ISSN 2542-2006

Том *Volume* **2** **Номер** **Number** **4** **Декабрь** **December** **2018**

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
WATER PROBLEMS INSTITUTE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА
ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Журнал освещает результаты фундаментальных исследований и прикладных работ по изучению состояния, закономерностей процессов и динамики в природных, антропогенно созданных и/или антропогенно нарушенных экосистемах любого ранга (от биотопа до биосферы), а также в отдельных компонентах этих экосистем (как живых, так и неживых) повсеместно: во всех природных зонах и ландшафтах, на суше и в водной стихии. Статьи соотвествующей тематики принимаются по следующим научным направлениям: география, биология, лесное и сельское хозяйство.

The journal highlights the results of fundamental and applied investigations on the study of the state, processes and dynamics in natural, anthropogenic and/or anthropogenically disturbed ecosystems of any scale (beginning from biotope and up to biosphere) as well as in separate components of those ecosystems (alive and lifeless) everywhere: in all natural zones and landscapes, on land and in the water. Papers on the related topics submitted to the journal should be related to the following branches of science: geography, biology, forest and agricultural management.

МОСКВА
MOSCOW

2018

WATER PROBLEMS INSTITUTE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Vol. 2, No. 4, 2018, December
Journal is founded in January 2017
Issued 4 times per year

Editor-in-Chief, Dr. geogr. Zh.V. Kuzmina

Editorial Council:
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences
V.I. Danilov-Danilyan,
Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Kulik,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.V. Melikhov,
Academician of the Russian Academy of Sciences A.S. Rulev

Editorial Board:
M.V. Bolgov, A.N. Gelfan, E.I. Golubeva, T.V. Dikariova, N.G. Mazey,
N.M. Novikova, G.N. Ogureeva, E.I. Pankova, S.A. Podolskiy, E.G. Suslova,
A.S. Viktorov, M.F. Vundtsettel, L.G. Yemelyanova

Executive Secretary:
E.I. Tobolova

Head of Editorial Office:
O.S. Grinchenko

Addresses of Editorial Offices:
Russia, 119333 Moscow, Gubkina str., 3, WPI RAS
Tel.: (499) 135-70-41, (499) 135-70-31. Fax: (499) 135-54-15
E-mail: dynamics-journal@yandex.ru
http://www.ecosystemsdynamic.ru

MOSCOW

2018

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОСИСТЕМЫ:
ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА

Том 2, № 4, 2018, декабрь
Журнал основан в январе 2017 г.
Выходит 4 раза в год

Главный редактор
доктор географических наук
Ж.В. Кузьмина

Редакционный совет:
член-корреспондент Российской академии наук В.И. Данилов-Данильян,
академик Российской академии наук К.Н. Кулик,
член-корреспондент Российской академии наук В.В. Мелихов,
академик Российской академии наук А.С. Рулев

Редакционная коллегия:
М.В. Болгов, А.С. Викторов, М.Ф. Вундцеттель, А.Н. Гельфан, Е.И. Голубева,
Т.В. Дикарева, Л.Г. Емельянова, Н.Г. Мазей, Н.М. Новикова, Г.Н. Огуреева,
Е.И. Панкова, С.А. Подольский, Е.Г. Суслова

Ответственный секретарь:
Е.И. Тоболова

Заведующий редакцией:
О.С. Гринченко

Адрес редакции:
Россия, 119333 Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН
Телефон: (499) 135-70-41, (499) 135-70-31. Факс: (499) 135-54-15
E-mail: dynamics-journal@yandex.ru
http://www.ecosystemsdynamic.ru

Москва

2018

© Журнал основан в 2017 г.
Учрежден и издается
Институтом водных проблем Российской академии наук.
Журнал как сетевое издание зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций;
Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77-68782 от 17.02.2017.
Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN Российской Федерации,
в Национальном информационно-аналитическом центре России – ВИНИТИ,
а также в научных электронных библиотеках НЭБ, РИНЦ, КИБЕРЛЕНИНКА.

The journal has been founded in 2017.
It was founded and published by the
Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.
The Journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (in Roskomnadzor) as a web Media;
Certification Number is ЭЛ № ФС 77-68782 of 17.02.2017.
The Journal is registered in National centre ISSN of Russian Federation,
All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI),
and also in scientific electron libraries Elibrary, Science Index, CYBERLENINKA.

Информация о журнале, правила для авторов располагаются на сайте
http://www.ecosystemsdynamic.ru

Information about Journal and Rules for authors are at the site
http://www.ecosystemsdynamic.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Том 2, номер 4, 2018 декабрь

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Климатические изменения в бассейне Амура и их влияние на экосистемы

Ж.В. Кузьмина, С.Е. Трешкин 5-60

Динамика берегов Таманского и Керченского полуостровов
в условиях изменения уровня моря

В.А. Дикарёв 61-74

Современное состояние растительности Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича и тенденции её трансформации в современных условиях

С.В. Черноруцкий 75-105

ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Опыт составления и сравнительного анализа баз данных по целинным каштановым почвам Прикаспия (Россия, Казахстан) и Монголии

В.А. Ибрагимова, М.В. Конюшкова, Д.Л. Голованов 106-131

Оценка потенциала устойчивости экосистем Костанайской области (Республика Казахстан)

С.Р. Тюлюова, Е.И. Голубева 132-143

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора)
в фито-очистных системах

К.Ю. Рыбка, Н.М. Щеголькова 144-171

CONTENTS

Volume 2, Number 4, 2018 December

DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Climatic Changes in the Amur Basin and the Way They Affect Ecosystems
Zh.V. Kuzmina, S.E. Treshkin 5-60

The Kerch and Taman Peninsulas Coast Dyanmics under Anticipated Sea-Level Rise
V.A. Dikarev 61-74

Modern Condition of Vegetation of P.G. Smidovich Mordovsky State Nature Reserve and Trends of its Transformation in Present-Day Conditions
S.V. Chernorutsky 75-105

ASSESSMENT OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Practice of Composing and Applying Comparative Analysis to the Databases of Virgin Chestnut Soils of Caspian Region (Russia, Kazakhstan) and Mongolia
V.S. Ibragimova, M.V. Konyushkova, D.L. Golovanov 106-131

Assessment of Potential Sustainability of Kostanay Region Ecosystems (Republic of Kazakhstan)
S.R. Tyulyuova, E.I. Golubeva 132-143

METHODS OF SUSTENANCE AND RESERVATION OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Mechanisms of Nutrients (Nitrogen and Phosphorus) Removal from Wastewater in Constructed Wetlands
K.Yu. Rybka, N.M. Shchegolkova 144-171

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, с. 5-60

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 551.583.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БАССЕЙНЕ АМУРА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭКОСИСТЕМЫ[1]

© 2018 г. Ж.В. Кузьмина*, С.Е. Трешкин**

**Институт водных проблем РАН*
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: jannaKV@yandex.ru
***Министерство науки и высшего образования*
Россия, 125009, г. Москва, ул. Тверская, д. 11. E-mail: biost@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018. После доработки 15.10.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

На основе анализа многолетней динамики (с момента открытия станций по 2013 г.) годовых, полугодовых и сезонных значений основных метеорологических характеристик (температуры воздуха и осадков для 22 метеостанций) установлены тенденции изменений температуры воздуха (средней, максимальной и минимальной) и количества выпадающих атмосферных осадков в бассейне Амура. На основе разработанного относительного коэффициента изменений (ОКИ) метеорологических характеристик оценена степень изменений 6-и таких показателей (суммарных осадков; средней температуры воздуха, средней максимальной, абсолютной максимальной, средней минимальной и абсолютной минимальной температур воздуха) по 11 внутригодовым периодам: годовой, весенний, летний, осенний, зимний и 6-и полугодиям – 3-м тёплым (с 4-го по 9-ый, с 4-го по 10-ый и с 5-го по 10-ый месяцы), и 3-м холодным (оставшиеся месяцы соответственно). Установлены тенденции изменения климата в бассейне Амура. На основе анализа индексов засушливости Педя (1) и его модифицированного варианта (Педя 2) для всех 11 внутригодовых периодов выявлены направления изменений совокупного влажностно-температурного режима в бассейне Амура в настоящее время и в ближайшем будущем. Определены тенденции изменений наземных экосистем бассейна Амура в недалеком будущем.

Ключевые слова: основные метеорологические характеристики, относительный коэффициент изменений метеорологических характеристик (ОКИ), климатические изменения, индекс засушливости Педя (1) и его модифицированный вариант (Педя 2), изменение влажностно-температурного режима, изменения наземных экосистем.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10020

С начала 90-х годов прошлого века климатические изменения стали реальностью нашего дня. Сегодня подготавливаются научные (Оценочный доклад …, 2008; Второй оценочный …, 2014), социальные и хозяйственные программы, которые должны предотвратить или минимизировать ущерб, связанный с сильным воздействием изменений климата на окружающую среду. Однако для минимизации ущерба от климатических изменений нужно, прежде всего, четко представлять, какие изменения появятся в ландшафтах и какой отклик на эти изменения будет в экосистемном покрове планеты. Таким образом, прогноз динамики экосистем как пойменных, так и водосборных территорий

[1] Работа выполнена по теме НИР Института водных проблем РАН (№ 0147-2018-0002) «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности», № государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8, Раздел темы «2.6 Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях».

является чрезвычайно важной задачей, он не возможен без анализа основных климатических характеристик, влияющих на экосистемы. Решение этой задачи может положить основы для разработки совершенно новых мероприятий по сохранению и поддержанию не только естественных экосистем на охраняемых территориях, но также сможет определить новые направления развития некоторых отраслей народного хозяйства (лесного, сельского, водного) в условиях меняющегося климата.

Материалы и методы

Основная исследовательская часть работы была выполнена на основе собственной методики оценки динамических нарушений в экосистемах и ландшафтах (Кузьмина, Трешкин, 2014, 2017 б, а) в связи с климатическими и гидрологическими изменениями.

В первую очередь проводился статистический анализ климатических данных для установления наличия (или отсутствия) по климатическим причинам изменений в экосистемах и ландшафтах (Кузьмина, Трешкин, 2014; 2017 б). Для этого:

- определялось наличие (или отсутствие) трендов метеорологических характеристик за весь имеющийся в наличии многолетний период наблюдений (от момента открытия метеостанции до настоящего времени);
- оценивалась величина изменений для каждой климатической характеристики по собственному относительному коэффициенту изменений (ОКИ, %) основных метеорологических и гидрологических характеристик;
- оценивалась величина изменений от взаимовлияния двух основных метеохарактеристик (средней температуры и осадков) для выявления многолетней динамики влажностно-температурного режима, как в настоящее время (по Индексу засушливости Педя 1), так и в будущем (по предлагаемому модифицированному Индексу засушливости Педя 2);
- выявлялось наличие (или отсутствие) климатических изменений в регионе (ландшафтах) на основе анализа всех полученных результатов и опубликованных материалав.

Для наземных экосистем бассейна Амура и прогноза их динамических изменений наиболее важными метеорологическими характеристиками в оценке климатических изменений были выбраны шесть: средние, абсолютные минимальные и максимальные, а также средние минимальные и максимальные величины температур воздуха и суммарных атмосферных осадков в многолетнем аспекте для 22-х метеостанций Росгидромета (рис. 1).

19 из этих метеостанций находятся в бассейне Амура и 3 – в сибирском – Ленском бассейне (Алдан, Канку, Токо). Для сравнения климатических тенденций Амурского бассейна с близлежашими северо-восточными территориями были взяты три Сибирские метеостанции. Все станции входят в систему Всемирной метеорологической организации (ВМО) и имеют длительные непрерывные выверенные и корректные ряды наблюдений (осадков и температуры). Для анализа использовались суточные данные следующих метеостанций (рис. 1): 1 – Алдан (Саха-Якутия), 58° 37' с.ш., 125° 22' в.д., 682 м БС, № ВМО 31004; 2 – Архара (Амурская обл.), 49° 25' с.ш., 130° 05' в.д., 135 м БС, № ВМО 31594; 3 – Благовещенск (Амурская обл.), 50° 16' с.ш., 127° 30' в.д., 132 м БС, № ВМО 31510; 4 – Богородское (Хабаровский край), 52° 23' с.ш., 140° 28' в.д., 35 м БС, № ВМО 31439; 5 – Бомнак (Амурская обл.), 54° 43' с.ш., 128° 56' в.д., 357 м БС, № ВМО 31253; 6 – Верхняя Томь (Амурская обл.), 51° 21' с.ш., 130° 23' в.д., 261 м БС, №ВМО 31459; 7 – Екатерино-Никольское (Еврейская автономная обл.), 47° 44' с.ш., 130° 58' в.д., 73 м БС, № ВМО 31707; 8 – Елабуга (Хабаровский край), 48° 49' с.ш., 135° 53' в.д., 58 м БС, № ВМО 31733; 9 – Канку (Саха Якутия), 57° 39' с.ш., 125° 58' в.д., 1204 м БС, № ВМО 31102; 10 – Константиновка (Амурская обл.), 49° 47' с.ш., 129° 55' в.д., 116 м БС, № ВМО 311586; 11 – Мазаново (Амурская обл.), 51° 38' с.ш., 128° 38' в.д., 161 м БС, № ВМО 31443; 12 – Нижнетамбовское (Хабаровский край), 50° 56' с.ш., 138° 11' в.д., 18 м БС, № ВМО 31562; 13 – Норск (Амурская

обл.), 52° 21' с.ш., 129° 55' в.д., 208 м БС, № ВМО 31388; 14 – Смидович (Еврейская автономная обл.), 48° 37' с.ш., 133° 50' в.д., 52 м БС, № ВМО 31725; 15 – Солекуль (Хабаровский край), 49° 17' с.ш., 138° 00' в.д., 911 м БС, № ВМО 31677; 16 – Софийский прииск (Хабаровский край), 52° 16' с.ш., 133° 59' в.д., 902 м БС, № ВМО 31478; 17 – Сутырь (Хабаровский край), 50° 04' с.ш., 132° 08' в.д., 347 м БС, № ВМО 31538; 18 – Токо (Хабаровский край), 56° 17' с.ш., 131° 08' в.д., 850 м БС, № ВМО 31137; 19 – Хабаровск (Хабаровский край), 48° 31' с.ш., 135° 10' в.д., 76 м БС, № ВМО 31735; 20 – Чекунда (Хабаровский край), 50° 49' с.ш., 132° 10' в.д., 272 м БС, № ВМО 31532; 21 – Черняево (Амурская обл.), 52° 47' с.ш., 126° 00' в.д., 210 м БС, № ВМО 31371; 22 – Экимчан (Амурская обл.), 53° 04' с.ш., 132° 56' в.д., 542 м БС, № ВМО 31329.

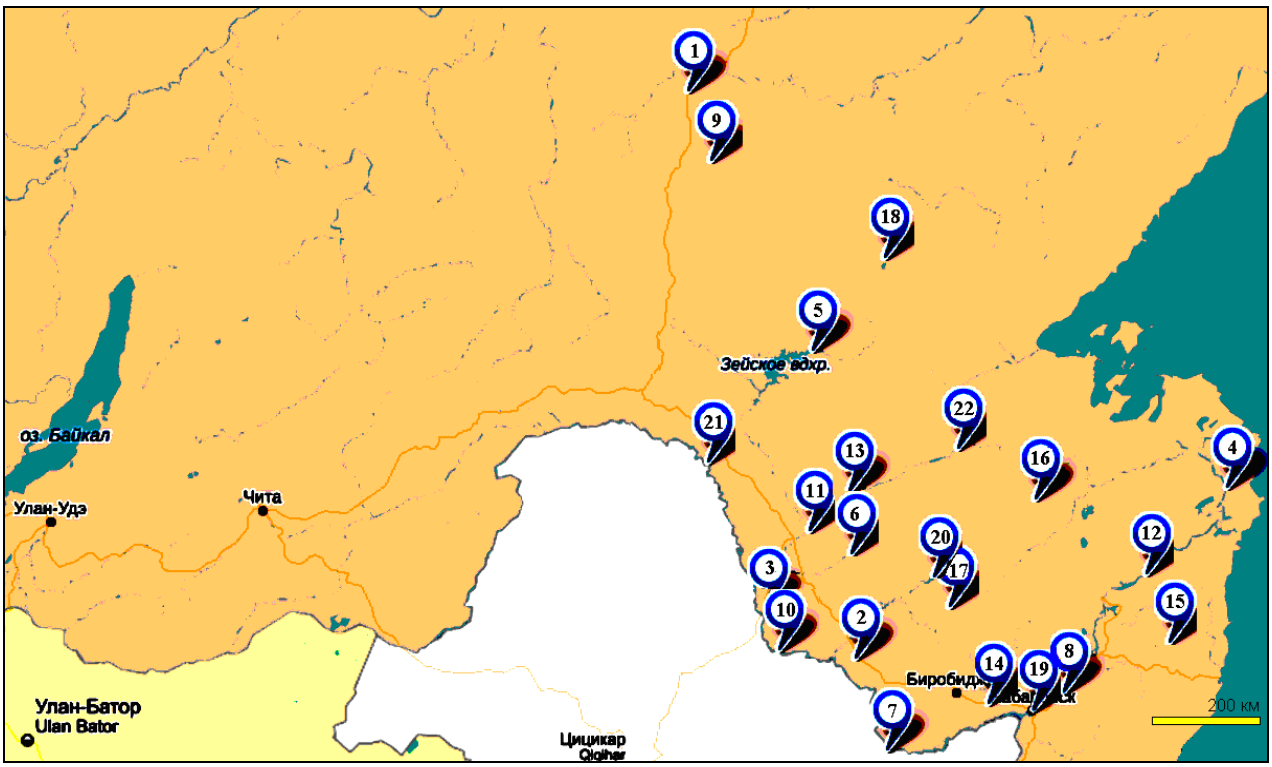


Рис. 1. Картосхема учтённых метеостанций в бассейнах Амура и Лены (Алдан, Канку, Токо). *Условные обозначения*: 1 – Алдан, 2 – Архара, 3 – Благовещенск, 4 – Богородское, 5 – Бомнак, 6 – Верхняя Томь, 7 – Екатерино-Никольское, 8 – Елабуга, 9 – Канку, 10 – Константиновка, 11 – Мазаново, 12 – Нижнетамбовское, 13 – Норск, 14 – Смидович, 15 – Солекуль, 16 – Софийский прииск, 17 – Сутырь, 18 – Токо, 19 – Хабаровск, 20 – Чекунда, 21 – Черняево, 22 – Экимчан. **Fig. 1.** Schematic map of weather stations under consideration in the Amur and Lena basin (Aldan, Kanku, Toko). *Legend*: 1 – Aldan, 2 – Arkhara, 3 – Blagoveshchensk, 4 – Bogorodskoye, 5 – Bomnak, 6 – Upper Tom, 7 – Ekaterino-Nikolskoye, 8 – Yelabuga, 9 – Kanku, 10 – Konstantinovka, 11 – Mazanovo, 12 – Nizhnetambovskoye, 13 – Norsk, 14 – Smidovich, 15 – Solekul, 16 – Sofia's Mine, 17 – Sutyr, 18 – Toko, 19 – Khabarovsk, 20 – Chekunda, 21 – Chernyaevo, 22 – Ekimchan.

