Ухудшаются условия проникновения корневой системы вглубь почвы. Урожайность культур уменьшается (рис. 2).

Наступает неблагоприятная положительная обратная связь в системе «почва – растение», поскольку подпахотный слой приобретает все сильнее проявляющиеся иллювиальные свойства. Усиливается неблагоприятная роль явления супердисперсности органоминеральной фазы почвы [33].

Теория и практика механической обработки почвы ориентированы на рыхлящие устройства с пассивными рабочими органами. Такие рабочие органы имеют ту же скорость перемещения относительно обрабатываемой среды, как и источник механической тяги, приложенной к орудью. Пассивные рабочие органы недостаточно рыхлят и перемешивают обрабатываемый слой почвы. После длительного применения такого рода механической обработки, которая обуславливает глыбистое агрегатное устройство обработанной среды, восстановление деградированных



Рис. 1. Блоки почвы в профиле солонца через 30 лет после трехъярусной обработки [17, 31]



Рис. 2. Развитие корневой системы в верхнем 4–7 см слое почвы в результате длительного использования технологии No-till (Great Plains: Vertical Tillage Principles. <https://www.youtube.com/watch?v=EwG4hqtN0VA>)

почв является сложной задачей [35]. Актуальность задачи сохранения, восстановления и долгосрочного повышения плодородия почв следует из того, что огромные территории Земли уже практически уничтожены несовершенной агротехникой, что угрожает биосфере и жизни [11], приводит ко все большему распространению болезней растений, включая особенно опасные микозы.

Имеет перспективу фрезерование почвы. Этот прием отличается тем, что соответствующее орудие для обработки почвы имеет скорость перемещения рабочих органов относительно обрабатываемой среды в несколько раз выше поступательной скорости перемещения орудия в целом относительно почвы. Такие рабочие органы называют активными. Фрезерование поверхностного слоя почвы имеет недостатки. С одной стороны, агрегатное устройство обработанного слоя отличается мелким размером агрегатов, что полезно для обеспечения беспрепятственного органогенеза растений. С другой стороны, рассматриваемая обработка полностью разрушает остатки растительного покрова, потому снижается эрозионная устойчивость почвы. Обратный угол резания фрезеров, оборудованных фрезами на вертикальном валу, обуславливает интенсивное уплотнение слоя почвы под обрабатываемым фрезами слоем. Тяговое сопротивление фрезы пропорционально диаметру фрезы. Потому глубокая фрезерная обработка почвы горизонтальным фрезером с поверхности сопряжена с большими затратами энергии.

Нами в 60–70-х годах XX в. был разработан принцип обработки почвы в целях мелиорации посредством фрезерования иллювиального горизонта горизонтальным фрезером, оборудованным фрезами диаметром 25 см, глубина обработки 20–45 см. Первоначально внутрипочвенную фрезерную обработку позиционировали только как альтернативу трехъярусной обработке. Цель была обеспечить интенсивное разрушение крупных почвенных агрегатов [36]. Параллельно решалась задача уменьшения тягового сопротивления, поскольку внутрипочвенное фрезерование до глубины 45 см выполненное полностью погруженными внутрь почвы фрезами диаметром 25 см, обуславливает значительно меньшие затраты энергии, чем фрезерование почвы с поверхности на глубину 0–45 см. В последнем случае диаметр фрезы должен быть более 90 см с учетом диаметра вала и вспучивания обработанной почвы. Решалась также вторая задача – сокращение дефляции и водной эрозии, поскольку после внутрипочвенного фрезерования на поверхности почвы сохраняются растительные остатки.

В Ростовской области выполнены длительные стационарные полевые эксперименты, в которых было изучено внутрипочвенное фрезерование [17, 31]. Сравнивали стандартную основную отвальную обработку

почвы на глубину 20–22 см, стандартную почвенно-мелиоративную трехъярусную обработку почвы на 40–45 см, и новый прием мелиоративной обработки почвы – внутрипочвенное фрезерование слоя 20–45 см.

Первый в мире внутрипочвенный фрезер ПМС-70 был испытан в 1972 году, стационар Ленинский путь (рис. 3) [31].

Внутрипочвенный фрезер ФС-1.3 (рис. 4) был испытан в 1976 году (стационар XVII Партконференции) [17].

Однократное внутрипочвенное фрезерование почвы сформировало мелкие и средние искусственные макроагрегаты почвы 1–3 мм в слое 20–45 см. Количество таких агрегатов в иллювиальном горизонте почвы после внутрипочвенного фрезерования было до 40%, в три-четыре раза больше, чем после стандартной трехъярусной обработки [17]. Однократное внутрипочвенное фрезерование улучшает агрофизические, химические и физико-химические свойства почвы, ризосфера получила приоритет [37]. При стандартной агротехнике содержание гумуса в почве в слое 0–20 см составило 2%, в слое 20–40 см – 1,1%. Внутрипочвенное фрезерование способствовало увеличению содержания гумуса в светло-каштановой почве в слое 0–20 см до 2,3%, в слое 20–40 см до 1,7%, в каштановой почве соответственно – 3,3%, 1,9%. Более высокая продуктивность культур после однократного внутрипочвенного фрезерования по сравнению со стандартами обработки почвы наблюдается в течение длительного периода, порядка 40 лет. Улучшаются условия резистентности растений к фитопатогенам на всех стадиях органогенеза. Длительное повышение урожайности на 30–50% в жизненном цикле технологии обеспечивает высокие экономические показатели, включая повышение рентабельности в 2–3 раза [1, 17, 31].

В развитие идеи внутрипочвенного фрезерования, разработан принципиально новый привод фрезера. Новый привод обеспечивает снижение тягового сопротивления орудия в 5–10 раз, энергетическая эффективность внутрипочвенного фрезерования почвы повышается в два раза (рис. 5).

Ирригация

Роль воды в эволюции почвы, развитии почвенной биоты, производстве продовольствия и сырья несомненна. Человечество тяготеет к территориям, где возможность приемлемого обитания, получения продовольствия и сырья не связана с жесткой необходимостью дополнительного увлажнения почвы. Однако ввиду довольно неуклюжего поведения человека в экосфере и лавинообразной деградации земель, используемых в сельском хозяйстве [10, 11], относительно мало количество территорий Земли, где сочетание факторов экосферы обеспечивает возникновение почв со стабильным плодородием. Поэтому возникает

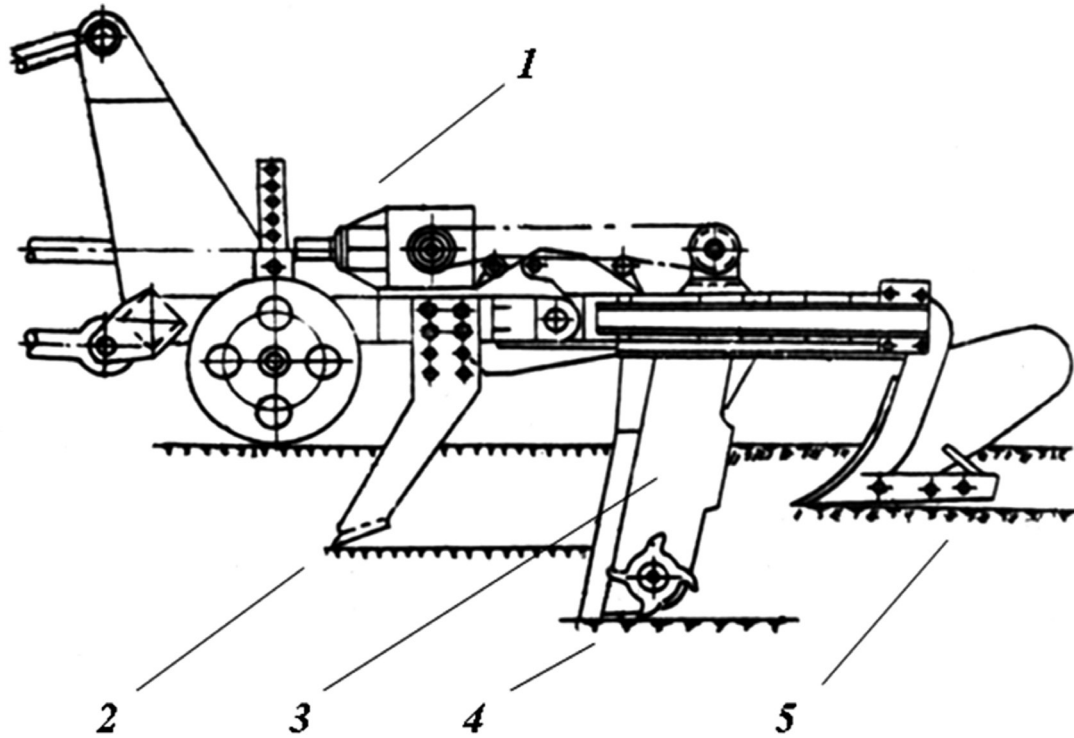


Рис. 3. Устройство для мелиоративной внутрипочвенной фрезерной обработки почвы ПМС-70, вид сбоку.
 1 – механический привод, 2 – рыхлящий нож, 3 – редукторная рыхлящая стойка, 4 – фрезерный рыхлитель иллювиального и переходного горизонтов почвы, 5 – пассивный плужный корпус для обработки верхнего слоя почвы

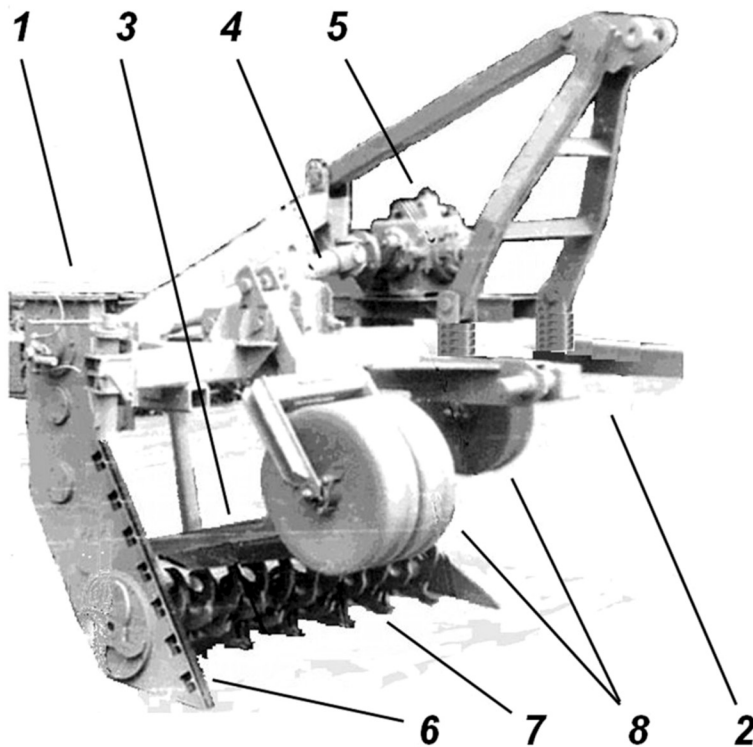


Рис. 4. Устройство для мелиоративной внутрипочвенной фрезерной обработки почвы ФС-1,3.
 1 – рама, 2 – навесное устройство, 3 – плоскорежущий плужный корпус верхнего слоя, 4 – привод бортового редуктора, 5 – редуктор, 6 – бортовой редуктор, 7 – роторный рыхлитель внутреннего слоя, 8 – опорное колесо



Рис. 5. Орудие ПМС-260 (2008 год) для внутрпочвенной фрезерной обработки почвы [38]

необходимость дополнительно увлажнять почву. На ирригацию в настоящее время расходуют 95% общемирового остродефицитного ресурса пресной воды. Одновременно усиливается деградация почв, разрушаются ландшафты и целые природно-хозяйственные комплексы [39]. Норма расхода воды на ирригацию в 4–15 раз превышает потребность культивируемых растений [40]. По этому поводу следует особо отметить, что стандартный эмпирический имитационный метод расчета оросительных и поливных норм дает завышенный результат, способствуя «обоснованию» продолжающегося, в действительности, необоснованного расходования пресной воды. Сложившийся в ирригации подход к определению размеров подачи воды для увлажнения почвы в целях, якобы, обеспечения максимальной продуктивности растений, в действительности не соответствует представлениям о физике почвы и питании растения [41, 42]. Нами показано, что имеет место системный дефект искусственного гидрологического режима почвы, который следует из дефектной устаревшей и опасной для биосферы фронтальной гравитационной континуально-изотропной парадигмы ирригации. Дефект состоит в том, что в стандартной ирригации оказываются совмещенными фаза подачи воды и фаза ее распределения внутри почвы. Причем вторая фаза является важнейшей в отношении реального увлажнения ризосферы каждого

растения, сохранения воды и структуры почвы, опасности утраты воды из почвы в виде преференсных потоков в зону аэрации. Тем не менее, при столь высокой значимости, фаза распределения внутри почвы абсолютно не контролируется в современной ирригации. В результате наступает деградация структуры почвы ввиду флотации и супердисперсности почвенной массы, слитизация, осолонцевание, которые обуславливает современная ирригация [33].

Для исключения недостатков традиционной фронтальной гравитационной континуально-изотропной парадигмы ирригации нами предложена новая водная стратегия биогеосистемотехники – внутрпочвенная импульсная континуально-дискретная парадигма увлажнения [43, 44]. Новая парадигма искусственного увлажнения почвы принципиально отличается от устаревшей стандартной парадигмы ирригации тем, что фаза подачи воды в почву и фаза распределения воды внутри почвы разнесены во времени.

Фаза подачи воды в почву предусматривает впрыск воды в почву шприцевым элементом 1. Воду в процессе перемещения шприца в почве дозированно распределяют в вертикальном цилиндре первичного увлажнения на глубине 10–40 см (рис. 6).

Последующая фаза увлажнения почвы представляет собой достаточно быстрое распределение воды из цилиндра первичного увлажнения в прилегающий

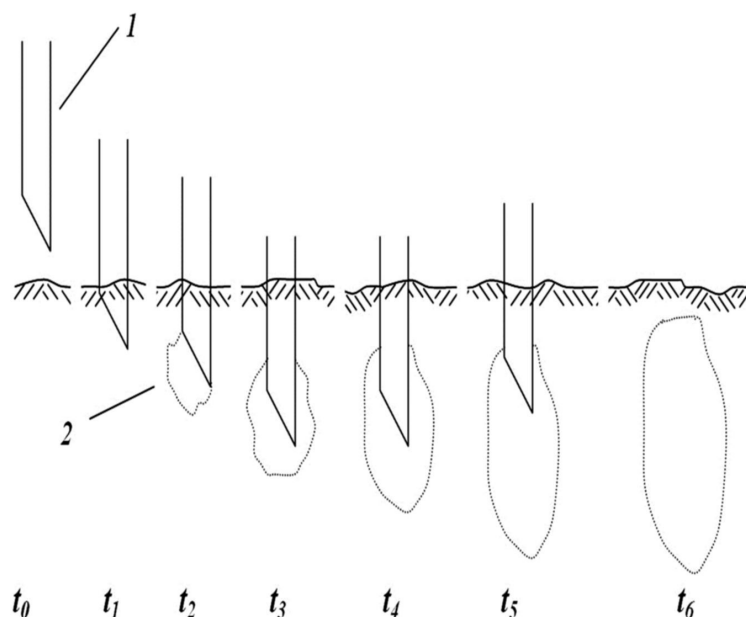


Рис. 6. Внутрипочвенный импульсный континуально-дискретный способ увлажнения почвы
1 – шприцевой элемент, 2 – контур увлажнения, $t_0 - t_6$ – стадии подачи воды из шприца

объем почвы в прилегающий элемент континуума почвы путем капиллярно-пленочного переноса и перегонки в парообразной форме. За счет этого термодинамический потенциал воды увлажненной почвы достаточно быстро понижается. Через 5–10 минут после выполнения инъекции воды он составляет около $-0,2$ МПа. Это существенно ниже искомого в стандартной ирригации потенциала -33 кПа, соответствующего состоянию наименьшей влагоемкости почвы. Потенциал при стандартной ирригации может быть даже выше в условиях подтопления, в таких условиях целевой термодинамический потенциал воды назначают очень высоким, вплоть до -10 кПа.

При стандартной ирригации, включая тепличное хозяйство, стремятся к тому, чтобы в целевом агрофитоценозе установить режим потенциальной транспирации растений, сделать влагу почвы максимально доступной растениям, применяют гидропонику. Это приводит к тому, что при избытке влаги устьичный аппарат растения открывается полностью, достигается максимальный уровень транспирации. Предполагают, что в таком режиме обеспечивается максимальная продуктивность растений. Однако это совсем не так. Рассмотренный режим влажности почвы избыточен, поскольку структура почвы становится нестабильной. Высокая влажность обуславливает быструю утрату механических свойств и структуры почвы. Особенно обедняется агрегатная системы почвы, поскольку имеет место значительный вклад локальной супердисперсности в генеральный облик почвенного континуума [45]. В обозримой исторической ретроспек-

ции это уже не раз приводило к краху цивилизаций.

Внутрипочвенный импульсный континуально-дискретный способ увлажнения стабилизирует структуру и агрегатное устройство почвы, обеспечивает питание растения относительно более концентрированным почвенным раствором. Устьичный аппарат растений функционирует в режиме регулирования. По этой причине расход воды сокращается не только по сравнению со стандартной ирригацией, но также и по сравнению с устаревшим эмпирическим пониманием потребности растений в воде, которое базируется на «почвенно-гидрологической константе» – наименьшей влагоемкости. Мы не ставим под сомнение общеизвестную концепцию А.А. Роде. Она, безусловно, справедлива для почвенного континуума, но применять ее для управления водным режимом растений, как видим, уже нельзя. Режим питания растения за счет внутрипочвенного импульсного континуально-дискретного способа увлажнения улучшается. Улучшается протекание органогенеза и повышается продуктивность растений (рис. 7).

Внутрипочвенный импульсный континуально-дискретный способ увлажнения исключает потери воды из почвы в агроландшафт. Сокращение расхода воды на увлажнение почвы составляет по нашим оценкам до 5–20 раз по сравнению со стандартной ирригацией. Относительно низкая влажность почвы способствует повышению устойчивости растений к фитопатогенам. Ту же роль играет устойчивый органогенез растений, позволяя усилить резистентность растений.

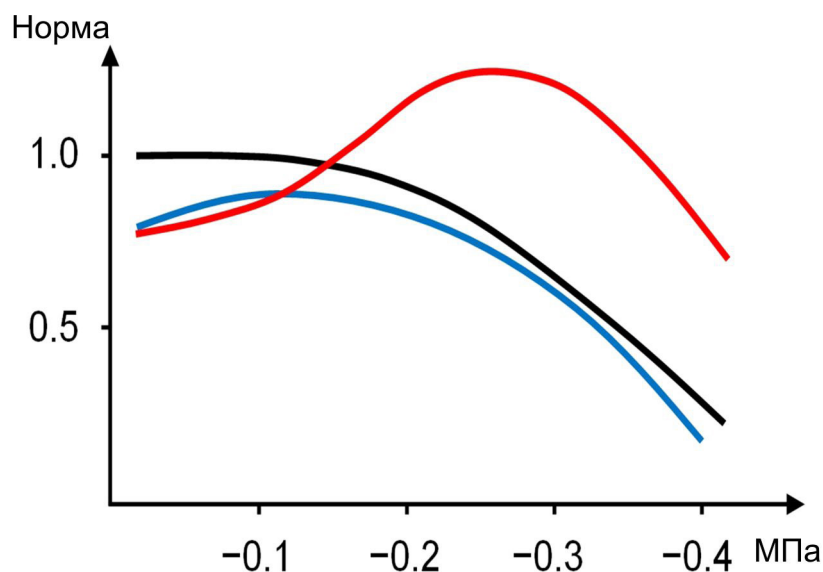


Рис. 7. Относительная транспирация и биологическая продуктивность растений в зависимости от термодинамического потенциала почвенного раствора (МПа) [1]. Черная линия – относительная транспирация, синяя – относительная биологическая продуктивность растений при стандартной ирригации, красная – относительная биологическая продуктивность растений при внутрипочвенном импульсном континуально-дискретном увлажнении

Органическое вещество почвы и рециклинг отходов внутри почвы

Даже в лесной экосистеме Аппалачей 78,2% органических веществ разлагаются до парниковых газов. Большая часть органического вещества выщелачивается [46]. Это вездесущий процесс. Органическая биодеградация как микробный контролируемый процесс влияет на плодородие почвы. Проявления органического вещества почвы (SOM), водорастворимого органического вещества (DOM) и гуминовых веществ (HS) в почве в настоящее время весьма скромны по сравнению с функционированием строго скоординированных структурных полимикробных ассоциаций и биопленок в толстой кишке живого организма [47]. Полимикробные сообщества и биопленки могут быть использованы в качестве стартового инструмента улучшения почвы. Методы биогеосистемотехники в состоянии обеспечить гармоничное действие полимикробных биопленок. Это будет координировать состояние органического вещества почвы, улучшит функционирование HS, обеспечит улучшенный круговорот SOM, DOM.

Стандартные технологии утилизации обеспечивают только частичную переработку отходов. Эти технологии опасны неблагоприятными эффектами на почву, водные системы, атмосферу. Каждая стандартная технология имеет свой отход. Он подлежит утилизации в свою очередь. В результате применения стандартных технологий утилизации отходов, нарушается баланс углерода, других биофилов, которые трансформируются в процессе хранения/захоро-

нения вплоть до образования ядовитых субстанций [48]. Это обедняет биосферу, ухудшает свойства экосферы, включая формирование неблагоприятных условий для развития растений и, наоборот, приоритет развития и распространения вредителей и болезней растений и животных.

Разработана технология рециклинга минеральных и органических отходов в виде агрегатов размером до 3–5 мм одновременно с внутрипочвенным фрезированием слоя 20–45 (30–60) см. Если по условиям обеспечения органогенеза необходим более мощный корнеобитаемый слой, то возможно провести внутрипочвенное фрезирование на большую глубину (рис. 8) [49].

Развитая искусственная геофизическая система агрегатов «почва – отходы» приоритетна для рециклинга отходов в питательные вещества для растений. Опасные соединения успешно трансформируются в элементы питания растений ввиду приоритетных условий развития для сапрофитов в развитой агрегатной почвенной экосистеме.

Внутрипочвенная утилизация с фрезированием почвы и одновременным внесением вещества в зону рыхления обеспечивает эффективный рециклинг отходов. Возможен рециклинг самых разнообразных по происхождению и форме отходов. Ввиду использования трансцендентального внутрипочвенного режима, исключаются природные трофические цепи распространения фитопатогенов.

На фоне внутрипочвенного фрезирования и внесения вещества в зону рыхления следует применять

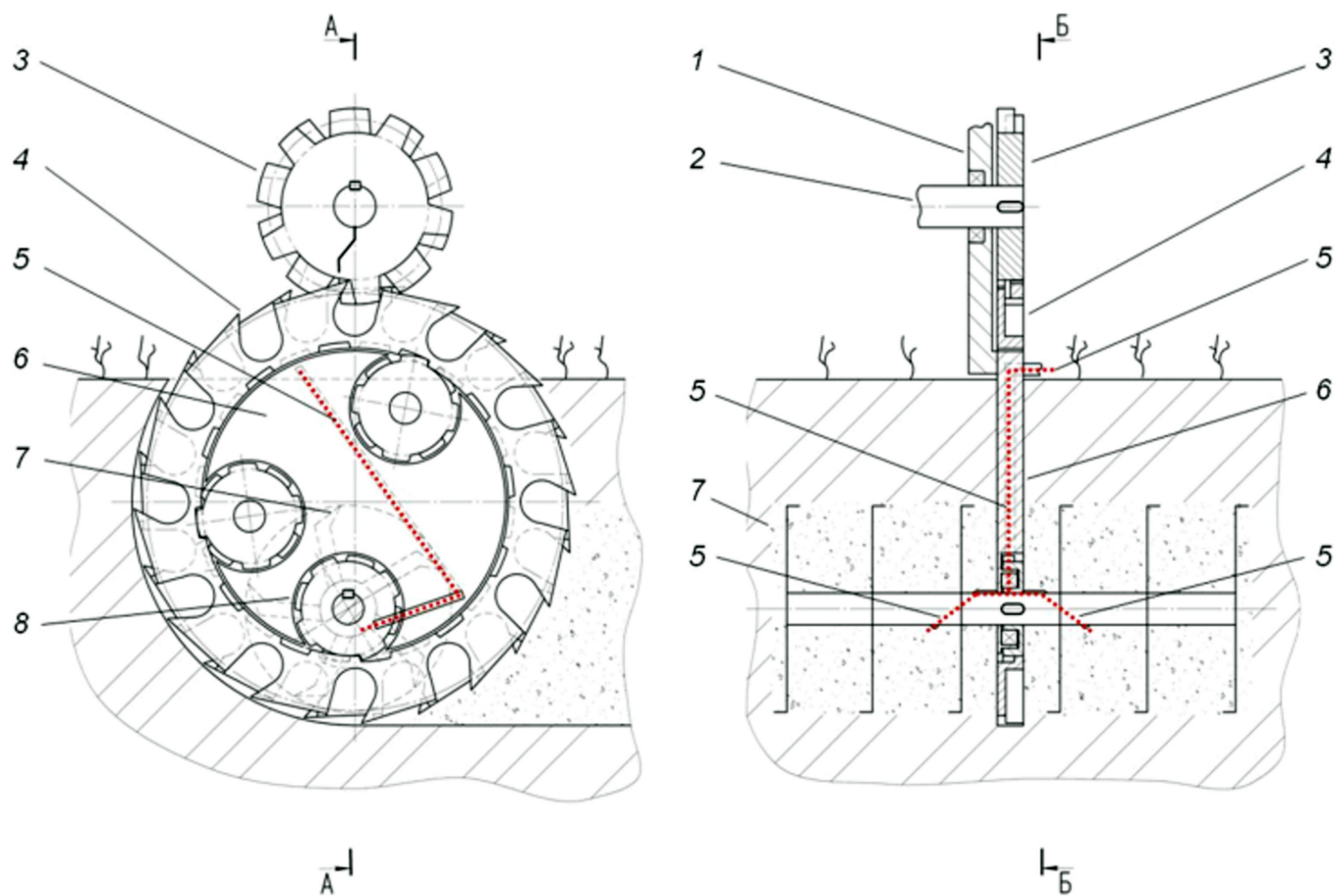


Рис. 8. Устройство для внутрипочвенного фрезерования и внесения вещества в зону рыхления [49].

1 – рама, 2 – вал привода, 3 – ведущая шестерня, 4 – кольцевой щелерез с внутренней промежуточной шестерней привода, 5 – канал подачи вещества внутрь обрабатываемого слоя почвы, 6 – диск, 7 – фрезерный рыхлитель, 8 – ведомая шестерня

внутрипочвенную импульсную континуально-дискретную систему увлажнения почвы с внесением вещества в жидкой форме (пульпа, смесь) для питания растений, синтезировать целевое вещество внутри созданной тонкодисперсной системы отходов и искусственной системы относительно мелких макроагрегатов почвы. Достигается медицинская и ветеринарная санитарная безопасность наземно-почвенных и водных экосистем. В новой агрегатной системе почвы, созданной путем внутрипочвенного фрезерования, после проведения внутрипочвенного импульсного континуально-дискретного увлажнения почвы формируется относительно низкий термодинамический потенциал воды. В результате устьичный аппарат растения работает в режиме регулирования. Потребление воды сокращается, а потребление питательных веществ, наоборот увеличивается, поскольку концентрация почвенного раствора относительно высокая, и при этом достаточна для максимального потока почвенного раствора к корневым волоскам и высокого уров-

ня питания растения [44]. Имеет место относительно высокая электропроводность почвенного раствора, что также благоприятно для формирования потока почвенного раствора к корневым волоскам. Ассоциация и комплексообразование ионов в почвенном растворе повышенной концентрации проявляются в значительной степени. Ассоциаты и особенно комплексы имеют существенно меньшую подвижность в почвенном растворе по сравнению со свободными ионами, которые преимущественно представлены в растворе низкой концентрации. Значительная часть опасных соединений, включая разнообразные соединения с тяжелыми металлами, переходит в форму комплексов и затем в твердую фазу. Поскольку почвенная система получает устойчивые новые свойства, условия для перехода таких химических соединений в еще менее растворимые формы и их пассивирование, включая роль карбонатно-кальциевой системы в почвенном растворе [20–23], дополнительно усиливаются. Таким образом новая система обработки почвы, рециклинга

отходов внутри почвы, увлажнения почвы усиливает биогеохимический барьера «почва – ризосфера», что резко ограничивает поступление тяжелых металлов и других опасных соединений в растение [50]. Микробиологическая активность ризосферы усиливаются [51]. Идет оздоровление почвы. Повышается резистентность растений к фитопатогенам, достигается высокая биологическая продуктивность агроценоза и высокое качество получаемой продукции [52–54].

Широкую долгосрочную перспективу гармоничного сочетания биосферы и техносферы, приоритетные условия органогенеза растений и их устойчивость к фитопатогенам обеспечивает разработанная нами технология рециклинга отходов на основе газификации органического вещества [55]. Изобретение является почвенно-химической технологией охраны окружающей среды и рециклинга отходов.

Техническое решение позволяет утилизировать углеродсодержащие отходы; производить золу уноса как высококачественного строительного вяжущего вещества; производить синтез-газ или тепловую энергию; производить и очищать синтез-газ в низкоуглеродном биочаре, получать обогащенный элементами питания растений низкоуглеродный биочар. Масса низкоуглеродного биочара составляет 3–7% от массы исходного продукта. Это соответственно уменьшает транспортные расходы в связи с доставкой низкоуглеродного биочара к объекту использования. Система предусматривает дисперсное внесение низкоуглеродного биочара внутрь почвы в твердом дисперсном виде, жидком виде или виде пульпы в процессе внутрипочвенного фрезерования слоя почвы 20–50 (30–60) см и/или внутрипочвенной фертигации. В результате будут созданы условия для последующей переработки низкоуглеродного биочара и других одновременно вносимых в

почву отходов сапрофитами почвы, что улучшит физические, химические и физико-химические свойства почвы и питание растений, позволит исключить опасное неконтролируемое эоловое и гидрологическое распространение отходов, повысить ветеринарно-медицинское качество экосферы, улучшить здоровье и плодородие почвы, обеспечить здоровье растений.

Биологическая защита растений

Внутрипочвенная импульсная дискретная система внесения биопрепаратов и пестицидов для защиты растений усилит их действие на вредные организмы и обеспечит безопасность экосферы.

Разработан способ внесения биопрепарата внутрь верхнего слоя почвы [56]. Способ (рис. 9) предусматривает импульсную дискретную внутрипочвенную подачу рабочего раствора биопрепарата (после этого отдельно возможна подача воды) посредством шприцевого элемента 1 под давлением. Впрыск начинают с момента погружения нижнего конца шприцевого элемента под поверхность почвы 2 и заканчивают впрыск в момент его извлечения из почвы. Обработку почвы и нижней поверхности расположенных на почве растительных остатков проводят последовательно. Сначала раствором биопрепарата. Затем, через некоторое время – водой.

Раствор биопрепарата вносят на глубину 0,02–0,05 м. Шаг внесения 0,20–0,25 м. Диаметр цилиндра обработанной раствором биопрепарата почвы и нижней поверхности расположенного на почве слоя растительных остатков составляет 0,10–0,15 м.

Для обеспечения условий развития инокулированного микробного сообщества после внесения биопрепарата, в течение времени, необходимого для получения устойчивого микробного сообщества, в позиции

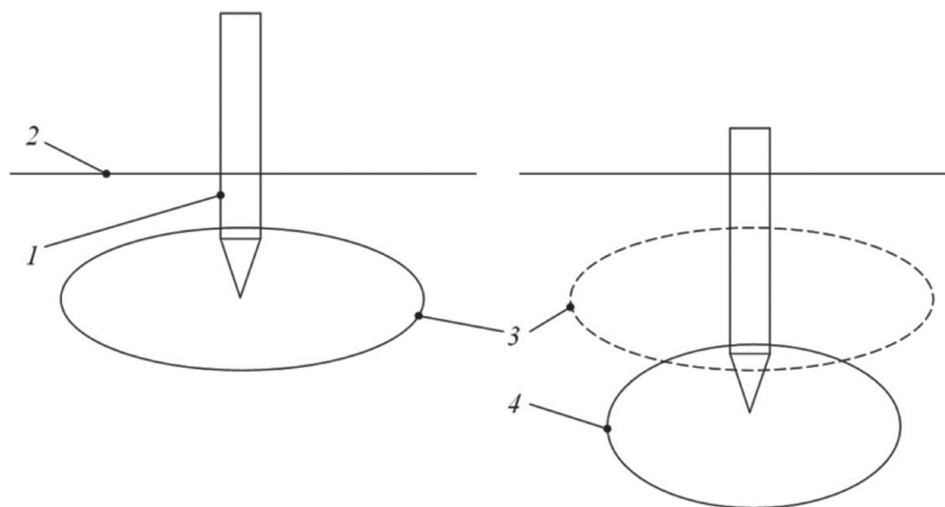


Рис. 9. Способ внесения биопрепарата внутрь верхнего слоя почвы

внесения рабочего раствора, содержащего биопрепарат, например, через 3–5 дней после обработки почвы раствором биопрепарата, выполняют импульсное дискретное внутрипочвенное увлажнение почвы водой. Импульсное дискретное внутрипочвенное увлажнение почвы водой выполняют до 3–4 раз на глубину 0,05–0,10 м. Диаметр цилиндра увлажненной водой почвы составляет 0,07–0,11 м. Периодичность выполнения импульсного дискретного внутрипочвенного увлажнения почвы водой составляет 3–7 дней.

Увлажнение почвы производят глубже, чем внесение биопрепарата, поскольку вода после увлажнения поступит в расположенный выше слой в достаточном количестве посредством перегонки пара. При этом наличие воды в слое до 0,11 м позволит обеспечить приоритетную экспансию микробного сообщества, представленного в биопрепарате, вглубь почвы.

Внутрипочвенное континуально-дискретное увлажнение почвы обеспечивает относительно низкий термодинамический потенциал воды в почве. Это благоприятно для развития внесенного биологического материала, и, в то же время, снижает активность вредоносной микрофлоры нативной почвы. Кроме того, относительно низкая влажность позволяет снизить расход воды из почвы на капиллярный перенос воды к поверхности испарения, при этом нужное для поддержания приоритетных условий развития инокулированного микробного сообщества количество воды небольшое. Дискретный характер исходного распределения биопрепарата не критичен с точки зрения охвата всего континуума почвы, поскольку расстояние между смежными цилиндрами обработанной биопрепаратом почвы составляет 0,05–0,1 м, и это пространство легко будет освоено инокулированным микробным сообществом в процессе его экспансии.

Именно в то же дискретное обработанное биопрепаратом пространство следует размещать семенной материал озимой культуры, что позволит обеспечить приоритетную защиту семени и формируемой им ризосферы от воздействия опасных биологических объектов на раннем самом опасном с фитопатологической точки зрения этапе органогенеза. Положительную роль играет дополнительное внутрипочвенное импульсное континуально-дискретное увлажнение. При этом относительно низкий термодинамический потенциал почвенной влаги обеспечивает оптимальные условия для развития злаков, и наоборот – ухудшает условия развития патогенов. Только по мере расширения ареала ризосферы она начнет осваивать менее защищенное сопряженное с обработанным биопрепаратом пространство почвы, но уже развившееся здоровое растение на последующих этапах органогенеза значительно менее восприимчиво к эпифитотиям, что сокращает риск поражения растения, формирующегося в рассматриваемых условиях фитоценоза.

Способ внесения биопрепарата внутрь верхнего слоя почвы улучшает условия развития содержащихся в биопрепарате биологических объектов внутри почвы. Это позволяет повысить их жизнеспособность. Достигается высокий биологический эффект воздействия на вредные объекты, создаются приоритетные условия защиты растений, улучшаются условия органогенеза культурных растений. Способ оптимизирует фитосанитарную обстановку в агрофитоценозе. Улучшается здоровье почвы. Повышается объем производства и качество продукции. Способ можно применить для внесения пестицидов.

Методы биогеосистемотехники в состоянии обеспечить формирование привлекательного габитуса декоративных и защитных насаждений. При этом будет увеличена продолжительность жизни деревьев и кустарников, получен высокий длительный микроклиматический и/или рекреационный эффект.

Биогеосистемотехника обеспечивает биолого-почвенное решение проблем углеродного баланса [57], питания растений [12], секвестра углерода [58], производства энергии [16], стабилизации климатической системы.

Реализацию биогеосистемотехники в решающей степени определяют квалифицированная эвристическая интуиция при принятии решений о векторе стратегии развития и степень совершенства политико-правовых инструментов выбора программ стратегического развития РФ [59]. Таким образом можно ослабить возможности для проявления негативного влияния управленческого уклонения на продвижение долгосрочных новаций [60]. Это позволит повысить продовольственную безопасность РФ.

Заключение

Биогеосистемотехника позволяет обеспечить управляемую гармоничную коэволюцию биосферы и техносферы, включая повышение плодородия и оздоровление почвы, усиление резистентности растений к фитопатогенам, повышение качества агросферы и производимой продукции, опережающее мировой уровень технологическое развитие РФ. Большинство опасных для высших организмов загрязняющих веществ гораздо менее опасны для геобионтов. Потому последние без ущерба для собственной жизнедеятельности утилизируют опасные загрязняющие вещества после дисперсной утилизации в процессе внутрипочвенного фрезерования, внутрипочвенной импульсной континуально-дискретной фертигации и/или внутрипочвенного импульсного континуально-дискретного внесения биопрепаратов в верхний слой почвы.

Биогеосистемотехника позволяет создать нишу развития, в которой производственный и экономический результат выше, чем при стандартных технологиях. Необходимы правовые и программные механизмы

обеспечения применения в РФ биogeосистемотехники, что обеспечит новые более высокие производственные результаты, включая приоритетное развитие

растений и более высокую вероятность преодоления ими действия фитопатогенов. Достигается повышение продовольственной безопасности РФ.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Калиниченко ВП, Глинушкин АП, Соколов МС, Шаршак ВК, Ладан ЕП, Минкина ТМ, Зинченко ВЕ, Черненко ВВ, Макаренков ДА, Рыхлик АЭ, Ларин ГС. Природоподобные технологии биogeосистемотехники. *Агрохимия*. 2020;(2):61-8, DOI: 10.31857/S0002188120020052
2. Gill JC, Malamud BD. Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Rev.* 2017;166:246-69. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.01.002
3. Van Mansvelt J-D. Soil fertility in agriculture: Russia – Western Europe – USA: In the past and today. *Biogeosystem Technique*. 2017;4(2):220–31. DOI: 10.13187/bgt.2018.1.87
4. Glazko VI, Glazko TT. Conflicts of Biosphere and Agroecosystems. *Int J Environ Problems*. 2015;1(1): 4-16.
5. Cheshko VT, Glazko VI, Kosova YV. Bioethics: Reincarnation of natural philosophy in modern science. *Biogeosystem Technique*. 2017;4(2):111-21. DOI: 10.13187/bgt.2017.2.111
6. Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tiftonell P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L, Quinton JN, Pachepsky Y, van der Putten WH, Bardgett RD, Moolenaar S, Mol G, Jansen B, Fresco LO. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*. 2016;(2):111-28. DOI: 10.5194/soil-2-111- 2016
7. Johansson J. Collaborative governance for sustainable forestry in the emerging bio-based economy in Europe. *Curr Opin Environ Sustainability*. 2018;32:9-16. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.01.009
8. Byerlee D, de Janvry A, Sadoulet E. Agriculture for development: Toward a new paradigm. *Annu Rev Resource Econ*. 2009;1:15-31. DOI:10.1146/annurev.resource.050708.144239
9. Reid Walter V et al. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press; 2005.
10. Сенькова ЛА. Состояние почв агроландшафтов Южного Урала и пути их рационального использования. Автореф. дисс. докт. биол. наук. Тюмень: Тюменская государственная сельскохозяйственная академия; 2009.
11. Добровольский ГВ. Педосфера – оболочка жизни на планете Земля. *Биосфера*. 2009;1(1):6-14.
12. Glinushkin AP, Kudayarov VN, Sokolov MS, Zinchenko VE, Chernenko VV. Nature-similar technologies of the biogeosystem technique in solving a global social and environmental problem. *Biogeosystem Technique*. 2018; 5(2): 159-96. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.159
13. Bohle M. Ideal-type narratives for engineering a human niche. *Geosciences*. 2017;7(1):18. doi:10.3390/geosciences7010018
14. Roco MC, Bainbridge WS, eds. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. U.S. National Science Foundation; 2002. http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf
15. Ковальчук МВ, Нарайкин ОС, Яцишина ЕБ. Конвергенция наук и технологий – новый этап научно-технического развития. *Вопросы философии*. 2013;(3):3-11.
16. Kalinitchenko VP. Renewal of energy and life in the biosphere. *Eur J Renewable Energy*. 2017;2(1):3-28. DOI: 10.1318.7/ejore.2017.1.3
17. Калиниченко ВП, Шаршак ВК, Миронченко СФ, Черненко ВВ, Ладан ЕП, Генов ЕД, Илларионов ВВ, Удалов АВ, Удалов ВВ, Киппель ЕВ. Изменение свойств почв солонцового комплекса через 30 лет после мелиоративных обработок. *Почвоведение*. 2014;(4):490–506.
18. Kalinitchenko VP Optimizing the matter flow in biosphere and the climate of the Earth at the stage of technogenesis by methods of biogeosystem technique (Problem-analytical review). *Int J Environ Probl*. 2016;2(4): 99-130. DOI: 10.13187/ijep.2016.4.99
19. Kalinitchenko VP. Soil dynamics management. *Biogeosystem Technique*. 2016;4(10):284-316. DOI: 10.13187/bgt.2016.10.284
20. Минкин МБ, Бабушкин ВМ, Садименко ПА. Солонцы юго-востока Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ; 1980.
21. Минкин МБ, Горбунов НИ, Садименко ПА. Актуальные вопросы физической и коллоидной химии почв. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ; 1982.
22. Минкин МБ, Калиниченко ВП, Садименко ПА. Регулирование гидрологического режима ком-

- плексных солонцовых почв. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ; 1986.
23. Минкина ТМ, Ендовицкий АП, Калиниченко ВП, Федоров ЮА. Карбонатно-кальциевое равновесие в системе вода-почва. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета; 2012.
 24. Суковатов ВА. Длительность действия мелиорации солонцового комплекса каштановых почв. Дис. ... канд. с-х. наук. Персиановский: Донской государственный аграрный университет; 2009. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19212993>
 25. Воробьева ЛА, ред. Теория и практика химического анализа почв. М.: Издательство ГЕОС; 2006.
 26. Минкина ТМ, Калиниченко ВП, Бакоев СЮ, Манджиева СС, Сушкова СН, Бауэр ТВ, Замулина ИВ, Воронов МБ, Бурачевская МВ. ИОН-3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016616075, 06.06.2016. Заявка № 2016613589 от 14.04.2016.
 27. Семенов АМ, Глинушкин АП, Соколов МС. Органическое земледелие и здоровье почвенной экосистемы. В кн.: Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гербологии и оздоровления почв (21–23 июня 2016 г.). Большие Вяземы; 2016. С. 283–91.
 28. Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Phil Transact Roy Soc B: Biol Sci.* 2013;368(1621). DOI: 10.1098/rstb.2013.0122
 29. Peries R, Gill JS. Subsoil manuring in the high rainfall zone: a practice for ameliorating subsoils for improved productivity. In: Proc 17th ASA Conf, 20–24 Sept 2015, Hobart, Australia. URL: <http://www.agronomy2015.com.au/papers/agronomy2015final00282.pdf>
 30. Ripping field 4 DEEP SIX. 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=88IEQuSvAoE>
 31. Kalinichenko VP, Sharshak VK, Bezuglova OS, Ladan EP, Genev ED, Illarionov VV, Zinchenko VE, Morkovskoi NA, Chernenko VV, Il'ina LP. Changes in the soils of solonchic associations in 30 years after their reclamation with the use of moldboard plowing, deep tillage with a three tier plow, and deep rotary tillage. *Eurasian Soil Sci.* 2011;44(8):927-38. DOI: 10.1134/S1064229311080060
 32. Makange NR, Tiwari VK. Effect of horizontal and vertical axis rotavators on soil physical properties and energy requirement. *Trends Biosci.* 2015;8(12):3225-34.
 33. Prikhod'ko V, Manakhov D Soil processes at different structural levels of organization and diagnosis of their changes under irrigation. *Moscow Univ Soil Sci Bulln.* 2010;(65):52–60. 10.3103/S014768741002002X.
 34. Shein EV, Skvortsova EB, Dembovetskii AV, Abrosimov KN, Il'in LI, Shnyrev NA. Pore-size distribution in loamy soils: A comparison between microtomographic and capillarimetric determination methods. *Eurasian Soil Sci.* 2016;49(3):315-25.
 35. Kalinina O, Giani L, Dolgikh AV, Goryachkin SV, Lyuri DI, Chertov O, Barmin AN. Self-restoration of post-agrogenic soils of calcisol-solonetz complex: soil development, carbon stock dynamics of carbon pools. *Geoderma.* 2015;237:117-28.
 36. Шаршак ВК, Москвичев НН, Ладан ЕП, Генеv ЕД, Слюсарев ВС. Комбинированное почвообрабатывающее орудие: Авторское свидетельство СССР №442760. Б.И. 1974. № 34.
 37. Kharitonova GV, Shein EV, Krutikova VO, Ostrouhov AV. Calcium carbonate formations in edaphic components of ecosystems. *Biogeosystem Technique.* 2018;5(2):197-212. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.197
 38. Калиниченко ВП, Шаршак ВК, Ладан ЕП., Илларионов ВВ, Генеv ЕД. Технические средства внутрпочвенного рыхления с малым тяговым сопротивлением. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2014;14(2). DOI: 10.12737/4467.
 39. Rykhlik AE, Bezuglova OS. Method of intra-soil pulse continuous-discrete moistening (model experiment). *Biogeosystem Technique.* 2017;4(1):39-65. doi: doi.org/10.13187/bgt.2017.1.39.
 40. Ochoa C, Guldan S, Fernald A, Tidwell V, Elias E, Gutierrez K, Borman M. Surface water and shallow groundwater interactions in semiarid agroecosystems of the western USA. *Geophys Res Abstr.* 2014;16: EGU2014-3161.
 41. Shein EV, Mady AY, Il'in LI. Validation of HYDRUS-1D for predicting of soil moisture content with hysteresis effect. *Biogeosystem Technique.* 2019;6(1):59-64.
 42. Zaitseva RI, Nikitina NS, Sudnitsyn II. The effect of the concentration and osmotic pressure of soil solution on the availability of water to plants. *Eurasian Soil Sci.* 2003;36(9):1003-9.
 43. Калиниченко ВП. Способ внутрпочвенного импульсного дискретного полива растений: Патент (RU) №2386243 С1. Б.И. 2010;(11).
 44. Kalinichenko V. Biogeosystem Technique as a base of the new world water strategy. *Biogeosystem Technique.* 2014;2(2):100-24.
 45. Lin H, 2012. Chapter 2 – Understanding Soil Architecture and Its Functional Manifestation across Scales. Part I: Overviews and Fundamentals. In: *Hydrogeology.* Elsevier; 2012. P. 41-74.
 46. Qualls RG. Long-term (13 years) decomposition rates of forest floor organic matter on paired coniferous and deciduous watersheds with contrasting