На основе суточных данных температуры и осадков для 22 метеостанций за период с момента их открытия по 2013 г. включительно устанавливалось наличие или отсутствие многолетних трендов осадков и температуры и проводился их анализ (табл. 1, 2). Осадки за разные периоды (месяцы, сезоны, полугодия, годы) считали по сумме суточных. Средние температуры за месяцы, годы, сезоны и полугодия расчитывали из среднесуточной.

Таблица 1. Анализ трендов многолетних изменений значений атмосферных осадков и температуры воздуха (средней, абсолютной минимальной и абсолютной максимальной) в бассейне Амура (фрагмент таблицы). **Table 1.** Analysis of trends of perennial changes of precipitation values and air temperature values (average, absolute minimal, absolute maximal) in the Amur basin (table's fragment).

Метеостанция	Значение (год, полуго-дие, сезон)	Осадки, мм								Средняя t°C воздуха							Индекс Педя		Абсолютная минимальная t°C воздуха							Абсолютная максимальная t°C воздуха						
		Кол-во лет	Тренд	r[1]	α[2]	Среднее[3]	Δ[4]	% от ср.[5]	ОКИ, %[6]	Кол-во лет	Тренд	r	α	Среднее	Δ	ОКИ, %	$И_{Педя\ 1}$[7]	$И_{Педя\ 2}$[8]	Кол-во лет	Тренд	r	α	Абс. мин.[3]	Δ	ОКИ, %	Кол-во лет	Тренд	r	α	Абс. макс.[3]	Δ	ОКИ, %
Богородское (Хабаровский кр.), 52° 23' с.ш., 140° 28' в.д., 35 м БС, № ВМО 31439		1936-2013								1936-2013									1936-2013							1936-2013						
	Годовое (1-12)	78	+	**0.46**	0.01	**475.5**	**165.2**	**34.8**	**37.3**	78	+	**0.58**	0.001	**-1.5**	**1.7**	**44.9**	0.8	0.1	78	+	**0.35**	0.01	**-47.7**	**3.4**	**23.6**	78	+	**0.20**	0.10	**34.0**	**1.3**	**14.1**
	Тёпл. п. (4-9)	78	+	**0.26**	0.05	**110.3**	**75.1**	**23.4**	**17.3**	78	+	**0.51**	0.001	**11.1**	**1.4**	**34.6**	0.6	0.1	76	+ (0)	0.15	н	-26.9	-	-							
	Холод. п. (1-3;10-12)	78	+	**0.46**	0.001	**154.8**	**90.2**	**58.7**	**29.2**	77	+	**0.48**	0.001	**-14.2**	**2.1**	**36.1**	**3.1**	**3.3**								78	+	**0.29**	0.01	**21.5**	**2.5**	**17.6**
	Весна (3-5)	78	+	**0.23**	0.05	**80.4**	**24.4**	**30.4**	**19.3**	78	+	**0.39**	0.001	**-1.7**	**1.6**	**29.6**	0.5	0.2	76	+	**0.24**	0.05	**-35.7**	**2.6**	**16.8**	78	+	**0.29**	0.01	**30.7**	**3.5**	**21.8**
	Лето (6-8)	78	+	**0.22**	0.10	**188.4**	**52.4**	**27.8**	**13.2**	78	+	**0.38**	0.001	**16.3**	**1.3**	**29.6**	0.3	-0.2	78	+	**0.31**	0.01	**-1.4**	**1.8**	**20.9**							
	Осень (9-11)	78	+	**0.28**	0.05	**141.6**	**42.2**	**29.8**	**20.4**	78	+	**0.41**	0.001	**1.0**	**1.5**	**29.6**	1.7	0.0	77	+	**0.27**	0.05	**-34.6**	**3.1**	**17.9**	78	+	**0.22**	0.10	**27.1**	**1.3**	**15.0**
	Зима (1-2; 12)	78	+	**0.35**	0.01	**65.1**	**46.2**	**71.0**	**21.5**	77	+	**0.39**	0.001	**-22.0**	**2.5**	**28.6**	**3.5**	**3.5**								78	+ (0)	0.14	Н	4.6	-	-
	Тёпл. п. (5-10)	78	+	**0.29**	0.01	**342.3**	**85.5**	**25.0**	**19.8**	78	+	**0.57**	0.001	**11.5**	**1.4**	**35.5**	1.0	0.1	78	+	**0.24**	0.05	**-22.1**	**3.0**	**16.6**							
	Холод. п. (1-4; 11-12)	78	+	**0.43**	0.001	**133.2**	**79.8**	**59.9**	**27.9**	77	+	**0.48**	0.001	**-14.7**	**2.1**	**35.7**	**3.2**	**3.4**								78	+	**0.21**	0.10	**22.5**	**2.5**	**17.5**
	Тёпл. п. (4-10)	78	+	**0.31**	0.01	**365.2**	**91.8**	**25.1**	**20.8**	78	+	**0.56**	0.001	**9.8**	**1.4**	**36.4**	0.7	-0.1	77	+ (0)	0.13	н	-26.9	-	-							
	Холод. п. (1-3; 11-12)	78	+	**0.43**	0.001	**110.3**	**73.4**	**66.6**	**28.4**	77	+	**0.45**	0.001	**-17.5**	**2.2**	**33.5**	**3.2**	**3.3**								78	+ (0)	0.06	н	12.0	-	-

Примечания к таблицам 1, 2: 1) **r**[1] – коэффициент корреляции линейного тренда с кривыми фактических многолетних значений осадков и температур воздуха; 2) α^2 – значимость коэффициентов корреляции; 3) **Среднее, Абс. мин., Абс. макс.**[3] – средние, абсолютные минимальные и абсолютные максимальные температуры воздуха, а также среднее количество суммарных атмосферных осадков за многолетний период по фактическим данным; 4) Δ^4 – модуль изменения величины фактического значения за рассматриваемый период, высчитанный на основании тренда; 5) **% от ср.**[5] – показатель доли изменения фактических средних значений осадков, рассчитанный как отношение модуля изменения к модулю среднего значения параметра, выраженный в %; 6) **ОКИ, %**[6] – относительный коэффициент изменений – показатель доли изменения фактических средних значений осадков и температуры рассчитанный как отношение модуля изменения параметра к модулю амплитуды колебания фактических значений этого параметра в многолетнем аспекте, выраженное в %; 7) $\mathbf{И}_{\text{Педя 1}}$[7] – индекс засушливости Педя (1); 8) $\mathbf{И}_{\text{Педя 2}}$[8] – модифицированный индекс засушливости Педя (2); жирным шрифтом выделены значения показателей для трендов с достоверными (значимыми) коэффициентами корреляции. **Notes to table 1:** 1) **r**[1] – coefficient of the linear trend correlation with the curves of the actual perennial precipitation values and air temperatures; 2) α^2 – significance of correlation coefficients; 3) **Среднее, Абс. мин., Абс. макс.**[3] – average, absolute minimal and absolute maximal air temperatures, average quantity of total precipitation for the perennial period, according to the actual data; 4) Δ^4 – module of changes of the actual value for the given period, calculated according to the trend; 5) **% от ср.**[5] – index of percentage of the changes of the actual average precipitation values, calculated as a ratio between module of changes and module of average parameter value, in %; 6) **ОКИ, %**[6] – relative coefficient of changes – an index of percentage of changes of the actual average precipitation and air temperatures values, calculated as a ration between module of parameter changes and module of perennial amplitude of swing of the actual values for that parameter, in %; 7) $\mathbf{И}_{\text{Педя 1}}$[7] – Pedya (1) dryness index; 8) $\mathbf{И}_{\text{Педя 2}}$[8] – modified Pedya (2) dryness index; bold font is for the values of indices for the trends with reliable (significant) correlation coefficient.

Путем усреднения суточных абсолютных максимальных и минимальных температур воздуха получали средние минимальные и максимальные температуры воздуха.

При анализе 6 метеорологических характеристик рассматривалось три варианта разбиения годового цикла на тёплое (4-9, 5-10 и 4-10 месяцы) и холодное (1-3, 10-12; 1-4, 11-12; 1-3, 11-12 месяцы) полугодия (табл. 1, 2, 3, 4, 5). Это делалось для выявления возможных изменений в распределении тёплых и холодных периодов. Кроме того, анализ велся по основным сезонам года: весна (3-5 месяцы), лето (6-8 месяцы), осень (9-11 месяцы), зима (1-2, 12 месяцы). Таким образом, все исследуемые метеохарактеристики анализировались по 11 внутригодовым периодам (включая полный годовой цикл).

Для многолетних рядов метеорологических данных строились графики их многолетней динамики и рассчитывались коэффициенты корреляции (r) между фактическими данными и их линейными трендами. На основе достоверных трендов 6 метеохарактеристик за многолетний период (54-174 года) для каждого из 11 внутригодовых периодов по 22-м метеостанциям выявлялись климатические изменения (табл. 1, 2). Изучались коэффициенты корреляции трендов с фактическими (измеренными) значениями для 6-и метеорологических характеристик (для осадков – табл. 3, для средней температуры воздуха (t°C) – табл. 6, для абсолютной минимальной t°C – табл. 7, для абсолютной максимальной t°C – табл. 8, для средней минимальной t°C – табл. 9, для средней максимальной t°C – табл. 10), которые потом анализировались для всех 11-и исследуемых временных периодов. Учитывали, что циклически меняющиеся данные от повышенных до пониженных значений имеют устойчивый тренд только при значимом коэффициенте корреляции (r) равным по модулю – 0.3 (Крицкий, Менкель, 1981). Анализировались r только со значимостью от 90% до 99.9% (Дмитриев, 1995). Однако при этом рассматривались достоверные (значимые) r с величиной и меньшей 0.3 по значению, поскольку величина таких изменений по тренду может

составлять около 1°С или даже больше. А к снижению урожайности зерновых на 15 ц/га в Западной Европе приводит уже понижение среднегодовой температуры воздуха в 1°С. К примеру, изменения средних температур воздуха в Алдане (№1) в зимний период при r=0.20 со значимостью α=0.10 (табл. 6) составили 1.7°С (табл. 4), а изменения в Хабаровске (№19) летом при r=0.17 (α=0.10; табл. 6) – 0.5°С (табл. 4).

Для методики оценки динамических нарушений в экосистемах и ландшафтах (Кузьмина, Трешкин, 2014, 2017 в, а) был разработан показатель оценки климатических и гидрологических изменений – относительный коэффициент изменений (ОКИ; табл. 5, 11-15) климатических и гидрологических характеристик.

Таблица 2. ***Анализ трендов*** многолетних изменений ***средних минимальных и средних максимальных температур*** воздуха в бассейне Амура (фрагмент таблицы).
Table 2. Analysis of trends of perennial changes of the average minimal and average maximal air temperatures in the Amur basin (table's fragment).

Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)	Средняя минимальная t°C воздуха							Средняя максимальная t°C воздуха						
	Кол-во лет	Тренд	r[1]	α[2]	Среднее[3]	Δ[4]	ОКИ, %[6]	Кол-во лет	Тренд	r	α	Среднее	Δ	ОКИ, %
Станция	**Благовещенск (Амурская обл.), 50° 16' с.ш., 127° 30' в.д., 132 м БС, № ВМО 31510**													
	1910-2013							**1881-2013**						
Год (1-12)	104	+	**0.68**	0.001	**-4.4**	**2.5**	**51.3**	100	+	**0.61**	0.001	**6.6**	**2.4**	**43.5**
Тёплый (4-9)	104	+	**0.70**	0.001	**9.2**	**1.9**	**59.0**	100	+	**0.53**	0.001	**20.6**	**1.9**	**37.8**
Холодный (1-3;10-12)	103	+	**0.57**	0.001	**-18.0**	**3.1**	**42.4**	100	+	**0.53**	0.001	**-7.2**	**2.8**	**40.6**
Весна (3-5)	104	+	**0.60**	0.001	**-3.7**	**3.1**	**43.5**	100	+	**0.51**	0.01	**8.6**	**3.4**	**39.8**
Лето (6-8)	104	+	**0.54**	0.001	**14.8**	**1.7**	**36.4**	100	+	**0.30**	0.01	**25.6**	**1.2**	**18.6**
Осень (9-11)	102	+	**0.47**	0.001	**-3.3**	**1.9**	**34.9**	100	+	**0.35**	0.001	**7.3**	**1.5**	**28.8**
Зима (1-2; 12)	103	+	**0.48**	0.001	**-25.8**	**3.4**	**33.9**	100	+	**0.49**	0.001	**-15.1**	**3.4**	**36.1**
Тёплый (5-10)	104	+	**0.66**	0.001	**9.2**	**1.8**	**47.2**	100	+	**0.45**	0.001	**20.4**	**1.4**	**30.4**
Холодный (1-4; 11-12)	103	+	**0.57**	0.001	**-18.2**	**3.2**	**41.9**	100	+	**0.56**	0.001	**-7.2**	**3.3**	**43.0**
Тёплый (4-10)	104	+	**0.70**	0.001	**7.6**	**1.9**	**52.8**	100	+	**0.52**	0.001	**18.9**	**1.7**	**35.0**
Холодный (1-3; 11-12)	103	+	**0.54**	0.001	**-21.2**	**3.3**	**39.7**	100	+	**0.53**	0.001	**-10.5**	**3.3**	**41.3**

Таблица 3. ***Модуль коэффициентов корреляции*** **(r)** линейных трендов кривых многолетних изменений суммарных ***атмосферных осадков*** для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан №1, Канку №9 и Токо №18).
Table 3. Module of correlation coefficients (r) of the linear trends of perennial changes curves of the total precipitation in the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	**0.62**	**0.45**	**0.67**	**0.51**	**0.66**	**0.47**	**0.68**	**0.60**	**0.24**	**0.56**	**0.50**	**0.54**	**0.68**	**0.24**
2	0.01	0.10	**0.33**	0.09	**0.47**	0.13	**0.45**	0.15	0.07	0.08	**0.41**	**0.42**	**0.47**	**0.33**
3	**0.22**	**0.16**	**0.31**	**0.17**	**0.35**	0.14	**0.35**	**0.25**	0.11	0.01	**0.36**	**0.27**	**0.36**	**0.16**
4	**0.46**	**0.26**	**0.46**	**0.31**	**0.43**	**0.29**	**0.43**	**0.23**	**0.22**	**0.28**	**0.35**	**0.34**	**0.46**	**0.22**
5	0.03	0.01	**0.20**	0.01	0.10	0.02	0.05	0.04	0.06	0.13	**0.24**	**0.22**	**0.24**	**0.20**
6	0.11	0.09	**0.23**	0.12	**0.43**	0.16	**0.40**	0.13	0.14	0.06	**0.30**	**0.34**	**0.43**	**0.23**
7	0.03	0.10	**0.27**	0.10	**0.42**	0.10	**0.52**	0.15	0.04	0.16	**0.33**	**0.39**	**0.52**	**0.27**
8	0.18	**0.25**	0.17	**0.24**	**0.26**	**0.33**	0.18	0.03	0.19	0.08	0.17	**0.27**	**0.33**	**0.24**
9	**0.36**	**0.29**	**0.42**	**0.33**	**0.30**	**0.34**	**0.21**	0.15	0.19	**0.37**	**0.21**	**0.31**	**0.42**	**0.21**
10	0.02	0.07	**0.24**	0.07	**0.32**	0.09	**0.31**	0.13	0.02	0.18	**0.39**	**0.32**	**0.39**	**0.24**
11	**0.24**	**0.20**	**0.29**	**0.20**	**0.47**	0.16	**0.41**	**0.19**	**0.19**	0.05	**0.46**	**0.29**	**0.47**	**0.19**
12	**0.30**	**0.20**	**0.28**	**0.21**	**0.26**	0.17	**0.33**	**0.41**	0.08	0.16	0.15	**0.28**	**0.41**	**0.20**
13	0.05	0.02	**0.29**	0.01	**0.35**	0.02	**0.28**	**0.25**	0.03	0.08	**0.30**	**0.29**	**0.35**	**0.25**
14	0.19	**0.26**	**0.26**	**0.24**	**0.33**	**0.22**	0.19	0.08	0.20	0.01	0.16	**0.26**	**0.33**	**0.22**
15	**0.41**	**0.27**	**0.56**	**0.32**	**0.54**	**0.30**	**0.52**	**0.34**	0.24	**0.31**	**0.40**	**0.40**	**0.56**	**0.27**
16	0.06	0.16	**0.39**	0.08	0.12	0.06	0.02	0.02	0.16	0.22	0.00	**0.39**	**0.39**	**0.39**
17	0.11	**0.19**	**0.30**	0.14	**0.22**	0.17	**0.28**	**0.22**	**0.22**	0.02	0.16	**0.24**	**0.30**	**0.19**
18	0.04	0.12	**0.26**	0.06	0.13	0.04	0.01	**0.20**	0.12	**0.25**	0.04	**0.24**	**0.26**	**0.20**
19	0.05	0.03	**0.30**	0.02	**0.38**	0.04	**0.35**	0.17	0.01	0.07	0.18	**0.34**	**0.38**	**0.30**
20	0.18	**0.22**	**0.21**	**0.20**	**0.19**	**0.22**	**0.22**	0.13	**0.26**	0.01	**0.19**	**0.21**	**0.26**	**0.19**
21	**0.44**	**0.39**	**0.44**	**0.41**	**0.54**	**0.39**	**0.44**	**0.43**	**0.28**	**0.24**	**0.48**	**0.41**	**0.54**	**0.24**
22	0.12	0.02	**0.27**	0.06	**0.31**	0.02	**0.39**	**0.42**	0.12	**0.17**	**0.24**	**0.30**	**0.42**	**0.17**
Ср.*	**0.38**	**0.26**	**0.33**	**0.29**	**0.38**	**0.32**	**0.39**	**0.32**	**0.24**	**0.31**	**0.34**	**0.32**	**0.39**	**0.24**
Макс.	**0.62**	**0.45**	**0.67**	**0.51**	**0.66**	**0.47**	**0.68**	**0.60**	**0.28**	**0.56**	**0.50**	**0.55**	**0.68**	**0.28**
Мин.	**0.22**	**0.16**	**0.20**	**0.17**	**0.19**	**0.22**	**0.21**	**0.19**	**0.19**	**0.17**	**0.19**	**0.19**	**0.22**	**0.16**

Примечания к таблицам 3-4, 6-10, 16-22: название метеорологической станции, её географические координаты, высотный уровень по Балтийской системе и её международный номер в системе ВМО для всех таблиц приводится в тексте в соответствии с порядковым номером 1-22; анализируемые значимые (достоверные) коэффициенты корреляции r (и другие показатели) выделены жирным шрифтом; голубой тон ячейки таблицы указывает на отрицательные значения показателей (для таблиц коэффициентов корреляции – 3, 7-10, а также таблиц фактических изменений температур и

осадков – таблицы модулей изменений … – 16, 18-20), отражающих тренд снижения (количества осадков или температуры воздуха) в многолетнем аспекте; **Ср.*, Макс., Мин.** – среднее, максимальное и минимальное значения. **Notes to tables 3-4, 6-10, 16-22:** a weather station name, its geographical coordinates, altitude level according to the Baltic system, and its international number in the World Meteorological Organization system for every table are put in this article according to their serial numbers (1-22); the analyzed significant (reliable) correlation coefficients (and other indices) are marked with bold font; blue table cells marks the negative values of the actual values of the indices (for the tables with correlation coefficient – 3, 7-10 and actual temperature and precipitation changes – tables of modules of changes … – 16, 18-20), showing the perennial trend of decrease (of precipitation quantity or air temperature).