- temperature regimes. *Forests*. 2016;7. DOI: 10.3390/f7100231
47. Swidsinski A. The colonic bioreactor – a forerunner model for future biotechnology (function, role, products & management). In: Fifth International Conference of CIS IHSS on Humic Innovative Technologies "Humic Substances and Living Systems". October 19-23, 2019. DOI: 10.36291/HIT.2019.swidsinski.017.
 48. Helfenstein J, Jegminat J, McLaren TI, Frossard E. Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. *Biogeosciences*. 2018;15:105-14. DOI: 10.5194/bg-15-105-2018
 49. Kalinichenko VP. Biogeosystem technique as a paradigm of non-waste technology in the biosphere. *Biogeosystem Technique*. 2015;3(1):4-28. DOI: 10.13187/bgt.2015.3.4
 50. Kalinichenko VP, Glinushkin AP, Sokolov MS, Zinchenko VE, Minkina TM, Mandzhieva SS, Sushkova SN, Makarenkov DA, Bakoyev SY, Il'ina LP. Impact of soil organic matter on calcium carbonate equilibrium and forms of Pb in water extracts from Kastanozem complex. *J Soils Sediments*. 2018;19(6): 2717-28. DOI: 10.1007/s11368-018-2123-z
 51. Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Blagodatsky S, Anderson T-H. Microbial growth and carbon use efficiency in the rhizosphere and root-free soil. *PLoS ONE*. 2014;9(4): e93282.
 52. Nigten AO. Re-inventing agriculture! *Biogeosystem Technique*. 2018;5(2):213-28. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.213
 53. Соколов МС. Здоровая почва – неотъемлемый, экологически значимый фактор коэволюции биосферы и социума (в развитие ноосферных идей В.И. Вернадского). В кн.: Глинушкин АП и др., ред. Адаптивно-интегрированная защита растений. М: Печатный город; 2019. С. 387–428.
 54. Семенов АМ, Глинушкин АП. Научно-методическое руководство для практического определения параметров здоровья почвенной экосистемы (почвы). В кн.: Глинушкин АП и др., ред. Адаптивно-интегрированная защита растений. М: Печатный город; 2019. С. 525-54.
 55. Калиниченко ВП, Глинушкин АП, Соколов МС, Козырев СГ, Савостьянов АП, Ильин ВБ. Патент RU № 2692718 С1. Комплекс утилизации отхода газификации. МПК C10J 3/06 (2006.01) C10J 3/46 (2006.01) F23B 40/02 (2006.01). <http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/692/718/%D0%98%D0%97-02692718-00001/document.pdf>
 56. Калиниченко ВП, Глинушкин АП, Соколов МС, Будынков НИ, Зинченко ВЕ, Черненко ВВ, Козырев СГ. Патент RU №2720634 С1. МПК A01G 25/06 (2006.01) A01C 23/02 (2006.01), СПК A01G 25/06 (2020.02) A01C 23/02 (2020.02). Способ внесения биопрепарата внутрь верхнего слоя почвы. Заявка № 2019117310/033090 от 04.06.2019. <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/720/634/%D0%98%D0%97-02720634-00001/document.pdf>
 57. Кудяров ВН Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России. *Почвоведение*. 2015;№ 9:1049-61. DOI: 10.7868/S0032180X15090087
 58. Kalinichenko V, Batukaev A, Glinushkin A, Sokolov M, Sushkova S, Minkina T, Zinchenko V, Chernenko V, Bauer T, Zamulina I, Makarenkov D. Carbon irreversible sequestration dangerous mistake. *Geophys Res Abstr*. 2019; 21:EGU2019-5934
 59. Larin GS, Lyakhov VP. Political and legal modernization and the choice of the vector of development of modern Russia in focus of the ideas and attributes of national security in the 21st century synthesis, taking into account the Decembrists views and ideologies. *Colloquium-Journal Jurisprudence*. 2019;9(33):56-61. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-1025
 60. Keum DD. Innovation, short-termism, and the cost of strong corporate governance. *Strateg Manag J*. 2021;42: 3-29. DOI: 10.1002/smj.3216
- Общий список литературы/Reference List**
1. Kalinichenko VP, Glinushkin AP, Sokolov MS, Sharshak VK, Ladan YeP, Minkina TM, Zinchenko VYe, Chernenko VV, Makarenkov DA, Rykhlik AE, Larin GS. [Nature-based technologies of Biogeosystem technique. *Agrokhimiya* 2020;(2):61-8. DOI: 10.31857/S0002188120020052b
 2. Gill JC, Malamud BD. Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Rev*. 2017;166:246-69. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.01.002
 3. Van Mansvelt J-D. Soil fertility in agriculture: Russia – Western Europe – USA: In the past and today. *Biogeosystem Technique*. 2017;4(2):220–31. DOI: 10.13187/bgt.2018.1.87
 4. Glazko VI, Glazko TT. Conflicts of biosphere and agroecosystems. *Int J Environ Problems*. 2015;1(1): 4-16.
 5. Cheshko VT, Glazko VI, Kosova YV. Bioethics: Reincarnation of natural philosophy in modern science. *Biogeosystem Technique*. 2017;4(2):111-21. DOI: 10.13187/bgt.2017.2.111
 6. Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tittonell P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L, Quinton JN, Pachepsky Y, van der Putten WH, Bardgett RD, Moolenaar S, Mol G, Jansen B, Fresco LO. The significance of soils and soil science towards realization of the United

- Nations Sustainable Development Goals. *Soil*. 2016;(2):111-28. DOI: 10.5194/soil-2-111- 2016
7. Johansson J. Collaborative governance for sustainable forestry in the emerging bio-based economy in Europe. *Curr Opin Environ Sustainability*. 2018;32:9-16. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.01.009
 8. Byerlee D, de Janvry A, Sadoulet E. Agriculture for development: toward a new paradigm. *Annu Rev Resource Econ*. 2009;1:15-31. DOI:10.1146/annurev.resource.050708.144239
 9. Reid Walter V et al. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press; 2005.
 10. Senkova LA. [Status of soil agricultural landscapes of the Southern Urals and the ways of their rational use]. PhD Theses. Tyumen: Tyumen State Agricultural Academy; 2009.
 11. Dobrovolsky GV. Pedosphere – a living cover of the planet Earth. *Biosfera*. 2009;1(1):6-14.
 12. Glinushkin AP, Kudayarov VN, Sokolov MS, Zinchenko VE, Chernenko VV. Nature-similar technologies of the biogeosystem technique in solving a global social and environmental problem. *Biogeosystem Technique*. 2018; 5(2): 159-96. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.159
 13. Bohle M. Ideal-Type narratives for engineering a human niche. *Geosciences*. 2017;7(1):18. doi:10.3390/geosciences7010018
 14. Roco MC, Bainbridge WS, eds. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. U.S. National Science Foundation; 2002. http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf
 15. Kovalchuk MV, Naraykin OS, Yatsishina YeB. [Convergence of sciences and technologies – a new stage of scientific and technical development]. *Voprosy Filosofii* 2013;(3):3-11. (In Russ.)
 16. Kalinitchenko VP. Renewal of tnergy and life in the biosphere. *Eur J Renewable Energy*. 2017;2(1):3-28. DOI: 10.1318.7/ejore.2017.1.3
 17. Kalinitchenko VP, Sharshak VK, Mironchenko SF, Chernenko VV, Ladan, YeP, Genev YeD, Illarionov VV, Udalov AV, Udalov VV, Kippel YeV. [Changes in the properties of soils in a solonetz soil complex thirty years after reclamation. *Pochvovedeniye*. 2014;(4):490-506 (In Russ.).
 18. Kalinitchenko VP Optimizing the matter flow in biosphere and the climate of the Earth at the stage of technogenesis by methods of biogeosystem technique (Problem-analytical review). *Int J Environ Probl*. 2016;2(4): 99-130. DOI: 10.13187/ijep.2016.4.99
 19. Kalinitchenko VP. Soil dynamics management. *Biogeosystem Technique*. 2016;4(10):284-316. DOI: 10.13187/bgt.2016.10.284
 20. Minkin MB, Babushkin VM, Sadimenko PA. *Solontsy Yugo-Vodstoka Rostovskoy Oblasti [Salt Licks of the South-East of the Rostov Region]*. Rostov-on-Don: Izdatelstvo RGU; 1980. (In Russ.)
 21. Minkin MB, Gorbunov NI, Sadimenko PA. *Aktualnye Voprosy Fizicheskoy i Kolloidnoy Khimii Pochv [Topical Issues of Physical and Colloidal Chemistry of Soils]*. Rostov-on-Don: Izdatelstvo RGU; 1982. (In Russ.)
 22. Minkin MB, Kalinichenko VP, Sadimenko PA. *Regulirovaniye Gidrologicheskogo Rezhima KomplSolontsovykh Pochv [Regulation of the Hydrological Regime of Complex Solonetzic Soils]*. Rostov-on-Don: Izdatelstvo RGU; 1986. (In Russ.)
 23. Minkina TM, Yedovitsky AP, Kalinichenko VP, Fedorov Yu.A. *Karbonatno-Kaltsiyevoye v Sisteme Voda-Pochva [Calcium-Carbonate Balance in the Water-Soil System]*. Rostov-on-Don: Izdatelstvo SFU; 2012. (in Russ.)
 24. Sukovatov VA. [Duration of the Effect of Melioration of Solonetzic Complex of Chestnut Soils]. Candidate of Science Dissertation. Persianovsky: Donskoy State Agrarian University; 2009. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19212993> (In Russ.)
 25. Vorobiyeva LA, ed. *Teoriya i Praktika Khimicheskogo Analiza Pochv [Theory and Practice of Chemical Analysis of Soils]*. Moscow: GEOS; 2006. (In Russ.)
 26. Minkina TM, Kalinichenko VP, Bakoyev SYu, Mandzhieva SS, Sushkova SN, Bauer TV, Zamulina IV, Voronov MB, Burachevskaya MV. ION-3. Software Registration Certificate RU 2016616075 of 06/06/2016. Application No. 2016613589 of 04/14/2016. (In Russ.)
 27. Semionov AM, Glinushkin AP, Sokolov MS. [Organic farming and soil ecosystem health] In: *Sovremennye Problemy Gerbologii i Ozdorovleniya Pochv [Current Problems Of Herbology and Soil Amelioration]*. Bolshiye Viazemy; 2016. P. 283-91. (In Russ.)
 28. Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Phil Transact Roy Soc B: Biol Sci*. 2013;368(1621). DOI: 10.1098/rstb.2013.0122
 29. Peries R, Gill JS. Subsoil manuring in the high rainfall zone: a practice for ameliorating subsoils for improved productivity. In: *Proc 17th ASA Conf, 20–24 Sept 2015, Hobart, Australia*. URL: <http://www.agronomy2015.com.au/papers/agronomy2015final00282.pdf>
 30. Fouraces1949. Ripping field 4 DEEP SIX. 2017. UL: <https://www.youtube.com/watch?v=88IEQuSvAoE>
 31. Kalinichenko VP, Sharshak VK, Bezuglova OS, Ladan EP, Genev ED, Illarionov VV, Zinchenko VE,

- Morkovskoi NA, Chernenko VV, Il'ina LP. Changes in the soils of solonchic associations in 30 years after their reclamation with the use of moldboard plowing, deep tillage with a three tier plow, and deep rotary tillage. *Eurasian Soil Sci.* 2011;44(8):927-38. DOI: 10.1134/S1064229311080060
32. Makange NR, Tiwari VK. Effect of horizontal and vertical axis rotavators on soil physical properties and energy requirement. *Trends Biosci.* 2015;8(12):3225-34.
 33. Prikhod'ko V, Manakhov D Soil processes at different structural levels of organization and diagnosis of their changes under irrigation. *Moscow Univ Soil Sci Bulln.* 2010;(65):52–60. 10.3103/S014768741002002X.
 34. Shein EV, Skvortsova EB, Dembovetskii AV, Abrosimov KN, Il'in LI, Shnyrev NA. Pore-size distribution in loamy soils: A comparison between microtomographic and capillarimetric determination methods. *Eurasian Soil Sci.* 2016;49(3):315-25.
 35. Kalinina O, Giani L, Dolgikh AV, Goryachkin SV, Lyuri DI, Chertov O, Barmin AN. Self-restoration of post-agrogenic soils of calcisol-solonchic complex: soil development, carbon stock dynamics of carbon pools. *Geoderma.* 2015;237:117-28.
 36. Sharshak VK, Moskvichev NN, Ladan YeP, Genev YeD, Slyusarev VS. [Combined Tillage Tool]: Inventor's Certificate SU №442760. B.I. 1974. №34..
 37. Kharitonova GV, Shein EV, Krutikova VO, Ostrouhov AV. Calcium carbonate formations in edaphic components of ecosystems. *Biogeosystem Technique.* 2018;5(2):197-212. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.197
 38. Kalinichenko VP, Sharshak VK, Ladan YeP, Illarionov VV, Genev YeD. Technical means of subsoil loosening with low traction resistance. *Biulleten Donskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta.* 2014.;14(2). DOI: 10.12737/4467.
 39. Rykhlik AE, Bezuglova OS. Method of intra-soil pulse continuous-discrete moistening (model experiment). *Biogeosystem Technique.* 2017;4(1):39-65. doi: doi.org/10.13187/bgt.2017.1.39.
 40. Ochoa C, Guldan S, Fernald A, Tidwell V, Elias E, Gutierrez K, Borman M. Surface water and shallow groundwater interactions in semiarid agroecosystems of the western USA. *Geophys Res Abstr.* 2014;16: EGU2014-3161.
 41. Shein EV, Mady AY, Il'in LI. Validation of HYDRUS-1D for predicting of soil moisture content with hysteresis effect. *Biogeosystem Technique.* 2019;6(1):59-64.
 42. Zaitseva RI, Nikitina NS, Sudnitsyn II. The effect of the concentration and osmotic pressure of soil solution on the availability of water to plants. *Eurasian Soil Sci.* 2003;36(9):1003-9.
 43. Kalinichenko VP. [Method of Intra-Soil Pulse Discrete Irrigation]. Patent RU № 2386243 C1. *Biulleten Izobreteniy.* 2010; (11). (In Russ.)
 44. Kalinichenko V. Biogeosystem Technique as a base of the new world water strategy. *Biogeosystem Technique.* 2014;2(2):100-24.
 45. Lin H, 2012. Chapter 2 – Understanding Soil Architecture and Its Functional Manifestation across Scales. Part I: Overviews and Fundamentals. In: *Hydropedology.* Elsevier; 2012. P. 41-74.
 46. Qualls RG. Long-term (13 years) decomposition rates of forest floor organic matter on paired coniferous and deciduous watersheds with contrasting temperature regimes. *Forests.* 2016;7. DOI: 10.3390/f7100231
 47. Swidsinski A. The colonic bioreactor – a forerunner model for future biotechnology (function, role, products & management). In: *Fifth International Conference of CIS IHSS on Humic Innovative Technologies "Humic Substances and Living Systems".* October 19-23, 2019. DOI: 10.36291/HIT.2019.swidsinski.017.
 48. Helfenstein J, Jegminat J, McLaren TI, Frossard E. Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. *Biogeosciences.* 2018;15:105-14. DOI: 10.5194/bg-15-105-2018
 49. Kalinichenko VP. Biogeosystem technique as a paradigm of non-waste technology in the biosphere. *Biogeosystem Technique.* 2015;3(1):4-28. DOI: 10.13187/bgt.2015.3.4
 50. Kalinichenko VP, Glinushkin AP, Sokolov MS, Zinchenko VE, Minkina TM, Mandzhieva SS, Sushkova SN, Makarenkov DA, Bakoyev SY, Il'ina LP. Impact of soil organic matter on calcium carbonate equilibrium and forms of Pb in water extracts from Kastanozem complex. *J Soils Sediments.* 2018;19(6): 2717-28. DOI: 10.1007/s11368-018-2123-z
 51. Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Blagodatsky S, Anderson T-H. Microbial growth and carbon use efficiency in the rhizosphere and root-free soil. *PLoS ONE.* 2014;9(4): e93282.
 52. Nigten AO. Re-inventing agriculture! *Biogeosystem Technique.* 2018;5(2):213-28. DOI: 10.13187/bgt.2018.2.213
 53. Sokolov MS. [Healthy soil is an integral, environmentally significant factor in the co-evolution of the biosphere and society (towards the development of V.I. Vernadsky's noospheric ideas)]. In: Glinushkin AP et al., eds. *Adaptivno-Integrirovannaya Zashchita Rasteniy [Adaptive-Integrated Plant Protection].* Moscow: Pechatnyi Gorod; 2019. P.387-428.
 54. Semionov AM, Glinushkin AP. [Scientific and methodological guide for the practical determination

- of health parameters of a soil ecosystem (soil)] In: Glinushkin AP et al., eds. *Adaptivno-Integririvannaya Zashchita Rasteniy* [Adaptive-Integrated Plant Protection]. Moscow: Pechatnyi Gorod; 2019. P. 525-54.
55. Kalinichenko VP, Glinushkin AP, Sokolov MS, Kozyrev SG, Savostyanov AP, Ilyin VB. [Gasification waste disposal complex]. Patent RU №2692718 C1. Application: 2018100555, 01/09/2018. Published: 26.06.2019 Bull. №18. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/692/718/%D0%98%D0%97-02692718-00001/document.pdf>
 56. Kalinichenko VP, Glinushkin AP, Sokolov MS, Budynkov NI, Zinchenko VYe, Chernenko VV, Kozyrev SG. [Method of introducing a biological product into the upper soil layer]. Patent RU №2720634 C1. IPC A01G 25/06 (2006.01) A01C 23/02 (2006.01), SPC A01G 25/06 (2020.02) A01C 23/02 (2020.02). Application No. 2019117310/033090 of 06/04/2019. Registered May 12, 2020. Bull. 14 URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/720/634/%D0%98%D0%97-02720634-00001/document.pdf>
 57. Kudeyarov VN. [Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration] *Pochvovedeniye*. 2015;48(9):923-33. (In Russ.)
 58. Kalinichenko V, Batukaev A, Glinushkin A, Sokolov M, Sushkova S, Minkina T, Zinchenko V, Chernenko V, Bauer T, Zamulina I, Makarenkov D. Carbon irreversible sequestration dangerous mistake. *Geophys Res Abstr*. 2019; 21:EGU2019-5934
 59. Larin GS, Lyakhov VP. Political and legal modernization and the choice of the vector of development of modern Russia in focus of the ideas and attributes of national security in the 21st century synthesis, taking into account the Decembrists views and ideologies. *Colloquium-Journal Jurisprudence*. 2019;9(33):56-61. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-1025
 60. Keum DD. Innovation, short-termism, and the cost of strong corporate governance. *Strateg Manag J*. 2021;423-9. DOI: 10.1002/smj.3216



АГРОЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ – ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА¹

И.А. Трофимов^{1, 2*}, Л.С. Трофимова¹, Е.П. Яковлева¹,
А.А. Шпедт², Т.А. Асеева³

¹ Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, г. Лобня Московской области;

² Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН, Красноярск;

³ Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

* Эл. почта: viktrofi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; принята к печати 21.11.2022

Изучение пространственного распределения ландшафтных, биологических, экологических и экономических закономерностей является необходимой основой развития высокопродуктивного, устойчивого и экологически чистого сельского хозяйства, что стало одним из важнейших национальных приоритетов развития России. В целях оптимального информационного обеспечения управления территорией на основе разработанных нами методологических основ выполнено агроландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий Восточно-Сибирского и Дальневосточного природно-экономических районов России. В качестве контурной основы агроландшафтно-экологического районирования использованы материалы Почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Использовались также природно-сельскохозяйственное и ландшафтно-экологическое районирования территории, эколого-географические, геоботанические карты и пояснительные записки к ним, Национальный атлас почв РФ, данные государственного земельного учета, наземных и дистанционных наблюдений, литературные, фондовые и другие материалы. В комплект документов агроландшафтно-экологического районирования территории входят карты, легенды, классификации кормовых угодий, классификации оленьих пастбищ, базы данных по земельным угодьям, базы данных по кормовым угодьям и пояснительные записки. Выделены зоны, горные территории, провинции, округа. Дана характеристика земельных и кормовых ресурсов, развития негативных процессов, экологического состояния, приоритетов развития единиц районирования. В Восточной Сибири выделены 136 единиц районирования. Сельскохозяйственные угодья занимают 24,7 млн га, природные кормовые угодья – 16,3 млн га, оленьи пастбища – 56,6 млн га. На Дальнем Востоке выделены 162 единицы районирования. Сельскохозяйственные угодья занимают около 8 млн га, из них пашня – 0,5%, сенокосы – 0,4%, пастбища – 0,4%, оленьи пастбища – 184,2 млн га, или 30% территории. Определены пространственное размещение биологических и экологических закономерностей агрогеоэкосистем для устойчивого развития сельского хозяйства.

Ключевые слова: закономерности территории, управление.

AGRO-LANDSCAPE AND ECOLOGICAL ZONING IS THE BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE IN EASTERN SIBERIA AND THE FAR EAST

I.A. Trofimov^{1, 2*}, L.S. Trofimova¹, Ye.P. Yakovleva¹, A.A. Shpedt², T.A. Aseyeva³

¹ Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Lobnia, Moscow Oblast;

² Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk;

³ Far Eastern Research Institute of Agriculture of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

E-mail: viktrofi@mail.ru

The study of the spatial distribution of landscape, biological and ecological patterns is a necessary basis for the development of highly productive, and sustainable agriculture, which is one of the most important national priorities of Russia's development. In order to ensure optimal information management of the territory, agro-landscape and ecological zoning of natural forage lands of the East Siberian and Far Eastern natural and

¹ По материалам доклада на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», Москва, 3–6 октября 2022 года.

Economic regions of Russia has been developed. The materials of Soil-ecological zoning of the Russian Federation were used as the contour basis of agro-landscape-ecological zoning. Natural-agricultural and landscape-ecological zoning of the territory, ecological-geographical, geobotanical maps, data of the state land registration, ground and remote observations, literary, stock and other materials were also used. Zones, mountainous territories, provinces, districts are highlighted. The characteristics of land and fodder resources, the development of negative processes, the ecological state, the priorities of the development of zoning units are given. 136 zoning units have been allocated in Eastern Siberia. Agricultural lands occupy 24.7 million hectares, natural forage lands – 16.3 million hectares, deer pastures – 56.6 million hectares. 162 zoning units have been allocated in the Far East. Agricultural land occupies about 8 million hectares, of which arable land – 0.5%, hayfields – 0.4%, pastures – 0.4%, deer pastures – 184.2 million hectares, or 30% of the territory. The spatial placement of biological and ecological patterns of agrogeoecosystems are determined.

Keywords: patterns of the territory, management.

Введение

Обширность территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, их значительная региональная, ландшафтная и экологическая дифференциация, богатство и разнообразие природно-климатических ресурсов являются нашими важнейшими стратегическими преимуществами.

Изучение пространственного распределения ландшафтных, биологических, экологических и экономических закономерностей является необходимой основой развития рационального природопользования с целью создания высокопродуктивного, устойчивого и экологически чистого сельского хозяйства, которое является одним из важнейших национальных приоритетов развития России.

Экологическое состояние агроландшафтов Восточно-Сибирского и Дальневосточного природно-экономических районов во многом определяет особенности их функционирования, продуктивность, развитие негативных процессов, перспективы рационального природопользования и устойчивого развития сельского хозяйства.

В условиях отсутствия государственного учета и контроля состояния сельскохозяйственных земель десятилетиями ведется истощительная бесконтрольная эксплуатация земельных ресурсов.

Материалы и методы исследования

Агроландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий Восточно-Сибирского и Дальневосточного природно-экономических районов России выполнено на базе разработанных нами методологических основ агроландшафтно-экологического изучения и оценки агроэкосистем в целях оптимального информационного обеспечения управления территорией [1, 2].

В качестве контурной основы агроландшафтно-экологического районирования использованы материалы Почвенно-экологического районирования Российской Федерации [3].

Использовались также природно-сельскохозяйственное и ландшафтно-экологическое районирования

территории, эколого-географические, геоботанические карты и пояснительные записки к ним, Национальный атлас почв РФ, данные государственного земельного учета, литературные и фондовые материалы, данные наземных и дистанционных наблюдений [4–6 и др.].

Результаты и обсуждение

В результате районирования изучаемая территория разделена по определенной системе на зоны, провинции, округа. Раскрыты закономерности распределения природных факторов сельскохозяйственного производства, экологического состояния агроландшафтов и использования земель.

Карты М 1:2500000, легенды, классификации кормовых угодий, классификации оленьих пастбищ, базы данных по земельным угодьям, базы данных по кормовым угодьям и пояснительные записки входят в комплект документов агроландшафтно-экологического районирования территории Восточной Сибири и Дальнего Востока.

В легендах к картам дана агроклиматическая, агроландшафтно-экологическая и хозяйственная характеристики всех выделенных единиц агроландшафтно-экологического районирования, представлены структура земельных угодий, структура природных кормовых угодий, оленьих пастбищ. В классификации природных кормовых угодий указаны классы и типы кормовых угодий, рельеф, почвы, основные растения, урожайность и качество корма. В классификации оленьих пастбищ указаны классы и типы оленьих пастбищ, рельефа, почв, основные растения, оленеёмкость и сезон использования.

На территории Восточно-Сибирского природно-экономического района выделено 136 единиц районирования, в том числе 11 крупных (Арктическая зона, Арктотундровая зона, зона Тундры и лесотундры, Северотаежная, Среднетаежная, Южнотаежная, Лиственнолесная, Лесостепная, Степная и Сухостепная зоны и Горные территории), 34 средних (22 равнинных и 12 горных провинций) и 91 мелких (49 равнинных и 42 горных округа).

В структуре земельных угодий Восточно-Сибирского природно-экономического района преобладают леса и лесные насаждения, не входящие в лесной фонд, на их долю приходится 62% площади района. Болота занимают 7%, под водой находится 4%, менее 0,5% в сумме занимают земли застройки, под дорогами и нарушенные, 22% приходится на прочие земли, по данным на 01.01.2020 [7]. Сельскохозяйственные угодья занимают около 6% площади Восточно-Сибирского природно-экономического района, при этом 2% занимает пашня, 4% приходится на сенокосы и пастбища.

Установлено, что в сельском хозяйстве Восточно-Сибирского и Дальневосточного природно-экономических районов происходит опасный перекос в сторону удовлетворения экономических интересов в ущерб экологическим и социальным.

В результате проведенного нами районирования, агроландшафтно-экологического анализа и оценки состояния изучаемой территории выявлены следующие закономерности:

разбалансированность сельского хозяйства (земледелия, растениеводства, животноводства);

в агроландшафтах мало средостабилизирующих элементов, составляющих их экологический каркас;

разбалансированность структуры посевных площадей (значительное преобладание экономически привлекательных культур);

нарушение севооборотов, переход к севооборотам с короткой ротацией и даже монокультуре.

Для сельского хозяйства Восточной Сибири и Дальнего Востока характерно широкое распространение возделывания ограниченного числа видов растений, генетически однотипных сортов и гибридов.

Несбалансированность продуктивных и защитных экосистем в нарушенной инфраструктуре агроландшафтов, структуре посевных площадей и севооборотов приводит к колебаниям урожайности агроэкосистем и неустойчивости сельскохозяйствен-

ного производства. На значительной части территории отмечаются деградация сельскохозяйственных земель, развитие негативных процессов эрозии, дефляции, дегумификации и др.

В сложившейся стратегии интенсификации сельского хозяйства, в том числе земледелия, растениеводства и животноводства, деятельности сельскохозяйственных производителей доминируют не естественнонаучные приоритеты развития устойчивого, экологически чистого сельского хозяйства и сохранения продуктивного долголетия агроэкосистем, а конъюнктурно-рыночные приоритеты получения быстрой выгоды.

Анализ состояния земель Восточно-Сибирского природно-экономического района дает представление о значительном развитии на сельскохозяйственных угодьях негативных процессов. Наибольшее значение из них для сельскохозяйственных угодий Восточно-Сибирского природно-экономического района имеют дефляционная и эрозионная опасность, наличие больших площадей кислых почв, каменистость, а также переувлажненность и заболоченность (табл. 1).

В разных регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока, которые охватывают огромные территории от арктической тундры на севере до сухих степей на юге, преобладают различные негативные процессы.

Так, на пашне Восточной Сибири основными негативными процессами являются эрозионная и дефляционная опасность, которые в наибольшей степени выражены в Республике Тыва и Забайкальском крае, где 78% пашни расположено на эрозионноопасных участках. Около половины площади пашни в Республиках Бурятия и Хакасия (44–51%), 64% в Забайкальском крае и 94% в Республике Тыва дефляционноопасны. Другим негативным фактором на пашне является распространенность кислых почв, которые в Забайкальском и Красноярском краях занимают 20–30%, а в Иркутской области – около 60% площади пашни.

Широкое распространение в Красноярском крае получили почвы, выпаханные в слабой и средней сте-

Табл. 1

Состояние сельскохозяйственных угодий Восточно-Сибирского природно-экономического района (% от площади)

Вид угодий	Состояние угодий						
	Эрозионно опасные	Дефляционно опасные	Кислые	Переувлажненные	Заболоченные	Каменистые	Засоленные
Сельскохозяйственные угодья	7	14	16	3	2	5	3
Пашня	20	31	29	3	–	7	1
Сенокосы	3	5	10	10	11	2	7
Пастбища	9	12	6	4	6	24	5

пени. Так, в агроландшафтах юга Красноярской лесостепи интенсивное использование почв приводит к постоянному увеличению степени их деградации и прогрессирующему развитию эрозионных процессов. Антропогенное воздействие при обработке почв заключается в снижении мощности гумусового горизонта, механическом перемешивании гумусового и иллювиально-карбонатного горизонтов, что приводит к формированию маломощных, малогумусированных агрочерноземов, содержащих карбонаты с поверхности, или на небольшой (10–20 см) глубине. Систематическое припахивание высококарбонатных средних и тяжелых суглинков негативно сказывается на свойствах почв. Уменьшается содержание гумуса и подвижного фосфора, увеличивается щелочность, ухудшаются структура, физические и водно-физические свойства почв [8].

Чрезвычайно актуальным в сложившейся ситуации является краевой закон «Об обеспечении плодородия земель сельскохозяйственного назначения в Красноярском крае» (<http://garant-krs.ru/documents/doc1343212974>), принятого в 2012 году, который направлен на восстановление, сохранение и повышение плодородия земель сельскохозяйственного назначения. Однако его исполнение не контролируется, и фактически закон не работает.

Если в ближайшее время не будут соблюдены меры по охране почв, выполнены организационно-хозяйственные, прежде всего, землеустроительные мероприятия, проведены лесомелиоративные и гидротехнические работы, а также не внедрены в производство современные адаптивно-ландшафтные системы земледелия, то почвенно-земельные ресурсы аналогичных агроландшафтов продолжат интенсивно деградировать, а на значительных площадях произойдет уничтожение естественного и антропогенно-преобразованного почвенного покрова [8].

На пастбищах Восточной Сибири эрозионная и дефляционная опасность выражена в основном в Республике Тыва, где 45% площади пастбищ эрозионноопасны, 64% – дефляционноопасны. В Республиках Бурятия, Тыва и Хакасия 26–40% пастбищ расположены на каменистых почвах. В Иркутской области и Бурятии 13% пастбищ заболочены.

В Красноярском крае около половины площади сенокосов расположены на кислых почвах. В Забайкальском крае 15%, а в Бурятии 24% сенокосов заболочены. В Хакасии и в Иркутской области 23% площади сенокосов переувлажнены.

В результате агроландшафтно-экологического районирования Дальнего Востока выделено 162 единицы районирования, в том числе 9 крупных (зоны: Арктическая, Арктотундровая Тундровая, Северотаежная, Среднетаежная, Разреженных лесов и редколесий Камчатки, Дальневосточная таежно-лесная, Дальневосточная зона широколиственных лесов и Горные территории), 32 средних (19 равнинных и 13 горных провинций) и 122 мелких (60 равнинных и 62 горных округа).

В структуре земельных угодий Дальневосточного природно-экономического района преобладают леса и лесные насаждения, не входящие в лесной фонд, на их долю приходится 56% площади района. Болота занимают 7%, под водой находится 3%, менее 0,2% в сумме занимают земли застройки, под дорогами и нарушенные, 32% приходится на прочие земли, по данным на 01.01.2020.

Сельскохозяйственные угодья расположены преимущественно на равнинных территориях в южной части Дальневосточного природно-экономического района и занимают 8014,1 тыс. га, или 1,3% общей площади макрорегиона. Из них пашня – 0,5%, сенокосы – 0,4%, пастбища – 0,4%.

Анализ состояния земель Дальнего Востока дает представление о значительном развитии на сельскохо-

Табл. 2

Состояние сельскохозяйственных угодий Дальневосточного природно-экономического района (% от площади угодий)

Вид угодий	Состояние угодий							
	Эрозионно опасные	Дефляционно опасные	Подверженные совместно водной и ветровой эрозии	Кислые	Переувлажненные	Заболоченные	Каменистые	Засоленные
Сельскохозяйственные угодья	11	1	11	66	22	23	10	3
Пашня	14	2	14	91	19	8	10	1
Сенокосы	5	0	3	40	30	59	1	7
Пастбища	11	1	10	36	26	32	4	1

зйственных угодьях негативных процессов. Наибольшее значение из них имеет наличие больших площадей кислых почв (66 %), переувлажненность (22%) и заболоченность (23%) (табл. 2).

Площадь оленьих пастбищ Дальнего Востока в 23 раза больше площади сельскохозяйственных угодий и составляет 184,2 млн га, или 30% общей площади макрорегиона. Из них 44% расположено в Республике Саха (Якутия), 23% – в Чукотском а. о., примерно по 10% – в Камчатском и Хабаровском краях и в Магаданской области.

Более 80% территории Дальнего Востока относится к районам Крайнего Севера и приравненным к ним местностям. В макрорегионе не обеспечивается продовольственная безопасность, устойчивость сельского хозяйства и конкурентоспособность на внешних рынках, что создает угрозу национальной безопасности. Характерна рискованность земледелия. Уровень сельскохозяйственной освоенности дальневосточных земель невысокий [9–12].

В последнее время в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке наблюдается значительное зарастание неиспользуемых (заброшенных) кормовых угодий и неиспользуемой пашни кустарником и мелколесьем, распространение кочек на этих угодьях. Местами площади, покрытые кочками, увеличились в 2–3 раза, а их количество возросло в 3–5 раз из-за недоиспользования и отсутствия ухода за пастбищами и сенокосами. Разрастается также крупное разнотравье, малоценное в кормовом отношении.

В соответствии с биогеохимическим районированием таежные зоны и лиственничная зона Восточно-Сибирского природно-экономического района относятся к таежно-лесному региону биосферы, в котором имеется недостаток кобальта, йода и меди (особенно на торфяных почвах), в болотистых местностях часто совместный недостаток кобальта и меди. Недостаток кобальта в почвах и кормовых растениях приводит к ослаблению синтеза витамина B_{12} и окислительных ферментов. Понижается мясная и шерстяная продуктивность, воспроизводство, ослаблены иммунно-биологические свойства. Возникают акабальтозы, гиповитаминозы B_{12} . Болеют овцы и крупный рогатый скот, реже – другие виды скота.

В лесостепном, степном регионах биосферы, к которому относится южная часть Восточно-Сибирского природно-экономического района, содержание химических элементов и их соотношение в почве и растениях близко к оптимальному. Значительные площади Восточно-Сибирского природно-экономического района относятся к горным биогеохимическим провинциям, бедным медью, кобальтом, кальцием и йодом. В восточных районах Забайкальского края, в некоторых районах Тывы отмечается недостаток кальция и относительный избыток стронция. Это

вызывает нарушение роста и формирования костной ткани – урвскую болезнь (названа по эндемическому очагу в районе р. Уров в Забайкальском крае) человека и животных.

Горные районы Забайкальского края и Иркутской области относятся к регионам биосферы с недостатком селена, что может вызывать беломышечную болезнь сельскохозяйственных животных. В Барыкской долине Тывы, наоборот, отмечается повышенное содержание селена в почве и в растениях, что приводит к селеновому токсикозу овец и крупного рогатого скота [13].

Здоровая среда обитания является необходимым условием укрепления иммунитета, повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к болезням и вредителям.

Устойчивость растениеводства к болезням и вредителям базируется на обязательном учете регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированных природных факторов. Это основа адаптивно-интегрированной системы защиты и устойчивого производства продукции растениеводства [14–16].

Здоровая экосистема, здоровая почва – важнейшие средообразующие и фитосанитарные факторы сельского хозяйства. Здоровая почвенная экосистема самозащищается от инфицирования фитопатогенами и самоочищается от органических поллютантов. Только здоровая почва способна стабильно и эффективно продуцировать чистый урожай, защищать от загрязнения сопряженные с почвой компоненты ландшафта.

Оздоровление почв, обеспечение посевов научно обоснованными дозами удобрений и средствами защиты растений – важнейший фактор повышения культуры земледелия и стабилизации продуктивности растениеводства. Рациональное использование минеральных и органических удобрений, мелиорантов, экологических средств защиты растений позволит сберечь и оздоровить наши почвы, приостановить их истощение, повысить производство растениеводческой продукции [17–19].

Выводы

Предлагаемое районирование предназначено для разработки и устойчивого развития сельского хозяйства, рационального природопользования и охраны окружающей среды.

Рискованность земледелия, растениеводства и неурожайные годы определяются природно-климатическими условиями Восточной Сибири и Дальнего Востока, которые усиливаются в результате нерациональной сельскохозяйственной деятельности. С другой стороны, их богатейшие воспроизводимые природные почвенные и растительные ресурсы, в том числе кормовые, являются перспективными для устойчивого развития животноводства.

Перспективно сбалансированное развитие агроландшафтов, посевных площадей и севооборотов, земледелия и растениеводства, животноводства и кормопроизводства, наиболее адаптированных к условиям Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Решение проблемы устойчивого развития сельского хозяйства, в том числе земледелия, растениеводства, кормопроизводства, животноводства, должно базироваться на максимальном использовании природно-климатических ресурсов, биологических и экологических факторов.

Обеспечить стабильность сельскохозяйственного производства, защитить его от засух, разрушения эрозией и дефляцией, повысить плодородие почв в пол-

ной мере может только рациональное природопользование и охрана окружающей среды – это необходимые условия для обеспечения продуктивного долголетия агроэкосистем и агроландшафтов.

Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0597-2014-0029 «Агроландшафтно-экологическое районирование Восточно-Сибирского и Дальневосточного природно-экономических районов Российской Федерации в целях информационного обеспечения использования и конструирования регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированных, высокопродуктивных и устойчивых кормовых агрофитоценозов и агроэкосистем».

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Косолапов ВМ, Трофимов ИА, Трофимова ЛС, Яковлева ЕП. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Наука; 2015.
2. Косолапов ВМ, Трофимов ИА, Трофимова ЛС, Яковлева ЕП. Агроландшафты Поволжья. Районирование и управление. Москва-Киров: Дом печати Вятка; 2010.
3. Урусевская ИС, Алябина ИО, Винюкова ВП, Востокова ЛБ, Дорофеева ЕИ, Шоба СА, Щипихина ЛС. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000. Москва; 2013.
4. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. Карта масштаб 1:8 000 000. М.: ГУГК; 1984.
5. Каштанов АН, ред. Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР. М.: Колос; 1983.
6. Природные кормовые угодья Российской Федерации и сопряженных государств (карта м 1:4 000 000), М.: ФСГК; 2001.
7. Сведения о наличии и распределении земель в Российской Федерации на 01.01.2020 (в разрезе субъектов Российской Федерации). URL: <https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-о-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 25.08.2022).
8. Шпедт АА, Трубников ЮН, Жаринова НЮ. Агротенная деградация почв и почвенного покрова Красноярской лесостепи. Почвоведение. 2017;(10):1253-61.
9. Асеева ТА, Киселев ЕП, Сухомиров ГИ. Сельское хозяйство Дальнего Востока: условия, проблемы и потенциал развития. Хабаровск: ИЭИ ДВО РАН; 2020.
10. Колосовский НН. Хозяйство Восточной Сибири и Дальнего Востока в связи с районированием. Пространственная экономика. 2009;(3):102-25.
11. Регионы России. Социально-экономические показатели: Статистический сборник. М.: Росстат; 2016.
12. Романов МТ, Степанько АА. Динамика территориальных структур сельского хозяйства Дальнего Востока России. Дальневосточный аграрный вестник. 2018;(1):133-43.
13. Ковальский ВВ. Проблемы биогеохимии микроэлементов и геохимической экологии. Избранные труды. М.: Россельхозакадемия; 2009.
14. Жученко АА. Основы адаптивно-интегрированной системы защиты агроценозов, агроэкосистем и агроландшафтов от вредных видов. В кн.: Роль мобилизации генетических ресурсов цветковых растений. Саратов; 2012. С. 180-95.
15. Глинушкин АП, Соколов МС, Торопова ЕЮ. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М.: Агрорус; 2016.
16. Соколов МС, Санин СС, Долженко ВИ, Спиридонов ЮЯ, Глинушкин АП, Каракотов СД, Надькта ВД. Концепция фундаментально-прикладных исследований защиты растений и урожая. Агрехимия. 2017;(4):3-9.
17. Захаренко ВА. Интегрированное управление фитосанитарным состоянием агроэкосистем в России. В кн.: Современные системы и мето-

- ды фитосанитарной экспертизы и управления защитой растений. Большие Вязёмы: ВНИИФ; 2015. С. 21-5.
18. Кудеяров ВН, Соколов МС, Глинушкин АП. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рациональному использованию. *Агрехимия*. 2017;(6):3-11.
 19. Косолапов ВМ, Трофимов ИА, Трофимова ЛС, Яковлева ЕП. Рациональное природопользование и кормопроизводство в сельском хозяйстве России. М.: РАН; 2018.
 9. Aseyeva TA, Kiselev YeP, Sukhomirov GI. *Selskoye Khoziaystvo Dalnego Vostoka: Usloviya, Problemy i Potentsial Razvitiya*. Khabarovsk: IEI DVO RAN; 2020. (In Russ.)
 10. Kolosovskiy NN. [Economy of East Siberia and Far East with regard to its zoning]. *Prostranstvennaya Ekonomika*. 2009;(3):102-25. (In Russ.)
 11. Anonymous. *Regiony Rossii. Sotsia'no-Ekonomicheskiye Pokazateli: Statisticheskiy Sbornik*. Moscow: Rosstat; 2016. (In Russ.)
 12. Romanov MT, Stepan'ko AA. [The dynamics of the territorial structures of Russian Far East agriculture]. *Dalnevostochnyi Agrarnyi Vestnik*. 2018;(1):133-43. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Kosolapov VM, Trofimov IA, Trofimova LS, Yakovleva YeP. *Agrolandshafty Central'nogo Chernozemya. Rayonirovaniye i Upravlenie*. Moscow: Nauka; 2015. (In Russ.)
2. Kosolapov VM, Trofimov IA, Trofimova LS, Yakovleva YeP. *Agrolandshafty Povolzhya. Rayonirovaniye i Upravleniye*. Moscow-Kirov: Dom Pechati Viatka; 2010. (In Russ.)
3. Urusevskaja IS, Aliabina IO, Viniukova VP, Vostokova LB, Dorofeyeva EI, Shoba SA, Shhipihina LS. *Karta Pochvenno-Ekologicheskogo Rayonirovaniya Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:2500000*. Moscow; 2013. (In Russ.)
4. Anonymous. *Prirodno-Selskokhoziaystvennoye Rayonirovaniye Zemelnogo Fonda SSSR. Karta Masshtab 1:8000000*. Moscow: GUGK; 1984. (In Russ.)
5. Kashtanov AN, ed. *Prirodno-Selskokhoziaystvennoye Rayonirovaniye i Ispolzovaniye Zemelnogo Fonda SSSR*. Moscow: Kolos; 1983. (In Russ.)
6. Anonymous. *Prirodnye Kormovye Ugodya Rossiyskoy Federatsii i Sopriazhennykh Gosudarstv (Karta m 1:4000000)*. Moscow: FSGK; 2001. (In Russ.)
7. Anonymous. URL: <https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii> (access date: 25.08.2022). (In Russ.)
8. Shpedt AA, Trubnikov JuN, Zharinova NJu. [Agrogenous degradation of soils and soil cover of Krasnoyarsk forest-steppe]. *Pochvovedeniye*. 2017;(10):1253-61. (In Russ.)
13. Kovalskiy VV. *Problemy Biogeokhimii Mikroelementov i Geokhimicheskoy Ekologii. Izbrannyye Trudy*. Moscow: Rosselkhozakademiya; 2009. (In Russ.)
14. Zhuchenko AA. [The Foundation of a Adaptive-Integrative System of Protection of Agricultural Cenoses, Ecosystems and Landscapes against Pest Species]. In: *Rol' Mobilizatsii Geneticheskikh Resursov Tsvetkovykh Rasteniy*. Saratov; 2012. P. 180-95. (In Russ.)
15. Glinushkin AP, Sokolov MS, Toropova YeYu. *Fitosanitarnyye i Gigiyenicheskiye Trebovaniya k Zdorovoy Pochve*. Moscow: Agrorus; 2016. (In Russ.)
16. Sokolov MS, Sanin SS, Dolzhenko VI, Spiridonov YuYa, Glinushkin AP, Karakotov SD, Nadykta VD. [A concept of basic and applied plant and crops protection research]. *Agrokimiya*. 2017;(4):3-9. (In Russ.)
17. Zakharenko VA. [Integrated management of the phytosanitary conditions of agricultural ecosystems in Russia]. In: *Sovremennyye Sistemy i Metody Fitosanitarnoy Ekspertizy i Upravleniya Zashchitoy Rasteniy. Bolshiye Viazemy: VNIIF*; 2015. (In Russ.)
18. Kudeyarov VN, Sokolov MS, Glinushkin AP. [The current conditions of soils in agrocenoses of Russia and actions for their amelioration and rational exploitation]. *Agrokimiya*. 2017;(6):3-11. (In Russ.)
19. Kosolapov VM, Trofimov IA, Trofimova LS, Yakovleva YeP. *Ratsionalnoye Prirodopolzovaniye i Kormoproizvodstvo v Sel'kom Khoziaystve Rossii*. Moscow: RAN; 2018. (In Russ.)

ЭКОЛОГИЯ ПИТАНИЯ СИВУЧА РЕПРОДУКТИВНОГО ЛЕЖБИЩА У МЫСА КОЗЛОВА (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)

И.А. Усатов^{1, 2*}, В.Н. Бурканов^{1, 3}, А.М. Токранов¹

¹ Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский;

² Кроноцкий государственный природный биосферный заповедник, г. Елизово, Россия;

³ Лаборатория по изучению морских млекопитающих Аляскинского рыбохозяйственного центра НСМР/НОАА,
г. Сиэтл, США

* Эл. почта: Usatov.ivan.alex@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.05.2022; принята к печати 28.09.2022

Изучали экологию питания сивуча *Eumetopias jubatus* по непереваренным остаткам пищи, обнаруженным в экскрементах на репродуктивном лежбище у мыса Козлова (восточное побережье полуострова Камчатка) в летние периоды с 2004 по 2008 год. По частоте встречаемости в питании преобладали северный одноперый терпуг *Pleurogrammus monopterygius* и минтай *Theragra chalcogramma*. Реже встречалась тихоокеанская песчанка *Ammodytes hexapterus*, трехиглая колюшка *Gasterosteus aculeatus*, тихоокеанская зубастая корюшка *Osmerus mordax*, рогатковые Cottidae, северный волосозуб *Trichodon trichodon*, камбаловые Pleuronectidae, тихоокеанские лососи *Oncorhynchus* sp., тихоокеанская треска *Gadus macrocephalus*, головоногие Cephalopoda. Вклад остальных объектов питания по отдельности был незначимым. Медиана распределения числа объектов питания на одну пробу для м. Козлова составила два объекта питания с диапазоном от одного до 9 типов добычи на одну пробу. Большинство из объектов питания сивуча являются видами с ярко выраженной сезонностью присутствия вблизи берега или на шельфе. Сивучи кормятся вблизи берега на сезонных скоплениях пищи, характерных для районов кормления. Сезонные скопления добычи могут быть исключительно важны для размножающихся животных, повышать эффективность поиска и добычи пищи, что в свою очередь может влиять на репродуктивный успех особей и их выживание. В связи с этим стабильность ресурса пищи вблизи репродуктивного лежбища может оказывать влияние на состояние численности сивуча у мыса Козлова.

Ключевые слова: сивуч, питание, компоненты рациона, сезонные скопления пищи, кормовые ресурсы.

STELLER SEA LION FEEDING ECOLOGY IN THE VICINITY OF CAPE KOZLOVA ROOKERY, EASTERN KAMCHATKA

I.A. Usatov^{1, 2*}, V.N. Burkanov^{1, 3}, A.M. Tokranov¹

¹ Kamchatka Branch of the Pacific Geographical Institute, the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences,
(Petropavlovsk-Kamchatsky);

² Kronotsky State Biosphere Nature Preserve (Yelizovo), Russia;

³ Marine Mammal Laboratory, AFSC, NMFS, NOAA, Seattle, WA

* Эл. почта: Usatov.ivan.alex@gmail.com

We studied the Steller's sea lion *Eumetopias jubatus* feeding ecology based on undigested food items found in feces at the Kozlova Cape rookery, Eastern coast of Kamchatka Peninsula, in summers (2004 through 2008). Atka mackerel *Pleurogrammus monopterygius* and walleye pollock *Theragra chalcogramma* were dominant in a sea lion diet hauled out at Kozlova Cape rookery in terms of frequency of occurrence. Less frequently occurred were Pacific sand lance *Ammodytes hexapterus*, Threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus*, Smelt *Osmerus mordax*, Sculpins Cottidae, Pacific sandfish *Trichodon trichodon*, Flatfishes Pleuronectidae, Salmon *Oncorhynchus* sp., Pacific cod *Gadus macrocephalus*, and Squid and Octopus Cephalopoda. The contribution of the other food items was not significant. Diet diversity median during sea lion single foraging trip was two prey items, range being one to nine Atka mackerel and Walleye pollock as the major prey objects. Most of sea lion food items were referred to species featuring a marked seasonal presence near the shore or on the shelf. Sea lions feed near the rookery close to the shore on seasonal food aggregations common to the area. Seasonal prey aggregations can be extremely important for breeding animals due to increasing the efficiency of food search and capture, which in turn can affect the reproductive success of animals and their survival. In this regard, the stability of the food resource near Kozlova Cape rookery may influence sea lion population status there.

Key words: Steller sea lion, diet components, seasonal food aggregations, food resources.

Введение

Сивуч (*Eumetopias jubatus* Schreber, 1776) распространен вдоль северной части Тихого океана от северной Японии до центральной Калифорнии [36]. Его численность стремительно сократилась на большей части ареала в конце прошлого века. По восточному побережью Камчатки численность сивуча с начала 1980-х годов снизилась более чем на 73,6%. Среднегодовые темпы снижения с 1983 по 2004 год составляли 6,3% [36], и с 2000-х снижение, по-видимому, замедлилось [33]. Лежбище у мыса Козлова в настоящее время является единственным сохранившимся на полуострове Камчатка местом размножения сивуча с численностью около 300 особей возраста один год и старше [24]. По последним данным, на 2015 год численность сивуча по всем лежбищам восточного побережья Камчатки оценивалась в 610 особей, при этом ежегодно рождалось примерно 100 щенков [37]. В нашей предыдущей публикации [26] рассмотрен рацион питания сивуча Камчатско-Командорского района без детального анализа питания зверей у мыса Козлова, где сокращение численности сивуча в местах их размножения у побережья Азии было наибольшим [36]. Поэтому в настоящей работе мы расширили анализ объектов питания сивуча у мыса Козлова конкретизацией рациона вида и детальным анализом главных компонентов пищи. Основой настоящей работы служили те же пробы экскрементов, что были использованы для подготовки предыдущей публикации [26]. Отличие данной работы – детальный анализ объектов питания сивуча для описания экологии питания вида.

Проведенные исследования [24] показали, что сивуч активно использует лежбище у м. Козлова только в период с конца апреля по начало сентября. Весной, с приближением репродуктивного периода, численность быстро возрастает, а после 24 июня так же резко снижается. Пик численности зверей наблюдается в июне. Зимой сивучи редко, в небольшом количестве и лишь непродолжительное время посещают это лежбище [24].

Некоторые гипотезы сокращения численности сивуча базируются на влиянии изменений доступности и состава рациона питания на кормодобывающую экологию вида и изменение темпов его воспроизводства и выживания [40, 62]. Питание сивуча по азиатскому побережью исследовано крайне слабо [13, 14, 15, 17, 26, 65, 66], особенно по восточному побережью Камчатки [26, 27, 65].

Известно, что состав рациона питания сивуча меняется географически и сезонно [27, 59, 65]. Несмотря на ограниченность исторических данных, было высказано предположение, что рацион сивуча на западной Аляске перешел от преобладания мелких стайных энергетически ценных рыб (таких как сельдь *Clupea pallasii*,

мойва *Mallotus villosus*, песчанка *Ammodytes hexapterus*) в 1970-х к преобладанию менее питательных рыб, таких как минтай *Theragra chalcogramma* в заливе Аляска и северный одноперый терпуг *Pleurogrammus monopterygius* на Алеутах [46, 59]. Также предположено, что разнообразие рациона питания было самым низким там, где произошло наиболее резкое сокращение численности сивуча [46], при этом низкое разнообразие добычи было приравнено к низкому поступлению энергии с пищей [68]. Однако для того, чтоб отличить фоновые вариации структуры рациона от действительно значимых, которые могут оказывать существенное влияние на выживаемость и распределения сивуча, необходимо более глубокое понимание экологии питания сивуча на локальном уровне каждого конкретного лежбища. Цель настоящего исследования – получить комплексное представление об особенностях питания сивуча у мыса Козлова на основе анализа компонентов пищи, обнаруженной в экскрементах, собранных на лежбище.

Задачи исследования:

1. Описать рацион питания сивуча на лежбище у м. Козлова на основе анализа проб экскрементов, собранных в период с 2004 по 2008 год.
2. Выделить главные компоненты рациона сивуча, встречаемые более чем в 5% исследованных проб экскрементов.
3. Рассмотреть особенности экологии главных объектов питания сивуча.
4. На основании полученных результатов составить описание экологии питания сивуча у м. Козлова.

Материалы и методы

Наше исследование проводилось на репродуктивном лежбище у м. Козлова, восточное побережье Камчатки (рис. 1). В течение сезонов размножения с 2004 по 2008 год собрана 151 проба экскрементов. Собирали образцы с конца июня до конца июля. Каждый образец помещали в пластиковый пакет. В лаборатории пробы переносили в набор из трех мелкоячеистых сит (минимальный размер ячеек 0,5 мм), большую часть переваренных частей пищи вымывали под напором воды, а оставшиеся непереваренные части просушивали и вручную очищали от примесей песка и водорослей.

Специалисты компании Pacific IDentifications Inc. (www.pacificid.com) идентифицировали очищенные и высушенные твердые части, используя эталонную коллекцию скелетов объектов добычи, отмечая морфологические части присутствующих твердых частей и определяя по ним виды организмов, к которым они принадлежат.

Относительную важность добычи в рационе количественно оценивали как простую (1) и модифицированную частоту встречаемости (2) [66].

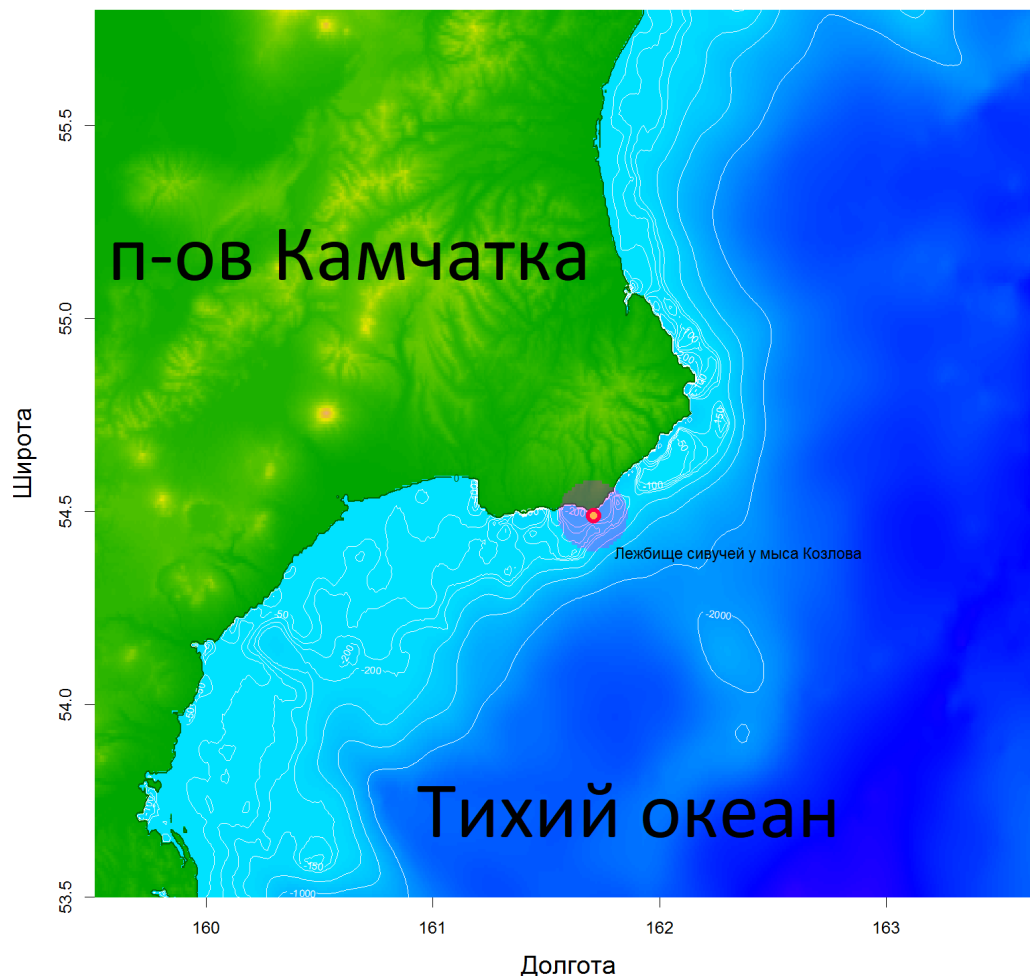


Рис. 1. Расположение лежища сивуча у мыса Козлова. Показана батиметрия и отмечен радиус 10 км – наиболее важная акватория для питания сивуча

Простая частота (%) встречаемости показывает, какая доля образцов экскрементов содержит тот или иной вид добычи. Она не суммируется до 100%. Например, 80% образцов могут содержать остатки минтая, а 50% – терпуга, то есть некоторые экскременты содержат оба вида добычи, а другие – только минтая или терпуга. Простую частоту встречаемости рассчитывали по формуле:

$$FO_i = \left(\frac{n_i}{n_t} \right) * 100 \quad (1)$$

где: FO_i – частота встречаемости объекта питания i ;
 n_i – число проб, содержащих объект питания i ;
 n_t – общее число исследуемых проб выборки t .

Модифицированная частота встречаемости [66] представляет собой долю вида добычи в общем составе рациона. Сумма пропорций модифицированной частоты встречаемости равна 100%. Например, средний рацион из предыдущего примера состоит из 65%

минтая и 35% терпуга. Расчет модифицированной частоты встречаемости основан на предположении, что в экскрементах содержатся остатки всей добычи, потребленной во время предыдущего приема пищи, и что добыча была потреблена в равных объемах. Модифицированную частоту встречаемости рассчитывают по формуле:

$$FOM_i = \left(\frac{FO_i}{\sum FO} \right) * 100 \quad (2)$$

где: FOM_i – модифицированная частота встречаемости объекта питания i .

Разнообразие питания оценивали по следующим параметрам:

- размер одной пробы, который определяли по числу объектов питания, приходящихся на 1 пробу, и представляли как медиану найденных значений и их интерквартильный размах (IQR) с указанием числа проб (N);

• число и состав проб с содержанием только одного кормового объекта.

Мы предполагали, что каждая проба экскремента представляет собой независимую выборку останков добычи и что наличие или отсутствие видов добычи в каждой пробе не зависит друг от друга. Статистическую обработку выполняли в среде R (<https://www.r-project.org/>).

Результаты и обсуждение

Состав рациона

В результате анализа экскрементов, собранных в 2004-2008 годах, были идентифицированы 24 объекта питания (табл. 1). Чаще всего в добыче сивуча встре-

чались северный одноперый терпуг ($FO = 70,2\%$, $FOM = 23,5\%$) и минтай ($FO = 49,0\%$, $FOM = 16,4\%$).

Реже в составе пищи встречались тихоокеанская песчанка, трехиглая колюшка, тихоокеанская зубастая корюшка, рогатковые, северный волосозуб, камбаловые, тихоокеанские лососи, тихоокеанская треска, головоногие. Вклад остальных объектов питания по отдельности был менее значимым, составляя в целом $24,2\%$ FO ($N = 11$).

Разнообразие рациона

В образцах экскрементов с мыса Козлова 58% всех проб содержали не более 1–2 объектов питания. В одном образце содержалось максимум 9 видов пищи,

Табл. 1

Структура рациона сивуча лежбища у мыса Козлова в 2004–2008 годах по результатам копрологического анализа

Объект питания	FO (%)	MFO (%)
Северный одноперый терпуг <i>Pleurogrammus monopterygius</i>	70,2	23,5
Минтай <i>Theragra chalcogramma</i>	49,0	16,4
Тихоокеанская песчанка <i>Ammodytes hexapterus</i>	33,8	11,3
Трехиглая колюшка <i>Gasterosteus aculeatus</i>	18,5	6,2
Тихоокеанская зубастая корюшка <i>Osmerus mordax</i>	18,5	6,2
Рогатковые Cottidae	16,0	5,4
Северный волосозуб, триходон <i>Trichodon trichodon</i>	14,6	4,9
Камбаловые <i>Pleuronectidae</i>	14,1	4,7
Тихоокеанские лососи <i>Oncorhynchus</i> sp.	11,9	4,0
Многощетинковые черви Polychaeta*	11,9	4,0
Тихоокеанская треска <i>Gadus macrocephalus</i>	9,3	3,1
Головоногие Cephalopoda	6,6	2,2
Pisces (не определенные виды рыб)	4,0	1,3
Не определенные до вида лисичковые Agonidae	4,0	1,3
Не определенные до вида рыбы семейства тресковые Gadidae	4,0	1,3
Не определенные до вида липаровые Liparidae	4,0	1,3
Не определенные до вида морские окуни <i>Sebastes</i> sp.	2,7	0,9
Зайцеголовый терпуг <i>Hexagrammos lagocephalus</i>	2,0	0,7
Рыба-лягушка <i>Aptocyclus ventricosus</i>	0,7	0,2
Не определенные рыбы рода <i>Crystallichthys</i>	0,7	0,2
Не определенные рыбы рода круглоперы колючие <i>Eumicrotremus</i>	0,7	0,2
Не определенные до вида стихеевые Stichaeidae spp.	0,7	0,2
Глубоководные скаты <i>Bathyraja</i> sp.	0,7	0,2

* Многощетинковые черви не являются объектами питания сивуча, но часто потребляются вместе с рыбой.

но такие пробы регистрировались единично. Медиана числа видов пищи на один образец экскремента составила два объекта питания при $IQR = 2$ ($N = 151$). Доля образцов с одним компонентом составляла 24,5%, которые содержали главным образом остатки северного одноперого терпуга (75,7% всех проб с одним видом корма в составе).

Каждая проба экскрементов представляет собой лишь один акт дефекации, который может не полностью отражать структуру рациона кормового похода, так как в течение дня или всего периода пребывания на суше животное производит несколько актов дефекации [43, 61]. Количество, масса экскрементов и, следовательно, количество непереваренных пищевых остатков, доступных исследователю, значительно варьируют. Эта вариабельность существенно затрудняет или даже делает полностью невозможным расчет объема биомассы корма, съеденного животным за сутки или один кормовой поход. В зависимости от видов объекта питания, скорости их прохождения через пищеварительный тракт различны. Крупные трудно перевариваемые остатки объектов питания могут задерживаться в пищеварительной системе, в то время как мелкие твердые остатки проходят транзитом за 2–3 дня [43, 61]. Поэтому в настоящей работе показано только присутствие или отсутствие каждого типа добычи в образцах экскрементов и не выполнен количественный расчет объема пищи, потребляемой сивучом.

Характеристика кормовых ресурсов сивуча

Для характеристики кормовых ресурсов исследовали только основные объекты питания сивуча, обнаруженные более чем в 5% образцов экскрементов. В данную категорию были включены: северный одноперый терпуг, минтай, тихоокеанская песчанка, трехиглая колюшка, тихоокеанская зубастая корюшка, рогатковые, северный волосозуб, камбаловые, тихоокеанские лососи, тихоокеанская треска, головоногие моллюски. Несмотря на общие недостатки использования копрологического анализа для исследования рациона сивуча [43, 61], пороговое значение в 5% ФО является важным показателем того, что данные объекты питания значимы в рационе вида исследуемого лежбища в сезон исследования.

Северный одноперый терпуг

Северный одноперый терпуг – наиболее массовый представитель терпуговых рыб в пределах тихоокеанских вод восточного побережья Камчатки. Он играет значительную роль в питании сивуча наравне с минтаем практически повсеместно у побережья Азии [13, 14, 15, 17, 26, 27, 65, 66].

Зоны распространения молоди и половозрелых рыб сильно различаются. Молодь широко рассредоточе-

на в эпипелагиали, обитает разрозненно и переходит к придонному образу жизни лишь при достижении определенных размеров [8]. Половозрелые рыбы обитают более локально, не совершая дальних миграций. Нерест рыб происходит в прибрежной зоне ежегодно в одних и тех же местах. В этот период года, совпадающий с временем размножения сивуча, терпуг играет одну из ключевых ролей в его рационе, являясь легким в поимке (самцы терпуга проявляют территориальность и защиту кладок икры, которую откладывают самки) объектом питания [59]. По нашим данным, пробы питания с одним кормовым объектом в пробе наиболее часто включали северного одноперого терпуга (75,7%), что отражает высокую его значимость в диете сивуча в летний период.

Минтай

Минтай является одним из наиболее потребляемых объектов питания сивуча на большей части ареала [59, 65, 69]. Массовость этого вида рыб в питании сивуча связана с его преобладанием в шельфовых ихтиоценозах: в некоторых районах его доля может составлять до 90% и более биомассы всех рыб [30]. Особую значимость в питании молодых сивучей, ограниченных в поисках и поимке объектов питания лишь небольшими глубинами [59], имеет молодь минтая, которая образует скопления и обитает в теплый период года локально на небольших глубинах [30]. Считается, что взрослый минтай (старше 4 лет) проводит жизнь на глубинах более 200 м [30], поднимаясь в период размножения на глубины менее 200 м. Во время нереста рыбы создают крупные скопления на шельфе. Вблизи мыса Козлова основной нерест минтая происходит в Кроноцком заливе [30] на глубине 90-190 м в вершинах глубоководных желобов [29], а также в динамических образованиях «циклон – антициклон». Время нахождения половозрелого минтая в данном районе составляет в среднем 1,5 месяца, пик нахождения приходится на апрель – май [29, 30].

Таким образом, потребляемый сивучом весной и в начале лета минтай представлен взрослыми отнерестившимися особями, в то время как летом – молодь, образующей скопления вблизи лежбища на небольших глубинах. Минтай может формировать различные по характеру скопления в течение всех сезонов года, поэтому он доступен для кормления круглогодично и доминирует в рационе питания сивуча на всем его ареале.

Тихоокеанская песчанка

Тихоокеанская песчанка – мелкая, полудемерсальная стайная рыба, занимающая значительное место в экосистемах дальневосточных морей и являющаяся важным объектом питания не только сивуча, но и многих других видов морских млекопитающих и

птиц [10]. Оценки биомассы этой рыбы и специализированные исследования в пределах исследуемой акватории единичные [21]. Способность песчанки зарываться в песчаный грунт накладывает отпечаток на ее распределение. Она встречается в тех районах шельфа, где донные отложения представлены песчаным, песчано-галечным и песчано-ракушечниковым грунтом [27, 28]. Песчанка совершает небольшие по протяженности сезонные и онтогенетические миграции. Половозрелые рыбы ведут прибрежный образ жизни и глубже 100 м не встречаются [27, 28]. В темное время суток они зарываются в мелкий гравий или песчаный субстрат, а кормятся днем в толще воды, формируя плотные скопления вблизи мест бентосных укрытий. Песчанке свойственно высокое содержание жиров [34], а малые глубины обитания рыб позволяют сивучу использовать этот вид в течение всех сезонов года.

Тихоокеанская песчанка редко встречалась при донном тралении в акватории Кроноцкого заповедника при обследовании в 1972–1982 годах на глубинах 20–25 м [21]. Малые размеры рыб и способность зарываться в песок, вероятно, не позволяют выполнить точные оценки биомасс этого вида рыб с использованием траловых орудий лова. Хрупкие маленькие кости тихоокеанской песчанки хорошо перевариваются в желудочно-кишечном тракте сивуча, в связи с чем при анализе экскрементов этот объект питания недооценивается в составе рациона вида в 2–7 раз [61].

Трехиглая колюшка

Этот один из наиболее массовых промысловых видов распространен циркумполярно. Формирует пресноводные и проходные формы [3]. В питании сивуча может быть включена только проходная форма, так как сивуч обитает в морской среде и редко поднимается по рекам. В период нереста, пик которого приходится на май – июнь, проходная форма колюшки формирует плотные скопления в акваториях эстуариев рек. Масса рыб мала, составляя всего порядка 4–10 г при длине 8–11 см [3]. Тело защищено от хищников тремя острыми шипами. Плотные скопления в мае – июне на малых глубинах в эстуариях рек позволяют хищникам легко находить этот источник пищи.

Исследования состава пищи у представителя рогатковых – дальневосточной широколобкой *Megalocottus platycephalus* – показало [11], что основными кормовыми объектами в летнем рационе рыб были трехиглая колюшка и мойва. Поэтому возможно, что колюшка была вторично переваренным компонентом, являясь пищей более крупных рыб – объектов питания сивуча. Содержимое желудков рыб перемешивалось с переваренными остатками пищи сивуча и оказывалось в его экскрементах. К сожалению, с помощью используемого метода исследований это предположение невозможно проверить.

В любом случае, малые размеры рыб и большие шипы позволяют назвать этот источник пищи второстепенным, используемым при отсутствии достаточного обилия основной пищи. Доля колюшки в рационе животных с репродуктивного лежбища мыса Козлова была высока (18,5% FO). При исследовании питания сивуча по американскому побережью колюшка встречалась в рационе, но повсеместно незначительно [59].

Тихоокеанская зубастая корюшка

В течение всех сезонов года молодые особи зубастой корюшки обитают в прибрежье, предпочитая заливы и бухты. На шельфе Кроноцкого залива в летний период 1971–1981 годов зубастая корюшка встречалась на глубинах 10–30 м в 37% тралениях [21]. Для вида характерны выраженные ежегодные нерестовые миграции с начала мая по июль [6, 7]. Нерест протекает в пресных водоемах в достаточно сжатые сроки (7–10 дней), отнерестившиеся рыбы скатываются обратно в море.

Зубастая корюшка формирует плотные нерестовые скопления во время заходов в водоемы [5], что позволяет сивучу эффективно использовать этот кормовой объект. Питательность у корюшки выше, чем у любого другого объекта рациона сивуча. Среднее содержание жиров у этого кормового вида составляет 16% и может достигать 29% [64]. Корюшка обеспечивает высокопитательный и хорошо предсказуемый в пространстве и времени источник пищи для сивуча.

Хотя корюшка не являлась важной добычей сивуча по американскому побережью [59], наше и зарубежные исследования позволяют предположить, что этот кормовой объект играет сезонно важную роль в рационе сивуча на отдельных лежбищах [70]. Так, например, в отдельных коллекциях экскрементов с лежбища о-ва Бенджамин (Аляска) в 2004 году корюшка встречалась в каждой пробе экскрементов [70].

Исследования кормления калифорнийского морского льва *Zalophus californianus* (схожий с сивучом вид) в неволе показали, что восстановление отоликов корюшки составляет всего 46,5% ($\pm 13,7$) [51], что способствует недооценке этого кормового вида в рационе морских львов.

Рогатковые

Рогатковые – повсеместно распространенные рыбы в тихоокеанских водах Камчатки. Их промышленный вылов невелик. Число видов в составе этого семейства составляет около 70 [22], из которых всего несколько являются объектами питания сивуча. Специализированные исследования в пределах исследуемой акватории не отражают полной картины распределения и биомасс рогатковых. В летний период основная масса рыб обитает на глубинах до 60 м [18, 19, 21]. Для некоторых видов рогатковых характерны сезонные

вертикальные миграции: весной – в зону прибрежного мелководья, осенью – в верхнюю часть материкового склона, на глубины более 200 м. У других видов этих рыб (например, у широколобого шлемоносца *Gymnacanthus detrisus*) значительные вертикальные перемещения отсутствуют, и в течение всего года рыбы обычно обитают на глубинах от 100 до 300 м [22]. Скопления получешуйников рода *Hemilepidotus* в Кроноцком заливе приурочены к районам с замкнутыми круговыми течениями [18]. Нерест большинства рогатковых происходит в теплый период года на глубинах от 10 до 40 м [20]. Другие виды, как, например, *Hemilepidotus hemilepidotus* нерестятся с октября по январь, при этом кладку самки охраняет самец. Исследования на американском побережье показали, что *Hemilepidotus hemilepidotus* встречался в районе сивуча в три раза чаще зимой, чем летом [59].

Вероятно, рогатковые занимают в рационе сивуча большую роль как один из видов рыб, в летнее время наиболее массово встречающихся в прибрежной зоне вблизи м. Козлова [21]. В зимнее время отдельные виды рогатковых являются доступным и легкими в поимке кормовыми объектами.

Северный волосозуб

Этот вид рыб многочислен в Кроноцком заливе и на западнокамчатском шельфе [23]. Волосозуб постоянно держится на глубинах менее 100–150 м (в летние месяцы – до 30–50 м) на участках с песчаными и песчано-илистыми грунтами. Нерест наблюдается в осенне-зимний период на прибрежном мелководье, при этом рыбы образуют скопления в одних и тех же районах. Крупные скопления волосозуба в пределах вод восточной Камчатки отмечены только в Кроноцком заливе [23]. В работе по исследованию питания сивуча у американского побережья [59] отмечено более важное в рационе питания этим видом рыб зимой, в сравнении с летом. Таким образом, северный волосозуб является легкодоступной пищей для сивуча, так как обитает в летнее время на небольших глубинах и формирует крупные скопления в районе исследования.

Камбаловые

Камбаловые были представлены в рационе сивуча района исследования главным образом звездчатой камбалой *Platichthys stellatus* и северной двухлинейной камбалой *Lepidopsetta polyxustra*. Двухлинейная камбала достаточно крупная рыба, достигающая 60 см в длину и массы более 3 кг. Для нее характерны сезонные незначительные миграции, но большую часть времени года, за исключением зимнего периода, рыбы обитают на глубинах 50–150 м [4, 9]. Размножение протекает в зимне-весенний период, например, у восточных берегов Камчатки – в конце апреля – нача-

ле мая в прибрежной зоне [4]. Северная двухлинейная камбала образует крупные скопления у восточного побережья Камчатки и северных Курильских островов [4]. Двухлинейная камбала включается в рацион сивуча как массовая придонная рыба на мелководье в теплый период года. Известные наиболее плотные скопления рыб у восточного побережья Камчатки [4] соответствуют местам с высокой встречаемостью этого вида камбал в районе сивуча согласно нашим и ранним исследованиям [26, 65].

Места обитания звездчатой камбалы связаны с устьями рек, мелководьем, заливами и лагунами, с сильно опресненными прибрежными водами. Рыбы обитают локально, не совершая миграций на ограниченных по площади акваториях [27, 28]. Глубины обитания рыб составляют 10–50 м, редко до 130 м. В целом, биомассы звездчатой камбалы невысоки по ее ареалу [27, 28], однако локальность обитания рыб и их малоподвижность позволяют сивучу легко находить этот источник пищи и кормиться им.

Тихоокеанские лососи

Большинство лососей ведут пелагический образ жизни в первые три года жизни и формируют плотные скопления на нерестовых путях миграции во взрослом возрасте [32]. Миграция лососей к местам размножения протекает в точно определенное время года, предположительно позволяя сивучу так же точно находить этот ресурс пищи [52, 59]. Биомасса тихоокеанских лососей в исследуемой акватории не высока [31]. Мы также не нашли в опубликованной литературе информацию о нагульных и нерестовых скоплениях тихоокеанских лососей у мыса Козлова [31, 32]. Вблизи лежбища у мыса Козлова находится ряд небольших рек, в которые лососевые заходят на нерест. Таким образом лососи являются сезонным источником пищи только в период их миграций к местам размножения, когда рыбы формируют плотные скопления. Несмотря на малые величины биомасс тихоокеанских лососей в исследованном районе, их скопления локальны, предсказуемы в акваториях и времени года, что позволяет сивучу эффективно находить и использовать концентрированные скопления этого источника пищи.

Тихоокеанская треска

Тихоокеанская треска совершает регулярные сезонные миграции [12]. В осенний и зимний периоды рыбы обитают на глубинах 150–220 м. С началом весны и летом большая часть трески перемещается на мелководье для нереста и нагула. В Кроноцком заливе нерест трески отмечается с января по март с пиком в феврале на глубинах порядка 200 м. Молодь трески в Кроноцком и Камчатском заливах обитает на глубинах от 25 до 250 м при средней глубине 96 м [16].

Треска встречается повсеместно в водах Камчатки, но ее концентрации распределены неравномерно [16], плотные скопления часто отмечаются над подводными хребтами, поднятиями (банками) [27, 28].

В ряде исследований на американском побережье отмечено, что треска значительно чаще встречается в зимнем районе сивуча, чем в летнем [38, 52, 59]. Вероятно, плотные нерестовые скопления трески на доступных для сивуча глубинах в конце зимы – начале весны могут предоставлять хорошие кормовые условия, однако наши данные ограничены только летним сезоном. Треска является крупной рыбой, сивуч может потреблять рыб не полностью, съедая только мягкие ткани, что снижает частоту встречаемости этого объекта в рационе питания при анализе экскрементов.

Головоногие моллюски

Головоногие значились среди наиболее важных объектов питания во многих ранних исследованиях [14, 15, 45, 52, 60] и иногда – как наиболее часто встречаемая добыча сивуча [42]. Единственным промысловым видом в водах России является командорский кальмар (*Beryteuthis magister*) с ежегодной добычей около 80-100 тысяч тонн [2], который преобладает в числе и биомассе среди головоногих моллюсков и, вероятно, является наиболее частой добычей сивуча [2, 59]. Командорский кальмар собирается в предсказуемые сезонные скопления над прибрежным континентальным шельфом, где он нерестится [1, 59]. Молодые особи командорского кальмара формируют скопления над континентальным шельфом, где потребляются сивучем [57, 58] до онтогенетической миграции этого кормового объекта в средние или демерсальные зоны открытого моря или в более глубокие воды над континентальным склоном.

Вероятно, скопления кальмара предоставляют сивучу доступный, предсказуемый и обильный источник пищи в местах концентрации. Отличительной особенностью этого кормового объекта является формирование плотных и достаточно устойчивых скоплений, приуроченных к районам с высокой динамикой вод [1, 2, 57, 58].

Экология питания сивуча

Физиологические адаптации к погружению и охоте развиваются у сивуча на протяжении первых трех лет жизни [56]. Использование телеметрических приборов для изучения питания сивуча показало, что большинство погружений сивуча ограничены глубинами менее 20 м, хотя отдельные особи ныряют на глубины более 250 м. Средняя глубина ныряния взрослых самок составляет 38 м, молодых (от 1 до 3 лет) – 21 м, у особей в возрасте до 1 года – 10 м. Средняя продолжительность ныряния особей до 1 года – 1,1 минуты, молодых животных старше 1 года – 1,5 мину-

ты, взрослых самок – 2,5 минуты. Наиболее важная для питания акватория ограничена радиусом 10 км от лежбища. Но нередко самки уходят на расстояние до 50-70 км и более в поисках пищи [47, 44, 53, 55, 50 и др.]. Большинство особей кормятся в прибрежной зоне у дна, и незначительный процент животных – в пелагиали [41, 47]. Районы кормовых путешествий особей, которые кормились в открытом море, как правило, были связаны с батиметрическими особенностями, такими как подводные хребты [41, 47].

Состав пищи, способности сивуча к погружениям и охоте, а также структура его рациона показывают, что сивуч кормится вблизи дна на сравнительно небольших глубинах. Наиболее глубокие погружения, вероятно, производятся в поисках прибрежных демерсальных и полудемерсальных видов рыб в подводных каньонах и расщелинах, которые составляют структуру морского дна вдоль континентального шельфа восточного побережья Камчатки.

Общей чертой для всех главных компонентов рациона сивуча было их обитание на континентальном шельфе в тот или иной период своей жизни. Для большинства кормовых видов характерны плотные скопления на отдельных стадиях жизненного цикла. Формируемые ими скопления постоянны в пространстве и приурочены к специфическим гидрологическим условиям, таким как особенности структуры дна, специфические температурные режимы, динамика вод. Концентрации добычи, в свою очередь, влияют на выбор мест кормления хищником [42, 52, 59 и др.]. Если кормовые участки приносят стабильно высокую добычу из сезона в сезон, опыт может позволить хищникам находить пищу более эффективно в последующих охотах [48], поскольку морские хищники могут ассоциировать время года и локальные особенности акватории с высокими концентрациями пищи [39].

Животные, залегающие на одном лежбище, генетически связаны [35, 49], у них сходные рационы питания [65] и схожие популяционные тенденции [33]. Таким образом, вероятно, сивучи могут развивать навыки поисков корма, специфичные для лежбищ их рождения [49, 59]. В этом смысле сивуч приспособлен к использованию локальных условий добычи в акваториях лежбищ региона их рождения в отличие от северного морского котика *Callorhinus ursinus*, который широко перемещается при поиске добычи, кормится в пелагиали и менее зависит от доступной пищи в акваториях лежбищ [66].

Мы предполагаем, что пищевые ресурсы сивуча, указанные в работе, могут отражать две основные стратегии хищников. Первая и доминирующая модель – это хищник, который питается на плотных и предсказуемых скоплениях пищи, таких как терпуг, минтай, лососи, песчанка и другие, вблизи лежбищ

[50], при этом звери могут кормиться сообща, возможно, помогая друг другу в поиске и даже поимке жертвы. Таким образом хищники оптимизируют свое кормовое поведение в соответствии с предположением мест и времени нахождения высоких концентраций ресурса пищи.

Однако, когда добыча труднодоступна, плотность и ее предсказуемость не является единственным важным фактором, и необходимо учитывать затраты, связанные с увеличением времени перемещения к местам кормления и погружения. В связи с этим, иногда для сивуча может быть характерна другая кормодобывающая стратегия, отражающая поиск жертв, рассредоточенных в пространстве, и сходная с собирательством единичных кормовых объектов. Прерывистое кормление на таких рассредоточенных кормовых объектах может быть менее выгодной стратегией для сивуча, поскольку каждый отдельный поиск и захват добычи энергетически более затратен, в отличие от кормления на плотных скоплениях пищи.

Для того чтобы стратегия групповой охоты была для сивуча успешной, объекты питания должны быть предсказуемы в пространстве моря и по времени года и доступны для сивуча с учетом его физиологических способностей к погружениям. Скопления пищи должны быть достаточно плотными и ограничены батиметрическими и температурными зонами и/или градиентами температур и солености. Все эти факторы связаны между собой и вероятно определяют кормопищевые миграции сивуча в море.

Данные показывают, что численность сивуча на лежбище на мысе Козлова увеличивалась весной, достигая максимума в пик репродуктивного сезона, и снижалась осенью [24]. Зимой сивучи практически не использовали мыс Козлова для обитания. Можно предположить, что в зимнее время по сравнению с летним сезоном года данное лежбище не может предоставить хорошие условия обитания. Это может быть связано с отсутствием достаточных и доступных кормовых ресурсов в прилегающей к лежбищу акватории. Отмечено [50], что энергетический баланс у сивуча в период ранней лактации достаточно ограничен. Любое уменьшение размера или обилия добычи может иметь серьезные последствия для репродуктивного успеха и физического состояния зверей. Учитывая длительный период лактации сивуча

[63], достигающий трех лет, наличие предсказуемых плотно агрегированных пищевых ресурсов зимой в районах обитания также может иметь решающее значение для выживания зверей. Энергетические потребности самок с растущим зависимым потомством возрастают зимой и особенно весной [67], перед началом репродуктивного сезона. Поэтому крайне необходимы дополнительные исследования зимнего питания и распределения сивуча по восточному побережью Камчатки в осенний, зимний и весенние сезоны года.

Заключение

В летний период сивучи мыса Козлова питаются недалеко от берега на плотных, нерестовых или миграционных скоплениях рыб. Основу рациона, с частотой встречаемости более 5% в экскрементах, составляют массовые виды рыб, обитающие вблизи лежбища у м. Козлова: северный одноперый терпуг, минтай, тихоокеанская песчанка, трехглая колюшка, тихоокеанская зубастая корюшка, рогатковые, северный волосозуб, камбаловые, тихоокеанские лососи, тихоокеанская треска, головоногие моллюски. Сезонные скопления добычи могут быть исключительно важными для размножающихся животных, повышать эффективность поиска и добычи пищи, что в свою очередь может влиять на репродуктивный успех особей и их выживание. В связи с этим стабильность ресурса пищи вблизи репродуктивного лежбища может оказывать влияние на численность сивучей у м. Козлова. Однако остается абсолютно неизвестной зимняя экология этого вида в водах восточного побережья Камчатки, в первую очередь, характер распределения и структура рациона сивуча. Необходимы дополнительные исследования зимнего периода жизни сивуча, когда животные покидают лежбище у м. Козлова.

Благодарности. Авторы благодарны участникам экспедиций по изучению сивуча, участвовавшим в сборе и промывке экскрементов, обработке и идентификации непереваренных частей пищи. Сбор проб экскрементов и их анализ выполнен при финансовой поддержке Национальной службы морского рыболовства США, Аляскинского рыбохозяйственного центра, Alaska SeaLife Center и North Pacific Wildlife Consulting, LLC.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Алексеев ДО, Бизиков ВА, Помозов АА, Хромов ДН. Подводные наблюдения за поведением и распределением командорского кальмара и других головоногих моллюсков в северной

части Тихого океана. В кн.: Подводные исследования в биоокеанологических и рыбохозяйственных целях. М.: ВНИРО. 1989; С. 66-77.