Таблица 4. ***Модуль изменения средних температур*** **(в °С)** воздуха по тренду за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9, Токо № 18). **Table 4.** Module of changes of average air temperatures (in °C) according to the perennial trend (from the opening of weather station to 2013) for the Amur basin (19 stations) and Siberian (Lensky) basin (3 stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	1.1	0.8	1.3	0.7	1.7	-	1.8	2.1	-	-	1.7	1.4	2.1	0.7
2	1.5	1.5	1.6	1.3	1.9	1.0	2.1	2.9	1.0	0.6	1.8	1.6	2.9	0.6
3	2.0	1.5	2.1	1.6	2.0	1.4	2.0	2.7	0.9	1.6	1.8	1.8	2.7	0.9
4	1.7	1.4	2.1	1.4	2.2	1.4	2.1	1.6	1.3	1.5	2.5	1.7	2.5	1.3
5	1.7	1.2	2.3	1.1	2.7	0.9	2.6	1.8	1.0	1.0	3.2	1.8	3.2	0.9
6	1.2	-	2.0	-	2.2	-	2.0	2.3	-	1.1	2.3	1.9	2.3	1.1
7	1.5	1.1	1.8	1.0	2.1	0.9	2.0	2.0	0.7	1.0	2.2	1.5	2.2	0.7
8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.5	1.5	1.8	1.5	1.6	1.6	1.8	1.5
9	1.8	1.6	1.9	1.6	2.1	1.3	2.3	2.8	1.0	1.2	2.0	1.8	2.8	1.0
10	2.6	1.8	3.2	1.8	3.5	1.7	3.2	2.4	1.8	2.1	3.7	2.5	3.7	1.7
11	2.1	1.0	3.1	1.0	3.6	0.7	3.4	2.8	-	1.3	3.7	2.3	3.7	0.7
12	1.0	0.7	1.1	0.8	1.2	0.7	1.1	1.2	-	0.9	1.3	1.0	1.3	0.7
13	1.7	0.8	2.7	0.7	3.1	0.5	3.0	2.2	-	1.0	3.3	1.9	3.3	0.5
14	1.5	1.3	1.7	1.3	1.8	1.3	1.7	1.3	1.2	1.5	2.0	1.5	2.0	1.2
15	1.1	1.0	1.2	1.1	1.1	1.3	-	-	1.4	1.8	1.2	1.2	1.8	1.0
16	1.8	1.4	2.2	1.4	2.4	1.3	2.3	2.1	1.3	1.6	2.3	1.8	2.4	1.3
17	2.1	1.5	2.6	1.4	3.0	1.3	2.8	2.4	1.2	1.5	3.1	2.1	3.1	1.2
18	2.1	1.8	2.4	1.8	2.6	1.6	2.7	3.1	1.6	-	3.2	2.3	3.2	1.6
19	1.6	1.0	2.2	0.9	2.7	0.6	2.7	2.7	0.5	0.5	2.8	1.7	2.8	0.5
20	2.3	1.2	3.0	1.3	3.5	1.1	3.4	2.7	0.9	1.3	3.5	2.2	3.5	0.9
21	1.3	0.8	1.3	0.8	1.4	0.6	1.4	1.8	-	-	1.7	1.2	1.8	0.6
22	1.9	1.5	2.3	1.4	2.9	1.2	2.8	2.6	1.4	-	3.4	2.1	3.4	1.2
Ср.	1.7	1.3	2.1	1.2	2.3	1.1	2.3	2.2	1.2	1.3	2.5	1.7	2.5	1.1
Макс.	2.6	1.8	3.2	1.8	3.6	1.7	3.4	3.1	1.8	2.1	3.7	2.6	3.7	1.7
Мин.	1.0	0.7	1.1	0.7	1.1	0.5	1.1	1.2	0.5	0.5	1.2	0.9	1.2	0.5

Таблица 5. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***средних температур*** воздуха за многолетний период для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 5.** Relative coefficient of changes (in %) of the average air temperatures for the perennial period for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	24	23	16	19	19	-	22	26	-	-	15	20	26	15
2	35	53	24	40	26	31	31	33	25	14	19	30	53	14
3	40	36	31	36	23	33	23	34	20	22	17	29	40	17
4	45	35	36	36	34	36	36	30	30	30	29	34	45	29
5	33	36	31	35	31	26	34	28	16	16	31	29	36	16
6	24	-	25	-	24	-	25	33	-	24	23	25	33	23
7	39	41	35	40	34	35	38	31	20	25	26	33	41	20
8	38	51	30	53	26	57	26	24	41	36	20	36	57	20
9	37	42	26	41	26	32	30	37	17	20	18	30	42	17
10	53	58	44	63	43	58	44	35	44	42	38	47	63	35
11	39	33	37	37	37	29	39	35	-	26	31	34	39	26
12	27	22	20	25	18	22	20	20	-	21	16	21	27	16
13	33	26	32	26	32	17	34	30	-	19	28	28	34	17
14	37	45	31	47	29	48	29	22	38	37	21	35	48	21
15	26	28	20	33	18	38	-	-	30	41	16	28	41	16
16	40	40	29	39	29	35	30	29	30	33	22	32	40	22
17	47	46	35	45	37	44	40	36	33	31	35	39	47	31
18	40	46	30	47	30	40	34	41	33	-	29	37	47	29
19	36	32	37	29	37	19	38	38	14	8	29	29	38	8
20	51	38	42	39	40	36	45	38	22	26	36	37	51	22
21	26	25	20	24	19	20	21	26	-	-	18	22	26	18
22	39	38	32	34	36	30	38	39	27	-	33	35	39	27
Ср.	37	38	30	38	29	34	32	31	28	26	25	32	38	25
Макс.	53	58	44	63	43	58	45	41	44	42	38	48	63	38
Мин.	24	22	16	19	18	17	20	20	14	8	15	17	24	8

Примечание к таблице 5. Классы ОКИ (ОКИ – произошедшие изменения в % от возможных).
Notes to table 5. Classes of relative coefficient of changes (the % of total possible changes):

1 класс – изменения очень слабые	2 класс – изменения слабые	3 класс – изменения средние	4 –класс – изменения сильные
- 0.1-14%.	- 15-30%.	- 31-50%.	- 51-100%.

Таблица 6. ***Коэффициенты корреляции*** **(r)** линейных трендов изменений ***средней температуры*** воздуха для различных внутригодовых периодов Амурского (по 19 метеостанциям) и Сибирского (Ленского) бассейнов (по 3 метеостанциям – Алдан № 1, Канку № 9, Токо № 18). **Table 6.** Correlation coefficients (r) of the linear trends of changes of the average air temperature for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.30	0.29	0.23	0.24	0.26	0.16	0.29	0.35	0.08	0.09	0.20	0.27	0.35	0.20
2	0.49	0.60	0.35	0.55	0.36	0.46	0.41	0.49	0.39	0.18	0.27	0.41	0.60	0.18
3	0.57	0.52	0.42	0.56	0.33	0.52	0.36	0.50	0.29	0.39	0.26	0.43	0.57	0.26
4	0.58	0.51	0.48	0.56	0.45	0.57	0.48	0.39	0.38	0.41	0.39	0.47	0.58	0.38
5	0.50	0.45	0.44	0.44	0.45	0.36	0.48	0.35	0.30	0.23	0.45	0.40	0.50	0.23
6	0.34	0.21	0.35	0.20	0.34	0.12	0.34	0.41	0.05	0.30	0.30	0.34	0.41	0.30
7	0.54	0.49	0.48	0.49	0.46	0.46	0.45	0.44	0.27	0.33	0.40	0.44	0.54	0.27
8	0.59	0.61	0.41	0.66	0.37	0.68	0.37	0.33	0.53	0.47	0.31	0.48	0.68	0.31
9	0.50	0.50	0.36	0.51	0.36	0.44	0.41	0.47	0.26	0.27	0.28	0.40	0.51	0.26
10	0.69	0.72	0.55	0.74	0.53	0.70	0.53	0.46	0.58	0.50	0.51	0.59	0.74	0.46
11	0.54	0.44	0.50	0.44	0.50	0.36	0.52	0.48	0.17	0.32	0.44	0.45	0.54	0.32
12	0.39	0.32	0.27	0.36	0.24	0.34	0.26	0.28	0.15	0.27	0.22	0.30	0.39	0.22
13	0.47	0.33	0.44	0.33	0.45	0.24	0.47	0.40	0.14	0.23	0.40	0.38	0.47	0.23
14	0.57	0.60	0.41	0.63	0.39	0.62	0.40	0.31	0.46	0.46	0.35	0.47	0.63	0.31
15	0.44	0.38	0.33	0.46	0.27	0.52	0.22	0.15	0.38	0.52	0.24	0.39	0.52	0.24
16	0.55	0.51	0.45	0.54	0.43	0.53	0.45	0.40	0.42	0.40	0.34	0.46	0.55	0.34
17	0.63	0.59	0.53	0.58	0.53	0.57	0.54	0.49	0.42	0.41	0.49	0.53	0.63	0.41
18	0.53	0.61	0.42	0.59	0.42	0.52	0.47	0.51	0.49	0.16	0.44	0.50	0.61	0.42
19	0.57	0.43	0.53	0.41	0.55	0.28	0.58	0.54	0.17	0.16	0.47	0.43	0.58	0.16
20	0.64	0.49	0.55	0.52	0.54	0.49	0.58	0.50	0.32	0.32	0.47	0.49	0.64	0.32
21	0.38	0.33	0.27	0.32	0.26	0.28	0.28	0.36	0.14	0.14	0.27	0.31	0.38	0.26
22	0.57	0.51	0.47	0.50	0.50	0.47	0.53	0.48	0.42	0.14	0.45	0.49	0.57	0.42
Ср.*	0.52	0.49	0.42	0.50	0.41	0.47	0.44	0.43	0.38	0.34	0.36	0.43	0.52	0.34
Макс.	0.69	0.72	0.55	0.74	0.55	0.70	0.58	0.54	0.58	0.52	0.51	0.61	0.74	0.51
Мин.	0.30	0.29	0.23	0.24	0.24	0.24	0.26	0.28	0.17	0.16	0.20	0.24	0.30	0.16

Таблица 7. ***Модуль коэффициентов корреляции*** **(r)** линейных трендов многолетних (с момента открытия станции по 2013 г.) изменений ***абсолютных минимальных температур*** воздуха по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18).
Table 7. Module of correlation coefficients (r) of linear trends of changes of the absolute minimal air temperatures for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.24	0.08	0.24	0.07	0.24	0.19	0.24	0.02	0.29	0.002	0.24	0.24	0.29	0.19
2	0.21	0.03	0.21	0.01	0.21	0.03	0.21	0.05	0.25	0.10	0.21	0.22	0.25	0.21
3	0.47	0.32	0.47	0.39	0.47	0.32	0.47	0.27	0.37	0.31	0.47	0.39	0.47	0.27
4	0.35	0.15	0.35	0.13	0.35	0.24	0.35	0.24	0.31	0.27	0.35	0.31	0.35	0.24
5	0.62	0.31	0.62	0.47	0.62	0.37	0.62	0.31	0.45	0.39	0.62	0.49	0.62	0.31
6	0.09	0.12	0.09	0.15	0.09	0.20	0.09	0.18	0.37	0.14	0.09	0.29	0.37	0.20
7	0.23	0.15	0.23	0.09	0.23	0.09	0.23	0.04	0.00	0.10	0.23	0.23	0.23	0.23
8	0.05	0.21	0.05	0.28	0.05	0.13	0.05	0.14	0.22	0.22	0.05	0.24	0.28	0.22
9	0.37	0.17	0.37	0.21	0.37	0.09	0.37	0.12	0.01	0.13	0.37	0.29	0.37	0.21
10	0.49	0.33	0.49	0.26	0.49	0.07	0.49	0.40	0.31	0.27	0.49	0.40	0.49	0.26
11	0.39	0.21	0.39	0.25	0.39	0.15	0.39	0.18	0.07	0.27	0.39	0.32	0.39	0.18
12	0.17	0.12	0.17	0.12	0.17	0.12	0.17	0.13	0.29	0.03	0.17	0.29	0.29	0.29
13	0.43	0.23	0.43	0.16	0.43	0.02	0.43	0.17	0.13	0.29	0.43	0.33	0.43	0.23
14	0.17	0.07	0.17	0.16	0.17	0.05	0.17	0.05	0.15	0.30	0.17	0.35	0.30	0.30
15	0.32	0.11	0.32	0.28	0.32	0.19	0.32	0.26	0.11	0.35	0.32	0.28	0.35	0.26
16	0.22	0.17	0.22	0.30	0.22	0.07	0.22	0.24	0.05	0.03	0.22	0.27	0.30	0.24
17	0.45	0.21	0.45	0.31	0.45	0.22	0.45	0.31	0.17	0.36	0.45	0.37	0.45	0.21
18	0.35	0.37	0.35	0.42	0.35	0.13	0.35	0.32	0.06	0.05	0.35	0.36	0.42	0.32
19	0.02	0.26	0.02	0.26	0.02	0.13	0.02	0.19	0.07	0.27	0.02	0.26	0.27	0.26
20	0.65	0.23	0.65	0.37	0.65	0.31	0.65	0.47	0.23	0.34	0.65	0.47	0.65	0.23
21	0.28	0.06	0.28	0.04	0.28	0.06	0.28	0.17	0.29	0.11	0.28	0.28	0.29	0.28
22	0.65	0.41	0.65	0.47	0.65	0.21	0.65	0.52	0.46	0.33	0.65	0.51	0.65	0.21
Ср.*	0.41	0.29	0.41	0.33	0.41	0.26	0.41	0.32	0.32	0.31	0.41	0.35	0.41	0.26
Макс.	0.65	0.41	0.65	0.47	0.65	0.37	0.65	0.52	0.46	0.39	0.65	0.53	0.65	0.37
Мин.	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.19	0.21	0.18	0.22	0.22	0.21	0.21	0.22	0.18

Таблица 8. ***Модуль коэффициентов корреляции*** **(r)** линейных трендов многолетних (с момента открытия станции по 2013 г.) изменений ***абсолютных максимальных температур*** воздуха по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 8.** Module of correlation coefficients (r) of linear trends of changes of the absolute maximal air temperatures for the perennial period (from the opening of a weather station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.07	0.07	0.00	0.07	0.13	0.07	0.31	0.38	0.07	0.08	0.05	0.35	0.38	0.31
2	0.23	0.23	0.08	0.23	0.23	0.23	0.28	0.38	0.23	0.26	0.31	0.26	0.38	0.23
3	0.27	0.27	0.05	0.27	0.27	0.27	0.29	0.32	0.27	0.15	0.37	0.29	0.37	0.27
4	0.20	0.20	0.29	0.20	0.06	0.20	0.21	0.29	0.20	0.22	0.14	0.22	0.29	0.20
5	0.03	0.03	0.15	0.03	0.05	0.03	0.22	0.13	0.03	0.11	0.03	0.22	0.22	0.22
6	0.36	0.36	0.08	0.36	0.31	0.36	0.15	0.45	0.36	0.11	0.40	0.37	0.45	0.31
7	0.28	0.28	0.01	0.28	0.06	0.28	0.21	0.34	0.28	0.27	0.26	0.28	0.34	0.21
8	0.39	0.39	0.28	0.39	0.08	0.39	0.17	0.33	0.39	0.52	0.25	0.37	0.52	0.25
9	0.15	0.15	0.02	0.15	0.17	0.15	0.23	0.25	0.15	0.17	0.04	0.24	0.25	0.23
10	0.35	0.35	0.17	0.35	0.17	0.35	0.09	0.25	0.35	0.34	0.16	0.33	0.35	0.25
11	0.26	0.26	0.11	0.26	0.25	0.26	0.29	0.42	0.26	0.28	0.29	0.28	0.42	0.25
12	0.11	0.11	0.04	0.11	0.00	0.11	0.20	0.25	0.11	0.25	0.23	0.23	0.25	0.20
13	0.40	0.40	0.02	0.40	0.34	0.40	0.29	0.39	0.40	0.16	0.28	0.37	0.40	0.28
14	0.42	0.42	0.31	0.42	0.16	0.42	0.17	0.39	0.42	0.43	0.19	0.40	0.43	0.31
15	0.22	0.22	0.19	0.22	0.12	0.22	0.05	0.03	0.22	0.36	0.13	0.36	0.36	0.36
16	0.14	0.14	0.03	0.14	0.10	0.14	0.16	0.00	0.14	0.18	0.18	-	-	-
17	0.29	0.29	0.09	0.29	0.07	0.29	0.16	0.37	0.29	0.11	0.25	0.30	0.37	0.25
18	0.37	0.37	0.06	0.37	0.21	0.37	0.19	0.36	0.37	0.25	0.09	0.35	0.37	0.25
19	0.36	0.36	0.15	0.36	0.13	0.36	0.21	0.38	0.36	0.49	0.21	0.34	0.49	0.21
20	0.34	0.34	0.23	0.34	0.10	0.34	0.17	0.29	0.34	0.08	0.07	0.32	0.34	0.23
21	0.36	0.36	0.05	0.36	0.24	0.36	0.35	0.33	0.36	0.30	0.20	0.32	0.36	0.20
22	0.11	0.11	0.14	0.11	0.14	0.11	0.39	0.31	0.11	0.05	0.12	0.35	0.39	0.31
Ср.*	0.33	0.33	0.28	0.33	0.27	0.33	0.27	0.34	0.33	0.33	0.28	0.31	0.34	0.27
Макс.	0.42	0.42	0.31	0.42	0.34	0.42	0.39	0.45	0.42	0.52	0.40	0.41	0.52	0.31
Мин.	0.20	0.20	0.23	0.20	0.23	0.20	0.20	0.25	0.20	0.22	0.20	0.21	0.25	0.20