2. Алексеев ДО, Бизиков ВА, Ботнев ДА, Лищенко ФВ. История развития промысла командорского

- кальмара в водах России и его современное состояние. Труды ВНИРО. 2018;170:90-104.
3. Берг ЛС. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Ч. 3. М.: АН СССР. 1949; С. 927-1382.
 4. Бирюков ИА. Сезонное распределение, промысел и состояние запасов северной двухлинейной камбалы *Lepidopsetta polyxustra* тихоокеанского побережья северных Курильских островов и юго-восточной оконечности Камчатки. Труды СахНИРО. 2008;10:77-98.
 5. Бугаев АВ, Амельченко ЮН, Липнягов СВ. Азиатская зубастая корюшка *Osmerus mordax dentex* в шельфовой зоне и внутренних водоемах Камчатки: состояние запасов, промысел и биологическая структура. Известия ТИНРО. 2014;178:3-24.
 6. Василец ПМ, Винников АВ, Золотов ОГ. Распределение и численность тихоокеанской корюшки *Osmerus mordax dentex* Steindachner на западнокамчатском шельфе. Известия ТИНРО. 1998;124:360-74.
 7. Василец ПМ, Трофимов ИК, Раевский РВ. Морфологическая дифференциация тихоокеанской корюшки *Osmerus mordax dentex* в водах Камчатки. Исследование водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2000;5:101-5
 8. Золотов ОГ. Северный одноперый терпуг. В кн.: Биологические ресурсы Тихого океана. М.: Наука. 1986; С. 310-19.
 9. Кузнецова ЕН, Кунин АМ. Новые данные о биологии северной двухлинейной камбалы *Lepidopsetta polyxustra* в тихоокеанских водах Северных Курильских островов и Юго-Восточной Камчатки. Вопросы ихтиологии. 2002;42(3):336-40.
 10. Лапко ВВ. Трофические отношения в эпипелагическом ихтиоценозе Охотского моря. Известия ТИНРО. 1994;116:168-77.
 11. Максименков ВВ, Токранов АМ. Питание северной дальневосточной широколобки в эстуарии реки Большая (Западная Камчатка). Биология моря. 1992;(1-2):34-42.
 12. Моисеев ПА. Треска и камбалы дальневосточных морей. Известия ТИНРО. 1953;40:288.
 13. Никулин ПГ. Сивуч Охотского моря и его промысел. Известия ТИНРО. 1937;10:35-48.
 14. Панина ГК. О питании сивуча и тюленей на Курильских островах. Известия ТИНРО. 1966;58:235-6.
 15. Перлов АС. Питание сивучей в районе Курильских островов. Экология. 1975;4:106-8.
 16. Савин АБ. Нерестилища тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* в северо-западной части Тихого океана. Известия ТИНРО. 2016;187:48-71.
 17. Тихомиров ЭА. О распределении и промысле сивучей в Беринговом море и сопредельных районах Тихого океана. Известия ТИНРО. 1964;52:287-91.
 18. Токранов АМ. Распределение получешуйных бычков Джордана и Гильберта *Hemilepidotus jordani* Bean и *Hemilepidotus gilberti* Jordan et Starks (Cottidae) у восточного побережья Камчатки. Вопросы ихтиологии. 1981;21:823-9.
 19. Токранов АМ, Полутов ВИ. Распределение рыб в Кроноцком заливе и факторы, его определяющие. Зоологический журнал. 1984;63:1363-73.
 20. Токранов АМ. Размножение массовых видов керчаковых рыб прикамчатских вод. Биология моря. 1988;4:28-32.
 21. Токранов АМ. К познанию морской ихтиофауны Кроноцкого заповедника. Вопросы географии Камчатки. 1990;10:173-8.
 22. Токранов АМ, Орлов АМ. Динамика уловов массовых видов рогатиковых рыб (Cottidae) в тихоокеанских водах северных курильских островов и юго-восточной Камчатки в 1992-2002 гг. В кн.: Шунтов ВП и др., ред. Материалы всероссийской научной конференции, посвященной 80- летию юбилею ФГУП «КамчатНИРО»; 26-27 сентября 2012. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО; 2012. С. 230-9.
 23. Токранов АМ. Нетрадиционные потенциальные объекты прибрежного рыболовства прикамчатских вод Охотского моря. В кн.: Зорченко НК и др., ред. Материалы V Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана»; 22-24 мая 2018. Часть I. Владивосток: Дальрыбвтуз; 2018. С. 9-13.
 24. Усатов ИА, Алтухов АВ, Бурканов ВН. Сезонная динамика численности сивуча на репродуктивном лежбище у м. Козлова, Камчатка. В кн.: Бугаев ВФ и др., ред. Материалы XV научной конференции «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей»; 18-19 ноября 2014. Петропавловск-Камчатский: КФ ТИГ ДВО РАН; 2014. С. 372-6.
 25. Усатов ИА, Токранов АМ, Труханова ИС, Бурканов ВН. Питание сивуча у восточного побережья Камчатки. Труды ВНИРО. 2021;185:57-67.
 26. Усатов ИА., Бурканов ВН. Летнее питание сивуча в водах Дальнего Востока России в 2004-2008 годах. Биосфера. 2022;14:8-28.

27. Фадеев НС. Промысловые рыбы северной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1984.
28. Фадеев НС. Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана. Владивосток: ТИНРО-центр; 2005.
29. Храпкина НВ. Нерестовые скопления промысловых рыб в Кроноцком заливе. Труды ИОАН СССР. 1959;36:123-42.
30. Шунтов ВП, Волков АФ, Темных ОС, Дулепова ЕП. Минтай в экосистемах дальневосточных морей. Владивосток: ТИНРО-центр; 1993.
31. Шунтов ВП, Бочаров ЛН. Атлас количественного распределения nekтона в северо-западной части Тихого океана. М.: «ФГУП Национ. рыбн. ресурсы»; 2005.
32. Шунтов ВП, Темных ОС. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах: монография Т. 2. Владивосток: ТИНРО-Центр. 2011.

Общий список литературы/Reference List

1. Alekseyev DO, Bizikov VA, Pomozov AA, Khromov DN. [Underwater observations of the behavior and distribution of the Commander squid and other cephalopods in the North Pacific]. In: Podvodnye Issledovaniya v Biooceanologicheskikh i Rybohozyajstvennykh Tselyakh. Moscow: VNIRO. 1989; P. 66-77. (In Russ.)
2. Alekseyev DO, Bizikov VA, Botnev DA, Lishchenko FV. [The history of the Schoolmaster squid fishery development in Russian waters and its current state]. Trudy VNIRO. 2018;170:90-104. (In Russ.)
3. Berg LS. Ryby Presnykh Vod SSSR i Sopredelnykh Stran Ch. 3 [Fishes of Fresh Waters of the USSR and Neighboring Countries. Pt. I]. Ch. 3. Moscow: AN SSSR. 1949; P. 927-1382. (In Russ.)
4. Biryukov IA. [Seasonal distribution, fishery, and stock status of the Northern rock sole *Lepidopsetta polyxystra* of the Pacific coast of the northern Kuril Islands and the southeastern part of Kamchatka]. Trudy SakhNIRO. 2008;10:77-98. (In Russ.)
5. Bugayev AV, Amel'chenko YuN, Lipnyagov SV. [Rainbow smelt *Osmerus mordax dentex* in the shelf zone and inland water bodies of Kamchatka: state of stock, fishery, and biological structure]. Izvestiya TINRO. 2014;178:3-24. (In Russ.)
6. Vasilets PM, Vinnikov AV, Zolotov OG. [Distribution and abundance of the Pacific smelt *Osmerus mordax dentex* Steindachner on the West Kamchatka shelf]. Izvestiya TINRO. 1998;124:360-74. (In Russ.)
7. Vasilets PM, Trofimov IK, Raevskiy RV. [Morphological differentiation of smelt *Osmerus mordax dentex* in Kamchatkan waters]. Issledovaniye Vodnykh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoy Chasti Tikhogo Okeana. 2000;5:101-5. (In Russ.)
8. Zolotov OG. [Atka mackerel]. In: Biologicheskije Resursy Tikhogo Okeana. Moscow: Nauka; 1986. P. 310-9. (In Russ.)
9. Kuznetsova EN, Kunin AM. [New data on the biology of the northern double-lined flounder *Lepidopsetta polyxystra* in the Pacific waters of the North Kuril Islands and Southeastern Kamchatka]. Voprosy Ikhtiologii. 2002; 42(3):336-40. (In Russ.)
10. Lapko VV. [Trophic relationships in the Epipelagic Ichthyocene of the Sea of Okhotsk]. Izvestiya TINRO. 1994;116:168-77. (In Russ.)
11. Maksimenkov VV, Tokranov AM. [Belligerent sculpin feeding in the Bolshaya River Estuary (Western Kamchatka)]. Biologiya Moria. 1992;(1-2):34-42. (In Russ.)
12. Moiseyev PA. [The cod and flounder of the Far Eastern Seas]. Izvestiya TINRO. 1953;40:288. (In Russ.)
13. Nikulin PG. [The Steller sea lion in the Sea of Okhotsk and its harvest]. Izvestiya TINRO. 1937;10:35-48. (In Russ.)
14. Panina GK. [Feeding of Steller sea lions and seals in the Kuril Islands]. Izvestiya TINRO. 1966;58:235-6. (In Russ.)
15. Perlov AS. [Feeding of Steller sea lions in the Kuril Islands area]. Ekologiya. 1975;4:106-8. (In Russ.)
16. Savin AB. [Spawning grounds of pacific cod *Gadus macrocephalus* in the North-West Pacific]. Izvestiya TINRO. 2016;187:48-71. (In Russ.)
17. Tikhomirov EA. [Distribution and harvesting of Steller sea lions in the Bering Sea and adjacent areas of the Pacific Ocean]. Izvestiya TINRO. 1964;52:287-91. (In Russ.)
18. Tokranov AM. [Distribution of Yellow Irish lord and Gilbert's Irish Lord *Hemilepidotus jordani* Bean and *Hemilepidotus gilberti* Jordan et Starks (Cottidae) off the eastern coast of Kamchatka]. Voprosy Ikhtiologii. 1981;21:823-9. (In Russ.)
19. Tokranov AM, Polutov VI. [Fish distribution in Kronotsky Bay and factors determining it]. Zoologicheskij zhurnal. 1984; 63(9): 1363-73. (In Russ.)
20. Tokranov AM. [Reproduction of common Sculpins fish species of Kamchatka waters]. Biologiya Moria. 1988;4:28-32. (In Russ.)
21. Tokranov AM. [To the knowledge of the marine ichthyofauna of the Kronotsky Reserve]. Voprosy Geografii Kamchatki. 1990;10:173-8. (In Russ.)
22. Tokranov AM, Orlov AM. [Dynamics of catches of common Cottids species (Cottidae) in Pacific waters of the northern Kuril Islands and south-eastern Kamchatka in 1992-2002]. In: Shuntov VP et al., eds. Materialy Vserossiyskoy Nauchnoy

- Konferentsii, Posviashchenoy 80-Letnemu Yubileyu FGUP «KamchatNIRO»; 26-27 Sentyabrya 2012. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchat NIRO; 2012. P. 230-9. (In Russ.)
23. Tokranov AM. [Non-traditional potential objects of coastal fishery in the near Kamchatka waters of Sea of Okhotsk]. In: Zorchenko NK et al., eds. Materialy V Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Aktualnye Problemy Osvoyeniya Biologicheskikh Resursov Mirovogo Okeana»; 22-24 Maya 2018. Chast I. Vladivostok: Dalrybvuz; 2018. P. 9-13. (In Russ.)
 24. Usatov IA, Altukhov AV, Burkanov VN. [Seasonal changes in the abundance of Steller sea lion at Cape Kozlova Rookery (Eastern Kamchatka)]. In: Bugayev VF et al., eds. Materialy XV Nauchnoy Konferentsii «Sokhraneniye Bioraznoobraziya Kamchatki i Prilegayushchikh Morey»; 18-19 Noyabrya 2014. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KF TIG DVO RAN; 2014. P. 372-6. (In Russ.)
 25. Usatov IA, Tokranov AM, Truhanova IS, Burkanov VN. [Steller sea lion diet in the Eastern Kamchatka]. Trudy VNIRO. 2021;185:57-67. (In Russ.)
 26. Usatov IA., Burkanov VN. [Summer diet of Steller sea lion in the Russian Far East, 2004-2008]. Biosfera. 2022;14(1):8-28. (In Russ.)
 27. Fadeyev NS. Promyslovye Ryby Severnoy Chasti Tikhogo Okeana. [Commercial Fishes of the North Pacific Ocean]. Vladivostok: DVNC AN SSSR; 1984. (In Russ.)
 28. Fadeyev NS. Spravochnik po Biologii i Promyslu Ryb Sevvernoy Chasti Tikhogo Okeana. [Reference Book on the Biology and Fisheries of the North Pacific]. Vladivostok: TINRO-Tsentr; 2005. (In Russ.)
 29. Hrapkova NV. [Spawning aggregations of commercial fish in Kronotsky Bay]. Trudy IOAN SSSR. 1959;36:123-42. (In Russ.)
 30. Shuntov VP, Volkov AF, Temnykh OS, Dulepova YeP. Mintay v Ekosistemakh Dalnevostochnykh Morey. [Pollock in the Ecosystems of the Far Eastern Seas]. Vladivostok: TINRO-Tsentr; 1993. (In Russ.)
 31. Shuntov VP, Bocharov LN. Atlas Kolichestvennogo Raspredeleniya Nektona v Severnoy Chasti Tikhogo Okeana. [Atlas of Nekton Species Quantitative Distribution in the North-Western Part of the Pacific Ocean]. Moscow: FGUP Natsionalnye Rybnye Resursy; 2005. (In Russ.)
 32. Shuntov VP, Temnykh OS. Tkhookeanskiye Lososi v Morskikh i Okeanicheskikh Ekosistemakh: Monografiya T.2. [Pacific Salmon in Marine and Ocean Ecosystems: Monograph, Vol. 2]. Vladivostok: TINRO-Centr. 2011. (In Russ.)
 33. Altukhov AV, Andrews RD, Calkins DG, Gelatt TS, Gurarie ED, Loughlin TR, Mamaev EG, Nikulin VS, Permyakov PA, Ryazanov SD, Vertyankin VV, Burkanov VN. Age specific survival rates of Steller sea lions at rookeries with divergent population trends in the Russian Far East. PLOS ONE. 2015; 10(5): e0127292.
 34. Anthony JA, Roby DD, Turco KR. Lipid content and energy density of forage fishes from the northern Gulf of Alaska. J Exper Marine Biol. 2000;248:53-78
 35. Baker AR, Loughlin TR, Burkanov VN, Matson CW, Trujillo RG, Calkins DG, Bickham JW. Variation of mitochondrial control region sequences of Steller sea lions, *Eumetopias jubatus*: The three-stock hypothesis. J Mammal. 86(6):1075-84.
 36. Burkanov VN, Loughlin TR. Distribution and abundance of Steller sea lions on the Asian Coast, 1720's – 2005. Marine Fisheries Rev. 2005;67:1-62.
 37. Burkanov VN, Tretyakov AV, Usatov IA, Mamaev EV, Fomin SV, Ryazanov SD, Kirillova AD., Artemieva SM., Laskina NB. Count of Steller sea lion (*Eumetopias jubatus* Shreber 1776) on terrestrial sites in the Russian Far East, 2015-2018. Abstr XI Internat Conf «Marine Mammals of the Holarctic». March 01-05 2021. P. 129-130.
 38. Calkins, DG. Prey of Steller sea lions in the Bering Sea. Biosphere Conserv. 1998;1(1):33-44.
 39. Davoren GK, Montevecchi WA, Anderson JT. Search strategies of a pursuit-diving marine bird and the persistence of prey patches. Ecol Monographs. 2003; 73:463-81.
 40. DeMaster D, Atkinson S. Steller sea lion decline: Is it food? University of Alaska Sea Grant, Fairbanks. 2002; AK. II. AK-SG-02-02.
 41. Fadely B, Robson BW, Sterling JT, Greig A, Call KA. Immature Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) dive activity in relation to habitat features of the eastern and central Aleutian Islands. Fisheries Oceanogr. 2005; 14:243-58.
 42. Fiscus CH, Baines GA. Food and feeding behavior of Steller and California sea lions. J Mammal. 1966;47(2):195-200.
 43. Harvey J, Antonelis G. Biases associated with non-lethal methods of determining the diet of northern elephant seals. Marine Mammal Sci. 1994;10:178-83.
 44. Loughlin TR, Sterling J, Merrick RL, Sease JL, York AE. Diving behavior of immature Steller sea lions. Fishery Bull. 2003;101:566-82.
 45. Mathisen OA, Baade RT, Loff RJ. Breeding habits, growth and stomach contents of the Steller sea lion in Alaska. J Mammal. 1962; 43(4):469-77.

46. Merrick RL, Chumbley MK, Byrd GV. Diet diversity of Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) and their populations decline in Alaska: a potential relationship. *Can J Fisheries Aquat Sci.* 1997;54:1342-8.
47. Merrick RL, Loughlin TR. Foraging behavior of adult female and young Canadian of-the-year Steller sea lions in Alaskan waters. *Can J Zool.* 1997;75:776-86.
48. Milinski M. Long-term memory for food patches and implications for ideal free distributions in sticklebacks. *Ecology.* 1994;75:1150-6.
49. O'Corry-Crowe G., Taylor BL, Gelatt T, Loughlin TR, Bickham J, Basterretche M, Pitcher KW, DeMaster DP. Demographic independence along ecosystem boundaries in Steller sea lions revealed by mtDNA analysis: implications for management of an endangered species. *Can J Zool.* 2006;84:1796-809.
50. Olivier PA, Andrews R, Burkanov VN, Davis RW. Diving behavior, foraging strategies, and energetics of female Steller sea lions during early lactation. *J Exper Marine Biol Ecol.* 2022;550:151707.
51. Orr AJ, Harvey JT. Quantifying errors associated with using fecal samples to determine the diet of California sea lion (*Zalophus californianus*). *Can J Zool.* 2001;79:1080-7.
52. Pitcher KW Prey of the Steller sea lion, *Eumetopias jubatus*, in the Gulf of Alaska. *Fishery Bull (Wash DC).* 1981;79:467-72.
53. Pitcher KW, Rehberg MJ, Pendleton GW, Raum-Suryan KL, Gelatt TS, Swain UG, Sigler MF. Ontogeny of dive performance in pup and juvenile Steller sea lions in Alaska. *Can J Zool.* 2005;83:1214-31.
54. Pitcher KW. Prey of the Steller sea lion, *Eumetopias jubatus*, in the Gulf of Alaska. *Fishery Bull.* 1981;79:467-72.
55. Rehberg MJ, Andrews RD, Swain UG, Calkins DG. Foraging behavior of adult female Steller sea lions during the breeding season in Southeast Alaska. *Marine Mammal Sci.* 2009;25:588-604.
56. Richmond JP, Burns JM, Rea LD. Ontogeny of total body oxygen stores and aerobic dive potential in Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*). *J Compar Physiol Biochem.* 2006;176:535-45.
57. Roper CFE., Young RE. Vertical distribution of pelagic cephalopods. *Smithson. Contrib Zool.* 1975;209:51.
58. Sinclair EH, Balanov AA, Kubodera T, Radchenko VI, Fedorets YA. Distribution and ecology of mesopelagic fishes and cephalopods. Dynamics of the Bering Sea. Alaska Sea Grant College Program Report no. AK-SG-99-03. Loughlin T.R., Kiyotaka O. (editors) University of Alaska, Fairbanks. 1999; p. 485-508.
59. Sinclair EH, Zeppelin TK. Seasonal and spatial differences in diet in the western stock of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*). *J Mammal.* 2002; 83(4):973-90.
60. Thorsteinson FV, Lensink CJ. Biological observations of Steller sea lions taken during an experimental harvest. *J Wildlife Manag.* 1962;26:353-9.
61. Tollit DJ, Heaslip SG, Barrick RL, Trites AW. Impact of diet-index selection and the digestion of prey hard remains on determining the diet of the Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*). *Can J Zool.* 2007; 85:1-15.
62. Trites AW, Miller AJ, Maschner HDG, Alexander MA, Bograd SJ, Calder JA, Capotondi A, Coyle KO, Lorenzo ED, Finney BP, Gregr EJ, Grosch CE, Royer TC. Bottom-up forcing and the decline of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) in Alaska: assessing the ocean climate hypothesis. *Fish Oceanograph.* 2007;16:46-67.
63. Trites AW, Porter B, Deecke VB, Coombs AP, Marcotte ML, Rosen DAS. Insights into the timing of weaning and the attendance patterns of lactating Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) in Alaska during winter, spring, and summer. *Aquat Mammals.* 2006; 32:85-97.
64. Vollenweider JJ. Variability in Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) prey quality in southeastern Alaska. MS thesis, University of Alaska, Fairbanks, AK. 2005; 87 pp.
65. Waite JN, Burkanov VN. Steller sea lion feeding habits in the Russian Far East, 2000–2003. Sea lions of the world. A.W. Trites, S.K. Atkinson, D.P. DeMaster, L.W. Fritz, T.S. Gelatt, L.D. Rea, and K.M. Wynne (edit.). Anchorage, Alaska Sea Grant College Program. 2006; pp 223–234.
66. Waite JN, Trumble SJ, Burkanov VN, Andrews RD. Resource partitioning by sympatric Steller sea lions and northern fur seals as revealed by biochemical dietary analyses and satellite telemetry. *J Exper Marine Biol Ecol.* 2012;(416-417):41-54.
67. Winship AJ, Trites AW, Rosen DAS. A bioenergetic model for estimating the food requirements of Steller sea lions *Eumetopias jubatus* in Alaska, USA. *Marine Ecol Progr Ser.* 2002;229:291-312.
68. Winship AJ, Trites AW. Prey consumption of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) off Alaska: How much prey do they require? *Fishery Bull (Washington DC).* 2003;101:147-67.
69. Womble JN, Sigler MF, Willson MF. Linking seasonal distribution patterns with prey availability in a central-place forager, the Steller sea lion. *J Biogeograph.* 2009;36:439-51.
70. Womble JN, Willson MF, Sigler MF, Kelly BP, Van Blaricom GR. Distribution of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) in relation to spring-spawning fish in SE Alaska. *Marine Ecol Progr Ser.* 2005; 294:271-84.

ОТНОШЕНИЕ ПОДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ К НАДЗЕМНОЙ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ В ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ

В.А. Усольцев^{1, 2*}, И.С. Цепордей¹

¹Ботанический сад Уральского отделения РАН

и ²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

Эл. почта: * Usoltsev50@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.07.2022; принята к печати 29.09.2022

Вследствие наблюдаемых климатических сдвигов актуализируется проблема корректных оценок углерод-депонирующей способности лесов и ее возможной динамики. В экологии растений наименее изучены их корневые системы. Целью настоящего исследования было (а) по материалам 1782 пробных площадей установить, проявляется ли действие закона лимитирующего фактора при моделировании отношения подземной биомассы древостоев к надземной (Pr/Pa) пяти лесообразующих видов (родов) на территории Евразии в связи с территориально обусловленными изменениями температур и осадков; (б) показать, в какой степени построенные климатически обусловленные модели Pr/Pa , чувствительные к температуре и осадкам в территориальных градиентах, могут использоваться для прогнозирования изменений Pr/Pa в темпоральных градиентах на основе принципа пространственно-временного замещения и (в) получить средние значения Pr/Pa для лесообразующих видов (родов) Евразии и выполнить их ранжирование. Установлено, что в холодных регионах при повышении уровня осадков Pr/Pa увеличивается, но по мере перехода к теплым регионам происходит замена одного лимитирующего фактора (недостаток тепла) другим (избыток тепла), и закономерность характеризуется противоположным трендом. При повышении температуры во влажных регионах Pr/Pa снижается, но по мере перехода в сухие условия происходит замена одного лимитирующего фактора (избыточное увлажнение) другим (недостаточное увлажнение), и Pr/Pa начинает возрастать. Сопоставление полученных закономерностей с закономерностями, ранее опубликованными для надземной биомассы, показало, что они прямо противоположны, то есть факторы, лимитирующие величину надземной биомассы, стимулируют величину Pr/Pa и наоборот. Предложены расчетные значения Pr/Pa по 24 видам растений Евразии, варьирующие от 0,11 у диптерокарпа в Малайзии до 0,37 у ясеня в Европе.

Ключевые слова: отношение подземной биомассы к надземной, принцип лимитирующего фактора, принцип пространственно-временного замещения, градиенты осадков и зимних температур Евразии.

ROOT TO SHOOT BIOMASS RATIOS OF FOREST-FORMING SPECIES ALONG TEMPERATURE AND PRECIPITATION GRADIENTS IN EURASIA

V.A. Usoltsev^{1, 2}, I.S. Tsepordey¹

¹Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
and ²Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

E-mail: Usoltsev50@mail.ru; ivan.tsepordey@yandex.ru

Due to the observed climatic shifts, the problem of correct estimates of the carbon sequestration capacity of forests and its possible temporal dynamics is being actualized. In plant ecology, tree root systems are the least studied. The purpose of this study was (a) to investigate, based on measurements carried out at 1782 sample plots, whether the effect of the law of the limiting factor is manifested when modeling the ratio of the belowground to the aboveground live biomass, i.e. the root-to-shoot ratio (R:S) of five forest-forming species in Eurasia as it relates to the geographically determined gradients of temperature and precipitation; (b) to show to what extent the climate-dependent models of R:S dependence on temperature and precipitation may be used to predict changes in R:S in temporal gradients based on the principle of space-for-time substitution and (c) to obtain the mean R:S values for forest-forming tree species (genera) of Eurasia and perform their ranking. It has been established that, in cold regions, R:S increases with increasing precipitation, whereas upon transition to warm regions, one limiting factor (heat deficit) is replaced by another one (heat excess), and R:S dependence on precipitation changes to the opposite trend. In humid regions, R:S decreases with increasing temperature, whereas upon transition to dry conditions, one limiting factor (moisture excess) is replaced by another one (moisture deficit), and R:S begins to increase. The comparison of the above patterns with previously published ones, which relate to the aboveground biomass, suggest that they are directly opposite, i.e., the factors that limit the amount of the aboveground biomass are stimulatory for the R:S ratio, and vice versa. Our estimates of the typical R:S values for 24 Eurasian tree species range from 0.11 for dipterocarpus in Malaysia to 0.37 for ash in Europe.

Keywords: root:shoot biomass ratio, the principle of the limiting factor, the principle of space-for-time substitution, gradients of precipitation and winter temperatures in Eurasia.

Введение

В условиях непрерывно возрастающей биосферной роли лесов требуются адекватные оценки их биомассы, однако наши знания по этой теме на глобальном уровне остаются пока рудиментарными [88]. Причины множественных неопределенностей при оценке биомассы лесных экосистем имеют объективный характер вследствие сложности причинно-следственных связей, лежащих в основе их функционирования. Ситуация усугубляется в силу действия так называемого принципа несовместимости: чем глубже анализируется реальная сложная система, тем неопределеннее наше понимание ее поведения [13, 33]. Поэтому подвергать сомнению укоренившееся в науке отождествление понимания явления с возможностью его количественного описания часто «означает взять диссонирующую ноту» [13. С. 7]. Если такого понимания нет, то возникают ситуации, когда «моделирование обгоняет эксперимент» [14. С. 48].

Вследствие наблюдаемых климатических сдвигов актуализируется проблема точных оценок углероддепонирующей способности лесов и ее возможной темпоральной динамики. В экологии растений наименее изучены их корневые системы [154]. Необходимо отметить важную роль корневых систем в депонировании атмосферного углерода и смягчении последствий потепления климата. Если в отношении надземной биомассы установлен общий тренд ее увеличения вследствие фенологических сдвигов, то в отношении корневых систем попытки выявления аналогичных фенологически обусловленных закономерностей пока не увенчались успехом [101, 103]. Наблюдается диспропорция в степени изученности количественных характеристик листвы и корней древесных растений, хотя корни в не меньшей степени, чем листва, определяют продукционный потенциал растения [108]. Имеются существенные неопределенности при решении названной проблемы, особенно в той ее части, которая касается функциональной экологии подземной части растений (below-ground functional ecology). Хотя экология корневых систем имеет давнюю историю, пробелы в понимании связей между их структурой и функциями препятствуют их адекватной количественной оценке [79]. Названные неопределенности проявляются уже на начальном уровне исследований, при определении фактической структуры биомассы корневых систем и особенно – ее годичной продукции (включая биомассу тонких корней с учетом их годичного массооборота) [43, 128], и связаны они с отсутствием единой, достаточно корректной методики их определения. Например, чтобы измерять массу тонких корней, необходимо знать, что такое тонкие корни. Но чтобы знать, что такое тонкие корни, необходимо иметь классификацию корней, которая невозможна без их измерений [46].

Для решения экологических проблем биосферного уровня формируются глобальные базы данных о биомассе и первичной продукции лесных экосистем, в том числе о биомассе корней [68, 85, 102, 123, 137] и их первичной продукции [82]. Известно, что наибольшая доля (около 77%) объясненной изменчивости биомассы корней приходится на морфоструктуру деревьев, то есть на их таксационные показатели [50]. Разрабатываются соответствующие аллометрические модели для оценки биомассы корней [19, 38, 94, 97, 106, 113], при региональном применении которых выявляются существенные смещения, объясняемые географическими (климатическими) особенностями регионов [44, 145, 150]. Формирование и публикация глобальных баз данных о биомассе корней создает предпосылки для вычленения климатической составляющей при объяснении ее изменчивости на глобальном уровне путем введения в модель как таксационных, так и климатических показателей в качестве независимых переменных.

На основе концепции постоянства (возможно, генетически закрепленного в оптимальных условиях роста) корне-лиственных функциональных связей [17, 24] устанавливались видоспецифичные значения отношения подземной биомассы к надземной (Pr/Pa) (в зарубежной литературе это root:shoot ratio, или R:S ratio) для мягколиственных древесных видов Канады (0,222) [107], для произрастающих в Канаде березы повислой и сосны обыкновенной (соответственно 0,32 и 0,17) [64], для лесного покрова Северной Евразии (0,43) [10], для диптерокарповых древостоев Малайзии (0,18) [113], для лесного покрова на мировом уровне (0,25) [89], а указаниями Межправительственной группы экспертов по изменению климата [90] рекомендовано общее для всех древесных видов значение Pr/Pa , равное 0,235. Однако в результате многочисленных исследований была установлена высокая изменчивость Pr/Pa : от 0,23 до 0,54 в сосновых молодняках Центральной Европы [114], от 0,22 до 0,41 для 13 видов Великобритании [98], от 0,05 до 2,47 для глобального лесного покрова [89], от 0,72 до 0,88 для дуба персидского в Иране [55], от 0,12 до 0,58 у сосны замечательной (*Pinus radiata*) в Новой Зеландии [59], от 0,19 у сосны обыкновенной до 0,31 у лиственницы сибирской на Урале [52], от 0,36 до 0,58 у эвкалипта в Австралии [155] и от 0,09 до 0,67 для хвойных и лиственных видов северо-востока Китая [147].

Знание величины Pr/Pa древостоя важно и в прикладном отношении. Известно, что вследствие высокой трудоемкости биомасса корней определяется очень редко по сравнению с надземной биомассой: например, из 235 определений биомассы сосновых древостоев лишь в 9 были данные о биомассе корней [83]. В таких случаях массу корней можно оценить по величине Pr/Pa .

По мере развертывания исследований по оценке биомассы корней в различных лесорастительных условиях были выявлены закономерности увеличения Pr/Pa :

- по мере возрастания дефицита тепла в широтном и высотном градиентах [4, 27, 102, 124, 130, 146];
- по мере возрастания дефицита почвенной влаги [4, 20, 57, 64, 65, 67, 70, 75, 93, 96, 110, 111, 112, 129, 152, 153, 155];
- по мере роста дефицита почвенной аэрации, например, с переходом от черничного к сфагновому типу леса [1];
- с ростом дефицита элементов питания [4, 15, 30, 67, 133, 141-143, 148];
- обратно пропорционально возрасту древостоя [3, 12, 16, 18, 20, 38, 64, 81].

На основе базы данных о биомассе лесобразующих видов Евразии [41] были установлены статистически значимые закономерности изменения Pr/Pa по зональным поясам и индексу континентальности [42]. Названные закономерности оказались прямо противоположными для хвойных и листопадных видов в трансконтинентальных градиентах зональности и континентальности: у хвойных Pr/Pa снижается по мере приближения к полюсу континентальности и в направлении от субарктического к субэкваториальному зональному поясу, а у лиственных, напротив, возрастает. Причины такого противоречия не были объяснены.

При прогнозировании темпоральных изменений в биоте под влиянием климатических сдвигов применяется метод пространственно-временного замещения [35, 78]. Он основан на использовании современных закономерностей, наблюдаемых в пространственных градиентах, для последующего выявления аналогичных закономерностей в градиентах времени, которые на данный момент не поддаются наблюдению [61]. J.L. Blois и соавт. [61] пишут: «В широком смысле замена пространства на время охватывает анализ, в котором современные пространственные явления используются для понимания и моделирования временных процессов, которые в противном случае не наблюдаемы, в первую очередь прошлых и будущих событий. Во многих областях были разработаны и обсуждены методы, основанные на пространственно-временном замещении, такие как экологические хронологические последовательности для изучения долгосрочного круговорота питательных веществ и сукцессий растений, а также передаточные функции для определения прошлых изменений окружающей среды на основе геологических прокси» (С. 9374).

Обычно при анализе продуктивности дерева или древостоя оценивается влияние одного фактора: или температуры, или осадков [21, 53, 71, 78, 100, 102, 105, 117, 122]. Оценивание Pr/Pa по единственному климатическому фактору приводит к противоречивым ре-

зультатам: одни авторы утверждают, что основным фактором, влияющим на Pr/Pa фитомассы, являются осадки [105], а другие приходят к противоположному выводу, что Pr/Pa определяется только температурой и не связано с засушливостью климата [117].

Наличие евразийской базы данных позволило оценить, как влияют на биомассу деревьев (древостоев) температура и осадки одновременно [47-49, 51, 137, 138]. Путем моделирования надземной биомассы деревьев и древостоев лесобразующих видов (родов) Евразии в трансконтинентальных пространственных градиентах температур и осадков было установлено действие закона лимитирующего фактора Либиха [99]. Согласно закону минимума Либиха, темпы роста организма зависят от фактора, который является минимальным по отношению к его потребностям. Позже этот принцип был интерпретирован как «закон толерантности Шелфорда» или «расширенная концепция лимитирующих факторов» [26, 28, 73, 127, 132, 135]. А.А. Молчанов [26] писал: «При изучении любых специфических биогеоценозов или их частей расширенная концепция лимитирующих факторов зависит от комплекса условий, а именно: любое состояние, приближающееся или превышающее границу стойкости для любого организма и групп, нас интересующих, может считаться лимитирующим фактором» (с. 271). Сегодня это явление получило широкое признание как принцип лимитирующих факторов Либиха-Шелфорда, когда продукция растений ограничивается фактором, который находится в минимуме или избытке по отношению к его потребностям [34].

В результате реализации принципа пространственно-временного замещения полученные модели изменения биомассы в транс-евразийских территориальных градиентах температур и осадков использованы для прогнозирования надземной биомассы в их темпоральных градиентах, где также подтвердилось действие принципа лимитирующего фактора [47-49, 51, 138, 139].

Благодаря оценке биомассы деревьев (древостоев) под влиянием одновременно двух факторов – температур и осадков – была установлена общая закономерность, обусловленная действием двух лимитирующих факторов с их взаимной заменой в территориальных градиентах: в достаточно богатых влагой климатических зонах повышение температуры при постоянном количестве осадков вызывает увеличение надземной биомассы, а в зонах с дефицитом влаги – ее уменьшение; в теплых климатических зонах уменьшение осадков при постоянной средней температуре января вызывает уменьшение надземной биомассы, а в холодных климатических зонах – ее увеличение. Это означает, что в теплых регионах биомасса лимитируется недостатком влаги, а по мере перехода в холодные регионы происходит смена лимитирующего фак-

тора, и биомасса лимитируется избытком осадков; во влагообеспеченных регионах биомасса лимитируется недостатком тепла, а по мере перехода во влагодефицитные регионы происходит смена лимитирующего фактора, и биомасса ограничивается избытком тепла [48, 49, 51, 138, 139].

Исходя из предположения, что влияние температур и осадков оказывает воздействие не только на наземную биомассу, но и на биомассу корней, мы впервые попытались оценить величину Pr/Pa лесообразующих видов (родов) в транс-евразийских градиентах температур и осадков.

Целью настоящего исследования было:

- установить, проявляется ли действие закона лимитирующего фактора при моделировании изменений Pr/Pa биомассы древостоев лесообразующих видов на территории Евразии в связи с территориально обусловленными изменениями температур и осадков;

- показать, в какой степени построенные климатически обусловленные модели Pr/Pa , чувствительные к температуре и осадкам в территориальных градиентах, могут использоваться для прогнозирования изменений Pr/Pa в темпоральных градиентах на основе принципа пространственно-временного замещения;

- рассчитать средние значения Pr/Pa для лесообразующих видов (родов) Евразии и выполнить их ранжирование.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач использовали авторскую базу данных о биомассе лесообразующих видов Евразии [137]. Каждую пробную площадь, на которой проводилась оценка биомассы древостоев, по известным координатам наносили на карты-схемы территориально распределенных климатических показателей: средней январской температуры и среднегодовых осадков [151]. Полученные карты-схемы с нанесенным на них положением пробных площадей были показаны ранее [49] и здесь не приводятся.

В качестве исходной схемы распределения температур (изотерм) на территории Евразии мы выбрали карту средних январских температур, поскольку наиболее выраженные изменения в биоте связаны с зимней, а не с летней и не со среднегодовой температурой [109], и именно зимние температуры более чувствительны к текущим изменениям климата [11, 91, 95]. Соответственно, прогнозы будущего климата указывают на дальнейшее повышение температуры, в первую очередь, в холодное время года [84]. В субарктических и субантарктических регионах потепление происходит быстрее, чем на территории низких широт, вследствие изменений альбедо, вызванных сокращением площадей снежного покрова и морских льдов, а также экологическими сдвигами [63, 115, 116, 120, 127]. Выбор зимней температуры имеет также био-

экологическую предпосылку. Известно, что каждый экологический фактор имеет диапазон оптимального воздействия, в котором он наиболее эффективен и за пределами которого его эффект снижается или даже оказывает подавляющее воздействие [22, 66, 69, 136]. В нашем случае наиболее эффективное влияние на биомассу лесов оказывает зимняя температура, в частности, средняя температура января.

Экологи, занимающиеся извлечением климатического сигнала из хронологий древесных колец, могут спросить, как влияет на биомассу дерева температура января, когда дерево находится в зимней «спячке», и почему не принята температура июня или июля, характерная для периода активного роста? В контексте нашего исследования на подобные вопросы не существует ответа, поскольку они свидетельствуют о подмене понятия, в данном случае – понятия температуры. Мы наносим на упомянутую карту территориально распределенных зимних температур положение пробных площадей с территориально распределенными данными о биомассе древостоев с целью их сопряженного анализа. Нынешнее территориальное (географическое) распределение температур и осадков формировалось в течение тысячелетий, и одновременно в соответствии с ним формировалось территориальное биоразнообразие растительного покрова [104], в том числе разделение того или иного рода на виды [37], и это биоразнообразие определяет структурно-функциональную специфику биомассы растений. Вследствие сферической формы Земли поступающая солнечная радиация уменьшается в направлении от экватора к полюсам. Соответственно, температура любого месяца снижается в том же направлении зимой или летом, или в среднем за год. Поскольку среднеянварские и среднегодовые температуры в какой-то степени коррелированы, названное сопряжение биомассы древостоев может быть выполнено как со среднегодовой, так и со среднеянварской температурой. Нами была выбрана последняя по приведенным выше соображениям.

В соответствии с упомянутым выше принципом лимитирующего фактора, на полярной границе распространения березы в Сибири ограничивающим фактором радиального прироста является температура, но по мере продвижения на юг дефицит тепла снижается, а роль дефицита влаги возрастает, и в подзоне средней тайги происходит смена лимитирующего фактора [53]. Аналогичным образом, в северных регионах Урала радиальный прирост сосны обыкновенной лимитируется температурой июня-июля, а в степной зоне Южного Урала прирост определяется количеством осадков и температурой за весь вегетационный период [21]. Впрочем, есть мнение, альтернативное принципу единственного лимитирующего фактора. Проводя аналогию с распределением ресурсов в эко-

номике, A. Bloom et al. [62] полагают, что растения распределяют имеющиеся для роста ресурсы таким образом, чтобы лимитирующий эффект был примерно одинаковым со стороны всех ресурсов, а не единственного из них.

В двух упомянутых случаях имеются в виду не климатические показатели в виде территориально распределенных температур и осадков, как в нашем исследовании, а метеорологические данные температур и осадков конкретных месяцев. Соответственно, в заявленном нами анализе лимитирующих биомассу факторов фигурируют не метеоданные январской температуры и не среднегодовые метеоданные осадков, а многолетние территориально распределенные температуры и осадки, воздействие которых на биомассу экстраполируется на предполагаемые температурные градиенты температур и осадков посредством пространственно-временного замещения.

Эмпирический материал упомянутых баз данных о биомассе корней был получен представителями разных областей лесных наук с различными целевыми установками, разнообразием применяемых методик, игнорированием связей с эндо- и экзогенными факторами и неравномерной представленностью результатов по регионам, что существенно понижает качественный уровень баз эмпирических данных [4, 23]. Например, доля тонких корней в их массе у дуба варьирует от 1,4 [6] до 39% [7]. В 40-летних древостоях сосны обыкновенной в условиях Ярославской области РФ, Финляндии и в степях Тургайского прогиба доля тонких корней составляет соответственно 15 [54], 32 [87] и 80% [39, 40]. В реальных условиях при определении биомассы корней их тонкая фракция исследователями или игнорируется вследствие трудоемкости ее оценки [31, 72, 80, 92, 97, 119, 149], или учитывается частично [2, 118, 123]. Корни могли также оцениваться путем их раскопки и отмывки у отдельного дерева на глубину их проникновения [19, 39] или оцениваться на единице площади древостоя путем отмывки корней, извлеченных из почвенных блоков, но без учета комля (пня), масса которого достигает 50–55% общей массы корней [5, 8, 9, 29, 32, 36, 86].

В итоге имеем сводку фактических значений общей массы корней, заниженных на неопределенную величину. При самом тщательном извлечении корней без их отмывки в грунте остаются неучтенными от 23 [113] до 35% [80, 97] и даже до 80% [39] общей биомассы корней. С другой стороны, в случае определения биомассы корней в сложных древостоях с развитыми нижними ярусами общая биомасса корней древесного вида может быть завышена за счет массы корней нижних ярусов вследствие трудности или невозможности разделения тонких корней разных ярусов в верхнем, наиболее насыщенном корнями почвенном слое [134]. Названные завышения и занижения формируют методически

обусловленную дисперсию массы корней, которая не может быть объяснена никакими независимыми переменными, вводимыми в уравнение биомассы корней.

Опасность подобных неопределенностей в исходных базах данных очевидна. Рассчитав модель биомассы, которая включает таксационные показатели дерева или древостоя в качестве независимых переменных, мы получаем остаточную дисперсию, которая объясняется как климатическими переменными, так и методически обусловленными и тривиальными расчетными ошибками или иными неопределенностями. Эти ошибки и неопределенности могут исказить вклад климатических переменных в объяснение изменчивости биомассы с точностью «до наоборот». Имеется в виду ситуация, когда преобладающая доля объясненной остаточной дисперсии приходится не на климатические переменные, а на упомянутые неопределенности и ошибки.

В связи с изложенным, эффективность результатов анализа и синтеза существующих баз данных о биомассе корней деревьев и древостоев с целью выявления климатически обусловленных закономерностей может быть существенно ограничена качественным уровнем исходного материала. Возможно поэтому сделанная ранее попытка выявить какие-либо закономерности в изменении Pr/Pa биомассы под влиянием комплекса абиотических и биотических факторов на глобальном уровне не увенчалась успехом [68]. Тем не менее, нами такая попытка предпринята.

На предварительном этапе исследований из нашей базы данных [137] были выбраны 2312 пробных площадей восьми лесообразующих родов в пределах их ареалов. Предполагалось, что Pr/Pa биомассы каждого древесного рода в связи с температурой и осадками будет соответствовать вышеупомянутому многократно установленным закономерностям, а именно, повышению как по мере снижения температур вследствие продвижения в северном направлении, так и по мере ухудшения эдафических условий вследствие сокращения годовых осадков. В результате предварительного регрессионного анализа оказалось, что из 8 родов только 5 показали соответствие предполагаемым закономерностям. Для остальных 3 родов влияние температур и осадков на Pr/Pa оказалось не соответствующим уже известным закономерностям. Причина может быть, скорее всего, одна: остаточная дисперсия Pr/Pa , обусловленная методическими и расчетными ошибками, которая не подлежит какому-либо статистическому объяснению, в данных трех случаях превалирует над дисперсией, обусловленной климатическими сигналами. К сожалению, другой, более совершенной базы данных сегодня мы не имеем.

Характеристика исходных данных Pr/Pa биомассы 5 родов, принятых для дальнейшего анализа, дана в табл. 1.

Характеристика 1782 исходных данных о *Pr/Pa* лесобразующих родов Евразии

Обозначение статистик ^(а)	Анализируемые показатели ^(б)						
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Pr/Pa</i>	<i>T</i>	<i>PR</i>
Двухвойные сосны (подрод <i>Pinus</i> L.)							
Mean	59	–	3,2	194,2	0,21	–9	662
Min	6	–	0,11	4,9	0,07	–	–
Max	236	–	83,0	655,0	0,61	–	–
<i>SD</i>	40,0	–	7,3	127,8	0,07	–	–
<i>CV</i> , %	67,6	–	231,3	65,8	33,1	–	–
<i>n</i>	1017	–	1017	1016	1017	–	–
Пихта (<i>Abies</i> Mill.)							
Mean	51	–	11,9	274,3	0,22	1	1133
Min	4	–	0,22	12,2	0,04	–	–
Max	283	–	1000,0	1294,0	0,50	–	–
<i>SD</i>	47,8	–	91,6	207,1	0,06	–	–
<i>CV</i> , %	94,1	–	772,3	75,5	25,3	–	–
<i>n</i>	166	–	165	160	166	–	–
Пятихвойные сосны (<i>P. sibirica</i> Du Tour и <i>P. koraiensis</i> S. & Z. – подрод <i>Haploxydon</i> , или <i>Strobus</i>)							
Mean	118	22,7	1,7	249,4	0,24	–19	550
Min	7	1,3	0,12	0,17	0,17	–	–
Max	380	58,0	36,2	820,0	0,67	–	–
<i>SD</i>	80,9	13,4	4,3	211,4	0,10	–	–
<i>CV</i> , %	68,7	58,9	250,2	84,8	43,7	–	–
<i>n</i>	152	153	153	153	57	–	–
Береза (<i>Betula</i> L.)							
Mean	46	–	2,5	170,1	0,30	–10	549
Min	6	–	0,16	0,34	0,14	–	–
Max	120	–	29,5	484,0	1,40	–	–
<i>SD</i>	19,6	–	3,5	96,4	0,11	–	–
<i>CV</i> , %	42,2	–	142,3	56,7	37,9	–	–
<i>n</i>	271	–	263	271	271	–	–
Осина (<i>Populus</i> L.)							
Mean	48	–	2,0	168,9	0,33	–11	635
Min	10	–	0,10	3,2	0,13	–	–
Max	222	–	32,2	600,0	0,50	–	–
<i>SD</i>	24,0	–	3,8	113,8	0,08	–	–
<i>CV</i> , %	49,8	–	185,7	67,4	25,8	–	–
<i>n</i>	185	–	184	185	185	–	–

^(а) Mean, Min и Max соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений.

^(б) *A* – возраст древостоя, лет; *D* – средний диаметр ствола на высоте груди, см; *N* – густота древостоя, тыс. экз./га; *M* – запас, м³/га; *Pr/Pa* – отношение биомассы корней к надземной; *T* – средняя температура января, °C; *PR* – среднегодовые осадки, мм.

Результаты и их обсуждение

Данные о показателях Pr/Pa биомассы, характеристики которых приведены в табл. 1, обработаны методом множественного регрессионного анализа. Выше были приведены многочисленные публикации, свидетельствующие об изменении Pr/Pa обратно пропорционально возрасту древостоев. Поэтому на первом этапе анализа была проверена структура модели для Pr/Pa , включающей в качестве независимых переменных возраст древостоя в качестве массообразующего фактора, а также температуру воздуха и осадки в качестве климатических переменных. Оказалось, что для пятихвойных (кедровых) сосен возраст древостоя статистически не значим на уровне $p < 0,05$, а для остальных уровень объясненной изменчивости Pr/Pa недостаточно высок: для березы, двухвойной сосны, осины и пихты он составил соответственно 3, 11, 16 и 28%. Очевидно, что изменчивость Pr/Pa , определяемая многообразием структурных форм древостоев, не исчерпывается одним лишь возрастом, и необходимо учитывать остальные массообразующие (таксационные) показатели древостоев. При построении моделей надземной и подземной биомассы, чувствительных к изменению климатических переменных Евразии, для древостоев рода *Quercus* L. была установлена статистическая значимость не только возраста и климатических переменных, но также запаса древесины и густоты древостоя [45].

С учетом изложенного нами выполнен анализ показателей Pr/Pa (табл. 1) согласно структуре модели:

$$\begin{aligned} \ln(Pr/Pa) = & a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln D) + a_3(\ln M) + \\ & a_4(\ln N) + a_5(\ln A)(\ln N) + a_6(\ln A)(\ln M) + \\ & a_7[\ln(T + 50)] + a_8[\ln(T + 50)]^2 + a_9(\ln PR) + \\ & a_{10}\{[\ln(T + 50)](\ln PR)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

После введения поправок на логарифмическое преобразование [58] получены модели, характеристика которых дана в табл. 2. В процессе работы с моделями переменные со значимостью $p < 0,05$ исключались из анализа.

Для наглядности полученных закономерностей изменения показателей Pr/Pa по климатическим переменным, модели (1) нами представлены в графической 3D-интерпретации. Для этого в модели (1) подставлены средние значения таксационных показателей по каждому древесному роду (подроду) и построены зависимости Pr/Pa от январской температуры и годовых осадков (рис. 1).

Как можно видеть на рис. 1, зависимость Pr/Pa биомассы всех древесных видов (родов) от температур и осадков описывается 3D-поверхностью пропеллерообразной формы. В холодных регионах при повышении осадков Pr/Pa увеличивается, но по мере перехода к теплым регионам характеризуется противополож-

ным трендом. При повышении температуры во влажных регионах Pr/Pa снижается, но по мере перехода в сухие условия начинает возрастать.

Сегодня широко обсуждается экологическая видоспецифичность древесных растений, возможные структурно-функциональные изменения, снижение устойчивости, повышение экологической уязвимости и особенности формирования подземной и надземной биомассы для отдельных видов (родов) древесных растений в условиях изменения климата [56, 60, 76, 126, 144]. Установлено, что разные виды даже в пределах одного рода могут обладать противоречивыми адаптивными способностями. Например, из двух североамериканских видов рода *Picea* spp. один из них, *Picea glauca* (Moench) Voss., демонстрирует наибольшую адаптивную способность, в то время как *Picea rubens* Sarg. обладает самыми низкими ее показателями [121]. Согласно полученному результату (рис. 1), при очевидной общей межродовой согласованности трендов Pr/Pa в климатических градиентах значения Pr/Pa для каждого рода специфичны, по-видимому, в связи с различной нормой реакции каждого рода на внешние условия: например, для кедровых сосен, двухвойных сосен, пихт, берез и осин при годовых осадках 600 мм и январской температуре -10 °C значения Pr/Pa составили соответственно (рис. 1) 17, 24, 26, 27 и 32%.

Одна из целей нашего исследования состояла в том, чтобы показать, в какой степени построенные климатически обусловленные модели Pr/Pa , чувствительные к температуре и осадкам в территориальных градиентах, могут использоваться для прогнозирования изменений Pr/Pa в темпоральных градиентах на основе принципа пространственно-временного замещения. Однако успех применения теории пространственно-временного замещения в экологии растений зависит от того, насколько экологические условия, определяющие свойства растений в территориальных градиентах, соответствуют будущим экологическим условиям, определяющим свойства растений во временном градиенте, а степень соответствия нынешних и будущих условий остается пока непроверенной [140].

Чтобы получить представление о том, как будет реагировать показатель Pr/Pa на предполагаемые будущие изменения температур и осадков, мы взяли своеобразные первые производные от двухфакторных поверхностей, представленных на рис. 1, в табличной их реализации путем взятия соответствующих приращений по оси температур с шагом 1 °C и по оси годовых осадков с шагом 20 мм. В итоге получили закономерности увеличения (красная область) и снижения (голубая область) величины Pr/Pa в % при предполагаемом увеличении зимней температуры на 1 °C (рис. 2), а также закономерности увеличения и снижения Pr/Pa при предполагаемом снижении годовых осадков на 20 мм (рис. 3).

Табл. 2

Характеристика моделей (1)

Зависимая переменная	a_0	$\ln A$	$\ln D$	$\ln M$	$(\ln A) + (\ln M)$	$\ln N$	$(\ln A) + (\ln N)$	$\ln(T + 50)$	$[\ln(T + 50)]^2$	$\ln PR$	$[\ln(T + 50)] \times (\ln PR)$	$adjR^2$	SE
Двухвойный подрод <i>Pinus</i> L.													
$\ln(Pr/Pa)$	-24,008	0,0736	–	-0,1270		-0,2183	0,0687	6,2471	–	3,6896	-1,0072	0,195	0,28
<i>Abies</i> Mill.													
$\ln(Pr/Pa)$	-22,110	–	–	-0,0679	–	–	0,0077	5,4158	–	3,1701	-0,8139	0,355	0,14
Пятихвойные сосны <i>Pinus sibirica</i> и <i>P. koraiensis</i> (подрод <i>Haploxylon</i> , или <i>Strobus</i>)													
$\ln(Pr/Pa)$	-197,10	–	0,3693	-0,1288	–	0,1172	–	55,683	–	31,643	-9,0232	0,694	0,16
<i>Betula</i> L.													
$\ln(Pr/Pa)$	-7,8005	–	–	-0,3221	–	-0,0462	–	–	0,6119	2,4869	-0,6798	0,333	0,27
<i>Populus</i> L.													
$\ln(Pr/Pa)$	-9,5184	0,3937	–	0,1974	-0,0856	–	–	–	0,4429	2,1321	-0,5132	0,297	0,24

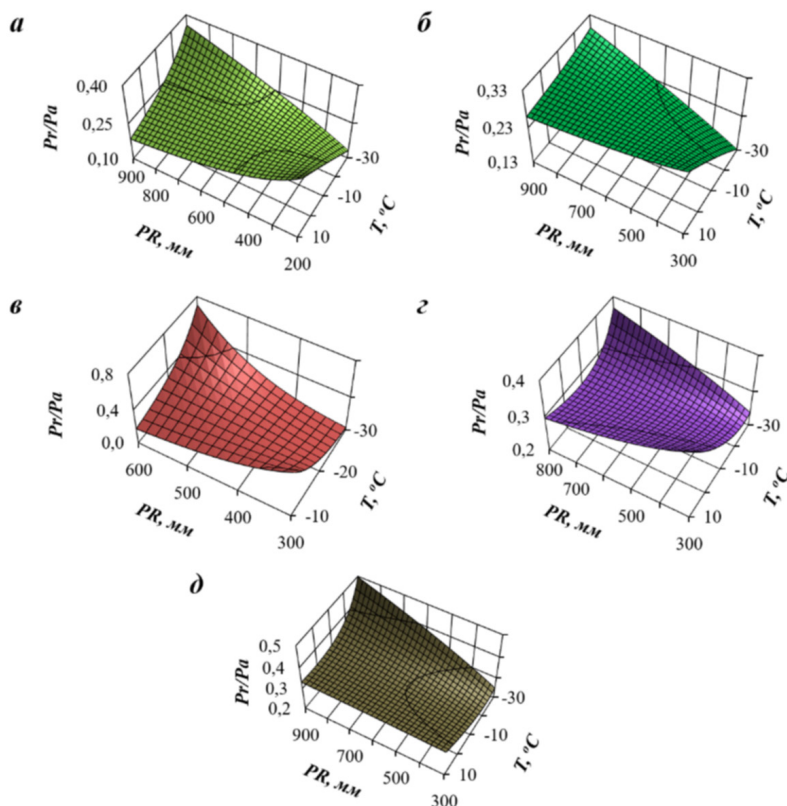


Рис. 1. Изменение расчетных значений Pr/Pa биомассы в градиентах температур и осадков при неизменных таксационных показателях древостоев; индексы а, б, в, г, д обозначают здесь и далее древостои соответственно двухвойных сосен, пихты, пятихвойных сосен (кедра), березы и осины

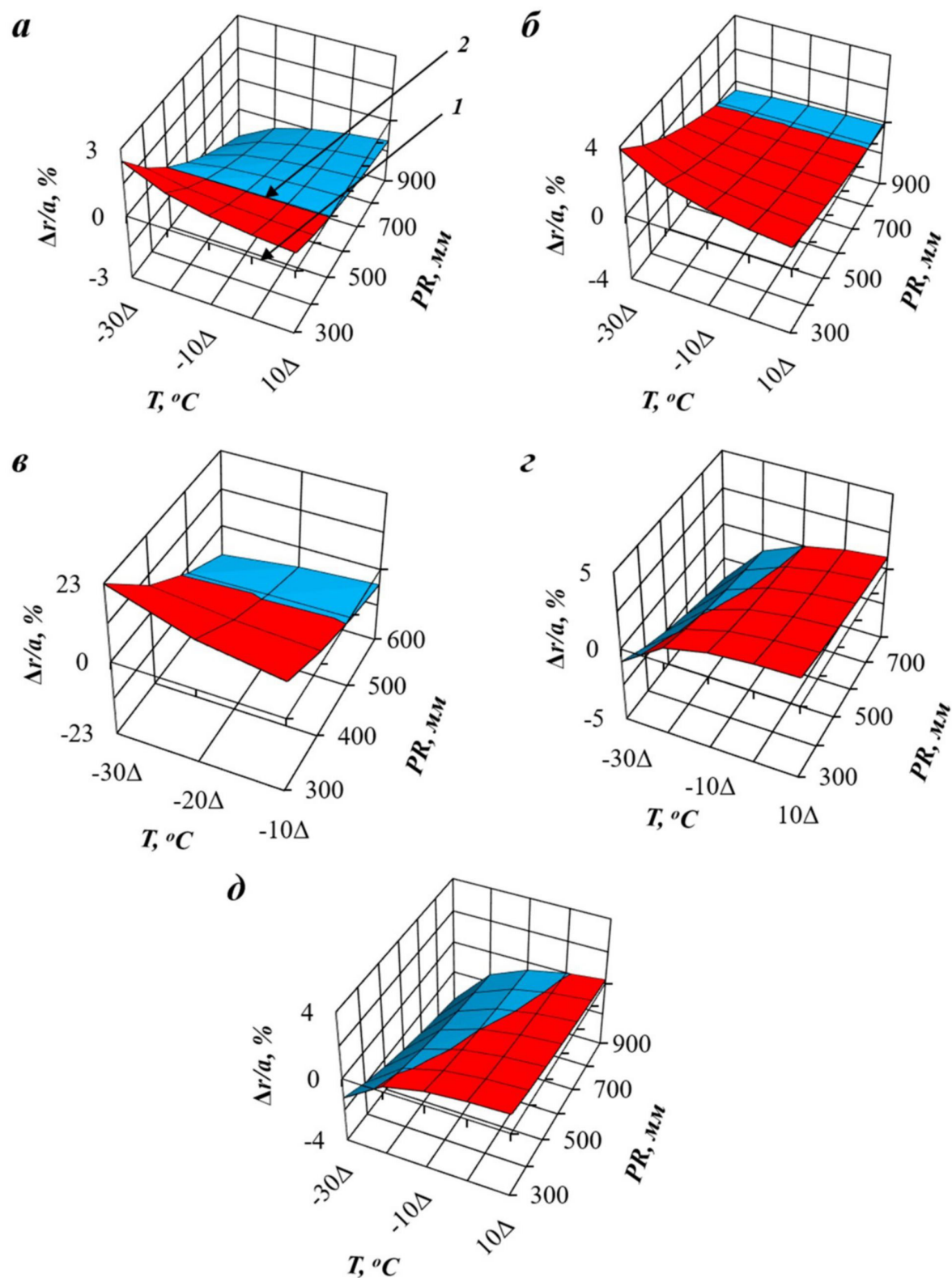


Рис. 2. Изменение Pr/Pa ($\Delta r/a$, %) при повышении температуры на 1°C вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков. 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению Pr/Pa при предполагаемом повышении температуры на 1°C ; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений Pr/Pa при предполагаемом повышении температуры на 1°C

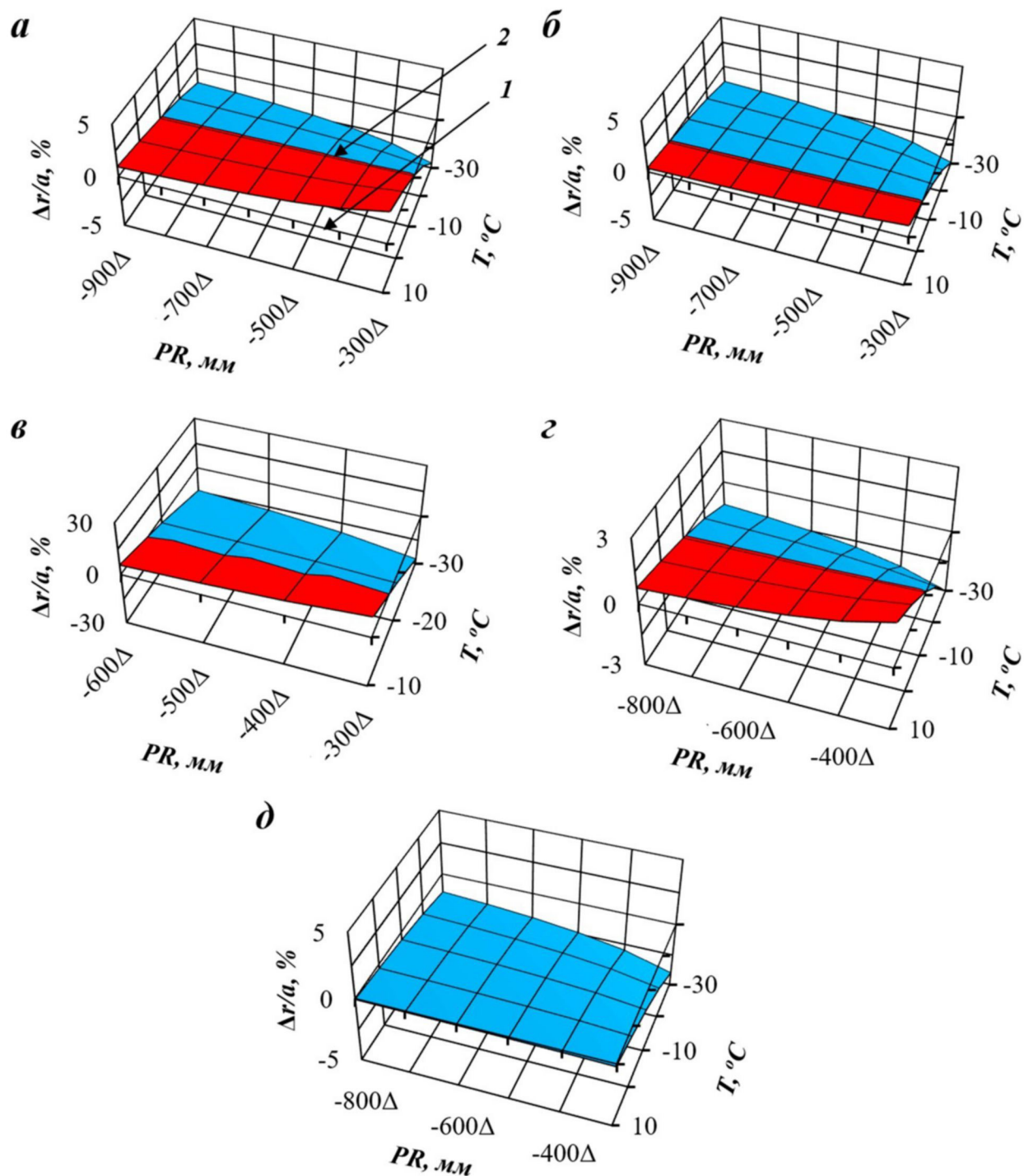


Рис. 3. Изменение Pr/Pa ($\Delta r/a$, %) при снижении уровня осадков вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков. 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению Pr/Pa при предполагаемом снижении уровня осадков на 20 мм; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений Pr/Pa при предполагаемом снижении осадков на 20 мм

Выше по результатам исследований надземной биомассы деревьев и древостоев была установлена общая закономерность, графически представленная поперечно-образной поверхностью: в теплых регионах биомасса лимитируется недостатком влаги, а по мере перехода в холодные регионы происходит смена лимитирующего фактора, и биомасса лимитируется избытком осадков; во влагообеспеченных регионах биомасса лимитируется недостатком тепла, а по мере перехода во влагодефицитные регионы происходит смена лимитирующего фактора, и биомасса ограничивается избытком тепла [48, 49, 137, 138]. Как было отмечено выше, в отношении показателя Pr/Pa многочисленными исследованиями установлено его увеличение по мере возрастания дефицита тепла, дефицита почвенной влаги и почвенной аэрации. Следовательно, факторы, способствующие увеличению Pr/Pa , для надземной биомассы являются, как известно, факторами, снижающими продуктивность.

Поэтому неудивительно, что сопоставление климатических трендов для надземной биомассы и для Pr/Pa показывает их отличие в главном: прямо противоположным характером выведенных закономерностей, то есть факторы, лимитирующие величину надземной биомассы, повышают величину Pr/Pa и наоборот. Опубликованные графические закономерности изменения надземной биомассы и Pr/Pa по осям координат прямо противоположны. Это означает, что, чем больше биомасса как показатель продуктивности, тем меньшей долей корневой массы по отношению к надземной обходится древостой. Эта зеркальность в соотношениях надземной и подземной биомасс в их реакции на климатические факторы отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста исследуемых древесных видов. На любой климатический фактор, снижающий продуктивность надземной биомассы, древостой отвечает увеличением относительной массы корней [4]. Стремление растений освоить корнями максимальный объем ризосферы за счет

преобладающего развития сосущих корней является общей стратегией их выживания в условиях засушливого климата [74].

Ранее было показано, что климатические показатели объясняют несущественную долю изменчивости биомассы древостоев [77, 131]. В нашем исследовании процедура выполненного регрессионного анализа дает возможность оценить вклад каждой из независимых переменных в объяснение изменчивости искомой переменной [22]. Результаты оценки названных вкладов показаны в табл. 3, согласно которой вклад климатических переменных в объяснение изменчивости Pr/Pa составил в среднем около 52%, что существенно выше, чем было установлено в отношении аналогичного вклада в объяснение изменчивости надземной биомассы – около 30% [51].

Поскольку количественный и качественный уровни существующих баз данных не позволяют вывести обобщающие закономерности в объяснении изменчивости Pr/Pa всех лесообразующих видов (родов) Евразии, нами выведены для 24 из них средние значения (табл. 4), а их ранжирование в убывающей последовательности видов (родов) по величине Pr/Pa представлено на рис. 4. Очевидно, наибольшей величиной Pr/Pa располагает *Fraxinus* в Европе ($0,37 \pm 0,10$) и наименьшей – *Dipterocarpus* в Тайланде ($0,11 \pm 0,03$). Поскольку некоторые роды и виды представлены ограниченным объемом данных в узких возрастных диапазонах, выполненное их ранжирование по величине Pr/Pa можно считать предварительным.

Учитывая выше отмеченные недостатки используемой базы данных о величине Pr/Pa , можно считать, что наш анализ исходных данных выполнен лишь в первом приближении, и по мере совершенствования исходной базы данных предложенные здесь закономерности могут корректироваться. Видимо, следует согласиться с мнением Р. Мак-Лоуна [25], что бессмысленно доводить модель до точности 5%, если исходные данные получены с ошибкой 10%.

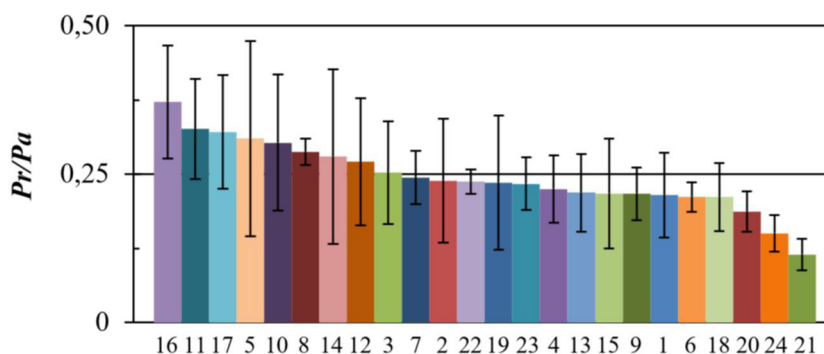


Рис. 4. Диаграмма распределения 24 лесообразующих видов Евразии по величине Pr/Pa в убывающей последовательности. Нумерацию видов см. табл. 4

Заключение

Таким образом, путем моделирования относительной биомассы корней (*Pr/Pa*) древостоев лесообразующих видов (родов) Евразии установлено действие принципа лимитирующего фактора Либиха в транс-континентальных пространственных градиентах температур и осадков. В холодных регионах при повышении осадков *Pr/Pa* увеличивается, но по мере перехода к теплым регионам происходит смена лимитирующего фактора, и закономерность характеризуется противоположным трендом. При повышении температуры во влажных регионах *Pr/Pa* снижается, но по мере перехода в сухие условия происходит смена лимитирующего фактора, и он начинает возрастать.

Многочисленными исследованиями установлено увеличение *Pr/Pa* по мере возрастания дефицита тепла, дефицита почвенной влаги и почвенной аэрации. Но, как известно, эти же факторы, способствующие

увеличению *Pr/Pa*, являются факторами, снижающими продуктивность надземной биомассы. Мы получили результаты, согласующиеся с данным явлением. Сопоставление полученных климатических трендов для надземной биомассы и *Pr/Pa* показало, что они прямо противоположны, то есть факторы, лимитирующие величину надземной биомассы, являются стимулирующими величину *Pr/Pa* и наоборот.

Эта зеркальность в соотношениях надземной и подземной биомасс в их реакции на климатические факторы отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста исследуемых древесных видов. На любой климатический фактор, снижающий продуктивность надземной биомассы, древостой отвечает увеличением относительной массы корней.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Табл. 3

Вклад независимых переменных уравнений (I) в объяснение изменчивости зависимой переменной, %

Зависимая переменная	lnA (I)	lnD (II)	lnN (III)	lnM (IV)	(lnA)(lnM) (V)	(lnA)(lnN) (VI)	(I) + (II) + (III) + (IV) + (V) + (VI)	ln(T + 50) (VII)	[ln(T + 50)] ² (VIII)	lnPR (IX)	[ln(T + 50)] × (lnPR) (X)	(VII) + (VIII) + (IX) + (X)
Двухвойный подрод <i>Pinus</i> L.												
ln(<i>Pr/Pa</i>)	7,6	–	10,9	20,4	–	12,7	51,6	16,0	–	16,0	16,4	48,4
<i>Abies</i> Mill.												
ln(<i>Pr/Pa</i>)	–	–	–	15,4	–	6,2	21,6	25,2	–	27,2	26,0	78,4
Пятихвойные сосны <i>Pinus sibirica</i> и <i>P. koraiensis</i> (подрод <i>Haploxyylon</i> , или <i>Strobus</i>)												
ln(<i>Pr/Pa</i>)	–	14,0	11,7	13,4	–	–	39,1	19,9	–	20,5	20,5	60,9
<i>Betula</i> L.												
ln(<i>Pr/Pa</i>)	–	–	12,5	58,4	–	–	70,9	–	9,7	9,7	9,7	29,1
<i>Populus</i> L.												
ln(<i>Pr/Pa</i>)	20,4	–	–	14,5	22,3	–	57,2	–	13,6	15,6	13,6	42,8
Итого												
X ± σ ^(a)	14,0 ± 9,1	–	11,7 ± 0,8	24,4 ± 19,2	–	9,5 ± 4,6	48,1 ± 18,7	20,4 ± 4,6	11,7 ± 2,8	17,8 ± 6,5	17,2 ± 6,3	51,9 ± 18,7

Здесь и далее: X ± σ – среднее значение ± стандартное отклонение.

Табл. 4

Характеристика средних показателей относительной биомассы корней (*Pr/Pa*) в древостоях основных видов (родов, подродов) Евразии

№	Наименование вида (рода, подрода)	Страна	Число пробных площадей	Диапазон возраста древостоев	X ± σ
1	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Россия, Белоруссия, Великобритания, Казахстан, Китай, Украина, Бельгия, Швеция, Япония, Финляндия, Болгария, Литва	1017	4–290	0,21 ± 0,07
2	<i>P. sibirica</i> Du Tour, <i>P. koraiensis</i> S. & Z.	Россия	57	7–380	0,24 ± 0,10

Табл. 4
(продолжение)

3	<i>Picea</i> L.	Россия, Германия, Украина, Белоруссия, Китай, Бельгия, Ирландия, Латвия, Болгария, Дания, Чехия, Швеция, Эстония	432	5–350	0,25 ± 0,09
4	<i>Abies</i> Mill.	Россия, Япония, Непал, Словакия, Украина	166	4–283	0,22 ± 0,06
5	<i>Larix</i> Mill.	Россия, Япония, Китай, Чехия,	179	10–350	0,31 ± 0,16
6	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Нидерланды, Франция, Болгария, Бельгия	12	9–70	0,21 ± 0,02
7	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don	Япония	38	5–59	0,24 ± 0,04
8	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (S. & Z.) Endl.	Япония	26	17–50	0,29 ± 0,02
9	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	Китай	97	16–55	0,22 ± 0,04
10	<i>Betula</i> L.	Россия, Украина, Великобритания, Белоруссия, Дания	271	6–120	0,30 ± 0,11
11	<i>Populus</i> L.	Россия, Белоруссия, Болгария, Казахстан, Таджикистан	185	10–222	0,33 ± 0,08
12	<i>Tilia</i> L.	Россия, Украина, Швеция	8	5–150	0,27 ± 0,11
13	<i>Alnus</i> Gaertn	Белоруссия, Литва, Бельгия, Великобритания	36	3–70	0,22 ± 0,07
14	<i>Quercus</i> L.	Россия, Украина, Бельгия, Чехия, Белоруссия, Испания, Индия, Венгрия, Грузия, Азербайджан, Непал, Пакистан, Нидерланды, Великобритания, Польша, Япония, Франция, Швеция	365	5–280	0,28 ± 0,15
15	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Германия, Украина, Франция, Япония, Италия, Болгария, Швеция, Бельгия, Дания, Италия, Румыния, Чехия, Россия	110	8–400	0,22 ± 0,09
16	<i>Fraxinus</i> L.	Россия, Белоруссия, Бельгия	4	30–80	0,37 ± 0,10
17	<i>Carpinus betulus</i> L.	Украина, Россия, Словакия, Япония	5	36–60	0,32 ± 0,10
18	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Словакия	3	8–49	0,21 ± 0,06
19	<i>Acacia</i> Mill.	Япония, Индонезия	15	3–7	0,24 ± 0,11
20	<i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) Nielsen	Индонезия	4	3–7	0,19 ± 0,03
21	<i>Dipterocarpus</i> C.F.Gaertn.	Тайланд	6	–	0,11 ± 0,03
22	<i>Tectona grandis</i> L.f.	Индия	9	5–40	0,24 ± 0,02
23	<i>Shorea robusta</i> Roth	Индия	15	5–65	0,23 ± 0,04
24	<i>Eucalyptus tereticornis</i> Sm.	Индия	5	5–9	0,15 ± 0,03
	Итого	–	3065	–	0,25 ± 0,07

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Абражко МА. Пространственное распределение и динамика биомассы корней ели. В кн.: Факторы регуляции экосистем еловых лесов. Л.: Наука; 1983. С. 89-97.
2. Аткин АС. Масса корней сосны на гранитных интрузиях Казахского мелкосопочника. Вестн с-х науки Казахстана. 1978;6:82-6.
3. Баглай АН. Формирование корневых систем сосны в культурах южной части Усманского бора в зависимости от условий местопроизрастания. Автореф. канд. дисс. Киев; 1962.
4. Базилевич НИ, Родин ЛЕ. Запасы органического вещества в подземной сфере растительных сообществ суши Земли. В кн.: Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы (Международный симпозиум СССР). Л.: Наука; 1968. С. 3-7.
5. Бобкова КС, Тужилкина ВВ, Кузин СН. Углеродный цикл в еловых экосистемах северной тайги. Экология. 2006;1:23-31.
6. Борискина ЕМ. Взаимодействие корневых систем дуба и сосны с почвой. Труды Воронежского гос. заповедника. 1959;8:255-63.
7. Бычваров Д, Петков ПБ, Сидеров К. [К характеристике корневой системы дубовых насаждений в Восточных Родобах]. Горскостопанска Наука. 1976;13(2):3-8 (болг.).
8. Ведрова ЭФ, Шугалей ЛС, Стаканов ВД. Баланс углерода в естественных и нарушенных южнотаежных лесах Средней Сибири. География и природные ресурсы. 2002;4:92-9.
9. Верзунов АИ. Рост лиственницы и устойчивость культурных фитоценозов с ее господством на полугидроморфных почвах лесостепи Северного Казахстана. Экология. 1980;2:38-44.
10. Воронин ПЮ. Ежегодный фотосинтетический сток атмосферного углерода и NEP растительного покрова Северной Евразии. Докл АН РАН. 2006;408(6):842-4.
11. Голубятников ЛЛ, Денисенко ЕА. Влияние климатических изменений на растительный покров европейской России. Известия РАН. Сер географ. 2009;2:57-68.
12. Ермоленко ПМ, Ермоленко ЛГ. Высотно-поясные особенности роста кедра и пихты в Западном Саяне. В кн.: Формирование и продуктивность древостоев. Новосибирск: Наука; 1981. С. 19-53.
13. Заде ЛА. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. В кн.: Математика сегодня (сборник переводных статей). М.: Знание; 1974. С. 5-49.
14. Заика ВЕ. Современное состояние теории роста. В кн.: Зотин АИ, Преснов ЕВ ред. Математическая биология развития. М.: Наука; 1982. С. 40-49.
15. Залесов СВ, Аткина ЛИ, Абрамова ЛП, Луганский НА. Строение корневой системы растений сосны в ювенильном возрасте в условиях Южного Урала. Леса Урала и хозяйство в них. 2004;24:46-51.
16. Зябченко СС, Иванчиков АА. Зональные особенности формирования сосняков черничных Карелии и Кольского полуострова и динамика структуры растительной массы в них. В кн.: Формирование и продуктивность сосновых насаждений Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск: Ин-т леса КФ АН СССР; 1978. С. 30-75.
17. Казарян ВО. Старение высших растений. М.: Наука; 1969.
18. Казимиров НИ, Волков АД, Зябченко СС и др. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука; 1977.
19. Каризуми Н. Определение биомассы корней в лесах путем отбора проб из почвенных блоков. В кн.: Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы (Международный симпозиум СССР). Л.: Наука; 1968. С. 79-86.
20. Крамер ПД, Козловский ТТ. Физиология древесных растений. М.: Лесная промышленность; 1983.
21. Кукарских ВВ. Что влияет на радиальный прирост деревьев в условиях сухого климата. В кн.: Экология в меняющемся мире: Материалы конф. молодых ученых, 24-28 апреля 2006 г. Екатеринбург: Академкнига; 2006. С. 120-2.
22. Лица ИЯ. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне; 1980.
23. Лица ИЯ. Единый метод таксации реакции древостоя на антропогенное воздействие. Лесоведение. 1985;(6):12-8.
24. Лир Х, Польстер Г, Фидлер Г-И. Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-сть; 1974.
25. Мак-Лоун РР. Математическое моделирование – искусство применения математики. В кн.: Математическое моделирование. М.: Мир; 1979. С. 9-20.
26. Молчанов АА. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука; 1971.
27. Москалюк ТА. Структура и продуктивность основных типов леса юга Магаданской области. Автореф. канд. дисс. Красноярск; 1984.

28. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир; 1975.
29. Орлов АЯ. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможности учета годовичного прироста органической массы в толще лесной почвы. Лесоведение. 1967;1:64-70.
30. Оськина НВ. Почвенные условия и продуктивность фитомассы сосновых насаждений приотских террас в Московской области. Автореф. канд. дисс. М.; 1982.
31. Поликарпов НП. Формирование сосновых молодняков на концентрированных вырубках. М.: Изд-во АН СССР; 1962.
32. Рахтеенко ИН, Якушев БИ. Комплексный метод исследования корневых систем растений. В кн.: Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы (Международный симпозиум СССР). Л.: Наука; 1968. С. 174-8.
33. Розенберг ГС. Математическое моделирование фитоценологических систем. Бюллетень МОИП. Отд-ние биологии. 1980;85(2):79-88.
34. Розенберг ГС, Рянский ФН, Лазарева НВ и др. Общая и прикладная экология. Самара-Тольятти: Изд-во Самар. гос. эконом. ун-та; 2016.
35. Смолоногов ЕП. Лесообразовательный процесс и генетическая классификация типов леса. Леса Урала и хозяйство в них. 1995;18:43-58.
36. Терехов ГГ, Усольцев ВА. Морфоструктура насаждений и корненасыщенность ризосферы культур ели сибирской и вторичного листовного древостоя на Среднем Урале как характеристика их конкурентных отношений. Хвойные бореальной зоны. 2010;27(3-4):330-5.
37. Толмачев АИ. Основы учения об ареалах: Введение в хорологию растений. Л.: Изд-во ЛГУ; 1962.
38. Усольцев ВА. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука; 1988.
39. Усольцев ВА. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург: УрО РАН; 1997.
40. Усольцев ВА. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН; 2007.
41. Усольцев ВА. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН; 2010.
42. Усольцев ВА. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии: К менеджменту биосферных функций лесов. Екатеринбург: УГЛТУ; 2016.
43. Усольцев ВА. В подвалах биосферы: Что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? Эко-потенциал. 2018;4:24-77.
44. Усольцев ВА, Колчин КВ, Маленко АА. Смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев лиственницы. Вестн Алтайск гос аграрн ун-та. 2017;4:85-90.
45. Усольцев ВА, Цепордей ИС. Климатические градиенты биомассы насаждений *Quercus spp.* на территории Евразии. Сибирский лесной журн. 2020;6:16-29.
46. Усольцев ВА, Ковязин ВФ, Цепордей ИС и др. Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020;232:50-78.
47. Усольцев ВА, Цепордей ИС, Азаренок МВ. Климатически обусловленные пространственные и темпоральные изменения биомассы рода *Abies spp.* Евразии в контексте закона лимитирующего фактора. Хвойные бореальной зоны. 2021;39(5):392-400.
48. Усольцев ВА, Цепордей ИС. Принцип пространственно-временного замещения в экологии и прогнозирование биомассы *Picea spp.* при изменении климата. Хвойные бореальной зоны. 2021;39(4):269-75.
49. Усольцев ВА, Цепордей ИС. Климатически обусловленные территориальные изменения фитомассы деревьев лесообразующих видов Евразии и их прогнозирование. Сибирский лесной журнал. 2021;6:72-90.
50. Усольцев ВА, Цепордей ИС, Норицин ДВ. Аллометрические модели для оценки биомассы корней лесообразующих родов Евразии дистанционными методами с учетом глобального потепления. Хвойные бореальной зоны. 2022;40(1):65-75.
51. Усольцев ВА, Цепордей ИС, Усольцев АВ. Прогнозирование биомассы кедровых сосен северной части Азии при изменении климата. Хвойные бореальной зоны. 2022;40(5). (принята в печать).
52. Усольцев ВА, Цепордей ИС, Норицин ДВ. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала. Леса России и хозяйство в них. 2022;1:4-14.
53. Фонти МВ. Климатический сигнал в параметрах годовичных колец (плотности древесины, анатомической структуре и изотопном составе) хвойных и лиственных видов деревьев в различных природно-климатических зонах Евразии. Автореф. докт. дисс. Красноярск; 2020.
54. Цельникер ЮЛ, Малкина ИС, Ковалев АГ, Чмора СН. Рост и газообмен CO_2 у лесных деревьев. М.: Наука; 1993.

Общий список литературы/Reference List

1. Abrazhko MA. [Spatial distribution and dynamics of spruce root biomass]. In: *Fakторы Regulatsii Ekosistem Yelovykh Lesov* [Factors of Regulation of Spruce Forest Ecosystems]. Leningrad: Nauka; 1983. P. 89-97. (In Russ.)
2. Atkin AS. [The mass of pine roots on granite intrusions of the Kazakh Low Hills]. *Vestnik Selskokhoziaystvennoy Nauki Kazakhstana*. 1978;6:82-6. (In Russ.)
3. Baglay AN. *Formirovanie Kornevykh System Sosny v Kul'turakh Yuzhnoy Chasti Usmanskogo Bora*. [Formation of Root Systems in Pine Plantations of the Southern Part of Usman Forest]. Abstract of PhD Thesis. Kiev; 1962. (In Russ.)
4. Bazilevich NI, Rodin LE. [Reserves of organic matter in the underground sphere of plant communities of the land of the Earth]. In: *Metody Izucheniya Produktivnosti Kornevykh Sistem i Organizmov Rizosfery: Mezhdunarodnyi Symposium SSSR*. [Methods of Studying the Productivity of Root Systems and Rhizosphere Organisms: International Symposium of the USSR]. Leningrad: Nauka; 1968. P. 3-7. (In Russ.)
5. Bobkova KS, Tuzhilkina VV, Kuzin SN. [Carbon cycle in spruce ecosystems of the Northern taiga]. *Russ J Ecol*. 2006;1:23-31. (In Russ. and Engl.)
6. Boriskina EM. [Interaction of oak and pine root systems with soil]. *Trudy Voronezhskogo Gosudarstvennogo Zapovednika*. 1959;8:255-63. (In Russ.)
7. Bychvarov D, Petkov PB, Siderov K. K kharakteristike kornevoy sistemy dubovykh nasazhdeniy v Vostochnykh Rodopakh. [On the characteristics of the root system of oak stands in the Eastern Rhodopes]. *Gorskostopanska Nauka*. 1976; 13(2):3-8. (In Bulgar. with Russ. abstract)
8. Vedrova EF, Shugaley LS, Stakanov VD. [Carbon balance in natural and disturbed southern taiga forests of Central Siberia]. *Geografiya i Prirodnye Resursy*. 2002;4:92-9. (In Russ.)
9. Verzunov AI. [The growth and the stability of larch plantations with its dominance on semi-hydromorphic soils of the forest-steppe of Northern Kazakhstan]. *Ekologiya*. 1980;2:38-44. (In Russ.)
10. Voronin PYu. [Annual photosynthetic sink of atmospheric carbon and NEP of the vegetation cover of Northern Eurasia]. *Doklady AN RAN*. 2006; 408(6):842-4. (In Russ.)
11. Golubiatnikov LL, Denisenko EA. [The influence of climatic changes on the vegetation of European Russia]. *Izvestiya RAN Ser Geogr*. 2009;2:57-68. (In Russ.)
12. Yermolenko PM, Yermolenko LG. [Altitude profiling features of stone pine and fir growth in the Western Sayan]. In: *Formirovanie i Produktivnost' Drevostoyev*. [Formation and Productivity of Stands]. Novosibirsk: Nauka, 1981. P. 19-53. (In Russ.)
13. Zadeh LA. [The basics of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes]. In: *Matematika Segodnya (Sbornik Perevodnykh Statey)*. [Mathematics Today (A Collection of Translated Articles)]. Moscow: Znaniye; 1974. P. 5-49. (In Russ.)
14. Zaika VYe. [The current state of growth theory]. In: Zotin AI., Presnov YeV, eds. *Matematicheskaya Biologiya Razvitiya*. [Mathematical Biology of Development]. Moscow: Nauka; 1982. P. 40-49. (In Russ.)
15. Zalesov SV, Atkina LI, Abramova LP, Lugansky NA. [The structure of the root system of pine plants in the juvenile age in the conditions of the Southern Urals]. *Lesa Urala i Khoziaystvo v Nikh*. 2004;24:46-51. (In Russ.)
16. Ziabchenko SS, Ivanchikov AA. [Zonal features of the formation of pine blueberry forests of Karelia and the Kola Peninsula and the dynamics of the biomass structure there]. In: *Formirovaniye i Produktivnost' Sosnovykh Nasazhdeniy Karelskoy ASSR i Murmanskoy Oblasti*. [Formation and Productivity of Pine Stands of the Karelian ASSR and Murmansk Region]. Petrozavodsk: Institut Lesa KF AN SSSR, 1978. P. 30-75. (In Russ.)
17. Kazarian VO. *Stareniye Vysshikh Rasteniy*. [Aging of Higher Plants]. Moscow: Nauka; 1969. (In Russ.)
18. Kazimirov NI, Volkov AD, Zyabchenko SS et al. *Obmen Veshchestv i Tnergii v Sosnovykh Lesakh Yevropeyskogo Severa*. [Matter and Energy Metabolism in the Pine Forests of the European North]. Leningrad: Nauka; 1977. (In Russ.)
19. Karizumi N. [Determination of root biomass in forests by sampling soil blocks]. In: *Metody Izucheniya Produktivnosti Kornevykh Sistem i Organizmov Rizosfery: Mezhdunarodnyj Symposium SSSR*. [Methods of Studying the Productivity of Root Systems and Rhizosphere Organisms: International Symposium of the USSR]. Leningrad: Nauka; 1968. P. 79-86. (In Russ.)
20. Kramer PD, Kozlovsky TT. *Fiziologiya Drevesnykh Rasteniy*. [Physiology of Woody Plants]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost'; 1983. (In Russ.)
21. Kukarskikh VV. [What influences the radial growth of trees in a dry climate]. In: *Ekologiya v Meniayushchemsia Mire: Materialy Konferentsii Molodykh Uchenykh, 24-28 Aprelia 2006 g. Yekaterinburg: Akademkniga*; 2006. P. 120-2. (In Russ.)