Таблица 9. ***Модуль коэффициентов корреляций*** **(r)** линейных трендов изменений ***средней минимальной температуры*** воздуха по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 9.** Module of correlation coefficients (r) of linear trends of changes of the average minimal air temperature for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.12	0.14	0.08	0.10	0.11	0.03	0.14	0.18	0.03	0.02	0.13	-	-***	-
2	**0.21**	0.14	**0.27**	0.12	**0.28**	0.01	**0.30**	**0.29**	0.01	0.04	**0.21**	**0.26**	**0.30**	**0.21**
3	**0.68**	**0.70**	**0.57**	**0.70**	**0.54**	**0.66**	**0.57**	**0.60**	**0.54**	**0.47**	**0.48**	**0.59**	**0.70**	**0.47**
4	**0.64**	**0.57**	**0.51**	**0.61**	**0.48**	**0.65**	**0.51**	**0.40**	**0.58**	**0.41**	**0.37**	**0.52**	**0.65**	**0.37**
5	**0.70**	**0.69**	**0.62**	**0.67**	**0.63**	**0.62**	**0.64**	**0.51**	**0.60**	**0.44**	**0.61**	**0.61**	**0.70**	**0.44**
6	**0.26**	**0.28**	**0.21**	**0.30**	**0.21**	**0.28**	**0.27**	**0.42**	0.16	0.06	**0.30**	**0.28**	**0.42**	**0.21**
7	**0.59**	**0.49**	**0.50**	**0.52**	**0.48**	**0.49**	**0.49**	**0.47**	**0.36**	**0.35**	**0.42**	**0.47**	**0.59**	**0.35**
8	**0.54**	**0.53**	**0.37**	**0.59**	**0.33**	**0.59**	**0.32**	**0.28**	**0.45**	**0.38**	**0.23**	**0.42**	**0.59**	**0.23**
9	**0.56**	**0.64**	**0.37**	**0.63**	**0.34**	**0.59**	**0.40**	**0.47**	**0.45**	**0.31**	**0.32**	**0.46**	**0.64**	**0.31**
10	**0.69**	**0.69**	**0.61**	**0.66**	**0.60**	**0.65**	**0.60**	**0.53**	**0.67**	**0.42**	**0.58**	**0.61**	**0.69**	**0.42**
11	**0.46**	**0.22**	**0.44**	**0.24**	**0.45**	0.11	**0.48**	**0.41**	0.05	0.12	**0.42**	**0.39**	**0.48**	**0.22**
12	**0.34**	**0.29**	**0.28**	**0.32**	**0.26**	**0.30**	**0.28**	**0.24**	**0.22**	0.16	**0.20**	**0.27**	**0.34**	**0.20**
13	**0.42**	**0.40**	**0.44**	**0.34**	**0.47**	**0.24**	**0.49**	**0.36**	**0.34**	0.07	**0.47**	**0.40**	**0.49**	**0.24**
14	**0.49**	**0.38**	**0.41**	**0.36**	**0.41**	**0.32**	**0.41**	**0.27**	**0.32**	**0.25**	**0.35**	**0.36**	**0.49**	**0.25**
15	**0.62**	**0.45**	**0.46**	**0.55**	**0.42**	**0.54**	**0.39**	**0.24**	**0.49**	**0.61**	**0.38**	**0.47**	**0.62**	**0.24**
16	**0.51**	**0.43**	**0.42**	**0.55**	**0.36**	**0.60**	**0.34**	0.20	**0.46**	**0.41**	**0.28**	**0.44**	**0.60**	**0.20**
17	**0.73**	**0.66**	**0.64**	**0.69**	**0.62**	**0.69**	**0.64**	**0.60**	**0.55**	**0.49**	**0.54**	**0.62**	**0.73**	**0.49**
18	**0.63**	**0.60**	**0.49**	**0.65**	**0.46**	**0.61**	**0.51**	**0.45**	**0.55**	**0.29**	**0.47**	**0.52**	**0.65**	**0.29**
19	**0.49**	**0.42**	**0.40**	**0.46**	**0.39**	**0.38**	**0.41**	**0.38**	**0.22**	**0.36**	**0.29**	**0.38**	**0.49**	**0.22**
20	**0.69**	**0.44**	**0.67**	**0.46**	**0.68**	**0.42**	**0.68**	**0.62**	**0.32**	**0.30**	**0.63**	**0.54**	**0.69**	**0.30**
21	**0.45**	**0.63**	**0.30**	**0.59**	**0.28**	**0.57**	**0.33**	**0.43**	**0.49**	**0.20**	**0.24**	**0.41**	**0.63**	**0.20**
22	**0.78**	**0.73**	**0.70**	**0.75**	**0.70**	**0.77**	**0.72**	**0.68**	**0.71**	**0.43**	**0.62**	**0.69**	**0.78**	**0.43**
Ср.*	**0.55**	**0.51**	**0.46**	**0.53**	**0.45**	**0.52**	**0.47**	**0.43**	**0.46**	**0.38**	**0.40**	**0.47**	**0.55**	**0.38**
Макс.	**0.78**	**0.73**	**0.70**	**0.75**	**0.70**	**0.77**	**0.72**	**0.68**	**0.71**	**0.61**	**0.63**	**0.71**	**0.78**	**0.61**
Мин.	**0.21**	**0.22**	**0.21**	**0.24**	**0.21**	**0.24**	**0.27**	**0.24**	**0.22**	**0.20**	**0.20**	**0.22**	**0.27**	**0.20**

Примечание к таблице 9, 10: -*** – данные отсутствуют, т.к. трендов не выявлено.
Notes to tables 9 and 10: -*** – no data, because trends were not detected; bold font marks the significant correlation coefficients.

Таблица 10. ***Модуль коэффициентов корреляции*** **(r)** линейных трендов изменений ***средней максимальной температуры*** воздуха по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 10.** Module of correlation coefficients (r) of linear trends of changes of the average maximal air temperature for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды для значимых r		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.44	0.36	0.37	0.32	0.39	0.25	0.42	0.45	0.13	0.13	0.34	0.37	0.45	0.25
2	0.54	0.48	0.45	0.45	0.46	0.40	0.47	0.43	0.24	0.33	0.43	0.43	0.54	0.24
3	0.61	0.53	0.53	0.52	0.53	0.45	0.56	0.51	0.30	0.35	0.49	0.49	0.61	0.30
4	0.57	0.48	0.44	0.51	0.42	0.50	0.46	0.41	0.33	0.34	0.40	0.44	0.57	0.33
5	0.17	0.15	0.17	0.10	0.20	0.02	0.23	0.24	0.03	0.02	0.18	0.21	0.24	0.18
6	0.41	0.22	0.36	0.20	0.38	0.10	0.38	0.25	0.20	0.13	0.38	0.32	0.41	0.25
7	0.55	0.51	0.40	0.50	0.40	0.46	0.42	0.42	0.27	0.29	0.39	0.42	0.55	0.27
8	0.55	0.56	0.40	0.59	0.36	0.61	0.35	0.34	0.45	0.43	0.31	0.45	0.61	0.31
9	0.52	0.47	0.38	0.40	0.38	0.33	0.42	0.45	0.25	0.20	0.37	0.40	0.52	0.25
10	0.60	0.62	0.44	0.61	0.43	0.54	0.43	0.32	0.44	0.39	0.44	0.48	0.62	0.32
11	0.56	0.54	0.47	0.53	0.49	0.46	0.51	0.50	0.32	0.32	0.43	0.47	0.56	0.32
12	0.53	0.51	0.40	0.52	0.39	0.48	0.42	0.36	0.29	0.31	0.40	0.42	0.53	0.29
13	0.44	0.43	0.33	0.39	0.35	0.33	0.37	0.42	0.27	0.16	0.27	0.36	0.44	0.27
14	0.63	0.65	0.43	0.67	0.40	0.66	0.41	0.35	0.49	0.47	0.38	0.50	0.67	0.35
15	0.30	0.22	0.17	0.30	0.10	0.41	0.04	0.02	0.24	0.39	0.12	0.33	0.41	0.24
16	0.38	0.40	0.32	0.36	0.35	0.36	0.33	0.17	0.36	0.21	0.40	0.36	0.40	0.32
17	0.43	0.47	0.30	0.43	0.34	0.40	0.36	0.33	0.28	0.24	0.30	0.35	0.47	0.24
18	0.52	0.55	0.40	0.55	0.37	0.50	0.42	0.41	0.39	0.20	0.40	0.45	0.55	0.37
19	0.56	0.62	0.38	0.63	0.35	0.61	0.38	0.43	0.42	0.43	0.32	0.47	0.63	0.32
20	0.30	0.53	0.00	0.46	0.03	0.36	0.12	0.42	0.32	0.07	0.08	0.40	0.53	0.30
21	0.55	0.49	0.39	0.46	0.40	0.36	0.44	0.44	0.24	0.20	0.39	0.40	0.55	0.20
22	0.16	0.12	0.15	0.06	0.13	0.02	0.15	0.20	0.07	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19
Ср.*	0.50	0.50	0.40	0.48	0.39	0.45	0.41	0.38	0.33	0.33	0.36	0.41	0.50	0.33
Макс.	0.63	0.65	0.53	0.67	0.53	0.66	0.56	0.51	0.49	0.47	0.49	0.56	0.67	0.47
Мин.	0.30	0.22	0.30	0.30	0.20	0.25	0.23	0.20	0.24	0.19	0.18	0.24	0.30	0.18

Таблица 11. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***атмосферных осадков*** за многолетний период для бассейна Амура (19 станций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 станции – Алдан №1, Канку №9 и Токо №18). **Table 11.** Relative coefficient of changes (in %) of the total precipitation for the perennial period for the Amur basin (19 stations) and Siberian (Lensky) basin (3 stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	48	35	53	43	53	38	52	42	20	40	34	42	53	20
2	-	-	25	-	39	-	33	-	-	-	31	32	39	25
3	16	12	23	13	23	-	20	20	-	-	27	19	27	12
4	37	17	29	21	28	20	28	19	13	20	22	23	37	13
5	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	15	15	16	15
6	-	-	88	-	80	-	86	-	-	-	47	75	88	47
7	-	-	16	-	33	-	15	-	-	-	27	23	33	15
8	-	~~15~~	-	~~14~~	17	~~13~~	-	-	-	-	-	15	17	13
9	30	24	26	28	21	28	15	-	-	26	18	24	30	15
10	-	-	22	-	25	-	20	-	-	-	25	23	25	20
11	17	15	21	14	35	-	26	14	15	-	30	21	35	14
12	22	16	19	16	20	-	25	37	-	-	-	22	37	16
13	-	-	22	-	27	-	19	19	-	-	19	21	27	19
14	-	~~26~~	18	~~22~~	22	~~22~~	-	-	-	-	-	22	26	18
15	~~29~~	~~19~~	~~41~~	~~24~~	~~32~~	~~23~~	~~36~~	~~25~~	-	~~25~~	~~32~~	28	41	19
16	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	27	27	27
17	-	~~15~~	18	-	15	-	17	16	~~14~~	-	-	16	18	14
18	-	-	19	-	-	-	-	~~25~~	-	23	-	22	25	19
19	-	-	21	-	22	-	22	-	-	-	-	22	22	21
20	-	~~14~~	14	~~13~~	14	~~15~~	19	-	~~16~~	-	13	15	19	13
21	21	19	36	21	44	20	34	36	15	15	35	27	44	15
22	-	-	20	-	22	-	29	28	-	12	15	21	29	12
Ср.	27	19	28	21	31	22	29	26	15	22	27	24	31	15
Макс.	48	35	88	43	80	38	86	42	20	40	47	52	88	20
Мин.	16	12	14	13	14	13	15	14	13	12	13	13	16	12

Примечание к таблицам 11-15. Градация ОКИ по величине значения. **Notes to tables 11-15:** gradation of the relative coefficient of changes by the magnitude of its values:

1 класс – изменения очень слабые - 0.1-14%.

2 класс – изменения слабые - 15-30%.

3 класс – изменения средние - 31-50%.

4 –класс – изменения сильные - 51-100%;

~~16*~~ - штриховка показывает отрицательные изменения, т.е. снижение значений по тренду / the hatching shows negative changes, i.e. the decrease of the trend values.

Таблица 12. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***средних минимальных температур*** воздуха за многолетний период для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 12.** Relative coefficient of changes of the average minimal temperatures for the perennial period for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	14	-	19	-	20	-	23	18	-	-	15	18	23	14
3	51	59	42	53	40	47	42	44	36	35	34	44	59	34
4	45	42	39	47	37	45	39	30	39	29	28	38	47	28
5	51	53	41	54	42	51	42	39	41	30	40	44	54	30
6	22	23	17	22	18	21	25	42	-	-	17	23	42	17
7	42	35	36	40	36	38	41	32	27	26	28	35	42	26
8	38	40	31	47	26	49	24	18	35	31	16	32	49	16
9	41	43	28	43	24	36	29	39	29	25	21	33	43	21
10	58	52	51	50	51	48	52	41	53	34	44	48	58	34
11	34	16	32	17	35	-	39	30	-	-	31	29	39	16
12	27	23	22	24	19	22	20	14	18	-	16	20	27	14
13	32	27	33	27	37	17	40	27	26	-	35	30	40	17
14	36	30	32	30	30	24	23	19	24	17	21	26	36	17
15	42	35	32	41	30	44	28	17	42	51	26	35	51	17
16	38	38	31	41	26	44	24	-	34	35	18	33	44	18
17	56	53	44	55	46	56	49	41	45	35	41	47	56	35
18	47	47	37	50	33	43	35	39	42	23	32	39	50	23
19	36	32	32	35	30	28	31	29	17	30	19	29	36	17
20	48	31	50	31	53	26	55	45	22	21	51	39	55	21
21	38	52	22	46	20	44	24	36	33	15	15	31	52	15
22	62	46	53	50	56	54	54	53	51	31	49	51	62	31
Ср.	41	39	34	40	34	39	35	33	34	29	28	35	41	28
Макс.	62	59	53	55	56	56	55	53	53	51	51	55	62	51
Мин.	14	16	17	17	18	17	20	14	17	15	15	16	20	14

Таблица 13. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***средних максимальных температур*** воздуха за многолетний период для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18).
Table 13. Relative coefficient of changes of the average maximal temperatures for the perennial period for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	36	29	26	28	30	20	34	34	-	-	24	29	36	20
2	36	40	33	19	35	26	35	30	17	26	29	29	40	17
3	44	38	41	35	41	30	43	40	19	29	36	36	44	19
4	41	32	32	32	30	31	32	30	26	26	28	31	41	26
5	-	-	-	-	14	-	16	18	-	-	12	15	18	12
6	36	19	30	-	30	-	33	19	-	-	26	28	36	19
7	39	39	39	37	33	39	34	29	18	22	26	32	39	18
8	35	45	27	45	25	57	24	25	35	31	20	34	57	20
9	39	40	28	33	29	26	32	36	15	-	24	30	40	15
10	42	48	33	49	35	37	34	26	32	31	31	36	49	26
11	42	44	36	42	36	31	38	35	22	25	32	35	44	22
12	37	27	39	38	28	35	31	27	24	20	29	30	39	20
13	30	37	23	31	24	22	27	33	18	-	16	26	37	16
14	39	48	31	49	28	51	28	24	40	39	23	36	51	23
15	19	-	-	25	-	32	-	-	17	32	-	25	32	17
16	27	27	22	25	24	23	23	-	24	-	28	25	28	22
17	33	38	21	32	25	32	26	27	24	22	22	28	38	21
18	35	43	25	43	24	38	29	32	25	-	24	32	43	24
19	35	48	26	50	23	54	24	26	32	31	21	34	54	21
20	23	41	-	34	-	28	-	32	26	-	-	31	41	23
21	46	36	30	37	33	29	37	32	17	14	28	31	46	14
22	-	-	-	-	-	-	-	17	-	16*	14	15	17	14
Ср.	36	38	30	36	29	34	31	28	24	26	25	30	38	24
Макс.	46	48	41	50	41	57	43	40	40	39	36	44	57	36
Мин.	19	19	21	19	14	20	16	17	15	14	12	17	21	12

Таблица 14. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***абсолютных минимальных температур*** воздуха за многолетний период для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9, Токо № 18). **Table 14.** Relative coefficient of changes of the absolute minimal temperatures for the perennial period for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	21	-	21	-	21	~~15*~~	21	-	~~20~~	-	21	20	21	15
2	15	-	15	-	15	-	15	-	17	-	15	15	17	15
3	30	25	30	27	30	19	30	18	25	21	30	26	30	18
4	24	-	24	-	24	17	24	17	21	18	24	21	24	17
5	45	19	45	33	45	27	45	22	31	32	45	35	45	19
6	-	-	-	-	-	15	-	-	26	-	-	20	26	15
7	14	-	14	-	14	-	14	-	-	-	14	14	14	14
8	-	-	-	22	-	-	-	-	17	16	-	19	22	16
9	16	-	16	14	16	-	16	-	-	-	16	15	16	14
10	39	26	39	19	39	-	39	30	20	24	39	31	39	19
11	26	19	26	18	26	-	26	13	-	23	26	23	26	13
12	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	22	22	22
13	34	22	34	-	34	-	34	-	-	22	34	31	34	22
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-	23	23	23
15	24	-	24	23	24	-	24	22	-	22	24	24	24	22
16	-	-	-	26	-	-	-	18	-	-	-	22	26	18
17	28	17	28	26	28	18	28	23	-	21	28	24	28	17
18	24	24	24	33	24	-	24	22	-	-	24	25	33	22
19	-	23	-	22	-	-	-	-	-	20	-	22	23	20
20	48	19	48	28	48	19	48	23	17	26	48	34	48	17
21	20	-	20	-	20	-	20	-	20	-	20	20	20	20
22	53	25	53	26	53	26	53	40	31	27	53	40	53	25
Ср.	29	22	29	24	29	19	29	22	22	23	29	25	29	19
Макс.	53	26	53	33	53	27	53	40	31	32	53	41	53	26
Мин.	14	17	14	14	14	15	14	13	17	16	14	15	17	13

Таблица 15. ***Относительный коэффициент изменений*** **(ОКИ, %)** ***абсолютных максимальных температур*** воздуха за многолетний период для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 15.** Relative coefficient of changes of the absolute maximal temperatures for the perennial period for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3.10-12	4-10	1-3.11-12	5-10	1-4.11-12	3-5	6-8	9-11	1-2. 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	-	-	-	-	-	-	26	29	-	-	-	28	29	26
2	15	15	-	15	15	15	18	32	15	17	22	18	32	15
3	39	39	-	39	17	39	22	35	39	-	25	33	39	17
4	14	14	18	14	-	14	18	22	14	15	-	16	22	14
5	-	-	-	-	-	-	19	-	-	-	-	19	19	19
6	34	34	-	34	23	34	-	42	34	-	35	34	42	23
7	17	17	-	17	-	17	14	23	17	16	17	17	23	14
8	28	28	22	28	-	28	-	28	28	38	19	27	38	19
9	-	-	-	-	-	-	19	23	-	-	-	21	23	19
10	25	25	-	25	-	25	-	19	25	23	-	24	25	19
11	15	15	-	15	17	15	21	36	15	20	19	19	36	15
12	-	-	-	-	-	-	16	18	-	15	14	16	18	14
13	44	44	-	44	24	44	27	40	44	-	28	37	44	24
14	33	33	22	33	-	33	-	32	33	29	-	31	33	22
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	30	30	30
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	19	19	-	19	-	19	-	29	19	-	17	20	29	17
18	20	20	-	20	-	20	-	25	20	16	-	20	25	16
19	27	27	-	27	-	27	16	27	27	35	17	26	35	16
20	20	20	13	20	-	20	-	20	20	-	-	19	20	13
21	24	24	-	24	15	24	27	25	24	23	12	22	27	12
22	-	-	-	-	-	-	33	26	-	-	-	30	33	26
Ср.	25	25	18	25	18	25	21	28	25	23	21	23	28	18
Макс.	44	44	22	44	24	44	33	42	44	38	35	38	44	22
Мин.	14	14	13	14	15	14	14	18	14	15	12	14	18	12

ОКИ представляет собой отношение модуля изменения трендовых значений климатических[2] (например, средних, минимальных и максимальных температур воздуха или осадков) или гидрологических (средних минимальных и максимальных уровней воды или расходов) характеристик за многолетний период (с момента открытия станции до времени анализа) к модулю амплитуды колебания фактических (измеренных) значений этого параметра в многолетнем аспекте (Кузьмина, Трешкин, 2014, 2016):

$ОКИ = \frac{|F(t_n) - F(t_1)|}{|t_{\max} - t_{\min}|} 100\%$, где $F(t_1)$ и $F(t_n)$ – начальные и конечные значения линейного тренда оцениваемой метеорологической или гидрологической характеристики (температуры, осадков, расходов и т.д.), а $t_{\max}$ и $t_{\min}$ – максимальные и минимальные фактические (измеренные) значения этого параметра за многолетний период (Кузьмина, 2007; Кузьмина, Трешкин, 2009).

В качестве показателя динамической оценки взаимовлияния климатических характеристик (температуры и осадков) использовался индекс засушливости Педя 1 (Педь, 1975; Переведенцев и др., 2008, Кузьмина, Трешкин, 2014, 2016), который рассматривает аномалии температуры и осадков тренда по отношению к базовому периоду (1961-1990 гг.; табл. 21). Кроме этого использовали разработанный нами модифицированный индекс засушливости Педя 2 (табл. 22), который оценивает отклонение от среднего уровня средней температуры воздуха и суммы осадков за весь многолетний период наблюдений, с момента открытия станции (Кузьмина, Трешкин, 2014, 2016). Первоначально рассчитывался *индекс Д.А. Педя* (Педя $_1$) по отношению к базовому периоду 1961-1990 гг.: $И_{Педя1} = \frac{\Delta t_i}{\sigma_t} - \frac{\Delta p_i}{\sigma_p}$, где Δt и Δp – аномалии средней температуры воздуха и осадков тренда (аномалии – отклонения от средних фактических величин базового периода 1961-1990 гг.), а σ_t и σ_p – среднеквадратические отклонения средней температуры воздуха и осадков**.** Этот индекс (Педя$_1$) показывает произошедшие изменения в настоящее время. Затем, оценивались также значения этого индекса по отношению к среднему уровню за полный период инструментальных наблюдений для каждой из станций, для чего был рассчитан *модифицированный индекс засушливости Д.А. Педя* (Педя $_2$): $И_{Педя2} = \frac{\Delta T_i}{\sigma_t} - \frac{\Delta P_i}{\sigma_p}$, где ΔT и ΔP – отклонение от среднего уровня средней температуры воздуха и суммы осадков за весь многолетний период наблюдений. Модифицированный индекс (Педя $_2$) отражает изменения, которые будут происходить в ближайшем будущем.

С помощью этих индексов (Педя $_1$ и Педя $_2$) характеризовались условия как влагообеспеченности, так и теплообеспеченности, поскольку итогом являлись знакопеременные величины. В целом, положительным значениям индексов соответствовали засушливые периоды с повышением термического режима, а отрицательным – влажные – с усилением холодов. Атмосферная засуха формируется при значениях индекса $И_{Педя} \geq 2$, а если $И_{Педя} \leq -2$, то отмечаются условия с избыточным увлажнением (Переведенцев и др., 2008). При $-2 < И_{Педя} < 2$ погодные условия считались нормальными или со слабой аномальностью. Однако, для зимних периодов индекс Педя рассчитывался по той же формуле с заменой при этом знака “-“ на знак “+” (Переведенцев и др., 2008). Тёплой и многоснежной зима

[2] Фактические изменения температуры (средней, максимальной и минимальной) и осадков за весь многолетний период (с момента открытия метеостанции) или иначе модуль изменения метеорологических характеристик для всех 22 станций бассейна Амура представлены в таблицах 4, 16-20.

считалась при $И_{Педя}>2$, а холодной и малоснежной – при $И_{Педя}<2$.

Таблица 16. ***Модуль изменения*** по тренду суммарных ***атмосферных осадков*** **(в мм)** для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9, Токо № 18). **Table 16.** Module of changes according to the trend of total precipitation (in mm) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	297	165	132	207	90	187	110	77	78	103	45	136	297	45
2	-	-	37	-	34	-	44	-	-	-	19	34	44	19
3	89	61	28	66	22	-	35	34	-	-	13	44	89	13
4	165	75	90	92	73	86	80	24	52	42	46	75	165	24
5	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	8	14	19	8
6	-	-	28	-	28	-	41	-	-	-	12	27	41	12
7	-	-	31	-	32	-	32	-	-	-	13	27	32	13
8	-	102	-	108	28	103	-	-	-	-	-	85	108	28
9	127	91	38	111	18	114	14	-	-	51	8	63	127	8
10	-	-	20	-	18	-	25	-	-	-	14	19	25	14
11	100	78	22	77	23	-	36	21	67	-	14	49	100	14
12	116	73	44	81	36	-	51	52	-	-	-	65	116	36
13	-	-	25	-	21	-	26	28	-	-	11	22	28	11
14	-	119	36	116	32	108	-	-	-	-	-	82	119	32
15	261	150	110	189	72	170	91	50	-	64	32	119	261	32
16	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-	33	33	33
17	-	67	26	-	12	-	23	26	77	-	-	39	77	12
18	-	-	20	-	-	-	-	32	-	32	-	28	32	20
19	-	-	37	-	36	-	44	-	-	-	-	39	44	36
20	-	87	17	79	9	87	17	-	89	-	6	49	89	6
21	162	138	33	146	25	135	35	47	83	28	13	77	162	13
22	-	-	31	-	22	-	38	53	-	25	8	30	53	8
Ср.	165	100	41	116	33	124	44	40	74	49	18	73	165	18
Макс.	297	165	132	207	90	187	110	77	89	103	46	137	297	46
Мин.	89	61	17	66	9	86	14	21	52	25	6	41	89	6

Таблица 17. ***Модуль изменения средних минимальных температур*** **(в °С)** воздуха по тренду за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 17.** Module of changes of the average minimal air temperatures (in °C) according to the perennial trend (from the opening of a weather station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.6	-	1.3	-	1.5	-	1.3	1.5	-	-	1.3	1.3	1.5	0.6
3	2.5	1.9	3.1	1.9	3.3	1.8	3.2	3.1	1.7	1.9	3.4	2.5	3.4	1.7
4	2.1	1.6	2.5	1.6	2.6	1.7	2.4	1.8	1.9	1.7	2.5	2.0	2.6	1.6
5	3.1	2.3	4.1	2.3	4.4	2.0	4.3	2.9	2.2	2.5	5.0	3.2	5.0	2.0
6	1.2	1.1	1.4	1.1	1.7	1.0	1.1	3.0	-	-	3.2	1.6	3.2	1.0
7	1.6	1.1	2.1	1.1	2.4	1.0	2.2	2.1	0.9	1.1	2.4	1.6	2.4	0.9
8	1.3	1.1	1.4	1.2	1.4	1.3	1.3	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4	1.1
9	2.1	2.3	2.0	2.2	2.1	2.0	2.3	3	1.6	1.5	2.3	2.1	3.0	1.5
10	2.8	1.7	3.8	1.7	4.3	1.6	3.9	2.9	1.8	1.9	4.5	2.8	4.5	1.6
11	1.7	0.5	2.7	0.5	3.3	-	3.1	2.3	-	-	3.5	2.2	3.5	0.5
12	1.0	0.7	1.3	0.8	1.4	0.7	1.3	1.3	0.6	-	1.3	1.0	1.4	0.6
13	1.6	1.0	2.8	0.8	3.4	0.6	3.2	2.1	0.9	-	4.0	2.0	4.0	0.6
14	1.3	0.9	1.7	3.4	1.9	0.9	1.7	1.1	0.9	1.0	2.1	1.5	3.4	0.9
15	1.7	1.2	1.9	1.3	1.9	1.4	1.7	1.1	1.6	2.1	2.1	1.6	2.1	1.1
16	1.5	1.0	1.9	1.2	1.8	1.3	1.6	-	1.2	1.9	1.8	1.5	1.9	1.0
17	2.8	1.7	3.7	1.8	4.1	1.7	3.8	3.3	1.5	2.2	3.9	2.8	4.1	1.5
18	2.5	2.1	2.8	2.4	2.8	2.2	2.9	2.9	2.0	1.7	3.2	2.5	3.2	1.7
19	1.2	0.8	1.6	0.8	1.8	0.7	1.7	1.7	0.6	1.1	1.5	1.2	1.8	0.6
20	2.7	1.1	4.8	1.3	5.3	1.2	4.8	3.7	0.9	1.4	5.3	3.0	5.3	0.9
21	1.6	1.8	1.6	1.7	1.7	1.6	1.8	2.3	1.7	0.9	1.8	1.7	2.3	0.9
22	3.7	2.9	4.6	2.8	5.3	2.7	5.1	4.7	3.0	1.9	5.6	3.8	5.6	1.9
Ср.	1.9	1.4	2.5	1.6	2.8	1.4	2.6	2.4	1.5	1.6	2.9	2.1	2.9	1.4
Макс.	3.7	2.9	4.8	3.4	5.3	2.7	5.1	4.7	3.0	2.5	5.6	4.0	5.6	2.5
Мин.	0.6	0.5	1.3	0.5	1.4	0.6	1.1	1.1	0.6	0.9	1.2	0.9	1.4	0.5

Таблица 18. ***Модуль изменения средних максимальных температур*** **(в °С)** воздуха по тренду за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 18.** Module of changes of the average maximal air temperatures (in °C) according to the perennial trend (from the opening of a weather station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс	Мин.
1	1.8	1.3	2.4	1.1	2.8	0.9	2.8	2.9	-	-	3.1	2.1	3.1	0.9
2	1.9	1.4	2.4	1.3	2.8	1.1	2.7	2.5	0.8	1.3	3.0	1.9	3.0	0.8
3	2.4	1.9	2.8	1.7	3.3	1.4	3.3	3.4	1.2	1.5	3.4	2.4	3.4	1.2
4	1.8	1.6	1.8	1.6	1.9	1.5	1.9	2.1	1.4	1.2	2.3	1.7	2.3	1.2
5	-	-	-	-	1.1	-	1.2	1.3	-	-	1.2	1.2	1.3	1.1
6	1.8	0.9	2.4	-	2.9	-	2.7	2.1	-	-	3.7	2.4	3.7	0.9
7	1.8	1.7	1.7	1.5	2.0	1.3	2.0	2.3	1.1	1.1	2.2	1.7	2.3	1.1
8	1.8	1.8	1.7	1.8	1.7	1.9	1.7	1.8	1.8	1.6	1.8	1.8	1.9	1.6
9	2.0	1.5	2.3	1.3	2.5	1.1	2.5	2.9	1.0	-	2.8	2.0	2.9	1.0
10	2.2	1.8	2.5	1.7	2.8	1.6	2.6	1.8	1.7	1.8	3.2	2.2	3.2	1.6
11	2.6	1.8	3.2	1.6	3.8	1.4	3.8	3.2	1.2	1.3	4.0	2.5	4.0	1.2
12	1.8	1.7	1.7	1.6	1.9	1.5	1.9	1.9	1.2	1.1	2.3	1.7	2.3	1.1
13	1.8	1.4	2.1	1.2	2.4	1.0	2.4	2.5	0.9	-	2.3	1.8	2.5	0.9
14	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0	2.0	1.8	2.0	1.9	2.4	2.0	2.4	1.8
15	0.8	-	-	0.8	-	1.2	-	-	1.0	1.4	-	1.0	1.4	0.8
16	1.3	1.4	1.6	1.2	2.0	1.2	1.7	-	1.5	-	2.8	1.6	2.8	1.2
17	1.5	1.5	1.5	1.3	1.9	1.2	1.9	1.8	1.0	1.0	2.0	1.5	2.0	1.0
18	2.1	2.1	2.0	2.0	2.2	1.8	2.4	2.6	1.7	-	3.0	2.2	3.0	1.7
19	1.8	2.1	1.7	2.0	1.8	1.8	1.8	2.4	1.6	1.6	1.9	1.9	2.4	1.6
20	1.0	1.7	-	1.4	-	1.0	-	2.4	1.2	-	-	1.5	2.4	1.0
21	2.1	1.6	2.2	1.4	2.6	1.1	2.7	2.7	0.9	0.9	3.0	1.9	3.0	0.9
22	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-	0.9	1.4	1.2	1.4	0.9
Ср.	1.8	1.6	2.1	1.5	2.3	1.4	2.3	2.3	1.3	1.3	2.6	1.9	2.6	1.3
Макс.	2.6	2.1	3.2	2.0	3.8	2.0	3.8	3.4	2.0	1.9	4.0	2.8	4.0	1.9
Мин.	0.8	0.9	1.5	0.8	1.1	0.9	1.2	1.2	0.8	0.9	1.2	1.0	1.5	0.8

Таблица 19. ***Модуль изменения абсолютных минимальных температур*** **(в °С)** воздуха по тренду за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 19.** Module of changes of the absolute minimal air temperatures (in °C) according to the perennial trend (from the opening of a weather station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	2.2	-	2.2	-	2.2	2.1	2.2	-	1.6	-	2.2	2.1	2.2	1.6
2	1.8	-	1.8	-	1.8	-	1.8	-	1.5	-	1.8	1.8	1.8	1.5
3	4.9	3.3	4.9	3.6	4.9	3.3	4.9	3.7	2.6	3.8	4.9	4.1	4.9	2.6
4	3.4	-	3.4	-	3.4	3.0	3.4	2.6	1.8	3.1	3.4	3.1	3.4	1.8
5	6.1	4.1	6.1	6.2	6.1	5.9	6.1	4.0	2.7	5.4	6.1	5.3	6.2	2.7
6	-	-	-	-	-	2.4	-	-	1.8	-	-	2.1	2.4	1.8
7	2.1	-	2.1	-	2.1	-	2.1	-	-	-	2.1	2.1	2.1	2.1
8	-	-	-	2.8	-	-	-	-	1.3	2.3	-	2.1	2.8	1.3
9	2.2	-	2.2	2.2	2.2	-	2.2	-	-	-	2.2	2.2	2.2	2.2
10	5.1	3.8	5.1	2.8	5.1	-	5.1	6.2	2.0	3.9	5.1	4.4	6.2	2.0
11	3.8	3.6	3.8	3.2	3.8	-	3.8	2.2	-	4.1	3.8	3.6	4.1	2.2
12	-	-	-	-	-	-	-	-	1.8	-	-	1.8	1.8	1.8
13	3.9	4.6	3.9	-	3.9	-	3.9	-	-	4.1	3.9	4.0	4.6	3.9
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.4	-	3.4	3.4	3.4
15	2.4	-	2.4	2.4	2.4	-	2.4	2.5	-	3.5	2.4	2.6	3.5	2.4
16	-	-	-	2.8	-	-	-	2.6	-	-	-	2.7	2.8	2.6
17	4.0	3.1	4.0	3.4	4.0	2.7	4.0	3.6	-	4.4	4.0	3.7	4.4	2.7
18	2.9	4.4	2.9	4.7	2.9	-	2.9	4.1	-	-	2.9	3.5	4.7	2.9
19	-	2.6	-	2.2	-	-	-	-	-	2.4	-	2.4	2.6	2.2
20	5.5	3.8	5.5	4.4	5.5	4.0	5.5	8.0	1.4	4.3	5.5	4.9	8.0	1.4
21	2.8	-	2.8	-	2.8	-	2.8	-	2.1	-	2.8	2.7	2.8	2.1
22	6.5	6.0	6.5	5.6	6.5	3.0	6.5	6.9	3.3	4.1	6.5	5.6	6.9	3.0
Ср.	3.7	3.9	3.7	3.6	3.7	3.3	3.7	4.2	2.0	3.8	3.7	3.6	4.2	2.0
Макс.	6.5	6.0	6.5	6.2	6.5	5.9	6.5	8.0	3.3	5.4	6.5	6.1	8.0	3.3
Мин.	1.8	2.6	1.8	2.2	1.8	2.1	1.8	2.2	1.3	2.3	1.8	2.0	2.6	1.3

Таблица 20. ***Модуль изменения абсолютных максимальных температур*** **(в °С)** воздуха по тренду за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 20.** Module of changes of the absolute maximal air temperatures (in °C) according to the perennial trend (from the opening of a weather station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	-	-	-	-	-	-	3.2	4.9	-	-	-	4.1	4.9	3.2
2	1.2	1.2	-	1.2	2.4	1.2	3.3	3.4	1.2	1.9	3.4	2.0	3.4	1.2
3	1.8	1.8	-	1.8	3.2	1.8	3.8	3.2	1.8	-	4.1	2.6	4.1	1.8
4	1.3	1.3	2.5	1.3	-	1.3	2.5	3.5	1.3	1.3	-	1.8	3.5	1.3
5	-	-	-	-	-	-	3.1	-	-	-	-	3.1	3.1	3.1
6	2.2	2.2	-	2.2	3.6	2.2	-	6.7	2.2	-	5.5	3.4	6.7	2.2
7	1.8	1.8	-	1.8	-	1.8	2.4	3.1	1.8	1.8	2.7	2.1	3.1	1.8
8	2.6	2.6	2.5	2.6	-	2.6	-	2.8	2.6	3.2	2.6	2.7	3.2	2.5
9	-	-	-	-	-	-	2.2	3.6	-	-	-	2.9	3.6	2.2
10	2.3	2.3	-	2.3	-	2.3	-	2.2	2.3	2.3	-	2.3	2.3	2.2
11	1.7	1.7	-	1.7	2.8	1.7	3.8	4.4	1.7	2.0	3.1	2.5	4.4	1.7
12	-	-	-	-	-	-	2.6	2.5	-	1.4	2.7	2.3	2.7	1.4
13	2.1	2.1	-	2.1	3.4	2.1	3.8	4.0	2.1	-	3.0	2.7	4.0	2.1
14	2.5	2.5	2.7	2.5	-	2.5	-	3.2	2.5	2.9	-	2.7	3.2	2.5
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	-	2.7	2.7	2.7
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	1.6	1.6	-	1.6	-	1.6	-	3.7	1.6	-	2.6	2.0	3.7	1.6
18	3.4	3.4	-	3.4	-	3.4	-	5.0	3.4	2.6	-	3.5	5.0	2.6
19	2.0	2.0	-	2.0	-	2.0	2.5	2.9	2.0	2.8	2.1	2.3	2.9	2.0
20	1.9	1.9	2.2	1.9	-	1.9	-	3.0	1.9	-	-	2.1	3.0	1.9
21	2.5	2.5	-	2.5	2.6	2.5	5.1	3.5	2.5	2.7	2.3	2.9	5.1	2.3
22	-	-	-	-	-	-	5.5	3.7	-	-	-	4.6	5.5	3.7
Ср.	2.1	2.1	2.5	2.1	3.0	2.1	3.4	3.6	2.1	2.3	3.1	2.6	3.6	2.1
Макс.	3.4	3.4	2.7	3.4	3.6	3.4	5.5	6.7	3.4	3.2	5.5	4.0	6.7	2.7
Мин.	1.2	1.2	2.2	1.2	2.4	1.2	2.2	2.2	1.2	1.3	2.1	1.7	2.4	1.2