22. Liyepa IYa. Dinamika Drevesnykh Zapasov: Prognozirovaniye i Ekologiya. [Wood Stock Dynamics: Forecast and Ecology]. Riga: Zinatne; 1980. (In Russ.)
23. Liyepa IYa. [Unified method of taxation of stand response to anthropogenic impact]. Lesovedeniye. 1985;6:12-8. (In Russ.)
24. Lyr H, Polster H, Fiedler H-J. Fiziologiya Drevesnykh Rasteniy. [Physiology of Woody Plants]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost'; 1974. (In Russ.)
25. McLone RR. [Mathematical modeling – the art of applying mathematics]. In: Matematicheskoe Myodelirovanie. [Mathematical Modeling]. Moscow: Mir; 1979. P. 9-20. (In Russ.)
26. Molchanov AA. Produktivnost' Organicheskoy Massy v Lesakh Razlichnykh Zon. [Productivity of Organic Matter in Forests of Various Zones]. Moscow: Nauka; 1971. (In Russ.)
27. Moskaliuk TA. Struktura i Produktivnost' Osnovnykh Tipov Lesa Yuga Magadanskoy Oblasti. [Structure and Productivity of the Main Types of Forests in the South of Magadan Region]. Abstract of PhD Thesis. Krasnoyarsk; 1982. (In Russ.)
28. Odum E. Osnovy Ekologii [Fundamentals of Ecology]. Moscow: Mir; 1975. (In Russ.)
29. Orlov AYa. [Method for determining the mass of tree roots in the forest and the possibility of accounting for the annual increase of organic matter in the forest soil layer]. Lesovedeniye. 1967;1:64-70. (In Russ.)
30. Os'kina NV. Pochvennye Usloviya i Produktivnost' Fitomassy Sosnovykh Nasazhdeniy Priokskikh Terras v Moskovskoy Oblasti. [Soil Conditions and Phytomass Productivity of Pine Stands on Prioksky Terraces in Moscow Region]. Abstract of PhD Thesis. Moscow; 1982. (In Russ.)
31. Polikarpov NP. Formirovanie Sosnovykh Molodniakov na Kotsentrirovannykh Vyrbkakh. [Formation of Young Pine Trees in Concentrated Cuttings]. Moscow: AS SSSR Publ.; 1962. (In Russ.)
32. Rakhteenko IN, Yakushev BI. [A comprehensive method for the studying plant root systems]. In: Metody Izucheniya Produktivnosti Kornevykh Sistem i Organizmov Rizosfery: Mezhdunarodniy Symposium SSSR. [Methods of Studying the Productivity of Root Systems and Rhizosphere Organisms: International Symposium of the USSR]. Leningrad: Nauka; 1968. P. 174-8. (In Russ.)
33. Rozenberg GS. [Mathematical modeling of phytocenotic systems]. Biulleten' MOIP. Otdelenie Biologii. 1980;85(2):79-88. (In Russ.)
34. Rozenberg GS, Rianskiy FN, Lazareva NV et al. Obshchaya i Prikladnaya Ekologia. [General and Applied Ecology]. Samara-Togliatti: Izdatel'stvo Samarskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta; 2016. (In Russ.)
35. Smolonogov EP. [Forest formation process and genetic classification of forest types]. Lesa Urala i Khozyaystvo v Nikh. 1995;18:43-58. (In Russ.)
36. Terekhov GG, Usoltsev VA. [Stand morphostructure and rhizosphere root density of Siberian spruce plantations and secondary small-leaved natural stands in the Central Urals as a characteristic of their competitive relations]. Khvoynye Boreal'noy Zony. 2010;27(3-4):330-5. (In Russ.)
37. Tolmachev AI. Osnovy Ucheniya ob Arealakh: Vvedeniye v Khorologiyu Rasteniy. [Fundamentals of Plant Habitat Theory: Introduction to Plant Community Chorology]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU; 1962. (In Russ.)
38. Usoltsev VA. Rost i Struktura Fitomassy Drevostoyev. [Growth and Structure of Forest Stand Biomass]. Novosibirsk: Nauka; 1988. (In Russ.)
39. Usoltsev VA. Bioekologicheskiye Aspekty Taktsii Fitomassy Derevyev. [Bioecological Aspects of Tree Phytomass Mensuration]. Yekaterinburg: Ural'skoe Otdeleniye RAS; 1997. (In Russ. with Engl. abstract.)
40. Usoltsev VA. Biologicheskaya Produktivnost' Lesov Severnoy Yevrazii: Metody, Baza Danykh i Yeyo Prilozheniya. [Biological Productivity of Northern Yevrasia's Forests: Methods, Database and its Applications]. Yekaterinburg: Ural'skoe Otdeleniye RAS; 2007. (In Russ. with Engl. abstract and contents.)
41. Usoltsev VA. Fitomassa i Pervichnaya Produktsiya Lesov Yevrazii. [Eurasian Forest Biomass and Primary Production Data]. Yekaterinburg: Ural'skoe Otdeleniye RAS; 2010. (In Russ. with Engl. contents.)
42. Usoltsev VA. Biologicheskaya Produktivnost' Lesoobrazuyushchikh Porod v Klimaticheskikh Gradientakh Yevrazii: K Menedzhmentu Biosfernykh Funktsiy Lesov. [Biological Productivity of Forest-Forming Species In Eurasia's Climate Gradients, as Related to Supporting the Processes of Decision-Making in Forest Management]. Yekaterinburg: UGLTU; 2016. (In Russ. with Engl. abstract.)
43. Usoltsev VA. [In the basements of the biosphere: What do we know about the primary production of tree roots?]. Eko-Potentsial. 2018;4:24-77. (In Russ. with Engl. abstract.)
44. Usoltsev VA, Kolchin KV, Malenko AA. [Biases of generic allometric models in the local assessment of the phytomass of larch trees]. Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2017;4:85-90. (In Russ.)

45. Usoltsev VA, Tsepordey IS. [Climate gradients of *Quercus* spp. forest biomass in Eurasia]. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal*. 2020;6:16-29. (In Russ. with Engl. abstract.)
46. Usoltsev VA, Koviazin VF, Tsepordey IS et al. [Foliage biomass of the forests of Eurasia: a correction of empirical modeling methods]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2020;232:50-78. (In Russ. with Engl. summary.)
47. Usoltsev VA, Tsepordey IS, Azarenok MV. [Climatically determined spatial and temporal changes in the biomass of *Abies L.* of Eurasia in the context of the law of the limiting factor]. *Khvoynye Boreal'noy Zony*. 2021;39(5):392-400. (In Russ. with Engl. abstract.)
48. Usoltsev VA, Tsepordey IS. [The principle of space-for-time substitution in ecology and the prediction of *Picea* spp. biomass with climate change]. *Khvoynye Boreal'noy Zony*. 2021; 39(4): 269-75. (In Russ. with Engl. abstract.)
49. Usoltsev VA, Tsepordey IS. [Climatically caused territorial changes in the phytomass of forest forming tree species of Eurasia and their forecasting]. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal*. 2021;6:72-90. (In Russ. with Engl. abstract and references.)
50. Usoltsev VA, Tsepordey IS, Noritsin DV. [Allometric models for estimating the root biomass of forest-forming genera of Eurasia by remote sensing as related to global warming]. *Khvoynye Boreal'noy Zony*. 2022; 40 (1): 65-75. (In Russ. with Engl. abstract.)
51. Usoltsev VA, Tsepordey IS, Usoltsev AV. [Forecasting the biomass of cedar pines in northern Asia under climate change]. *Khvoynye Boreal'noy Zony*. 2022;40(5). (Accepted for publication, in Russ. with Engl. abstract.)
52. Usoltsev VA, Tsepordey IS, Noritsin DV. [Allometric models of single-tree biomass for forest-forming species of the Urals]. *Lesa Rossii i Khoziaystvo v Nikh*. 2022;1:4-14. (In Russ. with Engl. abstract.)
53. Fonti MV. *Klimaticheskii Signal v Parametrakh Godichnykh Kolets (Plotnosti Drevesiny, Anatomicheskoy Struktury i Izotopnom Sostave) Khvoynykh i Listvennykh Vidov Dereviyev v Razlichnykh Prirodno-Klimaticheskikh Zonakh Yevrazii*. [Climatic Signal in the Parameters of Annual Rings (Wood Density, Anatomical Structure and Isotopic Composition) of Coniferous and Deciduous Tree Species in Various Natural and Climatic Zones of Eurasia]. Abstract of Doct of Sciences Thesis. Krasnoyarsk; 2020. (In Russ.)
54. Tsel'niker Yu L, Malkina IS, Kovalev AG, Chmora SN. Rost i Gazoobmen CO₂ u Lesnykh Derevyev. [Growth and Gas Exchange of CO₂ in Forest Trees]. Moscow: Nauka; 1993. (In Russ.)
55. Askari Y, Soltani A, Akhavan R, Kohyani PT. Assessment of root-shoot ratio biomass and carbon storage of *Quercus brantii* Lindl. in the central Zagros forests of Iran. *J Forest Sci*. 2017;63:282-89.
56. Aubin I, Boisvert-Marsh L, Kebli H et al. Tree vulnerability to climate change: Improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. *Ecosphere*. 2018; 9: Article e02108.
57. Axelsson B. Site differences in yield-differences in biological production or in redistribution of carbon within trees. *Swed Univ Agric Sci Dep Ecol Environ Res Rep*. 1981;9:1-11.
58. Baskerville GL. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can J Forest Res*. 1972;2:49-53.
59. Beets PN, Pearce SH, Oliver GR, Clinton PW. Root/shoot ratios for deriving below-ground biomass of *Pinus radiata* stands. *New Zealand J Forest Sci*. 2007;37(2):267-88.
60. Belote RT, Carroll C, Martinuzzi S et al. Assessing agreement among alternative climate change projections to inform conservation recommendations in the contiguous United States. *Sci Rep*. 2018;8:1-13.
61. Blois JL, Williams JW, Fitzpatrick MC et al. Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2013;110:9374-9.
62. Bloom A., Chapin III FS, Mooney HA. Resource limitation in plants – An economic analogy. *Ann Rev Ecol Syst*. 1985;16:363-92.
63. Bonan GB, Pollard D, Thompson SL. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*. 1992;359:716-8.
64. Bray JR. Root production and the estimation of net productivity. *Can J Bot*. 1963;41:65-72.
65. Brown S, Lugo A. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*. 1982;14(3):161-87.
66. Burian K. Produktion und Strahlungsnutzung bei *Helianthus annuus*, *Zea mays* und *Phaseolus vulgaris* während der gesamten Vegetationszeit. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*. 1970;178:1-35.
67. Büsgen M. Einiges über Gestalt und Wachstumsweise der Baumwurzeln. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. 1901;72:273-8.
68. Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner GA. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia (Berlin)*. 1997;111:1-11.

69. Cárdenas-Pérez S, Rajabi Dehnav A, Leszczynski K et al. *Salicornia europaea* L. functional traits indicate its optimum growth. *Plants*. 2022;11:Article 1051.
70. Chapin FS III. The mineral nutrition of wild plants. *Annu Rev Ecol Syst*. 1980;11:233-60.
71. Devi NM, Kukarskih VV, Galimova AA et al. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural. *Forest Ecosyst*. 2020;7:Article 7.
72. Durkaya A, Durkaya B, Ulu Say S. Below- and aboveground biomass distribution of young Scots pines from plantations and natural stands. *Bosque*. 2016;37(3):509-18.
73. Esslen J. *Das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages seit Justus von Liebig: Eine dogmengeschichtliche Untersuchung*. München, J. Schweitzer Verlag; 1905.
74. Farooq M, Wahid A, Kobayashi N et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron Sustain Dev*. 2009;29:185-212.
75. Fernandez OA, Caldwell MM. Phenology and dynamics of root growth of three cool semi-desert shrubs under field conditions. *J Ecol*. 1975;63(2):703-14.
76. Foden WB, Young BE, Akçakaya HR et al. Climate change vulnerability assessment of species. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2019;10:Article e551.
77. Forrester DI, Tachauer IH, Annighöfer P et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecol Manag*. 2017; 396:160-75.
78. Frauendorf TC, MacKenzie RA, Tingley III RW et al. Using a space-for-time substitution approach to predict the effects of climate change on nutrient cycling in tropical island stream ecosystems. *Limnol Oceanogr*. 2020;65:3114-27.
79. Freschet GT, Pagès L, Iversen CM et al. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytol*. 2021;232:973-1122.
80. Friend AL, Scarascia-Mugnozza G, Isebrands JG, Heilman PE. Quantification of two-year-old hybrid poplar root systems: morphology, biomass and ¹⁴C distribution. *Tree Physiol*. 1991;8:109-19.
81. Gerhardt K, Fredriksson D. Biomass allocation by broad-leaf mahogany seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in abandoned pasture and secondary dry forest in Guanacaste, Costa Rica. *Biotropica*. 1995;27:174-82.
82. Gill RA, Jackson RB. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol*. 2000;147:13-31.
83. Gower ST, Gholz HL, Nakane K, Baldwin VC. Production and carbon allocation pattern of pine forests. *Ecol Bull*. 1994;43:115-35.
84. Groisman PYa, Blyakharchuk TA, Chernokulsky AV et al. Climate changes in Siberia. In: *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Groisman PYa., Gutman G. (Eds). Springer; 2013:57-109.
85. Guerrero-Ramírez NR, Mommer L, Freschet GT et al. Global root traits (GRooT) database. *Glob Ecol Biogeogr*. 2020;30:25-37.
86. Harris WF, Kinerson RS, Edwards NT. Comparison of belowground biomass of natural deciduous forests and loblolly pine plantations. *Pedobiologia*. 1977;17:369-81.
87. Helmisaari H-S, Makkonen K, Kellomäki S et al. Below- and aboveground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecol Manag*. 2002;165(1-3):317-26.
88. Houghton RA, Hall F, Goetz SJ. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Geophys Res Lett*. 2009;114:G00E03.
89. Huang Y, Ciais P, Santoro M et al. A global map of root biomass across the world's forests. *Earth Syst Sci Data*. 2021;13:4263-74.
90. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry, and other Land Use. 2006. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
91. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on climate Change, Geneva, Switzerland, 2007. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
92. Ker MF, Raalte GD. Tree biomass equations for *Abies balsamea* and *Picea glauca* in northwestern New Brunswick. *Can J Forest Res*. 1981;11:13-7.
93. Keyes MR, Grier CC. Above- and belowground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Can J Forest Res*. 1981;11:599-605.
94. Kira T, Ogawa H, Yoda K, Ogino K. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. 4. Dry matter production with special reference to the Khao Chang rain forest. *Nature and Life in S. E. Asia*. 1967;5:149-74.
95. Laing J, Binyamin J. Climate change effect on winter temperature and precipitation of Yellowknife, Northwest Territories, Canada from 1943 to 2011. *Am J Clim Change*. 2013;2:275-83.
96. Ledo A, Paul KI., Burslem DFRP et al. Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally. *New Phytol*. 2017;217:8-11.

97. Le Goff N, Ottorini J-M. Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in North-East France. *Ann Forest Sci.* 2001;58:1-13.
98. Levy P. E., Hale S. E., Nicoll B. C. Biomass expansion factors and root: shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry.* 2004;77(5):421-30.
99. Liebig J. Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie. Braunschweig: Verlag Vieweg; 1840. In: Deutsches Textarchiv (<http://www.deutschestextarchiv.de/liebigagricultur840>).
100. Lieth H. Modeling the primary productivity of the world. In: H. Lieth, R. H. Whittaker (eds.). *Primary Productivity of the Biosphere.* New York: Springer-Verlag; 1975. P. 237-63.
101. Liu H, Wang H, Li N et al. Phenological mismatches between above- and belowground plant responses to climate warming. *Nat Clim Chang.* 2022;12:97-102.
102. Luo Y, Wang X, Zhang X et al. Root:shoot ratios across China's forests: forest type and climatic effects. *Forest Ecol. Manag.* 2012;269:19-25.
103. Mariën B, Ostonen I, Penanhoat A et al. On the below- and aboveground phenology in deciduous trees: observing the fine-root lifespan, turnover rate, and phenology of *Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L., and *Betula pendula* Roth for two growing seasons. *Forests.* 2021;12:Article 1680.
104. Mohan JE, Cox RM, Iverson LR. Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world. *Can J Forest Res.* 2009;39:213-30.
105. Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob Change Biol.* 2006;12:84-96.
106. Monk CD. Root-shoot dry weights in loblolly pine. *Bot Gaz.* 1966;127(4):246-48.
107. Monserud RA, Huang S, Yang Y. Biomass and biomass change in lodgepole pine stands in Alberta. *Tree Physiol.* 2006;26:819-831.
108. Montagnoli A, Chiatante D, Godbold DL et al. Editorial: Modulation of growth and development of tree roots in forest ecosystems. *Front Plant Sci.* 2022;13:Article 850163.
109. Morley JW, Batt RD, Pinsky ML. Marine assemblages respond rapidly to winter climate variability. *Glob Change Biol.* 2017;23:2590-601.
110. Murphy PG, Lugo AE. Structure and biomass of a subtropical dry forest in Puerto Rico. *Biotropica.* 1986;18:89-96.
111. Nadelhoffer KJ, Aber JD, Melillo JM. Fine roots, net primary production and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology.* 1985;66(4):1377-90.
112. Nihlgård B, Lindgren L. Plant biomass, primary production and bioelements of three mature beech forests in South Sweden. *Oikos.* 1977;28:95-104.
113. Niiyama K, Kajimoto T, Matsuura Y et al. Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *J Trop Ecol.* 2010;26:271-84.
114. Oleksyn J, Reich PB, Chalupka W, Tjoelker MG. Differential above- and belowground biomass accumulation of European *Pinus sylvestris* populations in a 12-year-old provenance experiment. *Scand J Forest Res.* 1999;14:7-17.
115. Overpeck J, Hughen K, Hardy D et al. Arctic environmental change of the last four centuries. *Science.* 1997; 278(5341):1251-6.
116. Parry M, Canziani O, Palutikof J et al. IPCC, 2007: Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge; 2007.
117. Reich PB, Luo Y, Bradford JB et al. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2014;111:13721-6.
118. Robinson D. Scaling the depths: belowground allocation in plants, forests and biomes. *Funct Ecol.* 2004;18:290-5.
119. Robinson D. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proc Roy Soc B.* 2007;274:2753-9.
120. Rogers AD, Frinault BAV, Barnes DKA et al. Antarctic Futures: An assessment of climate-driven changes in ecosystem structure, function, and service provisioning in the Southern Ocean. *Annu Rev Mar Sci* 2020;12(7):1-34.
121. Royer-Tardif S, Boisvert-Marsh L, Godbout J et al. Finding common ground: Toward comparable indicators of adaptive capacity of tree species to a changing climate. *Ecol Evol.* 2021;11(19):13081-100.
122. Russell MB, Domke GM, Woodall CW, D'Amato AW. Comparisons of allometric and climate-derived estimates of tree coarse root carbon stocks in forests of the United States. *Carbon Balance Manage.* 2015;10:Article 20.
123. Schenk HJ, Jackson RB. The global biogeography of roots. *Ecol Monogr.* 2002;72(3):311-28.
124. Schepaschenko D, Moltchanova E, Shvidenko A et al. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests.* 2018;9(6):Article 312.

125. Shelford VE. Animal Communities in Temperate America as Illustrated in the Chicago Region: A Study in Animal Ecology. Issue 5, Part 1. Pub. for the Geographic Society of Chicago by the University of Chicago Press; 1913.
126. Seidl R, Albrich K, Thom D, Rammer W. Harnessing landscape heterogeneity for managing future disturbance risks in forest ecosystems. *J Environ Manag.* 2018; 209:46-56.
127. Serreze M, Walsh J, Chapin FS et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim Change.* 2000;46:159-207.
128. Singh JS, Lauenroth WK, Hunt HW, Swift DM. Bias and random errors in estimators of net root production: A simulation approach. *Ecology.* 1984;65(6):1760-4.
129. Smucker AJM, Nunez-Barrios A, Richie JT. Root dynamics in drying soil environments. *Belowground Ecol.* 1991;2(1):4-5.
130. Solly EF, Djukic I, Moiseev PA et al. Treeline advances and associated shifts in the ground vegetation alter fine root dynamics and mycelia production in the South and Polar Urals. *Oecologia.* 2017;183:571-86.
131. Stegen JC, Swenson NG, Enquist BJ et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Glob Ecol Biogeogr.* 2011;20(5):744-54.
132. Stine AR. Global demonstration of local Liebig's law behavior for tree-ring reconstructions of climate. *Paleoceanogr Paleoclimatol.* 2019;34:203-16.
133. Świątek B, Woś B, Chodak M et al. Fine root biomass and the associated C and nutrient pool under the alder (*Alnus* spp.) plantings on reclaimed technosols. *Geoderma.* 2019;337:1021-7.
134. Tang X, Fan S, Qi L et al. Effects of understory removal on root production, turnover and total belowground carbon allocation in Moso bamboo forests. *iForest.* 2015;9:187-94.
135. Taylor WP. Significance of extreme or intermittent conditions in distribution of species and management of natural resources, with a restatement of Liebig's law of the minimum. *Ecology.* 1934;15:274-379.
136. Tranquillini W. Die Bedeutung des Lichtes und der Temperatur für die Kohlensäureassimilation von *Pinus cembra* – Jungwuchs an einem hochalpinen Standort. *Planta.* 1955;46(2):154-78.
137. Usoltsev VA. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: USFU; 2020. Available at: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx.
138. Usoltsev VA, Merganičová K, Konôpka B, Tsepordey IS. The principle of space-for-time substitution in predicting *Picea* spp. biomass change under climate shifts. *Cent Eur Forest J.* 2022;68(3):1-16.
139. Usoltsev V, Zukow W, Tsepordey I. Climatologically determined spatial and temporal changes in the biomass of *Pinus* sp. of Eurasia in the context of the law of the limiting factor. *Ecol Quest.* 2022;33(1):1-13.
140. Veloz S, Williams JW, Blois JL et al. No-analog climates and shifting realized niches during the late Quaternary: Implications for 21st-century predictions by species distribution models. *Glob Change Biol.* 2012;18(5):1698-713.
141. Vitousek PM, Sanford RL Jr. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annu Rev Ecol Syst.* 1986;17:137-67.
142. Vogt KA, Vogt DJ, Moore EE et al. Conifer and angiosperm fine-root biomass in relation to stand age and site productivity in Douglas-fir forests. *J Ecology.* 1987;75:857-70.
143. Vogt KA, Vogt DJ, Brown S et al. Dynamics of forest floor and soil organic matter accumulation in boreal, temperate and tropical forests. In: R. Lai, J. Kimble, E. Levine, Stewart BA. (eds.). *Soil Management and Greenhouse Effect.* Boca Raton, FL: CRC, Lewis Publishers; 1995. P. 159-78.
144. Wade AA, Hand BK, Kovach RP et al. Assessments of species' vulnerability to climate change: From pseudo to science. *Biodivers Conserv.* 2017; 26:223-9.
145. Wang JR, Zhong AL, Kimmins JP. Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper birch and trembling aspen. *North J Appl Forestry.* 2002;19(3):128-36.
146. Wang W, Zu Y, Wang H et al. Plant biomass and productivity of *Larix gmelinii* forest ecosystems in northeast China: intra- and inter-species comparison. *Euras J Forest Res.* 2005;8(1):21-41.
147. Wang X, Fang J, Zhu B. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China. *Forest Ecol Manage.* 2008;255(12):4007-20.
148. Waring RH, Schlesinger WH. *Forest Ecosystems: Concepts and Management.* New York: Academic Press; 1985.
149. Whittaker RH, Marks PL. Methods of assessing terrestrial productivity. In: Lieth H, Whittaker RH. (eds.). *Primary Productivity of the Biosphere.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1975:55-118.
150. Wirth C, Schumacher J, Schulze E-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward

- prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.* 2004;24:121-39.
151. World Weather Maps; 2007. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>.
152. Xiong F, Nie X, Yang L et al. Biomass partitioning pattern of *Rheum tanguticum* on the Qinghai-Tibet Plateau was affected by water-related factors. *Plant Ecol.* 2021;222:499-509.
153. Xu G-Q, Yu D-D, Li Y. Patterns of biomass allocation in *Haloxylon persicum* woodlands and their understory herbaceous layer along a groundwater depth gradient. *Forest Ecol Manag.* 2017;395:37-47.
154. Yuen JQ, Ziegler AD, Webb EL, Ryan CM. Uncertainty in below-ground carbon biomass for major land covers in Southeast Asia. *Forest Ecol Manag.* 2013;310:915-26.
155. Zerihun A, Montagu KD, Hoffmann MB, Bray SG. Patterns of below- and aboveground biomass in *Eucalyptus populnea* woodland communities of northeast Australia along a rainfall gradient. *Ecosystems.* 2006;9:501-15.



ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА, НЕГАТИВНО ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ХВОЙНЫХ РАСТЕНИЙ К ВРЕДИТЕЛЯМ И АФИЛЛОФОРОВЫМ ГРИБАМ¹

С.Э. Некляев*, Л.Г. Серая, Г.Е. Ларина

ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Большие Вяземы, Россия

* Эл. почта: slava9167748107@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; принята к печати 22.11.2022

Устойчивость древесных растений к вредителям и стволовым гнилям снижается по мере изменений климата повсеместно, включая нечерноземную зону России. Рост площадей ослабленных хвойных лесов и площадей буреломов является сигналом усиления негативного влияния абиотических факторов и фитопатогенов. Приоритетная роль в декомпозиции древесного субстрата принадлежит афиллофоровым грибам. Подготовительная или нулевая стадия ксилотиза протекает в пределах одного вегетационного сезона или его части и не влияет на изменения в характеристиках древесины. Первая стадия проходит за 1–2 года, приводя к образованию кольца деревоокрашивающих грибов. На второй стадии становятся заметны результаты окисления среды афиллофоровыми грибами, образуется покраснение древесины. Стадия длится от 2 до 3 лет. Третья стадия, период активного роста мицелия, приводит к образованию пятен бурой гнили и длится от 4 до 6 лет. На четвертой стадии мицелий осваивает до 70% субстрата до размягчения гнили, этот процесс занимает от 4 до 8 лет. Сроки завершающих стадий разрушения древесины продолжительные – от 10 до 60 лет. Эти стадии характеризуются почти полной утратой структуры древесины и могут быть выделены по глубине вовлечения продуктов распада в циклы минерального и органического питания насаждения. Смена сукцессий грибов и мезофауны протекает в условиях последовательной смены сапроксийных организмов в ходе изменения качественных характеристик субстрата. В ходе изучения модельных деревьев была выявлена зависимость между перфорацией древесины и развитием плодовых тел. С учетом особенностей физиологии афиллофоровых грибов можно полагать, что развитие плодовых тел начинается при глубоком освоении субстрата, достаточном для формирования вторичного вегетативного мицелия.

Ключевые слова: фитопатоген, ксилотиз, афиллофоровые грибы, хвойные растения.

THE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF CURRENT CLIMATE CHANGES THAT NEGATIVELY AFFECT THE RESISTANCE OF CONIFEROUS PLANTS TO PESTS AND APHYLLOPHORALES FUNGI

S.E. Nekliayev*, L.G. Seraya, G.Ye. Larina

All-Russian Research Institute of Phytopathology, Bolshie Vyazemy, Russian Federation

* Email: slava9167748107@yandex.ru

The resistance of woody plants to pests and stem rot is reduced in the Non-Chernozem zone of Russia. The spread of areas where coniferous forests are compromised and of windbreak areas is a signal of an increase in the negative impact of abiotic factors and phytopathogens. The primary role in the decomposition of the woody substrate belongs to Aphyllophorales fungi. The zero stage of xylolysis occurs within one growing season or a part of it and does not affect the characteristics of wood. The first stage takes 1–2 years and leads to the formation of a ring of wood-staining fungi. At the second stage, the results of oxidation of wood milieu by Aphyllophorales fungi become noticeable, and wood becomes reddened. This stage lasts from 2 to 3 years. The third stage, the period of an active growth of mycelium, which lasts from 4 to 6 years, is associated with the formation of brown rot spots. At the fourth stage, mycelium metabolizes up to 70% of the substrate until rot softens. This process takes from 4 to 8 years. The final stages of wood destruction last long, from 10 to 60 years, and result in an almost complete loss of wood structure. The succession of fungi and mesofauna is associated with an alternation of saproxylic organisms in the course of changes in the qualitative characteristics of their substrate. During our study of model trees, a relationship was found between wood perforation and fruiting bodies development. With account of the specific physiological characteristics of Aphyllophorales fungi, one may conclude that the development of fruiting bodies begins upon a high level of substrate degradation sufficient for the formation of a secondary vegetative mycelium.

Keywords: phytopathogen, xylolysis, Aphyllophorales fungi, conifers

¹ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3–6 октября 2022 года.

Введение

В таежной и лесостепной природной зоне защитные лесные насаждения играют важную роль в сохранении урожайности агротерриторий. Экологические связи между полезащитными насаждениями, лесными растениями в массивах и сапроксильными организмами могут нарушаться в условиях усиления аридизации климата в нечерноземной зоне Европейской части России. Усиливаются процессы ксилолиза древесины, которые также являются и частью единого процесса кругооборота веществ в природе.

Ход ксилолиза как освоение питательного субстрата сапроксильными организмами определяется особенностями строения древесины различных пород: ядровая, спелодревесная и заболонная [1, 2]. Клеточное строение определяет путь разрушения древесины. Ядровая древесина (дуб, ясень, платан, сосна, лиственница, кедр, яблоня, вишня, слива, абрикос и др.) разрушается по коррозионному типу; спелодревесная древесина (ель, пихта, осина, бук, груша и др.) – по деструктивному типу; заболонная древесина (береза, клен, ольха, липа) – по коррозионно-деструктивному типу.

В целом скорость протекания ксилолиза может быть разной в зависимости от положения ствола над землей и изменяться от вершины к комлевой части. В процессе ксилолиза формируются комплексы сапроксильных насекомых и приуроченных к ним ксилотрофов, формирующих сукцессии. Процесс естественного разрушения древесины объединяет в себе две линии декомпозиции древесного вещества: микогенную деструкцию древесины под воздействием ксилотрофов

и механическое разрушение структуры древесного вещества в ходе жизнедеятельности ксилобионтов [1, 3].

Имеющиеся в настоящее время подходы к изучению разрушения древесины не отражают многофакторный процесс биодеструкции, происходящей под воздействием сапроксильных организмов, в связи с чем целью исследования стало изучение экологических связей между сапроксильными организмами и хвойными растениями в процессе ксилолиза при разрушении полезащитных насаждений в условиях усиления аридизации климата в нечерноземной зоне европейской части России.

Современные аспекты теории ксилолиза (деструкции) древесины

Ферментативная деструкция древесины происходит под воздействием дереворазрушающих грибов, а механическая декомпозиция древесины – результат жизнедеятельности ксило- и сапротрофных насекомых. Смену сукцессий ксилолиза можно проследить по изменению поселения доминантных видов на субстрате и по характеру их воздействия на древесину. Для грибов это процесс более медленный и зависит от специфики физиологической активности разных видов. Грибы являются ведущими организмами, разрушающими древесину, как в процессе борьбы за освоение субстрата, так и при неконкурентном его освоении. Процесс разрушения древесины стволов хвойных пород под влиянием комплекса дереворазрушающих грибов и комплекса ксилобионтов в сочетании с абиотическими факторами, влияющими на жизнедеятельность сапроксильных организмов, приведен на рис. 1.

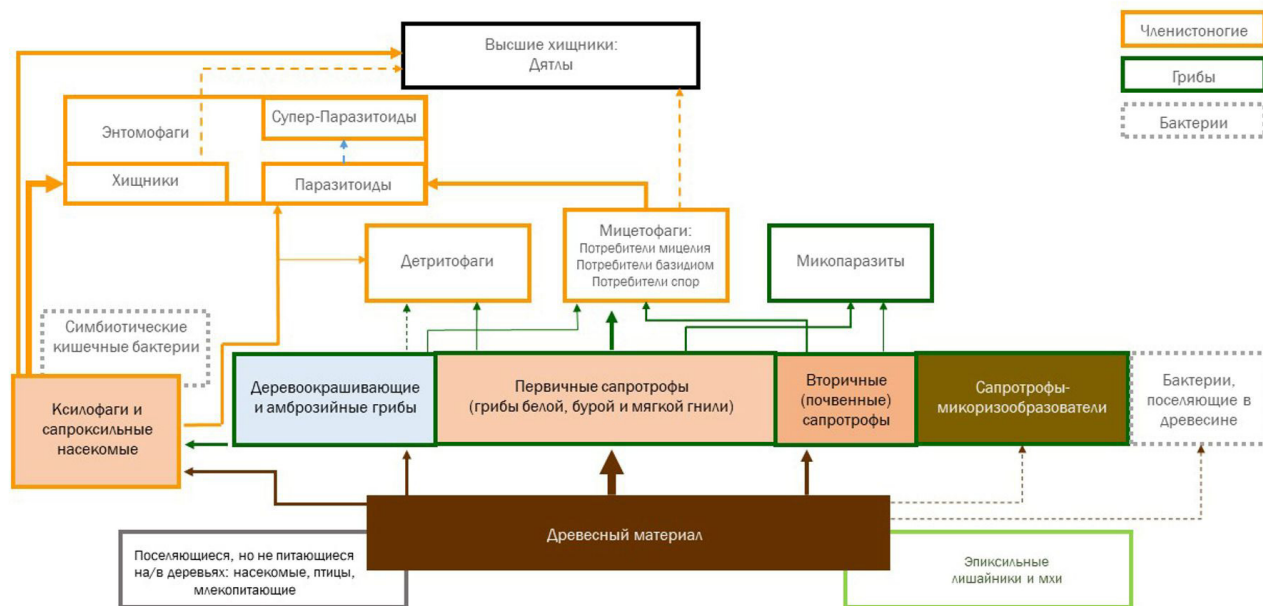


Рис. 1. Сапроксильная пищевая сеть в рамках консортной ассоциации древесных растений: стрелки указывают основные потоки питания и энергии, толщина стрелок указывает на величину этого пути [4]

В ксилотрофии хвойных пород можно выделить семь сукцессионных стадий. Начальная, или *нулевая, стадия* характеризуется необратимым ослаблением дерева и началом его усыхания, когда помимо уже паразитирующих на дереве грибов под кору вместе с массовым поселением короедов массово проникают споры деревоокрашивающих грибов.

На *1-й стадии* происходит развитие деревоокрашивающих грибов в ходах короедов. В период развития имаго ходы заполняются плодовыми телами, и идет активная споруляция, что обеспечивает распространение спор на другой свежий субстрат, так как легкодоступные простые сахара оказываются потребленными деревоокрашивающими грибами. Происходит переход биотрофов от паразитизма к сапротрофному типу питания. В середине вегетационного сезона нетронутую гнилью древесину заселяют настоящие ксилофаги, главными из которых являются представители семейства усачей. Вместе с ними проникают споры афиллофоровых сапрофитных грибов. Споры прорастают в личиночных ходах. Формируется первичный мицелий, начинается окисление среды.

На *2-й стадии* происходит активное развитие вторичного вегетативного мицелия базидиомицетами, вызывающими красную гниль в заболони. Этому способствует вылет усачей и рогахвостов, а по их ходам внутрь древесины поступают свободная вода и кислород. Важную роль в развитии грибов играет вторичное увлажнение древесины с множественной перфорацией древесины техническими вредителями: усачами и точильщиками.

На *3-й стадии* происходит проникновение мицелия в глубокие слои древесины вплоть до центра ствола. Вегетативное тело представлено мицелярными тяжами и пленками, формируются плодовые тела. В древесине образуются участки бурой сухой твердой гнили, заселяемые муравьями и личинками лептур. Насекомые рыхлят гниль, что еще больше усиливает приток кислорода к мицелию.

4-я стадия ксилотрофии характеризуется активным плодоношением афиллофоровых грибов. В древесине более 75% занимает бурая сухая мягкая гниль. В разрушенной грибами и насекомыми древесине поселяются сапро-ксило-мицетофаги, в частности семейств Lucanidae и Scarabaeidae. Виды насекомых этой группы специализированы на обитании в определенных типах гнили.

На *5-й стадии* ксилотрофия древесины переходит к загниванию, разрушенная древесина представлена мягкой влажной гнилью с участками твердой гнили. В субстрат проникают почвенные сапрофиты, развивая мицелий, что стимулирует процесс гумификации. Также поселяются агариковые базидиомицеты.

На *6-й стадии* развивается минерализация неразлагаемого лигнинсодержащего детрита, идентифици-

руемого по наличию бесструктурной бурой влажной мягкой гнили. При этом переход от стадии к стадии очень плавный, зачастую они совмещаются на одном дереве. Вместе с этим процесс деструкции постепенно поглощает всю омертвевшую массу древесины. В таком субстрате массово встречаются кивсяки, дождевые черви и мокрицы.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в период с 2013 по 2021 год на территории Московской области как уникального региона, включающего все типы лесорастительного районирования нечерноземной зоны. Для изучения процесса биодеструкции было проведено исследование 237 модельных деревьев в зонах южной тайги, хвойно-широколиственных лесов и лесостепи в насаждениях, выполняющих функции защиты агроценозов от неблагоприятных погодных факторов.

Для каждого модельного дерева производили замеры длины ствола, высоты остолопа или пня для буреломных экземпляров, проводили замер диаметра ствола на уровне 1,3 м от шейки корня, замеры влажности древесины, температуры ствола, индекса состояния древесины (ГОСТ 18610-82).

Для выявления сапроксильных зоодеструкторов с модельного дерева отбирали палетки и образцы на уровне 1, 3, 6, 12, 18, 24 м. На каждом из уровней производили учет всех повреждений, нанесенных сапроксильными организмами. Шаг закладки обусловлен дальнейшим отбором контрольных отрубков с этих участков для определения стадии разложения древесины. Дату образования ветровалов и буреломов устанавливали на основе данных учета лесосечного фонда по лесничествам Московской области. Точность определения времени, прошедшего с момента отпада дерева, составляла в среднем 3 месяца.

В отобранных образцах измеряли объем гнили. Объем образцов определяли геометрически с использованием формул усеченного конуса и параллелепипеда. Сильно разложившиеся фракции отбирали при помощи почвенного бура. Для сильно разложившихся образцов брали объем, равный объему бура. С модельных деревьев получили 1201 палетку для определения ксило- и сапротрофов, 2633 образца для определения стадии и типа разложения, а также пространственной геометрии ходов, взяли 924 зерна для определения структуры гнили.

Стадии разложения и фрагментации коры стволов оценивали по всей длине каждого модельного дерева. Проводили визуальную диагностику процента сохранившейся коры от видимой поверхности ствола и площадь покрытия модельного дерева синузиями мхов и лишайников.

Были отобраны с модельных деревьев базидиомы ксилотрофных базидиомицетов (всего собрали и определи-

ли 3512 базидиом) и проведена идентификация видовой принадлежности по морфологическому строению с использованием определителей [5, 6]. Терминология по микромицетам приведена в соответствии с *Index Fungorum* (<http://www.indexfungorum.org>). С модельных деревьев собрали 3465 личинок и 693 имаго сапроксильных насекомых. Определение видовой принадлежности производили по морфологическому строению с использованием специализированных определителей.

Статистическую обработку результатов проводили в программном пакете MS Excel с применением описательной статистики (среднее и стандартное отклонение) и корреляционного (КК – коэффициент корреляции) и регрессионного анализа. Значимыми считали результаты при $P < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Анализ климатических изменений в 2010–2021 годах показал, в частности, что сумма осадков за последние годы в среднем составляла $717,5 \pm 145,4$ мм (за период 2000–2009 годов $-726,9 \pm 97,3$ мм) при среднемноголетних 679 мм. Говорить об устойчивом поступлении атмосферной влаги мы не можем, но в отдельные годы (2010, 2018–2021) дефицит осадков составил 30–198 мм, что существенно нарушает физиологическую устойчивость древесных растений к негативным абиотическим факторам и воздействию патогенных организмов (рис. 2). Максимальная скорость ветра, или ветровая нагрузка, в 2010–2021 годах колебалась от 17 до 28 м/с и в среднем составила

$21,3 \pm 3,2$ м/с (в 2000–2009 годах – $19,8 \pm 3,5$ м/с) при среднемноголетнем значении 17 м/с.

Суммарное накопление разрушенных насаждений под воздействием ветровалов/буреломов увеличилось за 2010–2021 годы с 3198 до 78501 га. Динамика увеличения площадей (S, га) поврежденных и погибших лесных насаждений описывается линейным уравнением: $S = 897,4T + 709,5$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0,74$), где T – время, годы. В среднем в 2010–2021 годах прирост площадей ветровалов/буреломов составлял 860,4 га в год.

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о сильной связи между дефицитом атмосферной влаги и увеличением площадей ветровалов/буреломов в лесных насаждениях (КК = 0,63), выполняющих в Центральном регионе основные защитные функции агротерриторий. Не установлено влияние шквальных ветров на формирование ветровалов (КК = 0,14). Поэтому актуально и важно рассмотрение вопроса ксиллолиза – комплексной динамической системы разрушения древесины под действием сапроксильных организмов, ассоциированными с древесиной как питательным субстратом.

Многолетние исследования модельных хвойных деревьев в условиях Московской области показали, что для сосны и ели средняя влажность была сопоставима (27–32%). Объем гнили и наличие плодовых тел афиллофоровых грибов были выше у модельных деревьев сосны при сравнении с модельными деревьями ели (табл. 1).

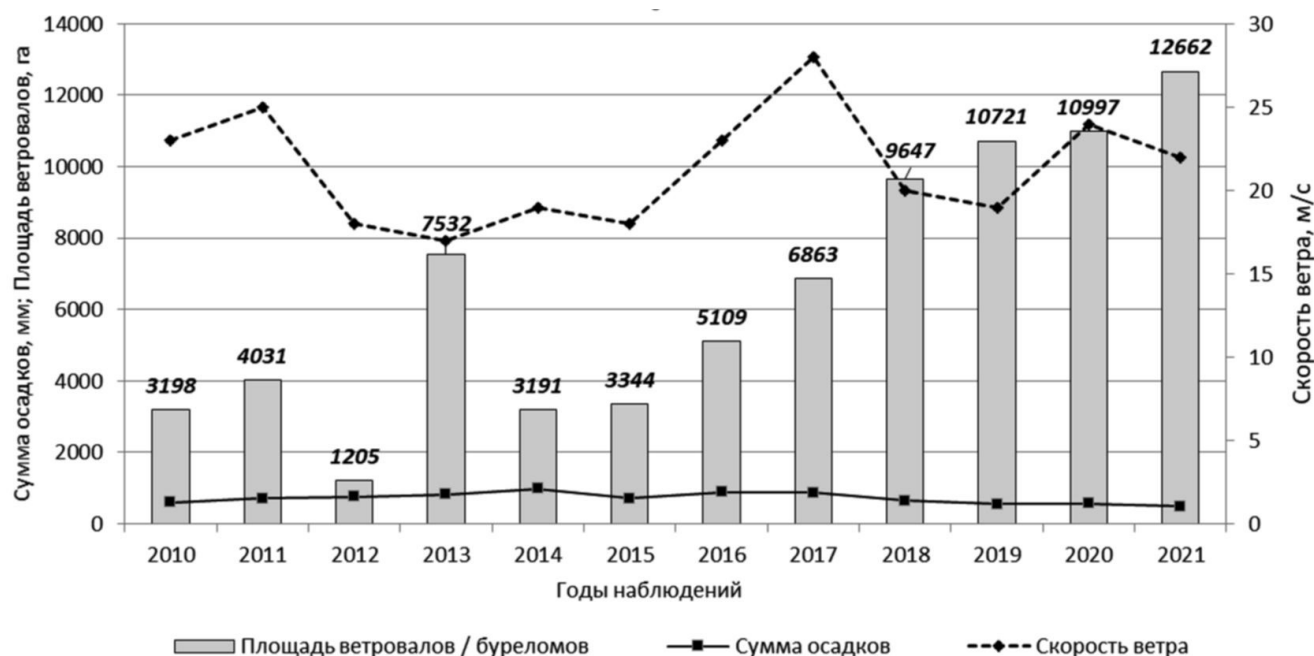


Рис. 2. Динамика площадей ветровалов/буреломов в лесах Московской области за 2010–2021 годы. (По данным Государственного лесопатологического мониторинга, оператор ФБУ «Рослесозащита» – <https://rcfh.ru>)

Характеристика повреждений хвойных растений, нанесенных сапротрофными грибами и ксилотрофными базидиомицетами

Название породы (выборка)	Параметр	Доля гнили, %	Влажность древесины, %	Плодовые тела афиллофоровых грибов, шт. на модельный отруб	Ходы вредителей, шт. на модельный отруб
Сосна (n = 92)	Среднее	26,8	32,4	15,1	11,5*
	ST	23,1	21,0	22,8	9,8
Ель (n = 64)	Среднее	20,7	27,7	9,8	15,6**
	ST	17,8	16,3	21,2	14,1

Примечания.

* Cerambycidae, Buprestidae, Siricidae.

** *Monochamus*, Siricidae.

Результаты статистического анализа свидетельствуют о неоднородности группировки основных параметров и характеризуют протекание фитопатогенного типа ксилотрофии не далее 2-й стадии разложения древесного вещества (рис. 3).