Таблица 21. ***Индекс засушливости Педя 1*** по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 21.** Pedya (1) dryness index for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.4	1.3	**2.5***	1.3	**2.3**	**-1.9**	**2.6**	0.0	**-2.4**	-1.4	**2.4**	0.6	**2.6**	**-2.4**
2	**2.5**	**2.4**	**4.2**	**2.7**	**4.1**	**3.0**	**3.8**	1.6	**2.1**	**3.9**	**4.2**	**3.1**	**4.2**	1.6
3	1.2	**1.9**	**3.0**	1.6	**2.8**	**2.4**	**2.2**	0.7	**2.8**	**2.2**	**3.4**	**2.2**	**3.4**	0.7
4	0.8	0.6	**3.1**	0.7	**3.2**	1.0	**3.2**	0.5	0.3	1.7	**3.5**	1.7	**3.5**	0.3
5	**2.1**	1.9	**3.8**	**2.4**	**1.9**	**2.5**	**1.9**	1.6	**2.9**	**2.4**	**2.8**	**2.4**	**3.8**	1.6
6	1.7	0.0	**3.2**	0.0	**2.5**	0.0	**2.0**	1.4	0.0	1.5	**2.5**	1.3	**3.2**	0.0
7	**2.0**	**2.2**	**3.1**	**1.9**	**3.2**	**2.6**	1.7	1.5	**2.2**	**2.1**	**2.8**	**2.3**	**3.2**	1.5
8	**2.2**	**5.1**	**2.3**	**4.2**	**5.0**	**5.2**	**2.3**	**2.3**	**2.0**	**2.7**	**2.4**	**3.2**	**5.2**	**2.0**
9	-0.7	-1.0	**4.5**	-0.7	**4.2**	-0.3	**4.2**	**2.0**	**3.3**	-0.4	**3.9**	1.7	**4.5**	-1.0
10	**2.5**	**2.5**	**5.2**	**2.4**	**4.7**	**2.6**	**4.5**	**2.4**	**2.3**	**2.3**	**4.6**	**3.3**	**5.2**	**2.3**
11	0.0	0.3	**3.4**	0.8	**3.1**	**2.1**	**2.5**	1.0	**-2.1**	**2.1**	**3.1**	1.5	**3.4**	**-2.1**
12	-0.4	-0.8	**3.5**	-0.2	**3.8**	**2.4**	**3.1**	-0.7	0.0	**3.1**	**2.3**	1.5	**3.8**	-0.8
13	**2.0**	**3.0**	**3.5**	**3.1**	**3.0**	**3.4**	**1.9**	1.3	0.0	**2.5**	**2.9**	**2.4**	**3.5**	0.0
14	**2.4**	**4.8**	**5.3**	**4.6**	**5.2**	**4.6**	**2.7**	**2.5**	**2.0**	**2.6**	**2.8**	**3.6**	**5.3**	**2.0**
15	**4.9**	**4.6**	0.5	**4.5**	0.4	**4.9**	**-2.3**	**2.3**	**2.2**	**5.1**	0.8	**2.5**	**5.1**	**-2.3**
16	**2.1**	**2.0**	**4.0**	**2.1**	1.8	**2.3**	1.6	1.6	**2.1**	**2.1**	**2.0**	**2.2**	**4.0**	1.6
17	**1.9**	**4.9**	**4.1**	**2.2**	**4.1**	**2.3**	**3.3**	0.0	**4.9**	**2.0**	**1.9**	**2.9**	**4.9**	0.0
18	**2.1**	**2.1**	**4.7**	**2.4**	**2.1**	**2.7**	**2.1**	**-3.7**	**2.3**	**-2.7**	**2.1**	1.5	**4.7**	**-3.7**
19	**2.8**	**3.3**	**4.5**	**4.0**	**4.3**	**4.8**	**3.8**	**1.9**	**5.5**	**7.0**	**2.2**	**4.0**	**7.0**	**1.9**
20	**2.1**	**5.0**	**4.6**	**4.8**	**3.7**	**4.9**	**3.4**	1.7	**5.3**	**2.6**	**3.5**	**3.8**	**5.3**	1.7
21	1.7	**2.0**	**2.7**	**2.4**	**2.6**	**3.0**	1.5	0.9	-0.5	-0.5	**2.9**	1.7	**3.0**	-0.5
22	1.7	**1.9**	**3.2**	**1.9**	**2.5**	**2.1**	1.8	0.8	1.8	**-2.5**	**2.1**	1.6	**3.2**	**-2.5**
Ср.	1.7	**2.3**	**3.6**	**2.2**	**3.2**	**2.6**	**2.4**	1.1	1.8	1.8	**2.8**	**2.3**	**4.2**	0.1
Макс.	**4.9**	**5.1**	**5.3**	**4.8**	**5.2**	**5.2**	**4.5**	**2.5**	**5.5**	**7.0**	**4.6**	**4.0**	**7.0**	**2.3**
Мин.	-0.7	-1.0	0.5	-0.7	0.4	**-1.9**	**-2.3**	**-3.7**	**-2.4**	**-2.7**	0.8	0.6	**2.6**	**-3.7**

Примечание к таблицам 21-22: 2.5* – жирным шрифтом выделены индексы обозначающие изменение влажностно-температурного режима. **Note to tables 21-22: 2.5*** – bold font marks the values of indexes designating change of a humidity-temperature mode.

Таблица 22. ***Индекс засушливости Педя 2*** по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 22.** Pedya (2) dryness index for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	0.0	0.4	3.3	-0.1	3.3	-1.7	3.5	0.0	-1.7	-1.7	3.4	0.8	3.5	-1.7
2	1.9	1.9	3.4	2.0	3.7	3.2	3.7	1.7	1.2	1.8	3.6	2.6	3.7	1.2
3	0.4	0.4	3.6	0.1	4.0	1.7	3.7	0.3	1.3	1.9	4.0	1.9	4.0	0.1
4	0.1	0.1	3.3	-0.1	3.3	0.1	3.4	0.2	-0.2	0.0	3.5	1.2	3.5	-0.2
5	1.8	1.4	3.3	1.8	1.8	1.5	1.9	1.9	2.0	1.4	3.6	2.0	3.6	1.4
6	2.0	0.0	4.2	0.0	3.7	0.0	3.5	1.7	0.0	1.5	3.6	1.8	4.2	0.0
7	1.8	1.9	3.4	1.5	3.5	2.0	1.7	1.6	1.5	1.6	3.4	2.2	3.5	1.5
8	1.5	3.6	1.5	3.4	3.4	3.6	1.6	1.9	1.6	1.8	1.5	2.3	3.6	1.5
9	0.0	-1.7	3.6	-1.7	3.6	-1.7	3.5	1.8	1.7	-1.7	1.7	0.8	3.6	-1.7
10	1.8	1.8	1.8	1.8	3.5	1.9	3.5	1.8	1.7	1.6	3.3	2.2	3.5	1.6
11	-0.7	-0.2	3.5	0.3	3.5	1.3	3.3	-0.1	-1.7	1.8	3.3	1.3	3.5	-1.7
12	-0.3	0.0	3.2	0.3	3.6	1.7	3.1	0.0	0.0	2.0	1.6	1.4	3.6	-0.3
13	1.7	2.0	3.4	1.9	3.3	1.5	3.5	0.0	0.0	1.9	3.3	2.0	3.5	0.0
14	-0.7	2.8	2.4	2.8	2.4	2.7	0.7	0.5	0.7	0.8	0.6	1.4	2.8	-0.7
15	3.5	3.4	0.2	3.2	0.1	3.5	-1.7	1.7	1.9	3.4	0.2	1.8	3.5	-1.7
16	2.0	1.8	3.3	1.8	1.8	2.0	1.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	3.3	1.5
17	1.7	3.6	3.5	1.7	3.5	1.7	3.5	0.0	3.6	1.6	1.7	2.4	3.6	0.0
18	1.7	1.6	3.4	1.9	1.8	2.1	1.8	-4.3	1.7	-1.7	1.7	1.1	3.4	-4.3
19	2.0	2.3	3.6	2.7	3.5	2.3	3.3	1.9	3.5	2.6	1.5	2.7	3.6	1.5
20	1.8	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	1.8	3.4	1.9	3.5	3.0	3.5	1.8
21	0.2	-0.4	3.4	-0.2	3.5	0.3	3.2	-0.1	-1.7	-1.7	3.6	0.9	3.6	-1.7
22	1.7	1.7	3.2	1.6	3.3	1.6	3.4	0.0	1.5	-1.7	3.3	1.8	3.4	-1.7
Ср.	1.2	1.5	3.1	1.4	3.1	1.6	2.7	0.7	1.1	1.0	2.6	1.8	3.1	0.7
Макс.	3.5	3.6	4.2	3.4	4.0	3.6	3.7	1.9	3.6	3.4	4.0	4.2	4.2	1.9
Мин.	-0.7	-1.7	0.2	-1.7	0.1	-1.7	-1.7	-4.3	-1.7	-1.7	0.2	-4.3	0.2	-4.3

Территория бассейна Амура относится к муссонной дальневосточной области (Климатическое …, 1984) умеренного климатического пояса. Она отличается ходом годовых осадков по муссонному типу (Хромов, 1983) с максимумом летом и минимумом – зимой, а также с резким их годовым ходом и большой амплитудой изменений за периоды, например, от 19 мм зимой до 335 мм летом в Благовещенске (табл. 23). При этом река Амур образуется слиянием рр. Шилка и Аргунь, которые вместе с их бассейнами относятся к другой климатической области – континентальной восточносибирской. В связи с этим данные по 19 метеостанциям бассейна Амура сравнивались с данными трёх метеостанций (Алдан, Канку, Токо) континентальной восточносибирской климатической области.

Используется традиционное разделение бассейна Амура на верхний (от истоков до Благовещенска), средний (от Благовещенска до Хабаровска) и нижний Амур (ниже Хабаровска).

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика атмосферных осадков и температуры воздуха

Для суммарных атмосферных осадков (табл. 16) величины значимых коэффициентов корреляции (табл. 3) для всех 22-х анализируемых станций лежат в пределах от -0.56 (холодное полугодие – 1-4, 11-12 месяцы) в Солекуле (№15)) до +0.68 (холодное полугодие – 1-4, 11-12 месяцы) в Алдане (№1)), а значения фактических изменений колеблются в пределах от 6 мм (для зимы в Чекунде (№20)) до 297 мм (за год для Алдана (№1); здесь и далее учитываются изменения величин параметров только при значимых коэффициентах корреляции; табл. 16). Следует отметить, что для всех метеостанций были выявлены достоверные тренды многолетних изменений суммарных атмосферных осадков за год или за различные полугодия и сезоны года (табл. 23). Из 242 анализируемых трендов значимые изменения установлены в 56% случаев. Большая часть установленных трендов имеет положительный знак (83% от всех установленных трендов).

Анализ трендов по полугодиям и сезонам года показал, что основная тенденция в многолетнем изменении суммарных атмосферных осадков в бассейне Амура связана не столько с их увеличением в целом за год, сколько в большей степени с их перераспределением в общем годовом цикле.

Принимая во внимание, что отрицательных трендов очень мало (табл. 16, 3), рассмотрим абсолютные значения только увеличения поступления суммарных атмосферных осадков в многолетнем аспекте всреднем по всем 22-м анализируемым станциям. Так, увеличение суммарного количества осадков летом и осенью почти не наблюдалось, а общее годовое увеличение осадков за год и в весенний сезон отмечалось менее чем для половины станций. В тоже время в холодный период повышение осадков отмечалось абсолютно для всех станций в одно из холодных полугодий или зимой.

Анализ показал, что основной тенденцией многолетней динамики суммарных атмосферных осадков является их перераспределение в годовом цикле с повсеместным увеличением их в холодные полугодия и зимой. При этом, для всех метеостанций основной тенденцией в сезонном перераспределении осадков является их безусловное повышение зимой (табл. 3, 16, 11, 23), а для сибирского бассейна (Лены) и верхнего Амура также в тёплый период (весной, летом и осенью, а также в тёплое полугодие). При этом повышение выпадения осадков в тёплый период в 2-2.5 раза больше по абсолютным значениям, чем в холодный период (табл. 16). О небольшом увеличении сумм годовых и полуголовых (тёплый период) осадков на 8 и 6% (соответственно) за период с 1891 г. по 2004 г. писал П.В. Новороцкий (2007). В тоже время для бассейна среднего и нижнего Амура нами установлена тенденция снижения выпадения атмосферных осадков в тёплое время года (в тёплые полугодия, летом и осенью).

Таблица 23. Сводная таблица дополнительных рассчитанных ***средних, максимальных и минимальных значений температур воздуха и осадков*** для всех внутригодовых периодов по анализируемым метеостанциям за многолетний период (с момента открытия станции по 2013 г.) для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Таблица 23.** Summary table of the calculated extra average and minimal values of air temperatures and precipitation for every period of a year for the analyzed weather stations for the perennial period (from the opening of a station to 2013) for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Станция		**Внутригодовой период**		**Осадки**		**Температура воздуха, °C**				
№ станции на карте и в таблицах	**Название метеостанции**	**Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон**	**Месяцы года**	**Среднее количество осадков, мм**	**Изменение осадков в % от среднего**	**Средняя**	**Абсолютная минимальная**	**Абсолютная максимальная**	**Средняя минимальная**	**Средняя максимальная**
1	АЛДАН (Саха-Якутия), 58° 37' с.ш., 125° 22' в.д., -682 м БС, № ВМО 31004	*Период расчёта, годы*		1937-2013		1936-2013	1937-2013	1937-2013	1937-2013	1937-2013
		Кол-во лет расчёта		76-77		77-78	76-77	76-77	76-77	74-77
		Год	1-12	**638.3***	**46.5**	**-5.9**	**-48.7**	35.2	-10.6	**-1.0**
		Тёпл.	4-9	**457.6**	**36.1**	**8.1**	-31.7	см. год	2.8	**13.5**
		Холодн.	1-3, 10-12	**180.7**	**72.9**	**-19.8**	**см. год****	15.8	-24.2	**-15.5**
		Тёпл.	4-10	**514.0**	**40.2**	**6.0**	-31.7	см. год	1.0	**11.2**
		Холодн.	1-3, 11-12	**124.3**	**72.4**	**-22.5**	**см. год**	9.1	-27.0	**-18.1**
		Тёпл.	5-10	**482.6**	**38.7**	7.8	**-30.3**	см. год	2.8	**13.0**
		Холодн.	1-4, 11-12	**155.7**	**70.8**	**-19.6**	**см. год**	**15.5**	-24.3	**-15.2**
		Весна	3-5	**115.0**	**67.3**	**-5.5**	-42.0	**27.4**	-10.7	**-0.2**
		Лето	6-8	**282.9**	**27.6**	14.5	**-5.9**	см. год	8.9	20.4
		Осень	9-11	**174.4**	**59.1**	-6.8	-44.9	25.8	-10.8	-2.4
		Зима	1-2, 12	**68.3**	**65.8**	**-25.9**	**см. год**	-0.6	-30.1	**-21.8**
2	АРХАРА (Амурская обл.), 49° 25' с.ш., 130° 05' в.д., -135 м БС, № ВМО 31594	*Период расчёта, годы*		1936-2013		1913-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013
		Кол-во лет расчёта		78		94-98	78	78	77-78	78
		Год	1-12	635.4	**-***	**-0.4**	**-47.3**	**37.1**	**-6.1**	**5.7**
		Тёпл.	4-9	544.0	**-**	**14.0**	-21.2	**см. год**	8.7	**20.2**
		Холодн.	1-3, 10-12	**91.4**	**40.3**	**-15.0**	**см. год**	27.0	**-21.1**	**-8.6**
		Тёпл.	4-10	579.4	**-**	**12.4**	-26.2	**см. год**	7.0	**18.5**
		Холодн.	1-3, 11-12	**56.0**	**61.5**	**-18.5**	**см. год**	**19.8**	**-24.7**	**-12.1**
		Тёпл.	5-10	547.0	**-**	**13.9**	-26.2	**см. год**	-8.5	**20.0**
		Холодн.	1-4, 11-12	**88.4**	**50.2**	**-15.0**	**см. год**	**30.5**	**-21.0**	**-8.6**
		Весна	3-5	103.6	**-**	**1.4**	-37.1	**32.6**	**-4.7**	**8.2**
		Лето	6-8	367.4	**-**	**19.2**	**-0.8**	**см. год**	14.2	**24.9**
		Осень	9-11	137.6	**-**	**0.9**	-38.5	**31.6**	-4.6	**7.1**
		Зима	1-2, 12	**26.8**	**71.0**	**-23.7**	**см. год**	**4.2**	**-29.9**	**-17.3**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метеостанции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
3	БЛАГОВЕЩЕНСК (Амурская), 50°16'с.ш., 127°30' в.д., -132 м БС, № ВМО 31510	*Период расчёта, годы*		1910-2013		1881-2013	1910-2013	1914-2013	1910-2013	1914-2013
		Кол-во лет расчёта		104		125-131	103-104	100	102-104	100
		Год	1-12	**540.4**	**16.4**	**0.7**	**-45.4**	**39.4**	**-4.4**	**6.6**
		Тёплый	4-9	**475.6**	**12.7**	**14.5**	**-17.7**	**см. год**	**9.2**	**20.6**
		Холодный	1-3, 10-12	**64.9**	**43.2**	**-13.2**	**см. год**	28.0	**-18.0**	**-7.2**
		Тёплый	4-10	**499.1**	**13.3**	**12.8**	**-19.8**	**см. год**	**7.6**	**18.9**
		Холодный	1-3, 11-12	**41.4**	**54.2**	**-16.3**	**см. год**	**20.3**	**-21.2**	**-10.5**
		Тёплый	5-10	473.9	**-**	**14.3**	**-19.8**	**см. год**	**9.2**	**20.4**
		Холодный	1-4, 11-12	**66.6**	**52.7**	**-13.1**	**см. год**	**27.9**	**-18.2**	**-7.2**
		Весна	3-5	**79.9**	**42.2**	**2.1**	**-35.7**	**34.7**	**-3.7**	**8.6**
		Лето	6-8	335.4	**-**	**19.9**	**0.1**	**см. год**	**14.8**	**25.6**
		Осень	9-11	106.4	**-**	**1.3**	**-32.9**	33.5	**-3.3**	**7.3**
		Зима	1-2, 12	**18.7**	**71.5**	**-20.9**	**см. год**	**7.0**	**-25.8**	**-15.1**
4	БОГОРОДСКОЕ (Хабаровский кр.), 52°23' с.ш., 140°28'в.д.,-35 м БС, № ВМО 31439	*Период расчёта, годы*		1936-2013		1936-2013	1936-2013	1936-2013	1910-2013	1936-2013
		Кол-во лет расчёта		78		77-78	76-78	78	74-79	75-78
		Год	1-12	**475.5**	**34.8**	**-1.5**	**-47.7**	**34.0**	**-6.2**	**3.9**
		Тёплый	4-9	**110.3**	**23.4**	**11.1**	-26.9	**см. год**	**6.2**	**16.9**
		Холодный	1-3, 10-12	**154.8**	**58.7**	**-14.2**	**см. год**	**21.5**	**-18.6**	**-9.0**
		Тёплый	4-10	**365.2**	**25.1**	**9.8**	-26.9	**см. год**	**5.1**	**15.5**
		Холодный	1-3, 11-12	**110.3**	**66.6**	**-17.5**	**см. год**	12.0	**-22.0**	**-12.2**
		Тёплый	5-10	**342.3**	**25.0**	**11.5**	**-22.1**	**см. год**	**6.8**	**17.2**
		Холодный	1-4, 11-12	**133.2**	**59.9**	**-14.7**	**см. год**	**22.5**	**-19.3**	**-9.5**
		Весна	3-5	**80.4**	**30.4**	**-1.7**	**-35.7**	**30.7**	**-6.9**	**4.3**
		Лето	6-8	**188.4**	**27.8**	**16.3**	**-1.4**	**см. год**	**11.2**	**22.2**
		Осень	9-11	**141.6**	**29.8**	**1.0**	**-34.6**	**27.1**	**-3.0**	**5.9**
		Зима	1-2, 12	**65.1**	**71.0**	**-22.0**	**см. год**	4.6	**-26.3**	**-16.9**
5	БОМНАК (Амурская обл.), 54° 43' с.ш., 128° 56' в.д., -357 м БС, № ВМО 31253	*Период расчёта, годы*		1928-2013		1928-2013	1928-2013	1928-2013	1928-2013	1928-2013
		Кол-во лет расчёта		86		83-85	84-86	84-86	84-86	81-86
		Год	1-12	565.3	**-**	**-4.5**	**-52.1**	35.8	**-10.6**	1.5
		Тёплый	4-9	480.5	**-**	**10.8**	**-32.1**	см. год	**4.8**	17.2
		Холодный	1-3, 10-12	**84.7**	**22.5**	**-19.9**	**см. год**	19.0	**-25.9**	-14.0
		Тёплый	4-10	515.9	**-**	**8.9**	**-32.1**	см. год	**2.9**	15.2
		Холодный	1-3, 11-12	49.4	**-**	**-23.4**	**см. год**	9.6	**-29.5**	**-17.4**
		Тёплый	5-10	485.6	**-**	**10.5**	**-29.9**	см. год	**4.6**	16.9
		Холодный	1-4, 11-12	79.7	**-**	**-19.8**	**см. год**	**22.9**	**-25.9**	**-13.8**
		Весна	3-5	89.4	**-**	**-1.9**	**-42.8**	31.9	**-8.7**	**4.6**
		Лето	6-8	325.0	**-**	**16.3**	**-3.4**	см. год	**10.3**	22.9
		Осень	9-11	132.6	**-**	**-4.5**	**-45.3**	27.0	**-9.9**	1.2
		Зима	1-2, 12	**18.3**	**44.2**	**-28.5**	**см. год**	1.6	**-34.3**	**-22.6**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метеостанции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
6	ВЕРХНЯЯ ТОМЬ (Амурская обл.), 51°21' с.ш., 130° 23' в.д., -261 м БС, №ВМО 31459	*Период расчёта, годы*		1936-1998		1936-1998	1936-1998	1936-1998	1936-1998	1936-1998
		Кол-во лет расчёта		62-63		53-60	60-63	60-63	55-63	54-63
		Год	1-12	618.9	-	**-3.8**	-56.3	**35.7**	**-11.6**	**4.8**
		Тёплый	4-9	536.5	-	11.7	-32.2	см. год	**3.8**	**19.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**91.0**	**30.9**	**-19.2**	см. год	26.2	**-27.0**	**-9.5**
		Тёплый	4-10	573.2	-	9.8	-32.2	см. год	**2.1**	17.4
		Холодный	1-3, 11-12	**53.8**	**53.8**	**-22.8**	см. год	**15.8**	**-30.7**	**-12.8**
		Тёплый	5-10	544.3	-	11.4	**-28.6**	см. год	**3.6**	19.0
		Холодный	1-4, 11-12	**81.3**	**50.1**	**-19.1**	см. год	26.1	**-27.0**	**-9.5**
		Весна	3-5	92.8	-	**-1.4**	-44.7	**26.2**	**-10.6**	**7.0**
		Лето	6-8	365.6	-	17.1	**-4.7**	см. год	9.3	24.5
		Осень	9-11	147.8	-	**-2.9**	-42.3	28.8	-9.9	5.2
		Зима	1-2, 12	**22.2**	**53.4**	**-28.2**	см. год	**3.6**	**-35.3**	**-17.6**
7	ЕКАТЕРИНО-НИКОЛЬСКОЕ (Евр. авт. обл.), 47°44'с.ш., 130°58'в.д., -73 м БС, № ВМО 31707	*Период расчёта, годы*		1936-2013		1935-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013
		Кол-во лет расчёта		78		78	79	78	78	77-78
		Год	1-12	629.2	-	**2.1**	-63.3	**39.6**	**-3.0**	**8.3**
		Тёплый	4-9	551.7	-	**14.8**	-17.4	**см. год**	**9.7**	**21.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**77.5**	**39.7**	**-10.6**	см. год	25.9	**-15.6**	**-4.6**
		Тёплый	4-10	583.8	-	**13.3**	-17.4	**см. год**	**8.2**	**19.7**
		Холодный	1-3, 11-12	**45.4**	**71.5**	**-13.6**	см. год	19.3	**-18.6**	**-7.7**
		Тёплый	5-10	555.0	-	**14.8**	-16.7	**см. год**	**9.7**	**21.2**
		Холодный	1-4, 11-12	**74.2**	**43.7**	**-10.7**	см. год	**29.5**	**-15.9**	**-4.6**
		Весна	3-5	97.8	-	**3.3**	-63.3	**34.9**	**-2.7**	**10.3**
		Лето	6-8	380.0	-	**19.7**	0.6	**см. год**	**15.0**	**25.6**
		Осень	9-11	132.3	-	**3.2**	-30.6	**31.0**	**-1.6**	**9.3**
		Зима	1-2, 12	**19.1**	**69.9**	**-18.0**	**-40.1**	**8.9**	**-22.9**	**-12.2**
8	ЕЛАБУГА (Хабаровский край), 48°49' с.ш., 135° 53' в.д., -58 м БС, № ВМО 31733	*Период расчёта, годы*		1960-2013		1959-2013	1936-2013	1953-2013	1959-2013	1959-2013
		Кол-во лет расчёта		54		55	54-55	55	54-55	54-55
		Год	1-12	661.5	-	**1.7**	-40.0	**37.9**	**-2.7**	**6.8**
		Тёплый	4-9	**521.8**	**19.4**	**14.6**	-15.5	см. год	**10.0**	**20.1**
		Холодный	1-3, 10-12	139.7	-	**-11.2**	см. год	**26.3**	**-15.3**	**-6.4**
		Тёплый	4-10	**567.5**	**19.1**	**13.1**	**-18.1**	см. год	**8.6**	**18.6**
		Холодный	1-3, 11-12	**94.0**	**29.7**	**-14.4**	см. год	16.3	**-18.5**	**-9.6**
		Тёплый	5-10	**529.3**	**19.4**	**14.6**	-18.1	см. год	**10.1**	**20.1**
		Холодный	1-4, 11-12	132.2	-	**-11.4**	см. год	28.5	**-15.6**	**-6.6**
		Весна	3-5	117.1	-	**2.7**	-28.4	**31.6**	**-2.3**	**8.3**
		Лето	6-8	341.4	-	**19.4**	**2.8**	см. год	**15.0**	**24.7**
		Осень	9-11	156.8	-	**3.4**	**-29.0**	**29.4**	**-0.7**	**8.4**
		Зима	1-2, 12	46.2	-	**-19.0**	см. год	**7.2**	**-22.9**	**-14.4**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метеостанции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
9	КАНКУ (Саха Якуия), 57° 39' с.ш., 125° 58' в.д., -1204 м БС, № ВМО 31102	*Период расчёта, годы*		1950-2013		1950-2013	1950-2013	1950-2013	1950-2013	1950-2013
		Кол-во лет расчёта		62-63		63-64	63-64	60-61	59-63	55-63
		Год	1-12	**552.7**	**22.9**	**-9.7**	**-55.2**	29.7	**-14.7**	**-4.9**
		Тёплый	4-9	**449.7**	**20.1**	**4.4**	-38.2	см. год	**-1.1**	**9.7**
		Холодный	1-3, 10-12	**102.2**	**37.3**	**-23.9**	**см. год**	10.4	**-28.5**	**-19.3**
		Тёплый	4-10	**489.0**	**22.7**	**2.2**	**-39.3**	см. год	**-3.1**	**7.4**
		Холодный	1-3, 11-12	**63.1**	**27.7**	**-26.6**	**см. год**	5.8	**-31.3**	**-21.9**
		Тёплый	5-10	**464.8**	**24.6**	**4.2**	-39.3	см. год	**-1.0**	**9.3**
		Холодный	1-4, 11-12	**87.2**	**16.5**	**-23.9**	**см. год**	**10.3**	**-28.8**	**-19.1**
		Весна	3-5	85.3	-	**-10.1**	-49.9	**27.3**	**-15.7**	**-4.9**
		Лето	6-8	307.6	-	**11.2**	-12.0	см. год	**5.5**	**16.9**
		Осень	9-11	**126.5**	**40.4**	**-10.6**	-47.6	24.1	**-15.0**	-6.3
		Зима	1-2, 12	**31.9**	**24.7**	**-29.7**	**см. год**	-6.0	**-34.3**	**-25.4**
10	КОНСТАНТИНОВКА (Амурская), 49°47' с.ш., 129°55' в.д., -116 м БС, № ВМО 311586	*Период расчёта, годы*		1959-2013		1959-2013	1953-2013	1959-2013	1959-2013	1959-2013
		Кол-во лет расчёта		54-55		54-55	55	54-55	54-55	54-55
		Год	1-12	511.3	-	**0.7**	**-45.6**	**39.6**	**-5.1**	**6.8**
		Тёплый	4-9	442.5	-	**14.7**	**-19.8**	**см. год**	**8.9**	**21.0**
		Холодный	1-3, 10-12	**69.5**	**28.1**	**-13.4**	**см. год**	28.4	**-19.2**	**-7.2**
		Тёплый	4-10	467.4	-	**13.0**	**-22.0**	**см. год**	**7.2**	**19.3**
		Холодный	1-3, 11-12	**44.6**	**40.7**	**-16.7**	**см. год**	20.2	**-22.6**	**-10.5**
		Тёплый	5-10	443.0	-	**14.5**	-22.2	**см. год**	**8.8**	**20.7**
		Холодный	1-4, 11-12	**68.9**	**36.0**	**-13.3**	**см. год**	27.5	**-19.2**	**-7.1**
		Весна	3-5	78.6	-	**2.6**	**-37.9**	**34.3**	**-4.0**	**9.2**
		Лето	6-8	312.1	-	**19.7**	**1.0**	**см. год**	**14.3**	**25.6**
		Осень	9-11	98.5	-	**1.6**	**-35.0**	**32.0**	**-3.8**	**7.7**
		Зима	1-2, 12	**22.5**	**61.3**	**-21.6**	**см. год**	5.4	**-27.4**	**-15.3**
11	МАЗАНОВО (Амурская обл.), 51°38' с.ш., 128° 38' в.д., -161 м БС, № ВМО 31443	*Период расчёта, годы*		1934-2013		1934-2013	1933-2013	1939-2013	1933-2013	1933-2013
		Кол-во лет расчёта		79		78-79	80-81	80-81	79-81	74-81
		Год	1-12	**529.5**	**18.8**	**-2.2**	**-51.5**	**39.1**	**-8.6**	**4.8**
		Тёплый	4-9	**463.8**	**16.8**	**13.2**	**-26.3**	**см. год**	**6.9**	**19.7**
		Холодный	1-3, 10-12	**65.6**	**33.3**	**-17.6**	**см. год**	25.9	**-24.2**	**-10.0**
		Тёплый	4-10	**490.2**	**15.7**	**11.3**	**-28.3**	**см. год**	**5.1**	**17.9**
		Холодный	1-3, 11-12	**39.3**	**57.4**	**-21.3**	**см. год**	**16.2**	**-28.0**	**-13.5**
		Тёплый	5-10	464.0	-	**12.9**	-28.3	**см. год**	6.7	**19.4**
		Холодный	1-4, 11-12	**65.4**	**55.0**	**-17.5**	**см. год**	**28.7**	**-24.2**	**-9.9**
		Весна	3-5	**83.6**	**24.5**	**0.1**	**-42.6**	**33.1**	**-7.2**	**7.3**
		Лето	6-8	**322.1**	**20.8**	-18.6	-1.2	**см. год**	12.4	**24.8**
		Осень	9-11	106.6	-	**-1.4**	**-41.8**	**29.6**	-7.4	**5.4**
		Зима	1-2, 12	**17.2**	**83.3**	**-26.5**	**см. год**	**1.4**	**-33.0**	**-18.5**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метеостанции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
12	НИЖНЕ-ТАМБОВСКОЕ (Хабаровск. край), 50°56'с.ш.,138°11'в.д.,-18 м БС, № ВМО 31562	*Период расчёта, годы*		1936-2013		1936-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013
		Кол-во лет расчёта		76-77		75-77	76-78	80-81	73-78	72-78
		Год	1-12	**568.8**	**20.4**	**-1.0**	-48.6	40.0	**-6.7**	**5.4**
		Тёплый	4-9	**417.4**	**17.6**	**12.6**	-29.9	см. год	**7.2**	**18.9**
		Холодный	1-3, 10-12	**150.9**	**29.0**	**-14.5**	см. год	22.2	**-20.6**	**-7.9**
		Тёплый	4-10	**464.6**	**17.4**	**11.1**	-29.9	см. год	**5.9**	**17.3**
		Холодный	1-3, 11-12	**103.6**	**35.3**	**-17.9**	см. год	12.8	**-24.4**	**-11.1**
		Тёплый	5-10	437.7	-	**12.8**	-20.6	см. год	**7.7**	**19.0**
		Холодный	1-4, 11-12	**130.2**	**39.2**	**-14.9**	см. год	**25.6**	**-21.2**	**-8.2**
		Весна	3-5	**96.0**	**54.6**	**-0.4**	-38.5	**30.9**	**-7.0**	**6.7**
		Лето	6-8	256.5	-	17.9	**-1.3**	см. год	**12.6**	**24.1**
		Осень	9-11	158.3	-	**1.3**	-37.5	**28.9**	-3.3	**6.8**
		Зима	1-2, 12	57.4	-	**-23.0**	см. год	**6.1**	**-29.4**	**-15.9**
13	НОРСК (Амурская обл.), 52° 21' с.ш., 129° 55' в.д., -208 м БС, № ВМО 31388	*Период расчёта, годы*		1933-2013		1933-2013	1925-2013	1933-2013	1925-2013	1933-2013
		Кол-во лет расчёта		81		81	85-88	78-81	83-89	70-81
		Год	1-12	552.6	-	**-3.1**	**-52.0**	**35.3**	**-9.6**	**4.1**
		Тёплый	4-9	475.2	-	**12.5**	**-28.8**	**см. год**	**6.1**	**19.1**
		Холодный	1-3, 10-12	**77.4**	**32.4**	**-18.8**	**см. год**	24.6	**-25.5**	**-10.7**
		Тёплый	4-10	504.4	-	**10.6**	-28.8	**см. год**	**4.4**	**17.2**
		Холодный	1-3, 11-12	**48.3**	**43.5**	**-22.5**	**см. год**	**15.0**	**-29.5**	**-14.1**
		Тёплый	5-10	476.7	-	**12.2**	-24.6	**см. год**	**6.0**	**18.8**
		Холодный	1-4, 11-12	**75.9**	**34.4**	**-18.7**	**см. год**	**27.8**	**-25.6**	**-10.6**
		Весна	3-5	**88.2**	**31.3**	**-0.6**	-41.9	**31.6**	**-8.1**	**6.8**
		Лето	6-8	323.2	-	17.9	-1.4	**см. год**	**11.7**	**24.3**
		Осень	9-11	121.3	-	**-2.3**	**-45.1**	29.4	-8.0	4.5
		Зима	1-2, 12	**19.8**	**53.1**	**-28.0**	**см. год**	**2.7**	**-34.7**	**-19.2**
14	Ш(С)МИДОВИЧ (Еврейск. авт. обл.), 48° 37'с.ш.,133°50'в.д.,-52 м БС, № ВМО 31725	*Период расчёта, годы*		1959-2013		1959-2013	1959-2013	1959-2013	1959-2013	1959-2013
		Кол-во лет расчёта		54-55		55	55	55	55	55
		Год	1-12	672.4	-	**1.2**	-44.3	**37.6**	**-4.5**	**7.3**
		Тёплый	4-9	**561.5**	**21.2**	**14.4**	-18.6	**см. год**	**9.0**	**20.8**
		Холодный	1-3, 10-12	**109.5**	**32.5**	**-12.2**	см. год	**25.5**	**-17.9**	**-6.0**
		Тёплый	4-10	**601.4**	**19.4**	**12.9**	-21.6	**см. год**	**7.4**	**19.3**
		Холодный	1-3, 11-12	**70.0**	**45.7**	**-15.4**	см. год	17.1	**-21.2**	**-9.2**
		Тёплый	5-10	**560.2**	**19.4**	**14.3**	-21.6	**см. год**	**8.9**	**20.7**
		Холодный	1-4, 11-12	112.3	-	**-12.2**	см. год	29.5	**-18.0**	**-6.1**
		Весна	3-5	117.6	-	**2.6**	-34.8	**32.0**	**-3.4**	**9.2**
		Лето	6-8	369.7	-	**19.3**	1.9	**см. год**	**14.1**	**25.3**
		Осень	9-11	147.4	-	**2.6**	**-31.0**	**30.6**	**-2.6**	**8.9**
		Зима	1-2, 12	30.8	-	**-20.2**	см. год	5.9	**-26.2**	**-14.0**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метео-стан-ции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
15	СОЛЕКУЛЬ (Хабаровский край), 49°17' с.ш.,138°00'в.д.,-911 м БС, № ВМО 31677	*Период расчёта, годы*		1966-2013		1961-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013
		Кол-во лет расчёта		46-48		49-51	46-48	46-48	43-48	43-48
		Год	1-12	**891.7**	**29.2**	**-2.4**	**-38.5**	33.7	**-5.4**	**2.0**
		Тёплый	4-9	**661.0**	**22.7**	**9.4**	-19.2	см. год	**5.9**	14.6
		Холодный	1-3, 10-12	**230.7**	**47.8**	**-14.3**	**см. год**	22.7	**-16.9**	-10.4
		Тёплый	4-10	**739.8**	**25.5**	**7.9**	**-19.2**	см. год	**4.6**	**13.0**
		Холодный	1-3, 11-12	**151.8**	**47.1**	**-17.0**	**см. год**	10.8	**-19.7**	-13.2
		Тёплый	5-10	**688.3**	**24.7**	**9.5**	-19.0	см. год	**6.2**	**14.7**
		Холодный	1-4, 11-12	**203.4**	**44.6**	-14.6	**см. год**	23.6	**-17.3**	-10.6
		Весна	3-5	**154.3**	**32.6**	-2.4	**-32.9**	27.8	**-5.8**	2.6
		Лето	6-8	429.9	-	**14.5**	-1.7	см. год	**11.1**	**19.8**
		Осень	9-11	**240.5**	**26.7**	**-1.4**	**-32.9**	**26.0**	**-4.1**	**2.8**
		Зима	1-2, 12	**65.3**	**49.4**	**-20.7**	**см. год**	0.9	**-23.2**	-17.1
16	СОФИЙСКИЙ ПРИИСК (Хабаровск. край), 52° 6' с.ш., 133° 59' в.д., 902 м БС, № ВМО 31478	*Период расчёта, годы*		1966-2013		1936-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013
		Кол-во лет расчёта		46-48		76-78	48	46-47	46-48	42-48
		Год	1-12	736.6	-	**-6.8**	-50.6	31.7	**-13.1**	**1.1**
		Тёплый	4-9	626.4	-	**7.8**	-32.6	см. год	**1.6**	**15.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**110.2**	**29.9**	**-21.5**	см. год	19.1	**-27.8**	**-12.9**
		Тёплый	4-10	671.7	-	**6.0**	**-32.9**	см. год	**-0.1**	**13.3**
		Холодный	1-3, 11-12	64.9	-	**-24.9**	см. год	10.2	**-34.1**	**-15.9**
		Тёплый	5-10	636.2	-	**7.7**	-32.9	см. год	**1.7**	**15.0**
		Холодный	1-4, 11-12	100.4	-	**-21.5**	см. год	19.8	**-28.1**	**-12.8**
		Весна	3-5	121.4	-	**-5.3**	**-45.0**	28.2	-12.4	2.8
		Лето	6-8	415.1	-	**13.4**	-6.5	см. год	**7.0**	**21.0**
		Осень	9-11	174.4	-	**-6.2**	-45.8	27.0	**-1.7**	0.9
		Зима	1-2, 12	25.7	-	**-29.5**	см. год	-0.2	**-35.6**	**-20.3**
17	СУТЫРЬ (Хабаровский край), 50°04' с.ш. 132° 08' в.д., -347 м БС, № ВМО 31538	*Период расчёта, годы*		1940-2013		1940-2013	1939-2013	1939-2013	1939-2013	1939-2013
		Кол-во лет расчёта		74		74	74-75	74-75	72-75	71-75
		Год	1-12	666.1	-	**-1.8**	**-49.1**	**37.6**	**-8.3**	**5.3**
		Тёплый	4-9	**570.8**	**11.8**	**12.3**	**-25.0**	**см. год**	**5.8**	**19.7**
		Холодный	1-3, 10-12	**95.3**	**27.5**	**-16.0**	**см. год**	24.9	**-22.5**	**-8.9**
		Тёплый	4-10	610.2	-	**10.6**	**-25.0**	**см. год**	**4.2**	**17.9**
		Холодный	1-3, 11-12	**55.9**	**21.8**	**-19.3**	**см. год**	17.5	**-26.0**	**-12.2**
		Тёплый	5-10	574.8	-	**12.0**	**-24.2**	**см. год**	**5.6**	**19.4**
		Холодный	1-4, 11-12	**91.3**	**25.0**	**-15.9**	**см. год**	28.9	**-22.5**	**-8.8**
		Весна	3-5	**111.2**	**23.1**	**0.4**	**-31.7**	**33.1**	**-6.9**	**8.0**
		Лето	6-8	**379.1**	**20.3**	**17.4**	-6.9	**см. год**	**11.0**	**24.7**
		Осень	9-11	150.8	-	**-1.2**	**-39.4**	30.5	**-7.1**	**5.8**
		Зима	1-2, 12	24.9	-	**-24.4**	**см. год**	**2.5**	**-30.9**	**-17.3**