На второй стадии облигатные паразиты или завершают свой жизненный цикл, или переходят к существованию в качестве факультативных сапротрофов. Сапротрофный тип разложения может быть определен не ранее перехода древесины ствола ели на 2-ю стадию разложения, так как в этот период происходит активное заселение афиллофоровыми грибами из родов *Fomitopsis*, *Stereum*, *Trametes*, *Trichaptum*, *Phellinus*, *Onnia*, *Postia*, *Gloeophyllum* (табл. 2). Данные виды сохраняют доминирование со 2-й до 4-й фазы разложения, и переход от стадии к стадии возможно проследить по освоению ими субстрата. Вместе с тем уровни развития мицелия в тканях древесины различаются по развитию гнили: на 2-й стадии активно развитие красной гнили в древесине с сохранением ее физико-химических свойств, на 3-й стадии формируется бурая сухая твердая гниль, на 4-й стадии – мягкая бурая гниль, на 4-й и 5-й стадиях доминируют подстилочные сапрофиты из родов *Oligoporus*, *Antrodia*, *Rhodonina*, *Coriolellus*, *Junghuhnia*.

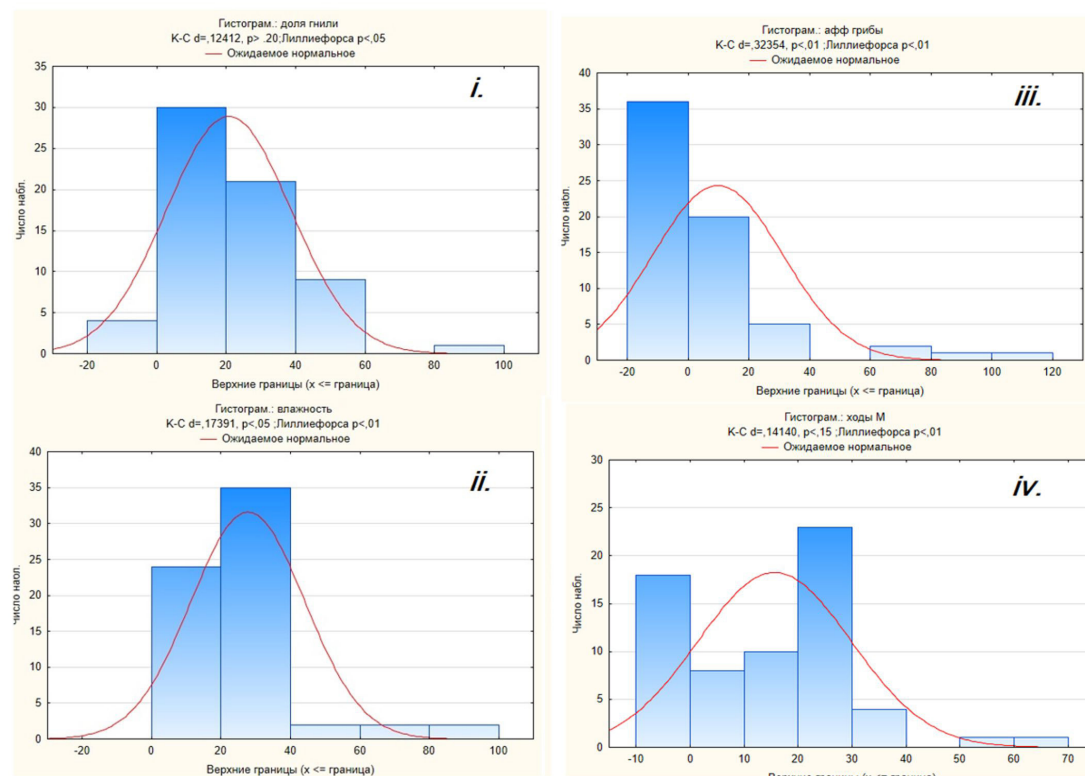
Успешность освоения субстрата зависит от интенсивности жизнедеятельности сапротрофных беспозвоночных, которые последовательно заселяют субстрат, образуя сукцессии (табл. 3). На стадии 1 зоодеструкции доминирует подсемейство Scolytinae, представитель родов *Buprestis* семейства Buprestidae и *Pissodes* (триба Pissodini), которых на стадии 2 последовательно сменяют представители семейств Siricidae и Cerambycidae из родов *Monochamus*, *Tetropium*, *Spondylis*, *Arhopalus*, *Asemum*, которые также потребляют живую древесину. В стадии 3 ведущая роль переходит к семейству Anobiidae и представителям семейства Cerambycidae (триба Hylotrupini и Callidiini), предпочитающим мертвую твердую дре-

весину, а также представителям рода *Formica*. На стадии 4 древесину массово осваивают представители родов *Anoplodera*, *Oxymirus* (подсемейство Lepturinae) и *Ampedus* (подсемейство Elateridae). Под оставшимися участками коры на стадиях 3–4 часто встречаются представители семейства Trogossitidae из рода *Peltis*. На стадии 5 встречаются единично представители семейства Elateridae, но только при сохранении незначительной части древесного вещества. На стадии 6 отмечено массовое присутствие червей и кивсяков.

В процессе ксилотрофии ели влажность древесины на первых стадиях падает, что отражает снижение поступления воды от корневой системы в ходе усыхания растения. Рост влажности наблюдается с началом заселения древесины личинками усачей и рогахвостов. На стадии 1 поселение короедов обеспечивает освоение верхних слоев заболони деревоокрашивающими грибами, которые активно осваивают простые сахара в клетках последних годовичных слоев. Из-за этого прорастание спор и образование первичного мицелия основными грибами, образующими гниль, возможно только во втором вегетативном сезоне после падения дерева. Вылет насекомых создает условия для благополучного прорастания спор. Однако образования вторичного мицелия возможно только после достаточного окисления древесины и достижения ее влажности 10–12%.

Афиллофоровые грибы последовательно осваивают субстрат, образуя между рядами годовичных слоев пленочный мицелий. Достигнув предела, ограниченного поступлением воды и кислорода, гриб, преодолев бактериальное кольцо поверхностных слоев древесины, формирует начальное плодовое тело и начинает споруляцию. Сам же процесс плодоношения требует значительного расхода питательных веществ и энергии, что косвенно подтверждает увеличение влажности субстрата (древесины) в результате метаболизма глюкозы как основной составляющей целлюлозы. На границе роста мицелия (или непосредственного по-

Ель обыкновенная (*Picea abies*) .



Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*)

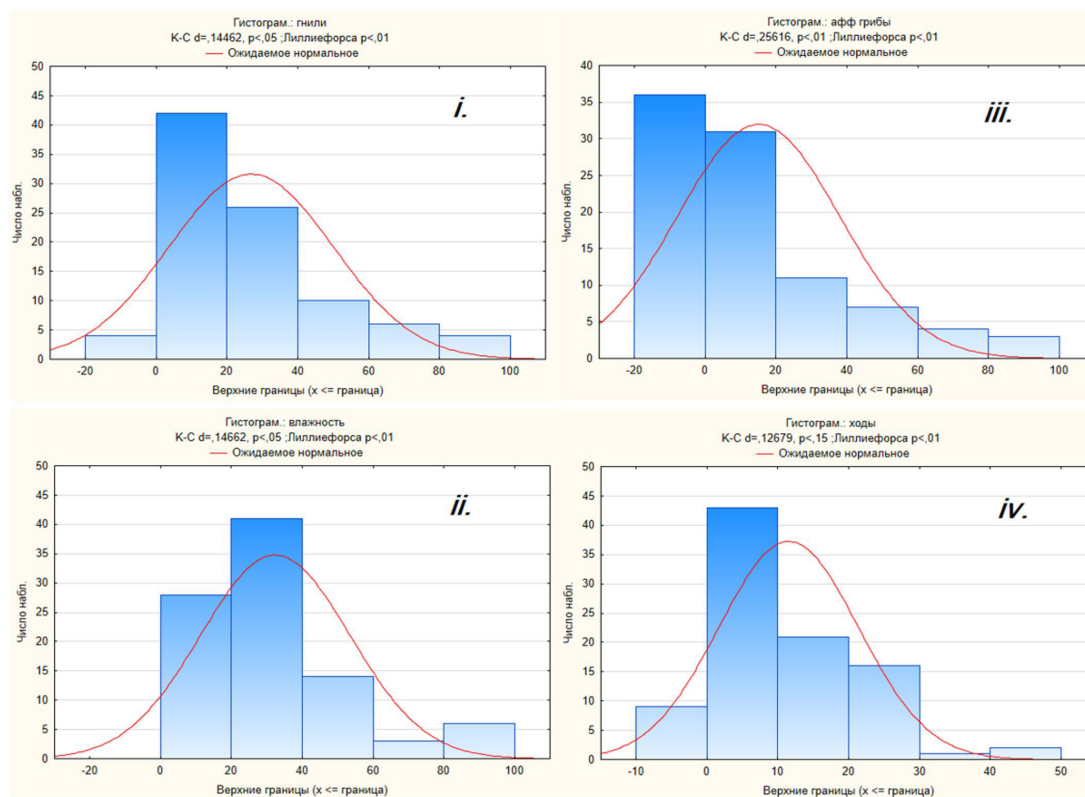


Рис. 3. Гистограммы параметров ксилотолиза древесины ($P < 0,01$): i – доля гнили, %; ii - плодовые тела афиллофоровых грибов; iii – ходы вредителей; iv – влажность древесины, %

Ведущие декомпозиторы древесины хвойных пород по стадиям ксилोलиза

Стадия	Ель <i>Picea abies</i>		Сосна <i>Pinus sylvestris</i>	
1	<p>Биотрофы: <i>Heterobasidion parviporum</i>, <i>Phellinus chrysoloma</i>, <i>Porodaedalea pini</i> [=Phellinus pini], <i>Phaeolus schweinitzii</i>, <i>Armillaria mellea</i></p>	<p>Рода: <i>Ceratocystis</i> [=Ophiostoma], <i>Rosellinia</i>, <i>Penicillium</i>, <i>Leptographium</i>, <i>Phialophora</i>, <i>Cladosporium</i></p>	<p>Биотрофы: <i>Armillaria mellea</i>, <i>Heterobasidion annosum</i>, <i>Phaeolus schweinitzii</i>, <i>Porodaedalea pini</i> [=Phellinus pini]</p>	<p>Рода: <i>Ceratocystis</i> [=Ophiostoma], <i>Rosellinia</i>, <i>Penicillium</i>, <i>Leptographium</i>, <i>Phialophora</i>, <i>Cladosporium</i></p>
2	<p><i>Fomitopsis pinicola</i>, <i>Rhodofomes roseus</i> [=Fomitopsis rosea], <i>Gloeophyllum sepiarium</i>, <i>Trametes hirsuta</i>, <i>Trametes versicolor</i>, <i>Trichaptum abietinum</i></p>		<p><i>Schizophyllum commune</i>, <i>Stereum sanguinolentum</i>, <i>Trichaptum abietinum</i>, <i>Trichaptum fuscoviolaceum</i>, <i>Gloeophyllum sepiarium</i>, <i>Ischnoderma benzoinum</i>, <i>Phlebiopsis gigantea</i>, <i>Phellinus viticola</i>, <i>Neoantrodia serialis</i> [=Antrodia serialis], <i>Fuscopostia fragilis</i> [=Postia fragilis], <i>Butyrea luteoalba</i> [=Junghuhnia luteoalba], <i>Rigidoporus crocatus</i>, <i>Incrustoporia biguttulata</i> [=Skeletocutis biguttulata]</p>	
3	<p><i>Fomitopsis pinicola</i>, <i>Rhodofomes roseus</i> [=Fomitopsis rosea], <i>Gloeophyllum sepiarium</i>, <i>Gloeophyllum abietinum</i>, <i>Trametes hirsuta</i>, <i>Trametes versicolor</i>, <i>Trichaptum abietinum</i>, <i>Pycnoporellus fulgens</i></p>		<p><i>Fomitopsis pinicola</i>, <i>Rhodofomes roseus</i> [=Fomitopsis rosea], <i>Gloeophyllum odoratum</i>, <i>Gloeophyllum protractum</i>, <i>Gloeophyllum sepiarium</i>, <i>Gloeoporus taxicola</i>, <i>Schizophyllum commune</i>, <i>Stereum sanguinolentum</i>, <i>Trichaptum abietinum</i>, <i>Trichaptum fuscoviolaceum</i>, <i>Ischnoderma benzoinum</i>, <i>Phlebiopsis gigantea</i>, <i>Phellinus viticola</i>, <i>Neoantrodia serialis</i> [=Antrodia serialis], <i>Fuscopostia fragilis</i> [=Postia fragilis], <i>Butyrea luteoalba</i> [=Junghuhnia luteoalba], <i>Rigidoporus crocatus</i>, <i>Skeletocutis biguttulata</i></p>	
4	<p><i>Rhodofomes roseus</i> [=Fomitopsis rosea], <i>Trichaptum fuscoviolaceum</i>, <i>Trichaptum abietinum</i>, <i>Neoantrodia serialis</i> [=Antrodia serialis], <i>Phellopilus nigrolimitatus</i> [=Phellinus nigrolimitatus], <i>Xeromphalina campanella</i></p>		<p><i>Rhodofomes roseus</i> [=Fomitopsis rosea], <i>Dichomitus squalens</i> [=Coriolellus squalens], <i>Butyrea luteoalba</i> [=Junghuhnia luteoalba], <i>Leucogyrophana mollusca</i>, <i>Phellopilus nigrolimitatus</i> [=Phellinus nigrolimitatus], <i>Rhodonina placenta</i>, <i>Rhodonina placenta</i>, <i>Tricholomopsis rutilans</i>, <i>Xeromphalina campanella</i>, <i>Neoantrodia serialis</i> [=Antrodia serialis], <i>Fuscopostia fragilis</i> [=Postia fragilis], <i>Rigidoporus crocatus</i>, <i>Incrustoporia biguttulata</i> [=Skeletocutis biguttulata]</p>	
5–6	<p><i>Postia</i> [=Oligoporus], <i>Climacocystis borealis</i>, <i>Neoantrodia serialis</i> [=Antrodia serialis], <i>Phellopilus nigrolimitatus</i> [=Phellinus nigrolimitatus], <i>Lycogala epidendrum</i>, <i>Xeromphalina campanella</i></p>		<p><i>Lycoperdon perlatum</i>, <i>Tricholomopsis rutilans</i>, <i>Xeromphalina campanella</i>, <i>Mycena polygramma</i>, <i>Rhodonina placenta</i>, <i>Pholiota mixta</i></p>	



Ведущие деструкторы древесины хвойных пород по стадиям ксилолиза

Стадия	Ель <i>Picea abies</i>	Сосна <i>Pinus sylvestris</i>
1	<i>Ips typographus</i> , <i>Polygraphus polygraphus</i> , <i>Trypodendron lineatum</i> , <i>Monochamus sutor</i> , <i>Monochamus urussovii</i> , <i>Callidium aeneum</i> , <i>Tetropium castaneum</i> , <i>Anthaxia quadripunctata</i> , <i>Hylobius abietis</i>	<i>Tomicus minor</i> , <i>Tomicus piniperda</i> , <i>Ips acuminatus</i> , <i>Ips sexdentatus</i> , <i>Ips acuminatus</i> , <i>Hylurgops palliates</i> , <i>Phaenops cyanea</i> , <i>Anthaxia quadripunctata</i> , <i>Melanophila acuminata</i> , <i>Buprestis rustica</i> , <i>Rhagium inguisitor</i> , <i>Monochamus galloprovincialis</i> , <i>Tetropium castaneum</i> , <i>Monochamus urussovii</i> , <i>Monochamus sutor</i> <i>Acanthocinus aedilis</i> , <i>Pissodes pini</i> , <i>Pissodes piniphilus</i> , <i>Hylobius abietis</i>
2	<i>Monochamus sutor</i> , <i>Monochamus urussovii</i> , <i>Callidium violaceum</i> , <i>Tetropium castaneum</i> , <i>Rhagium inquisitor</i> , <i>Sirex gigas</i>	<i>Trypodendron lineatum</i> , <i>Spondylis buprestoides</i> , <i>Arhopalus rusticus</i> , <i>Monochamus urussovii</i> , <i>Monochamus galloprovincialis</i> , <i>Monochamus sutor</i> , <i>Paururus juvenecus</i>
3	<i>Anobium punctatum</i> , <i>Hylotrupes bajulus</i> , <i>Oxymirus cursor</i> , <i>Stictoleptura rubra</i> , <i>Peltis grossa</i> , <i>Peltis ferruginea</i> , <i>Ostoma ferruginea</i> , <i>Serviformica fusca</i>	<i>Chalcophora mariana</i> , <i>Spondylis buprestoides</i> , <i>Callidium violaceum</i> , <i>Arhopalus rusticus</i> , <i>Hylotrupes bajulus</i> , <i>Pyrrhidium sanguineum</i> , <i>Pachyta quadrimaculata</i> , <i>Leptura quadrifasciata</i> , <i>Anobium punctatum</i> , <i>Serviformica fusca</i>
4	<i>Ampedus pomonae</i> , <i>Ampedus pomorum</i> , <i>Ampedus balteatus</i> , <i>Ampedus sanguineus</i> , <i>Oxymirus cursor</i> , <i>Stictoleptura rubra</i> , <i>Pyrrhidium sanguineum</i> , <i>Peltis grossa</i> , <i>Peltis ferruginea</i> , <i>Ostoma ferruginea</i> , <i>Ceruchus chrysomelinus</i>	<i>Oxymirus cursor</i> , <i>Stictoleptura rubra</i> , <i>Anoplodera sanguinolenta</i> , <i>Pyrrhidium sanguineum</i> , <i>Leptura mimica</i> , <i>Ampedus sanguineus</i> , <i>Ampedus pomonae</i> , <i>Ampedus balteaus</i> , <i>Ostoma ferruginea</i> <i>Ceruchus chrysomelinus</i>
5-6	Мезофауна: кивсяки, дождевые черви, мокрицы	

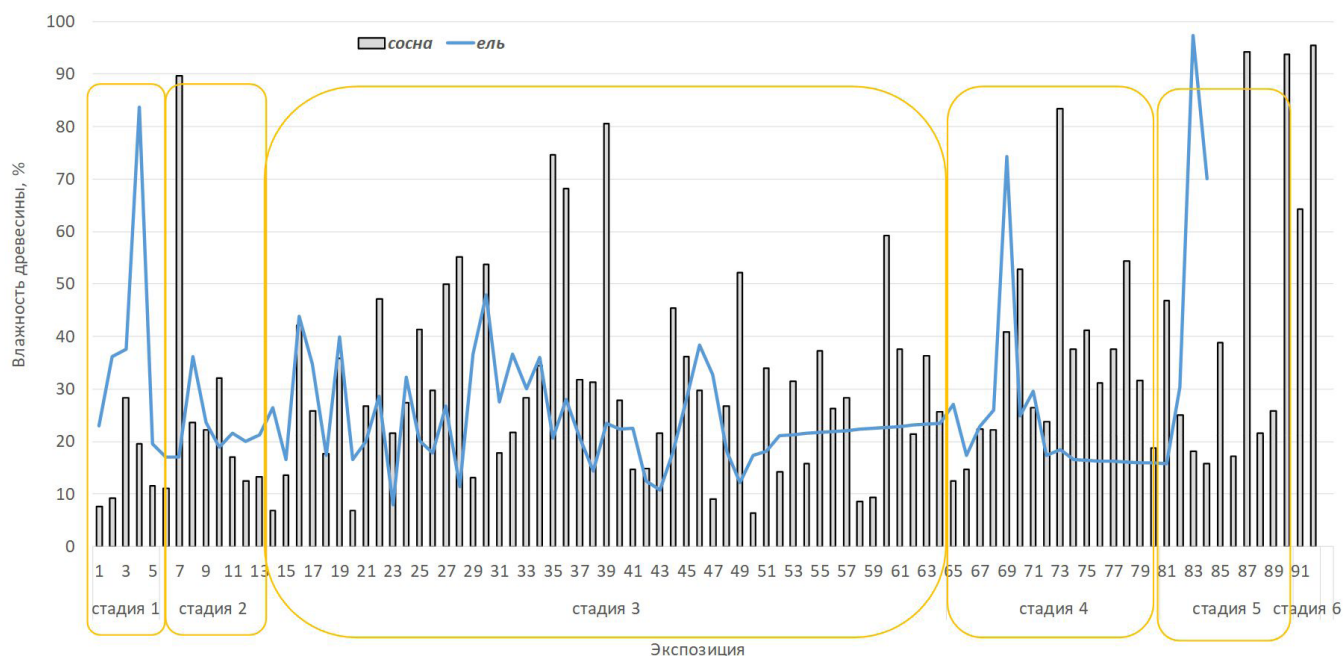


Рис. 4. Динамика влажности субстрата хвойных растений при ксилолизе древесины

требления грибом целлюлозы) влажность достигает 46–99%, постепенно уменьшаясь к внешней поверхности ствола. Данная физиологическая зависимость хорошо прослеживается на стадиях 3–4. После полного освоения субстрата плодоношение заканчивается. Субстрат при этом осваивают почвенные сапротрофы, которые лучше приспособлены к измененной афиллофоровыми грибами среде.

В ядровой древесине сосны влажность нарастает по иной кривой (рис. 4). Ткани ядра являются местом накопления запасных питательных веществ в форме смол и других сложных веществ. На начальном этапе ксилолиза верхние слои заболони подвергаются поверхностному повреждению короедами, долгоносиками и златками, а также неглубокой перфорации усачами. При этом развитие афиллофоровых грибов начинается во второй половине вегетационного сезона по причине преодоления кольца деревоокрашивающих грибов. Их развитие не всегда охватывает всю поверхность ствола, как это бывает у ели. В местах поселения *Rhagium inguisitor* субстрат активно осваивают *Stereum sanguinolentum*, *Trichaptum abietinum*, *Trichaptum fuscoviolaceum*, гниль от которых развивается по коррозийному типу. При этом активное плодоношение, как и увлажнение древесины, происходит на стадии 3 и снижается к стадии 4, когда идет активное отмирание плодовых тел. Далее влажность снова нарастает под воздействием грибов из родов *Rhodonia*, *Antrodia*, *Postia*, которые активно осваивают субстрат древесины после ее соприкосновения с землей и разрушения сучьев 1-го порядка.

Выводы

Устойчивость древесных растений к вредителям и стволовым гнилям снижается по мере изменений климата, в том числе и в Нечерноземной зоне России. Процессы ксилолиза древесины характеризуют единый биологический процесс, представленный динамической многофакторной циклической системой с неравномерным хронологическим ходом взаимодействия организмов, в результате жизнедеятельности которых происходит преобразование биологических

полимеров древесины в комплекс веществ, пригодных для последующего вовлечения в биогеоценоз. Но рост площадей ослабленных хвойных лесов и площадей буреломов является сигналом усиления негативного влияния абиотических факторов и фитопатогенов. Приоритетная роль в декомпозиции субстрата принадлежит афиллофоровым грибам.

Подготовительная или нулевая стадия ксилолиза протекает в пределах одного вегетационного сезона или его части и не влияет на изменения в характеристиках древесины. Первая стадия проходит за 1–2 года, приводя к образованию кольца деревоокрашивающих грибов. На второй стадии становятся заметны результаты окисления среды афиллофоровыми грибами, образуется покраснение древесины. Эта стадия длится от 2 до 3 лет. Третья стадия, период активного роста мицелия, приводит к образованию пятен бурой гнили и длится от 4 до 6 лет. На четвертой стадии мицелий осваивает до 70% субстрата до размягчения гнили. Этот процесс занимает от 4 до 8 лет. Завершающие стадии разрушения древесины имеют продолжительные сроки от 10 до 60 лет, характеризуются почти полной утратой структуры древесины и могут быть выделены по глубине вовлечения продуктов распада в циклы минерального и органического питания насаждения.

Смена сукцессий грибов и мезофауны протекает в условиях последовательной смены сапротрофных организмов в ходе изменения качественных характеристик субстрата. При этом на каждой стадии могут проявляться все формы взаимодействия между участниками ксилолиза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0598-2019-0004).

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные, внесли равный вклад в работу и в равной степени принимали участие в написании рукописи. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Jennings DH. The Physiology of Fungal Nutrition. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2006. DOI: 10.1007/BF02908824
2. Schmidt O. Wood and Tree Fungi. Biology, Damage, Protection, and Use. Hamburg: Springer; 2006. doi.org/10.1007/3-540-32139-X.
3. Zabel RA, Morrell JJ, Robinson S. Wood Microbiology. Decay and Its Prevention. London: Elsevier Academic Press; 2020.

References

1. Jennings DH. The Physiology of Fungal Nutrition. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2006. DOI: 10.1007/BF02908824.
2. Schmidt O. Wood and Tree Fungi. Biology, Damage, Protection, and Use. Hamburg: Springer; 2006. doi.org/10.1007/3-540-32139-X.
3. Zabel RA, Morrell JJ, Robinson S. Wood Microbiology. Decay and Its Prevention. London: Elsevier Academic Press; 2020.

4. Stokland JN, Siitonen J, Jonsson BG. Biodiversity in Dead Wood. Cambridge, UK: University Printing House; 2012. DOI: 10.1017/CBO9781139025843.
5. Стороженов ВГ, Крутов ВИ, Руоколайнен АВ, Коткова ВМ, Бондарцева МА. Атлас-определитель дереворазрушающих грибов Русской равнины. М.: КМК; 2014.
6. Ниемея Т. Трутовые грибы Финляндии и прилегающей территории России. *Norrinia*. 2001;(8):120.
4. Stokland JN, Siitonen J, Jonsson BG. Biodiversity in Dead Wood. Cambridge, UK: University Printing House; 2012. DOI: 10.1017/CBO9781139025843.
5. Storozhenko VG, Krutov VI, Ruokolainen AV, Kotkova VM, Bondartseva MA. Atlas-Opredelitel Derevorazrushayuschikh Gribov Russkoy Ravniny [Identification Guide for Wood-Destroying Fungi of the Russian Plain]. Moscow: KMK; 2014. (In Russ.)
6. Niemelya T. [Polypore fungi in Finland and the adjacent territory of Russia]. *Norrinia*. 2001;8:120. (In Russ.)



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХИМИЧЕСКИХ МУТАГЕНОВ И ФЕНОТИПИЧЕСКИХ АКТИВАТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ, РАЗРАБОТАННЫЕ И.А. РАПОПОРТОМ¹ (обзор литературных источников)

Л.И. Вайсфельд¹, Н.А. Боме²

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (Москва)

и ²Тюменский государственный университет (Тюмень), Россия

Эл. почта: ¹liv11@yandex.ru; ²bomena@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; принята к печати 21.11.2022

В условиях климатических колебаний, нередко приводящих к возникновению различных стрессов в течение вегетационного периода, все большую актуальность приобретает необходимость увеличения генетического разнообразия сельскохозяйственных растений с привлечением различных методов. Одним из них является метод экспериментального мутагенеза, зарекомендовавший себя перспективным для сельскохозяйственной практики как в России, так и за рубежом. На основе литературных источников изложена краткая история открытия мутагенеза, индуцированного ионизирующей радиацией и химическими веществами. Дан обзор материалов по разработке И.А. Рапопортом принципиально новой теории химического мутагенеза и методам его применения. Открытие И.А. Рапопортом фенотипических активаторов роста и развития растений позволяет в современных условиях повысить устойчивость растений к воздействию абиотических и биотических факторов окружающей среды и существенно снизить пестицидную нагрузку на агроценозы, что подтверждено исследованиями и проверкой пара-аминобензойной кислоты (ПАБК) на практике. Приводятся исторические факты, касающиеся событий, связанных с борьбой генетиков, крупнейших физиков и известных ученых биологических специальностей в постсталинский период с ненаучными и разрушительными для сельского хозяйства тенденциями, реализуемыми Лысенко.

Ключевые слова: радиационный и химический мутагенез, дрозофила, сессия ВАСХНИЛ, пара-аминобензойная кислота.

THEORETICAL ASPECTS OF CHEMICAL MUTAGENS AND PHENOTYPIC GROWTH ACTIVATORS DEVELOPED BY I.A. RAPOPORT (A review)

L.Y. Weisfeld¹, N.A. Bome²

¹N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, the Russian Academy of Sciences (Moscow) and ²Tyumen State University (Tyumen), Russia

Email: ¹liv11@yandex.ru; ²bomena@mail.ru

Under the conditions of climatic fluctuations, which often lead to various stresses during the growing season, the need to increase the genetic diversity of agricultural plants by various methods is becoming increasingly important. One of the methods is experimental mutagenesis, which has proved to be promising for agricultural practice both in Russia and abroad. Based on literature sources, a brief history of the discovery of mutagenesis induced by ionizing radiation and chemicals is presented. Information about the development of a fundamentally new theory of chemical mutagenesis by I.A. Rapoport and of methods of its application is reviewed. The discovery of phenotypic activators of plant growth and development makes it possible under current conditions to increase plant resistance to the effects of abiotic and biotic environmental factors and to reduce significantly pesticide load on agrocenoses. These claims are confirmed by studies and practical tests of para-aminobenzoic acid (PABA). Some facts related to the struggle of outstanding geneticists, physicists and biologists in the post-Stalin period against the anti-scientific trends implemented by Lysenko, which were destructive for agriculture, are presented.

Key words: radiation and chemical mutagenesis, *Drosophila*, VASKhNIL session, para-aminobenzoic acid.

С чего начинались исследования мутагенеза

Мутагенное действие рентгеновского излучения было открыто в 1928 году американским ученым Генрихом Меллером [1]. Эксперименты были проведены

в Техасском университете (США) на модельном объекте – дрозофиле (*Drosophila*), удобном объекте исследования законов наследственной изменчивости. Меллер (H.J. Müller) впервые показал, что воздействие рентгеновских лучей на личинок мух увеличивает

¹ По материалам доклада на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», Москва, 3–6 октября 2022 г

в сотни и тысячи раз скорость мутагенеза у взрослых особей – строго пропорционально полученной личинками дозе облучения. Его выступление «Проблемы генетической модификации» на Пятом международном генетическом конгрессе в Берлине (1927 год) вызвало сенсацию в прессе. До 1933 года Меллер работал в Германии (у известного уже тогда советского ученого генетика Н.К. Тимофеева-Ресовского). С приходом нацистов он переехал в Советский Союз и привез с собой большую коллекцию дрозофил. В Институте генетики АН СССР Меллер успешно руководил лабораторией проблем гена. В 1937 году он покинул Советский Союз. В 1946 году после трагедии в Хиросиме и Нагасаки Меллер был номинирован на Нобелевскую премию по физиологии и медицине («За открытие появления мутаций под влиянием рентгеновского облучения») [2].

И.А. Рапопорт начинал свой научный путь в исключительно творческой обстановке Института экспериментальной биологии (ИЭБ), директором которого был выдающийся русский ученый Н.К. Кольцов.

Николай Константинович Кольцов³ (1872–1940) в своей монографии «Организация клетки» [3] высказал предположение о том, что мутации должны возникать не только от ионизирующей радиации, но и под действием химических веществ: «Неужели в самом деле гамма-лучи и космические лучи – единственная причина всей эволюции?» «Очень важно найти и другие факторы, которые имеют такое же определенное влияние на мутационный процесс... Пятнадцать лет назад я выражал уверенность, что недолго уже ждать до того времени, когда человек... будет создавать новые жизненные формы... Это пророчество оказалось верным... Это дает надежду, что нам удастся... еще более овладеть мутационным процессом и в некоторых случаях направлять изменчивость в одном определенном желательном для нас направлении». В главе «О прогрессивной эволюции» Н.К. Кольцов пишет: «...вместо трудно поддающегося определения “совершенства организации”... понятие о приспособлении организма к внешним условиям, развитие палеонтологий... доказывают прогрессивный ход эволюционного прогресса» [3, с. 507].

На основании этой идеи Н.К. Кольцова возникла серия экспериментов по индукции мутаций с помощью химических веществ [11, с. 81–89]. Ученик Н.К. Кольцова В.В. Сахаров⁴ [4, 5] получил сцепленные с полом

³ Н.К. Кольцов – основатель Института экспериментальной биологии (ИЭБ) (1917–1938), директор Института цитологии, гистологии и эмбриологии АН СССР (1938–1939), член-корреспондент АН СССР, академик ВАСХНИЛ, заслуженный деятель науки РСФСР.

⁴ В.В. Сахаров (1902–1969) впоследствии стал крупным ученым, одним из основоположников учения о химическом мутагенезе. Получил и исследовал полиплоиды у растений с помощью колхицина; установил эффективность отбора на плодовитость у полиплоидов (на гречихе) и возможность их практического использования. Он индуцировал



И.А. Рапопорт

мутации во втором поколении мух *Drosophila* после обработки личинок и куколок раствором йода. Аналогичные опыты с уксусной кислотой и аммиаком (неорганическими веществами) проводил М.В. Лобашов в Ленинградском университете [6, 7]. Поиски химических веществ, вызывающих мутации, предпринимались раньше, но результаты были недостаточно убедительными.

В этих и других подобных начальных опытах были получены мутанты от действия неорганических веществ (йод, аммиак, уксусная кислота), но количество мутантов ненамного превышало естественный уровень. Кроме того, авторы не уловили закономерности возникновения мутаций.

В начале 40-х годов минувшего столетия в Англии Шарлоттой Ауэрбах и Дж. Робсоном [8, 9] были опубликованы сообщения об индукции мутаций у взрослых самцов дрозофилы после воздействия на личинки боевого отравляющего вещества иприта (горчичного газа).

Будучи аспирантом в Кольцовском институте, И.А. Рапопорт вел огромную исследовательскую работу. Об этом говорит характеристика Н.К. Кольцова на аспиранта И.А. Рапопорта [10, с. 21–24].

Война, разразившаяся в 1941 году, прервала его научную работу. А диссертация «Феногенетический

полиплоидию у растений с помощью колхицина; 1965–1969 годы – профессор Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

анализ зависимой и независимой дифференцировки» была уже готова к защите, и демонстрационный материал вывешен в конференц-зале Московского государственного университета [11, с. 30–31].

Сразу после объявления войны И.А. Рапопорт подал заявление в военкомат об отправке его на фронт. Он прошел всю войну, где получил дважды тяжелое ранение, потерял глаз, но оставался в строю. За мужество и находчивость он награжден орденами. Начал он войну рядовым, окончил орденосцем, уважаемым офицером, комбатом. Служивцы дали ему имя «батяня». Его военные подвиги и военные награды описаны в книгах, изданных после его смерти в 1990 году [10, с. 26–69; 11, с. 30–37], и в документальных фильмах, в особенности в фильме «Наука Побеждать. Подвиг комбата»⁵.

Развертывание «эпохи Лысенко»

Начиная с 1930-х годов власть в СССР создавала обстановку нетерпимости в отношении интеллигенции и науки генетики в особенности (такова была стилистика взаимоотношений власти и науки). Открытия Ч. Дарвина власть извращала и использовала для сохранения контроля над биологическим сообществом, изображая Т.Д. Лысенко создателем советского варианта дарвинизма. Был принят ламаркистский тезис о наследовании приобретенных признаков. В биологии началось то, что можно назвать «эпохой Т.Д. Лысенко» и временем так называемой «мичуринской биологии». Из библиотек изымались книги по генетике и некоторым другим разделам биологии. Был сожжен тираж выпуска «Труды Института цитологии, гистологии и эмбриологии АН СССР», так как он содержал статью генетика И.А. Рапопорта. Ученые писали письма в правительство о преследовании генетики и генетиков [10, с. 90–103].

Только после начала Великой Отечественной войны эта реформаторская деятельность власти стихла, но не закончилась.

Сессия

Более 70 лет тому назад, с 31 июля по 7 августа 1948 года, состоялась сессия Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина (ВАСХНИЛ), организованная с целью объявить стране и миру, что отныне государственная власть (компартия, фактически Сталин) запрещает в СССР исследования в области генетики. Лысенко выступил на сессии с докладом «О положении в советской биологической науке». Сталин был соавтором этого доклада (такова была стилистика взаимоотношения науки и власти).

Но травля генетики и селекции началась задолго до 1948 года [10, с. 102–103; 11, с. 40–42, 109–114]).

⁵ Этот фильм был показан на Конференции.

В защиту науки с 1944 года выступали крупнейшие генетики А.Р. Жебрак, И.А. Рапопорт, П.А. Жуковский, Н.П. Дубинин, ученые биологи Д.А. Сабинин, П.И. Лисицын, С.А. Алихьян и другие [10, с. 40–42; 11, с. 90–114])

Лысенко выступил с идеей (несколько позже окрещенной «агробиология»), которая противоречила основным положениям классической генетики: он отвергал законы Менделя и концепцию гена как материального носителя наследственности, продвигал идею наследования приобретенных признаков, давно разоблаченную мировой наукой, и обвинял ученых в «вейсманизме», поскольку еще немецкий ученый Август Вейсман первым показал отсутствие наследования приобретенных признаков. К примеру, Лысенко утверждал: если у крысы отрезать хвост, ее потомки будут бесхвостые (сама в школе делала эти опыты, но безуспешно. – ЛВ). Лысенко и его последователи отрицали генетику как якобы буржуазную науку, выдвигали идеи о получении ветвистой пшеницы, об отсутствии внутривидовой конкуренции, о запрете селекции, о переходе разных видов друг в друга, пропагандировали лжеученых (к примеру: Бошнян и Лепешинскую), обещали быстрые результаты с помощью «яровизации». Власть считала себя вправе решать, так это или не так, за ученых. «Лысенковщина» внедрялась в сельское хозяйство, что привело лишь к его к дальнейшему упадку после разрушения войной и предшествующей коллективизацией крестьянских хозяйств.

Упадок сельского хозяйства послевоенных лет привел страну к хроническому аграрному отставанию и, как следствие, к зависимости от импорта продовольствия.

Научная литература о деятельности Лысенко обширная. Приводим наиболее доступные ссылки: [13, глава 26, с. 355–364) и глава 28, с. 380–390); 14; 15].

И.А. Рапопорт не получал приглашения на сессию ВАСХНИЛ, но, после того как он ознакомился с обстановкой на сессии, он 2 августа сумел пройти на заседание и добиться слова. Он выступил в защиту научного знания и вступил в дискуссию с противниками генетики [10, с. 104–108]. Приводим цитаты из речи И.А. Рапопорта [12]:

«Основой генетики, как показывает самое название, является ген, материальный носитель наследственности. И основной спор, который в теории идет по этому вопросу, конечно, касается гена. Родоначальник современной теории гена – Чарлз Дарвин. Чтобы в этом убедиться, достаточно прочесть несколько глав его книги “Происхождение видов”, глав, являющихся не случайным плодом воображения великого человека, а результатом 27-летних исследований. Без признания материальной базы теории естественного отбора, конечно, не могла бы существовать». И еще: «...Ген яв-

ляется материальной единицей с огромным молекулярным весом порядка сотен тысяч и даже миллионов единиц. Гены имеются в ядре клетки в совершенно определенных точках, которые называются хромосомами. Эти единицы стали известными нам в результате настойчивых и трудоемких экспериментов. Мы убедились, что можно искусственно перемещать единицы из одной хромосомной системы в другую. Мы убедились, что эти наследственные единицы – гены – не являются неизменными, а, наоборот, способны давать мутации.

Мутации являются огромным завоеванием советской науки и в смысле открытия могущественного действия внешних физических факторов, и в смысле действия агрохимических факторов. ...нами, советскими генетиками, найдены химические агенты, которые позволяют произвольно получать наследственные изменения во много тысяч раз чаще, чем это было ранее. Имеются химические соединения, вызывающие в каждой проросшей грибовой клетке наследственные изменения»...

«Мы сейчас находимся на грани крупных открытий в области генетики. Многие из вас помнят факт открытия существования фагов – мельчайших вирусов, паразитирующих на бактериях. Многие ученые отрицали существование фагов до последних дней, несмотря на большое количество фактов. Теперь колоссальное развитие микроскопической техники позволяет нам видеть фагов дизентерийной клетки, фагов холерных, фагов, вызывающих различные кишечные заболевания домашних животных. Таким образом, и ветеринарный, и медицинский микробиологи могут видеть, что постулированное на основе не прямо еще доказанных положений утверждение о существовании особой, невиданно малой материальной единицы оправдывается: эта единица, действительно, есть. Можно видеть мельчайшую структуру фагов; видеть, как они проникают в клетку, размножаются, разрывают ее оболочку и вызывают ее гибель.

Ген – это единица еще более таинственная, еще более далекая от возможности наглядного показа, но во всяком случае это единица материальная, в отношении которой имеется возможность прийти к большим практическим успехам. И мне кажется большой практической ошибкой стремление нацело и огульно отказывать советской генетике в огромных успехах. Советскую генетику мы обязаны отличать от буржуазной генетики. Советские генетики никогда не стояли на неправильных антидарвинистских позициях. Они связали в единый величайший принцип естественный отбор, который объяснил разумно и рационально явление развития органической жизни».

«Генетика описала некоторые механизмы получения в известной мере направленных изменений при повторении определенной экспериментальной про-

цедуры. Благодаря этому генетика может служить продуктивно нашему социалистическому сельскому хозяйству. Она может служить тем, что в состоянии на огромной площади, занятой кукурузой, использовать метод гетерозиса, который, к нашему стыду, несмотря на обязывающее постановление февральского Пленума ЦК ВКП(б) (1947 г.), недостаточно применяется в сельскохозяйственной практике. Этот метод позволяет на 25% повысить продуктивность кукурузы. Это является не выдумкой, а точным фактом, и указанный метод должен быть нами использован. Этот метод можно распространить на целый ряд других растений. Сахарный тростник, клещевина и другие растения положительно отвечают на этот метод. Метод гетерозиса позволяет получить усиленный выход белков, жиров и углеводов, необходимых для нашего народного хозяйства».

И еще: «...Можно сказать, что в результате мутации изменяется физиологический признак, потому что формы, оторванной от материалистического содержания, конечно, не существует...»

«Я думаю, что биология будет развиваться на основе широкого применения принципа естественного отбора, который несовместим с ламаркизмом, который противоречит ламаркизму. Ламаркизм в той форме, в какой он опровергнут Дарвином и принимается Т. Д. Лысенко, – это концепция, которая ведет к ошибкам».

Полный текст его выступления см. [12].

Принципиальным защитником генетики выступал на этой сессии также ректор сельскохозяйственной академии имени А.К. Тимирязева академик В.С. Немчинов [12]: «Считаю, что хромосомная теория наследственности вошла в золотой фонд науки человечества и продолжаю держаться такой точки зрения... Я не разделяю точку зрения... о том, что хромосомная теория наследственности и, в частности, некоторые законы Менделя являются какой-то идеалистической точкой зрения, какой-то реакционной теорией. Я считаю свою точку зрения правильной, и агрессивный характер выступлений и действий, направленных на запрещение работ А. Р. Жебрака⁶, я считаю неправильным. Неслучайно Министерство сельского хозяйства утвердило у нас опорный генетический пункт».

Несмотря на яркие и убедительные выступления И.А. Рапопорта и В.С. Немчинова, разгром науки, инспирированный властью, продолжался в издевательском тоне по адресу ученых-генетиков [10, с. 109–111]. После сессии академик Немчинов был снят с поста ректора Сельскохозяйственной академии им. Н.К. Тимирязева.

Самое унижительное было на последнем заседании. Накануне вечером в квартирах так называе-

⁶ Профессор А.Р. Жебрак – генетик, селекционер растений (см. [11, с. 90]).

мых «менделистов-морганистов» раздались телефонные звонки с угрозами. На следующий день три человека: выдающийся ботаник школы Н.И. Вавилова профессор П.М. Жуковский, доцент Московского государственного университета С.И. Алиханян и профессор И.М. Поляков – заявили о переходе в ряды «мичуринцев» [13, с. 359]. Наука генетика была упразднена.

После сессии ВАСХНИЛ 1948 года ученого И.А. Рапопорта (герой Великой Отечественной войны, вернулся с нее в звании гвардии майора, грудь в боевых орденах, после двух тяжелых ранений возвращался в строй даже с потерей одного глаза, доктор биологических наук ушел на фронт за день до назначенной защиты диссертации, которую защитил в 1943 году во время командировки из армии в Москву) исключили из партии (а он вступил в нее на фронте) с формулировкой: «за несогласие с установками в биологической науке в свете решений сессии ВАСХНИЛ» [11, с. 42–45]. Его уволили из института *без права поступления на научную работу*, тираж опубликованной диссертации был изъят из продажи, уничтожены коллекции дрозофил, привезенные еще Меллером. Позже партийные руководители не допустили получения И.А. Рапопортом Нобелевской премии, поскольку он отказался вступать в партию заново. Он сказал: «Я не хочу восстанавливаться в партии за 60 тысяч долларов» [10, с. 53]. И.А. Рапопорт в своих воспоминаниях пересказывает примечательную беседу с партийным боссом. Чтобы избежать репрессий, надо было «*написать маленькую записочку*» с признанием своей неправоты [11, с. 43]. Те из генетиков, кто отрекся от своей науки, имели возможность работать под началом мракобесов [11, с. 43].

Эффективные химические мутагены И.А. Рапопорта

«В отличие от других исследователей И.А. Рапопорту принадлежит честь открытия *ключа* к поиску эффективных химических мутагенов..., ...понимание работы генов в их нативном состоянии», в отличие от чисто химического подхода предшествующих авторов» [10, с. 83–89].

И.А. Рапопортом были открыты сильные химические мутагены и супермутагены [11, с. 98–109]. В 1946 году (то есть после окончания войны) в издании Доклады АН СССР (Т. 54. № 1. с. 65–68) была опубликована статья «Карбонильные соединения и химические механизмы мутаций». Статья помещена заново в посмертном сборнике трудов И.А. Рапопорта [16, с. 7–9]. В этой и последующих публикациях, включенных редколлекцией в данный сборник, И.А. Рапопорт раскрывает механизм возникновения различных типов мутаций и их принципиальное отличие от воздействия радиацией.

И.А. Рапопорт получил большое количество мутаций у мух *Drosophila* после обработки личинок и яиц формальдегидом. Личинки и отложенные яйца переносили из стандартной питательной среды в среду, содержащую водный раствор формальдегида в сублетальной концентрации. Сразу после выхода имаго самцы скрещивались с самками CLB (метод оценки летальных мутаций у взрослых особей с маркерным признаком полосковидных глаз Bar). Формальдегид вызывал у взрослых мух до 6%, а при высоких дозах мутагена – до 12 и 30% летальных и видимых мутаций против менее 0,12% в контроле. Доза формальдегида почти не влияла на плодовитость самцов. Мутации от формальдегида не вызывали фрагментации хромосом, как при действии коротковолновых лучей. Количество летальных мутаций и разрывов хромосом от коротковолновых излучений зависит только от дозы облучения и подавляет плодовитость самцов. После облучения разорванные концы хромосом склеиваются хаотично.

И.А. Рапопорт подчеркивает *химический характер* мутаций, их отличие от модификаций, которые не наследуются, и от мутагенного действия коротковолновых излучений. Вызванные формальдегидом и карбонильными соединениями мутации являются результатом взаимодействия химического препарата с аминокислотными группами как протоплазмы, так и хромосомы. Разрыв хромосомы происходит в результате связывания карбонильной группы с белками и образования пептидной связи в хромосоме. При этом возникают в основном рецессивные мутации в отличие от непосредственного и полного разрыва хромосомы при коротковолновом облучении, когда происходит фрагментация хромосом и беспорядочное воссоединение разорванных концов.

Работа имела принципиальное отличие от более ранних опытов по индукции мутаций химическими веществами в том смысле, что выявила механизм возникновения мутаций. Полученные данные по воздействию формальдегида указывают на строго химическую природу возникновения мутаций без связи с механическими повреждениями хромосом.

В посмертный сборник И.А. Рапопорта «Открытие химического мутагенеза» [16] включены его основные публикации по механизму действия различных химических мутагенов, вышедшие за период от 1946 (приоритетная работа «Карбонильные соединения и химический механизм мутации») по 1975 год в журналах Доклады АН СССР, Бюллетень экспериментальной биологии и медицины, Бюллетень МОИП, «Генетика», Доклады ВАСХНИЛ и теоретические статьи в книгах издательства «Наука»: «Микрогенетика», «Супермутагены», «Мутационная селекция», «Химический мутагенез и селекция». Последняя статья «Химический мутагенез в селекции на адаптацию к

погодным условиям» была учтена в Продовольственной программе России (1983 год).

Статьи сборника отражают этапы научного обоснования теории и практического применения химического мутагенеза. В статье «Химическая реакция с аминогруппой протеина в структуре гена» [16, с. 16–35] И.А. Рапопорт, упоминая опыты Ауэрбах и Робсона [8, 9] с ипритом, формулирует теорию химического механизма: воздействие мутагенов на белки цитоплазмы и хромосомы и тем самым сохранение мутагена в клетке. И.А. Рапопорт обсуждает различие летальных мутаций и ненаследуемых морфозов, подчеркивает отсутствие фрагментации хромосом от действия химических мутагенов (в отличие от радиационных), анализирует влияние химического мутагена на химическую структуру белка и гена. В статьях И.А. Рапопорта, опубликованных в данном сборнике, описаны эксперименты с большим числом мутагенов.

Полная библиография публикаций И.А. Рапопорта представлена в издании Российской академии наук «Иосиф Абрамович Рапопорт (1912–1990)» [17] и в книге О.Г. Строевой [11, с. 185–205].

В трагических обстоятельствах безработицы И.А. Рапопорт продолжал начатый труд. Он разрабатывал теорию химического мутагенеза.

В 1965 году в издательстве «Наука» была опубликована его монография «Микрогенетика». Тираж был изъят из продажи по неустановленным причинам [11, с. 54–55].

В 2010 году по инициативе О.Г. Строевой и при поддержке Российской академии наук было опубликовано репринтное издание книги «Микрогенетика» [18]. Первая глава «Принципиальные основы микрогенетики» декларирует связь процессов, проходящих в организме при действии мутагенных веществ («мутационных раздражителей», по терминологии И.А. Рапопорта), с физическими и химическими процессами в организме. Далее И.А. Рапопорт подробно анализирует механизм мутагенного действия алкилирующих веществ, сходство и различия химического и радиационного видов мутагенеза. Он вводит понятие «наследственной субстанции» как особой формы материи, предлагает существование «микрогенетического» механизма мутагенеза. Автор подразделяет мутагены («мутационные раздражители») на сильные, например формальдегид, диметилсульфат, диэтилсульфат, нитрозозтил- и нитрозометилмочевина, этиленмин, умеренные и слабые.

И.А. Рапопорт подчеркивал, что проникновение мутагенов к ядру проходит через фильтры: внешние оболочки, системы органов и тканей, клеточные и ядерные. Вводимые в организм вещества неодинаково распределяются в тканях. Среди испытанных мутагенов И.А. Рапопорт выделил вещества с высоким выходом мутаций – супермутагены.

Творческая жизнь И.А. Рапопорта в Институте химической физики (ИХФ) АН СССР

К практическим генетическим исследованиям И.А. Рапопорт смог вернуться только в конце 1957 года благодаря приглашению и поддержке академика Николая Николаевича Семенова (директора Института химической физики РАН СССР, лауреата Нобелевской премии) [11, с. 45–60].

В этом году (2022) был установлен памятник физику Н.Н. Семенову возле здания ИХФ РАН на улице Косыгина в Москве.

И.А. Рапопорт вспоминал: «Только личное содействие академика Н.Н. Семенова... и поддержка Н.М. Эмануэля и его сотрудников помогли мне восстановить вкус к новым генетическим поискам в ряде направлений, а с ними и работоспособность» [11, с. 46–52].

Николай Николаевич активно и охотно способствовал внедрению химического мутагенеза в сельскохозяйственную практику. В статье И.А. Рапопорта «Академик Н.Н. Семенов и генетика» [10, с. 144–153] кратко описаны развитие генетических школ в СССР, борьба с ними со стороны Лысенко в 40-е годы, закончившаяся разгромом генетики после 1948 года. Далее он сообщает о поддержке Н.Н. Семеновым и академиком Н.М. Эмануэлем широких генетических исследований на основе химического мутагенеза и о применении генетики в сельском хозяйстве с целью создания и внедрения в практику сельского хозяйства новых продуктивных сортов. В первой половине 1960-х годов работа лаборатории была посвящена поискам новых классов химических мутагенов. Возобновилась публикация работ И.А. Рапопорта [11, с. 47–48]. В химической лаборатории под руководством И.А. Рапопорта было синтезировано большое количество новых мутагенов [11, с. 90–92]. Также началось сотрудничество И.А. Рапопорта с учреждениями медицинского профиля, с лабораторией генетики и селекции микроорганизмов, с медицинскими учреждениями, с Институтом антибиотиков, он контактировал с вирусологами, онкологами, начал применять супермутагены в качестве противоопухолевых препаратов. Параллельно сотрудники Группы химической генетики проверяли синтезируемые химические препараты на мутагенность. Были опубликованы статьи в газете «Сельская жизнь» [10, с. 48–50].

В 1965 году на заседании дирекции института работы И.А. Рапопорта встретили сопротивление со стороны ряда тенденциозных ученых, не знакомых с генетикой, но подверженных парадигме единственно правильной теории предыдущих лет (если можно считать теорией понятия Лысенко).

И тогда Н.Н. Семенов предложил создать Отдел химической генетики [11, с. 50–52]. Он особенно поддерживал применение достижений химического му-

тагенеза в сельскохозяйственной практике. С этого времени началось «победное шествие» химического мутагенеза [11, с. 55–60].

В 1962 году И.А. Рапопорт стал номинантом Нобелевской премии. Власти дали ему квартиру (18 лет жил в полуподвальном помещении) и предложили повторно вступить в компартию. Но здесь они споткнулись – вступать туда заново И.А. Рапопорт отказался. Мсть последовала немедленно: власти отказали Нобелевскому комитету. В итоге оба номинанта – ни И.А. Рапопорт, ни Ш. Ауэрбах не получили Нобелевской премии. Это не помешало этим ученым позже дружески общаться на конгрессе памяти Грегора Менделя в Чехословакии в 1965 году [11, с. 53], когда власти выпустили И.А. Рапопорта за границу впервые после войны – и это после того, как он в составе Советской Армии гнал немецких захватчиков до «встречи на Эльбе», за смелость и мудрость на войне получал воинские звания и награды [10, с. 26–69], тогда как большинство его так называемых «судей» жили в тылу.

При поддержке Российской академии наук ежегодно в ИХФ проводились Всесоюзные совещания и консультации для генетиков, агрономов и селекционеров [11, с. 50–53]. Селекционеры съезжались из разных областей страны и из ближнего зарубежья. И.А. Рапопорт председательствовал на всех заседаниях, обсуждал каждый доклад. Заседания продолжались часто до 10 вечера. По результатам этих совещаний издавались сборники, куда входили методические статьи и результаты внедрения химического мутагенеза в селекцию, получение исходного материала для селекции и новых сортов культурных растений. Каждый сборник предварялся теоретической статьей И.А. Рапопорта. Всего было издано 25 томов.

Мутагены, синтезированные химиками Отдела химической генетики, И.А. Рапопорт раздавал участникам конференций бесплатно с инструкцией о безопасной методике применения и безопасной транспортировке препаратов. В дальнейшем с помощью метода И.А. Рапопорта созданы новые сорта различных культур, которые были включены в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию.

Метод химического мутагенеза стал широко применяться в генетических, цитогенетических и селекционных исследованиях крупных научных коллективов Советского Союза и за рубежом, в таких областях науки, как экспериментальная биология, микробиология, онкология, и особенно широко в сельском хозяйстве.

«В отличие от других исследователей И.А. Рапопорту принадлежит честь открытия *ключа* к поиску эффективных химических мутагенов», «...понимание работы генов в их нативном состоянии», в отличие от чисто химического подхода предшествующих ав-

торов. И.А. Рапопортом были открыты сильные химические мутагены и супермутагены [11, с. 98–102].

За открытие химического мутагенеза И.А. Рапопорт в 1984 году был представлен ИХФ РАН СССР на соискание Ленинской премии с формулировкой «Явление химического мутагенеза и его генетическое изучение».

В представлении было сказано, что в исследованиях, проведенных автором с 1940 по 1982 год (исключая период участия в войне 1941–1945 годы и период репрессий науки генетики 1948–1958 годы), «на бактериях, животных и растениях, ...показана возможность эффективного экспериментального вмешательства химических мутагенов» [11, с. 103–109, 211]).

При получении государственной награды СССР Золотой Звезды Героя труда («За особый вклад в сохранение и развитие генетики и селекции», 1990 год) Иосиф Абрамович сказал: «Я вспоминаю о том, что если бы не помощь Семенова Николая Николаевича, то эта работа не могла быть начата, поскольку через десять лет после сессии ВАСХНИЛ он мне предоставил возможность работать, а тогда я не мог надеяться даже после этого срока длительное время найти работу. Он интересовался работами в сельском хозяйстве, и я особенно рад, что у нас здесь что-то получилось» (цит. по: Делоне Н.Л. [19]).

Стоит заметить, что это были годы возрождения в СССР науки вообще и генетики в особенности, в биологии и сельском хозяйстве медленно возрождалось применение научных методов при сопротивлении бывших сотрудников или сторонников Лысенко. После Августовской сессии ВАСХНИЛ 1948 года (см. выше) даже после снятия с «пьедестала» Лысенко как разрушителя сельского хозяйства и науки генетики в СССР среди многих несведущих научных работников бродил (и бродит иногда теперь) вирус лженауки – «лысенковщины».

И.А. Рапопорт стремился к популяризации метода химического мутагенеза с целью его практического применения. Он всегда добивался применения своих открытий в практике. В 1966 году издательство «Знание» опубликовало книгу И.А. Рапопорта «Химический мутагенез. Теория и практика» [20] для широкого круга читателей, в основном для тех, кто работал в сельском хозяйстве. В предисловии говорится: «Одна из важнейших задач, стоящих сейчас перед учеными, – расширение практических работ по генетике и селекции животных и растений». Это издание было необходимо, чтобы избавиться от антинаучного периода «лысенковщины», внедренной в сельское хозяйство. На 88 страницах изложены теоретические основы мутационных механизмов и практические результаты их применения в растениеводстве и селекции на культурах: озимая пшеница, кукуруза, свекла, чернушка, горох, ячмень.

Открытие и внедрение пара-аминобензойной кислоты

И.А. Рапопорт открыл фенотипический эффект пара-аминобензойной кислоты (ПАБК) как «фенотипического активатора» ферментов на ранних этапах развития растений, не индуцирующего мутации. Будучи активным практиком, он организовал широкое внедрение ПАБК в сельское хозяйство, что было отражено в книге «Химические мутагены и пара-аминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений» [21].

Сборник предваряется теоретической статьей И.А. Рапопорта [21, с. 3–37]: «Действие ПАБК в связи с генетической структурой». По мнению И.А. Рапопорта, обрабатывать растения растворами ПАБК следует в самом начале их развития. Действие ПАБК осуществляется на фенотипическом уровне путем взаимодействия с клеточными ферментами: «С использованием ПАБК наступает поворот от резко преобладающей в норме чувствительности ферментов к окружающим условиям, преимущественно отрицательным, в сторону различных проявлений производительности и устойчивости», – говорится во вступительной статье. При этом, по мнению И.А. Рапопорта,

образуются комплексы ПАБК и фермента. В сборнике помещено более 30 статей о применении ПАБК при выращивании разных сельскохозяйственных культур в опытных и полевых условиях. С появлением этих исследований ПАБК началось широкое ее внедрение в сельскохозяйственную практику при поддержке Министерства сельского хозяйства России. В условиях производства обработка семян ПАБК перед посевом проводилась полусухим способом в емкостях совместно с пестицидами.

В книге О.Г. Строевой отражены основные даты жизни, основные научные открытия И.А. Рапопорта [11, с. 206–214]. Творческая жизнь И.А. Рапопорта была подобна его боевым подвигам.

И.А. Рапопорт во время и после войны с гитлеровской Германией был награжден орденом Ленина (1990), двумя орденами Красного Знамени (1942, 1943), орденом Суворова 3-й степени (1944), двумя орденами Отечественной войны 1-й степени (1945, 1985), орденом Отечественной войны 2-й степени (1944), орденом Трудового Красного Знамени (1972), медалями, а также орденами и медалями иностранных государств, в том числе американским орденом Дistinguished Legion (1945) и венгерским орденом Красной Звезды (1970).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Müller HJ. The problem of genetic modification. *Zeit ind. Abst. und Vereb.* (1927;(Supp. 1):234-60.
2. Лауреаты Нобелевской премии: Джозеф Мюллер. <https://indicator.ru/medicine/nobelevskie-laureaty-dzhozef-myoller.htm>.
3. Кольцов Н.К. Организация клетки: Сборник экспериментальных исследований, статей и речей. 1903–1935. Москва-Ленинград. Гос. изд-во биол. и мед. литературы; 1936.
4. Сахаров ВВ. Иод как химический фактор, действующий на мутационный процесс у *Drosophila melanogaster*. *Биол журн.* 1932; I(3-4):1-8.
5. Сахаров ВВ. Специфичность действия химических веществ как мутационных факторов. *Биол журн.* 1938; 7(3):595-618.
6. Лобашов МЕ, Смирнов ФА. К природе действия химических агентов на мутационный процесс. Сообщение I. Действие уксусной кислоты на non-disjunction и трансгенации. *Доклады АН СССР.* 1934;2(5):307-11.
7. Лобашов МЕ, Смирнов ФА. К природе действия химических агентов на мутационный процесс. Сообщение II. Действие аммиака на возникновение летальных трансгенаций. *Доклады АН СССР.* 1934;3(3):174-8.
8. Auerbach Ch, Robson JM. Production of mutations by allyl isothiocyanate. *Nature.* 1944;154:81. DOI: 10.1038/154081a0.
9. Auerbach Ch, Robson JM. Chemical production of mutations. *Nature.* 1946;157:302. DOI:10.1038/157302a0.
10. Иосиф Абрамович Рапопорт - ученый, воин, гражданин. Очерки, воспоминания, материалы. Москва: Наука; 2003.
11. Строева ОГ. Иосиф Абрамович Рапопорт. Москва: Наука; 2009.
12. Выступления И.А. Рапопорта и В.С. Немчинова на августовской сессии ВАСХНИЛ 1948 года. <http://www.math.nsc.ru/LBRT/g2/english/ssk/washnil48.htm>.
13. Шноль СЭ. Герои, злодеи, конформисты отечественной науки. Москва: Книжный дом «Либроком»; 2009.
14. Колчинский ЭИ. Советские юбилеи Ч. Дарвина и лысенкоизм. Историко-биологические исследования. 2015;7(2):10-52.
15. Александров ВЯ. Трудные годы советской биологии: Записки современника. СПб.: Наука; 1993.
16. Рапопорт ИА. Избранные труды. Открытие химического мутагена (1912-1990). Москва: Наука; 1993.

17. Строева ОГ, Рапопорт КА. Вступительная статья. В кн.: Материалы к библиографии ученых. Серия биологических наук. Генетика. Вып. 6. Иосиф Абрамович Рапопорт (1912-1990). Москва: Наука; 1993.
18. Рапопорт ИА. Микрогенетика. Москва: Наука; 2010.
19. Делоне НЛ. У времени в плену: Записки генетика. Глава IX. Москва: Российское гуманитарное общество; 2010.
20. Рапопорт ИА. Химический мутагенез. Теория и практика. Москва: Знание; 1966.
21. Рапопорт ИА, ред. Химические мутагены и пара-аминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений. Москва: Наука; 1989.
9. Auerbach Ch, Robson JM. Chemical production of mutations. *Nature*. 1946;157:302. DOI:10.1038/157302a0.
10. Anonymous. Iosif Abramovich Rapoport – Uchenyi, Voin, Grazhdanin. [Iosif Abramovich Rapoport – Scientist, Warrior, and Citizen. Essays, Memories, and Materials]. Moscow: Nauka; 2003. (In Russ.)
11. Stroyeva OG. Iosif Abramovich Rapoport. Moscow. Nauka; 2009. (In Russ.)
12. Speeches by IA Rapoport and VS Nemchinov at the August Session of VASKhNIL in 1948. <http://www.math.nsc.ru/LBRT/g2/english/ssk/washnil48.htm>
13. Shnol SE. Geroi, Zlodei i Konformisty Otechestvennoy Nauki. [Heroes, Villains, Conformists of National Science]. Moscow: Librocom; 2009. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Müller HJ. The problem of genetic modification. *Zeit ind. Abst. und Vererb.* 1927;(Supp. 1):234-60.
2. Nobel Prize winners: Joseph Muller. <https://indicator.ru/medicine/nobelevskie-laureaty-dzhozef-myoller.htm>
3. Koltsov NK. Organizatsiya Kletki: Sbornik Eksperimentalnykh Issledovaniy, Statey i Rechey [Cell Organization: A Collection of Experimental Studies, Articles and Speeches. 1903-1935]. Moscow-Leningrad; Gosudarstvennoye Izdatelstvo Biologicheskoy i Meditsynskoy Litratyury; 1936. (In Russ.)
4. Sakharov VV. Iodine as a chemical factor acting on mutation process in *Drosophila melanogaster*. *Biologicheskij Zhurnal*. 1932;I (3-4):1-8. (In Russ.)
5. Sakharov VV. The specificity of the action of chemical substances as mutational factors. *Biologicheskij Zhurnal*. 1938;7(3):595-618. (In Russ.)
6. Lobashov MYe, Smirnov FA. On the nature of the action of chemical agents on the mutation process. Report I. Action of acetic acid on nondisjunction and transgenesis. *Doklady AN SSSR*. 1934;2(3):307-11. (In Russ.)
7. Lobashov ME, Smirnov FA. On the nature of the action of chemical agents to the mutation processes. Report II. The effect of ammonia on the occurrence of lethal transgeneses. *Doklady AN SSSR*. 1934;3(3):174-8. (In Russ.)
8. Auerbach Ch, Robson JM. Production of mutations by allyl isothiocyanate. *Nature*. 1944:154:81. DOI:10.1038/154081a0.
14. Kolchinsky EI. [Soviet anniversaries of Charles Darwin vs Lysenkoism]. *Istoriko-Biologicheskkiye Issledovaniya*. 2015;7(2):10-52. (In Russ.)
15. Aleksandrov VYa. Trudnye Gody Sovetskoy Biologii: Zapiski Sovremennika. [The Difficult Years of Soviet Biology: Contemporary's Notes]. Saint Petersburg; Nauka; 1993. (In Russ.)
16. Rapoport IA. Izbrannyye Trudy. Otkrytiye Khimicheskogo Mutageneza (1912-1990). [Selected Works. Discovery of Chemical Mutagenesis (1912-1990)]. Moscow: Nauka; 1993. (In Russ.)
17. Stroyeva OG, Rapoport KA. [Introductory Article]. In: Materialy k Bibliografii Uchenykh. Seriya Biologicheskikh Nauk. Genetika. Vyp. 6. Iosif Abramovich Rapoport. [Materials for the Bibliography of Scientists. Biological Sciences Series. Genetics. Issue. 6. Joseph Abramovich Rapoport (1912-1990)]. Moscow: Nauka; 1993. (In Russ.)
18. Rapoport IA. Mikrogenetika. [Microgenetics]. Moscow: Nauka; 2010. (In Russ.)
19. Delone NL. U Vremeni v Plenu: Zapiski Genetika. Glava IX. [Captured by the Time: Geneticist's Notes. Chapter IX]. Moscow: Rossiyskoye Gumanisticheskoye Obschestvo; 2010. (In Russ.)
20. Rapoport IA. Khimicheskij Mutagenez. Teoriya i Praktika. [Chemical Mutagenesis. Theory and Practice]. Moscow: Znaniye; 1966. (In Russ.)
21. Rapoport IA, ed. Khimicheskkiye Mutageny i Para-Aminobenzoynaya Kislota v Povyshenii Urozhaynosti Selskokhoziaystvennykh Rasteniy. [Chemical Mutagens and Para-Aminobenzoic Acid for Increasing the Yield of Agricultural Plants]. Moscow: Nauka; 1989. (In Russ.)

ЛЕВ АНАТОЛЬЕВИЧ ЖИВОТОВСКИЙ

(к 80-летию со дня рождения)

Г.О. Османова

Марийский государственный университет, Институт естественных наук и фармации,
Йошкар-Ола, Российская Федерация

E-mail: gyosmanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.09.2022; принята к печати 28.09.2022

22 ноября 2022 года исполнилось 80 лет со дня рождения Льва Анатольевича Животовского - выдающегося ученого, специалиста в области математико-биологического научного знания, профессора, доктора биологических наук, кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией Института общей генетики РАН, главного научного сотрудника Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Заслуженного деятеля науки России, лауреата Государственной премии РФ, премии им. И.И. Шмальгаузена в области эволюционной биологии РАН, журнала The Lancet за лучшую статью года (2003) и просто замечательного человека. Л.А. Животовский внес весомый вклад в развитие популяционной и эволюционной биологии. Большинство его исследований сфокусировано на изучении природных популяций растений и животных. С коллегами он исследовал популяционную структуру дубов на Кавказе, генетику растений, в том числе сельскохозяйственных (хлопчатник, виноград и др.), восстановление флоры в районах нефтедобычи в Тюменской области). В результате этой работы получены патенты по методикам отбора в популяциях растений и по способам селекции. Им предложены новый популяционный показатель – «индекс эффективности» и новая классификация нормальных популяций растений – «дельта-омега», основанная на совместном использовании введенного им индекса эффективности и предложенного А.А. Урановым индекса возрастности. Лев Анатольевич разработал экогеографический подход, предложив концепцию экогеографических единиц, и тем самым внес значительный вклад в развитие общей теории популяционной структуры вида. Лев Анатольевич – научный руководитель и участник многих экспедиций на Дальний Восток, в Сибирь и другие регионы страны. Автор/соавтор более 300 научных статей и восьми монографий, в том числе – фундаментального учебника «Генетика природных популяций» (2021).

Ключевые слова: юбилей, творческая биография, Лев Анатольевич Животовский, генетика, популяционная и эволюционная биология, классификация «дельта-омега», экогеографические единицы, математические модели, статистические методы.

LEV ANATOLYEVICH ZHIVOTOVSKY (to his 80th birthday)

G.O. Osmanova

Institute of Natural Sciences and Pharmacy at Mari State University, Yoshkar-Ola, the Russian Federation

E-mail: gyosmanova@yandex.ru

November 22, 2022 is the 80th birthday of Lev Anatolyevich Zhivotovskiy, an outstanding scientist, expert in population and mathematical biology, Professor, PhD in biology and mathematics, head of a laboratory at Research Institute of General Genetics of the Russia Academy of Sciences, principal researcher at All-Russia Research Institute of Fishery and Oceanography, Honored Scientist of the Russian Federation, laureate of Science and Technology Award of the Russian Federation, of I.I. Schmalhausen Evolutionary Biology Award of the Russian Academy of Sciences, and of The Lancet Award for the Best Article of the Year (2003), and just a wonderful personality. Most of his research focuses on studying natural populations of plants and animals. Jointly with his colleagues, he studied the population structure of oaks in the Caucasus, the genetics of conifers and of agricultural plants (cotton, grapes etc.) and addressed flora restoration in oil production areas in Tyumen Region. Based on these works, patents were obtained for methods of selection and breeding of plant populations. He introduced a new population indicator «efficiency index» and a new classification of normal plant populations («delta-omega»). Based on the concerted application of the efficiency index and the age index suggested by A.A. Uranov, Lev A. developed an ecogeographic approach by proposing the concept of ecogeographic units thereby making a significant contribution to the development of a general theory of species population structure. Lev A. Zhivotovskiy has been being a scientific supervisor and participant of many expeditions to the Far East, Siberia and other regions of the Russian Federation. He has authored/coauthored more than 300 research articles and eight monographs, including his fundamental textbook «The Genetics of Natural Populations.» (2021).

Keywords: jubilee, creative biography, Lev Anatolyevich Zhivotovskiy, genetics, population and evolutionary biology, «delta-omega» classification, ecogeographic units, mathematical models, statistical methods.

Лев Анатольевич Животовский родился 22 ноября 1942 года в г. Катта-Кургане Самаркандской области. После скитаний от станиц Кубани до строек Волго-Донского (Сталинградская обл.) и Волго-Балтийского (Вологодская обл.) каналов, жизни в пос. Израель и Воркуте (Коми АССР) семья осела в г. Старый Оскол Белгородской области, где он в 1959 году окончил среднюю школу и в том же году поступил на механико-математический факультет МГУ, где успешно защитил дипломную работу по задачам нелинейного программирования. По окончании МГУ поступил в аспирантуру в Центральном экономико-математическом институте АН СССР (ЦЭМИ), где занимался теорией игр, задачами оптимизации и дифференциальными уравнениями. В это же время работал в Главной редакции физико-математической литературы издательства «Наука», где был редактором перевода всемирно известной книги Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение» («Наука», 1970). В 1968 году защитил кандидатскую диссертацию по дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом (руководитель Лев Эрнестович Эльсгольц). Трагическая кончина руководителя, который, по словам Льва Анатольевича, был образцом любви к науке и бережного обращения с людьми, коренным образом повлияла на дальнейший жизненный путь Льва Анатольевича.

Вообще, Научная Судьба человека часто определяется его Учителями, сумевшими не только заинтересовать молодого исследователя, но и разбудить в нем способности к научному творчеству. После защиты кандидатской диссертации в 1968 году Л.А. Животовский переходит на должность научного сотрудника Всероссийского НИИ животноводства ВАСХНИЛ (ВИЖ) в вычислительной лаборатории (заведующий – прекрасный ученый, будущий вице-президент Всесоюзной сельскохозяйственной академии Лев Константинович Эрнст) и резко меняет научное направление, занявшись математическим моделированием селекционно-генетических процессов в популяциях сельскохозяйственных животных. Более того, походы по сельскохозяйственным фермам под эгидой его куратора и старшего друга завлаба в ВИЖ Бориса Владимировича Александрова (сильно повлиявшего, по словам Льва Анатольевича, на его формирование как биолога) и чтение специальной литературы помогли ему вникнуть в специфику проблем животноводства и на всю жизнь привили ему уважение к практике сельского хозяйства, к проблемам селекции и разведения.

На научное мировоззрение Льва Анатольевича несомненно повлияло также знакомство с Николаем Васильевичем Глотовым и другими молодыми учеными из окружения Н.В. Тимофеева-Ресовского, с которыми он познакомился в г. Обнинске (математик Ю.М. Свиричев, медик Е.К. Гинтер, эколог А.В. Яблоков, почвовед А.Н. Тюрюканов и многие другие). В 1972 году



Л.А. Животовский проходит повышение квалификации на факультете при кафедре генетики и селекции биофака МГУ. Увлеченность и исследовательский талант открыли Льву Анатольевичу совершенно новый для него мир биологических объектов. Дипломную работу по кроссинговеру и компаунд-хромосомам у дрозофилы защищает под руководством Н.В. Глотова и лучшего специалиста по дрозофиле – О.В. Кузнецовой. Эта первая научная работа с лабораторным биологическим объектом – мушкой дрозофилой – заложила тот уникальный генетический фундамент, который определил весь дальнейший научный путь Льва Анатольевича.

Более того, в эти же годы у Льва Анатольевича вырос интерес к изучению дикой природы, который пробудили в нем экспедиции на Кавказ вместе с Н.В. Глотовым, Л.Ф. Семериковым, М.М. Магомедмирзаевым и другими коллегами-друзьями для изучения популяций древесных растений, показавшего ему, как статистические методы анализа данных имитируют изменчивость природных популяций. Перейдя на работу в 1974 году в Институт общей генетики (ныне ИОГ им. Н.И. Вавилова РАН), он надолго увлекся генетикой количественных признаков и в 1982 году защитил докторскую диссертацию по теории отбора в полигенных системах (оппоненты: А.В. Яблоков, Ю.М. Свиричев, Е.К. Гинтер). Практически сразу, в этот же год, в свет выходит коллективная монография-учебник «Биометрия» (1982), ставшая настольной книгой биологов по анализу данных.

С 1984 года Лев Анатольевич, заведующий в ИОГ лабораторией генетики количественных признаков, продолжает активно заниматься научным творчеством и издает (рис. 1) две широко цитируемые монографии: «Интеграция полигенных систем в популяциях» («Наука», 1984) и «Популяционная биометрия» («Наука», 1991), принесшие ему (вместе с коллективом ученых) Премию им. И.И. Шмальгаузена в области эволюционной биологии РАН (1995) и Государственную премию РФ (1996). В эти же годы, находясь в бурлящей научной атмосфере лаборатории Юрия Петровича Алтухова, а затем заведующий собственной лабораторией, Лев Анатольевич глубоко вник в проблемы популяционно-генетической структуры видов у гидробионтов (в основном – лососевых рыб), включая проблемы их искусственного воспроизводства с позиций охраны природы, что было отражено в большом числе статей и в коллективной монографии «Теория и практика сохранения биоразнообразия при разведении тихоокеанских лососей» (2012).

Рос интерес к природным популяциям животных и растений, начавшийся с исследования популяций дубов на Кавказе и продолжившийся в исследованиях на животных. Этому способствовало и то, что Лев Анатольевич – полевик до мозга костей – был научным руководителем и участником многих экспедиций на Дальний Восток, в Сибирь и другие регионы страны (рис. 2).

Тяга к диким местам и любовь к экспедиционной жизни выразилась, например, и в том, что, по словам Льва Анатольевича, он не хотел праздновать свой 70-летний юбилей в «каменных джунглях», представляя себя в день рождения стоящим в реке в болотных сапогах и держащим в руках большую рыбу. В результате он встретил этот день на южнокурильском острове Кунашир (рис. 3).

Интерес к генетической организации природных популяций и к вопросам охраны природы не мог не касаться популяций растений, и Лев Анатольевич ре-



Рис. 1. Монографии Л.А. Животовского, изданные в разные годы



Рис. 2. Экспедиционные будни Льва Животовского.

Слева: за рулем научной яхты «Флора», на которой под руководством капитана, доктора биологических наук Л.Ф. Семерикова собирали материал в районе средней и нижней Оби. В центре: за измерениями рыб на курильском острове Итуруп. Справа: за житейскими разговорами с местными жителями



Рис. 3. Юбилей-70 на р. Винай (о. Кунашир, 22.11.2012)

гулярно и надолго обращался к насущным проблемам теории и практики растительных объектов. В частности, его заинтересовала генетика хвойных растений, генетические особенности которых (гаплоидность эндосперма и диплоидность зародыша), вместе с анализом генотипа материнского растения (хвои), позволяли однозначно определять гаплотип оплодот-

ворившей пыльцы и одновременно исследовать два поколения и процессы инбридинга, аутбридинга и отбора.

В конце 1980-х и начале 1990-х Лев Анатольевич вместе с Николаем Васильевичем Гловым, работавшим тогда в Биологическом институте Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) университета, и

Леонидом Филатовичем Семериковым из Института экологии растений и животных в Свердловске (ныне Екатеринбург) организовали многолетние экспедиции по изучению восстановления флоры в районах нефтедобычи в Тюменской области (Западная Сибирь). Лаборатория Льва Анатольевича взяла на себя изучение сосны сибирской и сосны обыкновенной. Кстати, продолжая работу по генетике хвойных и генетике сельскохозяйственных растений, он с коллегами получил отечественные патенты «Способы отбора семян хвойных растений» (№ 1281216, 1986), «Способ селекции и семеноводства» (№ 1445645, 1988). Сохраняя интерес к изучению не только природных, но и сельскохозяйственных растений (инициированные совместными работами под руководством Ю.П. Алтухова по генетике и селекции хлопчатника в конце 1970-х), Лев Анатольевич организует совместную работу с Институтом виноделия и виноградарства «Магарач» в Ялте. В течение нескольких лет он вместе со своими сотрудниками выезжает на плантации Крыма для сбора и совместного с ампелографом Л.П. Трошиным анализа материала по сортам и клонам винограда. Эта работа вылилась в ряд научных публикаций, патент «Способ клонового отбора винограда по комплексу признаков» (№ 1417842, 1988) и Методические рекомендации «Идентификация видов, сортов и клонов винограда по белкам как маркерам генов» (ВАС-ХНИЛ, 1990).

Вклад Л.А. Животовского в науку, включая изучение природных популяций растений, трудно переоценить. Продолжая теоретические исследования проблем генетической адаптации популяций на математических моделях, Лев Анатольевич обратился в начале 1990-х к недавно тогда открытому у человека полиморфизму микросателлитной ДНК, опубликовав вместе с зарубежными и российскими коллегами ставшие широко известными работы по генетической истории человечества. Это принесло ему в составе международного коллектива авторов Премию журнала *The Lancet* (2003) за лучшую статью года. Затем вместе с коллегами по руководимой им лаборатории в ИОГ и из других учреждений страны он применил эти ДНК-маркеры для изучения популяций рыб.

Вместе с тем, Лев Анатольевич продолжал расширять сферу своих научных интересов в области популяционной биологии растений. В феврале 1997 года на базе кафедры ботаники, экологии и физиологии растений (ныне кафедра экологии и кафедра биологии) Марийского государственного университета (г. Йошкар-Ола) был проведен I Всероссийский популяционный семинар «Жизнь популяций в гетерогенной среде», одним из инициаторов которого, наряду с Н.В. Готовым и Л.А. Жуковой, был и Лев Анатольевич (рис. 4).

Знакомство с одним из лидеров отечественного популяционно-онтогенетического направления, профессором Людмилой Алексеевной Жуковой и сотрудни-



Рис. 4. На I Всероссийском популяционном семинаре (1997): сидят (слева направо) – И.А. Головенкина, Л.А. Жукова, Р.М. Алексеева, Е.С. Закамская, Г.О. Османова, Е.А. Золотарева; стоят (слева направо) – О.Е. Максименко, В.В. Тараканов, Н.В. Готов, М.В. Бекмансуров, О.П. Ведерникова, Е.А. Булыгин, С.А. Дубровная, Н.В. Илюшечкина, Н.В. Ившин, Ю.Г. Суетина, Л.А. Животовский

ками открыло ему новые горизонты в популяционной структуре видов растений. С 1998 года Людмила Алексеевна стала приглашать Льва Анатольевича для чтения спецкурсов студентам и аспирантам. По инициативе Л.А. Жуковой на кафедре стали организовывать научные семинары для сотрудников, аспирантов и студентов, на которых обсуждались актуальные и проблемные вопросы популяционной ботаники и экологии. Такие семинары и консультации при участии известных ученых с мировым именем, таких как Л.А. Животовский – специалист широкого профиля, были крайне необходимы периферийным вузам.

Лев Анатольевич проявлял искренний интерес к научной жизни кафедры. Однажды он заинтересовался статьей А.А. Уранова «Возрастной спектр ценопопуляций как функция времени» (1975). Поводом к этому послужило обсуждение типов спектров онтогенетических состояний в нормальных популяциях, согласно которым онтогенетический спектр имеет один максимум. А как быть, если в спектре доминирует не одна онтогенетическая группа, а две или более? К тому же, заметил Лев Анатольевич, из теории анализа данных известно, что оценивание точек максимума и минимума – процедура статистически неустойчивая. В результате Лев Анатольевич заинтересовался данной проблемой, и нестандартность его мышления и математический склад ума сделали свое дело. Проанализировав данные аспирантов кафедры, в том числе

полученные автором этой публикации, Лев Анатольевич блестяще решил эту проблему, предложив новый популяционный показатель – «индекс эффективности» и новую классификацию нормальных популяций – «дельта-омега», основанную на совместном использовании введенного им индекса эффективности и индекса возрастности, предложенного А.А. Урановым (рис. 5). Обобщающая статья «Онтогенетические состояния, эффективная плотность и классификация популяций растений» была опубликована Л.А. Животовским в журнале Экология (2001) и с тех пор широко цитируется и используется в популяционно-онтогенетических исследованиях.

Прорывом в научной деятельности Льва Анатольевича и значительным вкладом в развитие общей теории популяционной структуры вида стала предложенная им концепция экогеографических единиц. В 1990-е годы зарубежными исследователями были предложены две концепции сохранения природного популяционного разнообразия: 1) сохранять существующее ныне генетическое разнообразие, которое обеспечивает адаптацию популяций к условиям их среды обитания; 2) сохранять условия среды и те эволюционные процессы, которые генерируют и поддерживают это генетическое разнообразие в популяциях. Однако эти концепции трудно на практике прямо применить к проблеме выделения территориальных границ популяций из-за отсутствия информации об адаптивных генотипах и обуславливающих их средовых



Рис. 5. Лев Анатольевич представляет новую классификацию популяций растений «дельта-омега» на научном семинаре кафедры ботаники, экологии и физиологии растений (г. Йошкар-Ола, 2000). На переднем плане – Н.В. Готов и Л.А. Жукова

факторах в конкретных популяциях. Определить границы популяций очень сложно или вообще невозможно из-за колебаний численности, изменений климата, условий среды, влияния антропогенных факторов и пр. И тогда Лев Анатольевич, занимающийся много лет гидробионтами, предложил двухэтапный подход к изучению популяционной структуры вида (на примере лососевых рыб), основанный на совместном использовании экологических (средовых) и генетических маркеров и выделении экогеографических единиц (ЭГЕ). Применение данного подхода нашло отражение в целом ряде статей, посвященных популяционной структуре тихоокеанских лососей. Важность выделения экогеографических единиц заключается не только в расширении наших представлений о структуре видового разнообразия, но и в практической пользе применения ЭГЕ. В частности, это было использовано Л.А. Животовским для определения единиц запаса лососевых рыб – как промысловых, так и редких видов.

Выделение экогеографических единиц важно не только для животных, но в еще большей степени для растений. Автору этих строк – ботанику и популяционному экологу – Лев Анатольевич предложил апробировать этот подход на растениях. И началась наша очередная совместная научная работа, еще раз убедившая в том, что Лев Анатольевич – незаурядная, талантливая и влюбленная в науку личность, человек с кипучей энергией, кладезь идей. Он с интересом читал ботаническую литературу,

задавал вопросы (помню, как мы с ним разбирали тему «Плоды и семена»; если честно, и у студентов по этой теме часто возникают вопросы) и открывал для себя мир травянистых растений. Предложенный им экогеографический подход мы решили, видоизменив его, апробировать на одном из представителей орхидных – башмачке настоящем, редком виде для Республики Марий Эл. Льву Анатольевичу сразу же захотелось побывать в местообитаниях этого вида, чтобы самому увидеть, где и как растет башмачок, и мы поехали в деревню Коркатово Республики Марий Эл (рис. 6.). Как он говорил: «Если не потрогаешь особей в их местообитании, то они тебя не признают». Был ясный солнечный день, голубое небо, и откуда-то доносились голоса птиц. Надо было видеть, как загорелись его глаза, когда он увидел в окрестностях деревни бескрайние поля, заросшие молодыми березками и елями холмы, островки лесов... Поездка в Коркатово произвела на него неизгладимое впечатление. Я поняла, что Лев Анатольевич проявляет неподдельный интерес ко всем объектам, с которыми он работает, будь то животные или растения, и относится к ним с большим уважением, трепетом и любовью. И это характеризует Льва Анатольевича как человека, общение с которым помогает ощутить неисчерпаемость мира и величие природы, а предназначение Homo sapiens – бережно относиться к любым представителям живой природы и быть верным тому делу, которым ты занимаешься.



Рис. 6. В окрестностях деревни Коркатово (Республика Марий Эл)



Рис. 7. Совместный доклад на конференции по выделению экогеографических единиц и агрегаций у растений (2019)

Нами была предложена (рис. 7) концепция экогеографических агрегаций (ЭГА) видов растений, согласно которой экогеографические единицы каждого вида объединяют в территориально связанные группы (агрегации), если они соседствуют друг с другом и обитают в сходных условиях.

Выделение ЭГА основано на анализе тематических географических карт (почв, растительности, рельефа и пр.). Определенные участки территории, занимаемые многовидовыми экогеографическими агрегациями, можно рассматривать в качестве кандидатов на создание новых охраняемых природных территорий. Сейчас с улыбкой вспоминаю, как вначале мы пытались вручную, на листах ватмана и пергаментной бумаге, совместить на одной карте различную картографическую информацию. Затем мы заплутали в обилии географических карт, и тогда Лев Анатольевич задумался и сказал, что наверняка что-то имеется в виде компьютерных программ. После недолгих поисков по интернету выяснилось, что давно уже существуют ГИС-технологии (ГИС – географические информационные системы) и соответствующие пакеты программ. Тут я осознала, что о них что-то было мне известно, но я не могла их представить в таком качестве, а Лев Анатольевич был до того далек от них, но быстро их освоил, и дальше мы работали с ними.

Разработанный Л.А. Животовским экогеографический подход, включая адаптированный к изучению растительных объектов, призван решать важную природоохранную задачу: разработку и реализацию мер по охране, восстановлению и рациональному исполь-

зованию биоразнообразия, в том числе при выработке рекомендаций по выделению охраняемых природных территорий. В качестве примера мы рассмотрели примерно сорок редких видов растений Республики Марий Эл и пришли к выводу, что популяции этих видов образуют более десятка экогеографических агрегаций, которые лишь частично входят в состав существующих особо охраняемых природных территорий республики. Результаты наших совместных исследований вылились в монографию «Популяционная биогеография растений» (2019).

Лев Анатольевич продолжает активно заниматься наукой. Он полон сил и идей. В 2021 году он выпустил фундаментальный учебник «Генетика природных популяций». Суть этой книги емко выражена рецензентом: «...Этот учебник совсем другой, поскольку его автор – математик по образованию и биолог по всей научной (лабораторной и экспедиционной) жизни. Блестящее знание разных сторон предмета и прекрасный язык позволили ему найти идеальный баланс между простотой текста и научной точностью. Это действительно уникальный учебник по широте охвата материала, увлекательности приводимых примеров, простоте стиля, ясности изложения приведенных аргументов».

Пожелаем Льву Анатольевичу здоровья и долголетия, в том числе научного, и чтобы он встретил следующий юбилей все так же: в лугах, горах и морях, в кругу экспедиционников, с новыми идеями и монографиями, с всегда присущим ему оптимизмом, с захватывающими рассказами о научных приключениях!



Подписано в печать **02.12.2022.**

Дата выхода в свет **19.12.2022 10:21.**

Отпечатано в типографии ООО "Типография Лесник":

197374, Санкт-Петербург, ул. Сабировская, 37.

Тел.: **+7 (812) 649-73-14.**

Тираж **700 экз.**

Цена свободная

Адрес издателя и редакции:

197110, Санкт-Петербург, Большая Разночинная ул., д. 28; тел./факс: (812) 415-41-61

Учредитель: **Фонд научных исследований "XXI век"**

Главный редактор: **Розенберг Геннадий Самуилович**