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	Название метео-стан-ции	Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон	Месяцы года	Среднее кол-во осадков, мм	Изменение осадков в % от среднего	Средняя	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя минимальная	Средняя максимальная
18	ТОКО (Хабаровский край), 56° 17' с.ш., 131° 08' в.д., -850 м БС, № ВМО 31137	*Период расчёта, годы*		1962-2013		1951-2013	1962-2013	1962-2013	1962-2013	1962-2013
		Кол-во лет расчёта		51		60-63	50-51	50-51	49-52	48-52
		Год	1-12	451.8	-	**-10.6**	**-61.1**	**44.4**	**-18.6**	**-2.3**
		Тёплый	4-9	355.2	-	**6.3**	**-43.2**	**см. год**	**-2.1**	**14.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**96.5**	**21.1**	**-27.7**	**см. год**	17.4	**-35.2**	**-18.8**
		Тёплый	4-10	395.0	-	**4.1**	**-43.3**	**см. год**	**-4.1**	**11.8**
		Холодный	1-3, 11-12	56.8	-	**-31.4**	**см. год**	9.0	**-39.0**	**-22.2**
		Тёплый	5-10	372.1	-	**6.0**	-43.3	**см. год**	**-1.9**	**13.6**
		Холодный	1-4, 11-12	79.7	-	**-27.6**	**см. год**	18.9	**-35.5**	**-18.4**
		Весна	3-5	**77.6**	**41.3**	**-8.7**	**-52.2**	**31.9**	**-17.9**	**0.3**
		Лето	6-8	227.0	-	**12.6**	-11.4	**см. год**	**3.8**	**20.8**
		Осень	9-11	**117.1**	**27.4**	-10.7	-52.2	**26.8**	**-17.9**	**-3.3**
		Зима	1-2, 12	30.2	-	**-36.3**	**см. год**	-2.0	**-42.9**	**-27.4**
19	ХАБАРОВСК (Хабаровск. край), 48° 31' с.ш., 135° 10'в.д.,-76 м БС, № ВМО 31735	*Период расчёта, годы*		1953-2013		1910-2013	1952-2013	1952-2013	1952-2013	1952-2013
		Кол-во лет расчёта		61		102-104	61-62	61-62	61-62	61-62
		Год	1-12	674.8	-	**1.9**	-40.0	**36.4**	**-2.1**	**6.9**
		Тёплый	4-9	543.1	-	**14.7**	**-15.1**	**см. год**	**10.3**	**20.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**131.6**	**28.0**	**-11.1**	см. год	25.8	**-14.5**	**-6.2**
		Тёплый	4-10	590.2	-	**13.3**	**-15.6**	**см. год**	**8.9**	**18.7**
		Холодный	1-3, 11-12	**84.6**	**42.9**	**-14.3**	см. год	17.0	**-17.5**	**-9.4**
		Тёплый	5-10	549.5	-	**14.9**	-15.6	**см. год**	**10.4**	**20.2**
		Холодный	1-4, 11-12	**125.3**	**34.9**	**-11.4**	см. год	**28.6**	**-14.8**	**-6.4**
		Весна	3-5	123.4	-	**2.5**	-28.9	**31.9**	**-1.8**	**8.4**
		Лето	6-8	350.3	-	**19.6**	2.2	**см. год**	**15.2**	**24.8**
		Осень	9-11	159.8	-	**3.7**	**-27.4**	**29.8**	**-0.2**	**8.4**
		Зима	1-2, 12	41.3	-	**-18.8**	см. год	**6.6**	**-21.9**	**-14.1**
20	ЧЕКУНДА (Хабаровский край), 50° 49' с.ш.,132°10' в.д.,-272 м БС, № ВМО 31532	*Период расчёта, годы*		1936-2013		1934-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013	1936-2013
		Кол-во лет расчёта		78		73-78	77-78	76-78	72-78	70-78
		Год	1-12	655.0	-	**-3.8**	**-52.2**	**39.6**	**-10.2**	**4.1**
		Тёплый	4-9	**570.3**	**15.2**	**12.1**	**-26.5**	**см. год**	**5.6**	**19.8**
		Холодный	1-3, 10-12	**84.6**	**20.2**	**-19.6**	**см. год**	**23.4**	**-26.1**	-11.6
		Тёплый	4-10	**604.6**	**13.1**	**10.3**	**-26.5**	**см. год**	**3.9**	**17.9**
		Холодный	1-3, 11-12	**50.3**	**18.4**	**-23.4**	**см. год**	18.0	**-30.1**	-15.2
		Тёплый	5-10	**574.7**	**15.1**	**11.7**	**-26.4**	**см. год**	**5.5**	**19.5**
		Холодный	1-4, 11-12	**80.3**	**21.4**	**-19.4**	**см. год**	28.9	**-26.1**	-11.4
		Весна	3-5	101.8	-	**-0.6**	**-46.0**	**33.8**	**-8.6**	**7.8**
		Лето	6-8	**392.3**	**22.6**	**17.3**	**-2.4**	**см. год**	**11.1**	**25.0**
		Осень	9-11	140.2	-	**-2.5**	**-44.1**	30.1	**-8.1**	4.7
		Зима	1-2, 12	**22.8**	**26.0**	**-29.6**	**см. год**	2.0	**-35.9**	-21.3

Продолжение таблицы 23.

Станция		Внутригодовой период		Осадки		Температура воздуха, °С				
№ станции на карте и в таблицах	**Название метео-стан-ции**	**Годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон**	**Месяцы года**	**Среднее кол-во осадков, мм**	**Изменение осадков в % от среднего**	**Средняя**	**Абсолютная мини-мальная**	**Абсолютная макси-мальная**	**Средняя мини-мальная**	**Средняя макси-мальная**
21	ЧЕРНЯЕВО (Амурская обл.), 52° 47' с.ш., 126° 00' в.д., -210 м БС, № ВМО 31371	*Период расчёта, годы*		1901-2013		1901-2013	1910-2013	1928-2013	1910-2013	1928-2013
		Кол-во лет расчёта		112-113		107-111	100-103	84-86	95-104	74-86
		Год	1-12	**439.8**	**36.9**	**-4.4**	**-51.9**	**38.2**	**-8.8**	**4.7**
		Тёплый	4-9	**385.3**	**35.7**	**12.5**	-27.5	**см. год**	**6.0**	**19.2**
		Холодный	1-3, 10-12	**52.1**	**63.5**	**-17.1**	см. год**	24.5	**-23.6**	**-9.8**
		Тёплый	4-10	**405.7**	**35.9**	**10.5**	-27.8	**см. год**	**4.2**	**17.3**
		Холодный	1-3, 11-12	**31.7**	**77.9**	**-20.4**	**см. год**	**24.5**	**-27.0**	**-13.0**
		Тёплый	5-10	**386.5**	**35.0**	**12.1**	-27.8	**см. год**	**5.8**	**18.9**
		Холодный	1-4, 11-12	**51.1**	**68.2**	**-16.9**	**см. год**	**28.1**	**-23.5**	**-9.6**
		Весна	3-5	**66.1**	**71.0**	**-0.5**	-44.3	**35.1**	**-7.9**	**7.1**
		Лето	6-8	**269.1**	**30.7**	18.0	**-4.2**	**см. год**	**11.7**	**24.6**
		Осень	9-11	**87.4**	**32.1**	-2.3	-43.3	**31.6**	**-7.9**	**4.5**
		Зима	1-2, 12	**13.9**	**92.4**	**-25.0**	**см. год**	**5.5**	**-31.3**	**-17.7**
22	ЭКИМЧАН (Амурская обл.), 53° 04' с.ш., 132° 56' в.д., -542 м БС, № ВМО 31329	*Период расчёта, годы*		1915-2013		1915-2013	1914-2013	1915-2013	1914-2013	1925-2013
		Кол-во лет расчёта		97-99		95-98	97-99	88-89	89-100	79-87
		Год	1-12	678.5	-	**-5.3**	**-53.4**	34.8	**-11.4**	1.8
		Тёплый	4-9	573.0	-	**9.7**	**-36.6**	см. год	**3.3**	16.9
		Холодный	1-3, 10-12	**106.9**	**28.6**	**-20.4**	**см. год**	22.0	**-26.5**	-13.1
		Тёплый	4-10	618.2	-	**7.8**	**-36.6**	см. год	**1.7**	14.9
		Холодный	1-3, 11-12	**60.8**	**35.9**	**-23.9**	**см. год**	12.0	**-30.2**	-16.3
		Тёплый	5-10	587.0	-	**9.5**	**-30.7**	см. год	**3.5**	16.6
		Холодный	1-4, 11-12	**91.6**	**41.7**	**-20.4**	**см. год**	**23.7**	**-26.8**	-12.9
		Весна	3-5	**102.7**	**51.8**	**-3.3**	**-41.3**	**30.2**	**-10.9**	**4.5**
		Лето	6-8	387.4	-	**15.2**	**-6.0**	см. год	**9.0**	22.6
		Осень	9-11	**161.7**	**15.6**	-4.5	**-43.9**	28.6	**-9.6**	**1.8**
		Зима	1-2, 12	**25.2**	**32.4**	**-29.2**	**см. год**	0.8	**-34.9**	**-21.7**

Примечание к таблице 23: 638.3* – жирным шрифтом выделены метеорологические показатели, рассчитанные из ежедневных многолетних данных, для которых определены достоверные тренды изменений; см. год** – показатель за соответствующий внутригодовой период соответствует показателю за весь годовой период; **-*** ** – данные не вычислялись, поскольку достоверных трендов не утановлено, а, следовательно, многолетние изменения отсутствуют. **Notes to table 23: 638.3*** – bold font marks the meteorological values, calculated with the help of the perennial data, for which the reliable trends of changes were determined; см. год** – the index for the corresponding period of a year matches the index for the entire year; **-*** ** – data was not calculated, because there were no trends and, therefore, no changes.

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) многолетнего распределения суммарных атмосферных осадков (табл. 11) в бассейне Амура показал, что значимые достоверные изменения произошли в 56% случаев от общего количества анализируемых кривых для всех 22-х станций и в 54% случаев для метеостанций бассейна Амура. При этом основная доля (83% от всех достоверных трендов и 80% для трендов только бассейна Амура) этих изменений (этого ОКИ) относятся к положительным, т.е. связаны с увеличением выпадения атмосферных осадков. Большая доля ОКИ (69% от всех установленных положительных изменений 72% для бассейна Амура) лежит в пределах 15-30%, т.е. пока относится ко 2-му классу изменений – к слабым (табл. 11).

Минимальные и максимальные значения ОКИ составляют 8% и 5% соответственно (10% и 3% для бассейна Амура) от установленных положительных трендов изменения осадков.

Сравнивая произошедшие изменения с многолетними средними значениями суммарных атмосферных осадков за разные временные периоды[3] следует отметить, что всреднем для всех станций за все периоды изменения по тренду достигли в настоящее время 38% от значений их многолетних средних. При этом, максимальные положительные по доле изменения произошли в зимний сезон – на 59% всреднем по всем 14 станциям, на которых они были зафиксированы; в основное холодное полугодие (1-3, 10-12) современные изменения осадков достигли всреднем для 21 станций 37% от их многолетних средних значений (табл. 24); в альтернативное холодное полугодие (1-3, 11-12) изменения осадков всреднем по 18 станциям достигли 48% от их многолетних средних значений (табл. 24). Таким образом, изменения в холодное полугодие, хотя и менее существенны по абсолютным значениям, но более стабильны и достигают по величине от одной трети до половины от среднемноголетних значений.

Таким образом, можно сказать, что для бассейна Амура характерна тенденция увеличения выпадения атмосферных осадков, наиболее постоянна она для холодных периодов. При этом для бассейна верхнего Амура характерна также тенденция увеличения выпадения осадков в тёплый период, которая по значениям изменений выше в 2-2.5 раза по сравнению с увеличением их в холодный период. При этом наблюдающееся повышение в выпадении атмосферных осадков всреднем по всем периодам и станциям происходит на величину от одной трети до половины от возможных.

Для *средних температур воздуха* (табл. 4) величины значимых коэффициентов корреляции (как для всех 22-х анализируемых метеостанций, так и только для 19-и метеостанций бассейна Амура) лежат в пределах от +0.16 (осенний сезон в Хабаровске (№19) до +0.74 (тёплое полугодие (4-10 месяцы) в Константиновке (№10; табл. 6)), т.е. все они положительные. При этом значимое повышение средних значений температур воздуха зафиксировано от 0.5°С (осень и лето в Хабаровске (№19)) до 3.7°С (зима в Константиновке (№10) и Мазаново (№11); табл. 4), а всреднем для всех анализируемых временных периодов (для всех 22 станций и только для 19 бассейна Амура) – на 1.7°С (табл. 4).

Для всех анализируемых метеостанций в многолетнем распределении средней температуры воздуха (среднегодовой, средней по полугодиям, а также по отдельным сезонам года) установлены только положительные достоверные тренды (табл. 6, 4-5, 23). Отрицательные значения отсутствуют даже для незначимых коэффициентов корреляции. Из 242 анализируемых трендов изменений средних температур воздуха достоверные изменения не выявлены лишь для отдельных сезонов некоторых станций (табл. 4). Таким образом, пока не отмечены достоверные изменения для 6 станций летом, для 4 станций осенью, для

[3] Рассматривается показатель «% от среднего» (табл. 24), определяющийся как доля изменений фактических средних значений осадков, рассчитывающийся как отношение модуля изменения к модулю среднего значения осадков, выраженное в %.

1 станции весной, для тёплых полугодий: по 1-ой станции для двух разных полугодий (4-9 месяцы и 4-10 месяцы) и для 2-х станций третьего альтернативного тёплого полугодия (5-10 месяцы) из всех взятых для анализа данных 22 метеорологичеких станций.

Таблица 24. ***Показатель доли изменений фактических средних значений осадков*** **(% от среднего)** по различным внутригодовым периодам для бассейна Амура (19 метеостанций) и Сибирского (Ленского) бассейна (3 метеостанции – Алдан № 1, Канку № 9 и Токо № 18). **Table 24.** Index of percentage of the changes of the actual average precipitation values for the different periods of a year for the Amur basin (19 weather stations) and Siberian (Lensky) basin (3 weather stations – Aldan № 1, Kanku № 9, Toko № 18).

Метео-стан-ция	Период времени в месяцах (годовой, полугодовой тёплый и холодный, сезон)											За все периоды		
	Год	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Тёпл.	Холодн.	Весна	Лето	Осень	Зима			
	1-12	4-9	1-3,10-12	4-10	1-3,11-12	5-10	1-4,11-12	3-5	6-8	9-11	1-2, 12	Ср.	Макс.	Мин.
1	47	36	73	40	72	39	71	67	28	59	66	54	73	28
2	-	-	40	-	62	-	50	-	-	-	71	56	71	40
3	16	13	43	13	54	-	53	42	-	-	72	38	72	13
4	35	23	59	25	67	25	60	30	28	30	71	41	71	23
5	-	-	23	-	-	-	-	-	-	-	44	33	44	23
6	-	-	31	-	54	-	50	-	-	-	53	47	54	31
7	-	-	40	-	72	-	44	-	-	-	70	56	72	40
8	-	19	-	19	30	19	-	-	-	-	-	22	30	19
9	23	20	37	23	28	25	17	-	-	40	25	26	40	17
10	-	-	28	-	41	-	36	-	-	-	61	42	61	28
11	19	17	33	16	57	-	55	25	21	-	83	36	83	16
12	20	18	29	17	35	-	39	55	-	-	-	31	55	17
13	-	-	32	-	44	-	34	31	-	-	53	39	53	31
14	-	21	33	19	46	19	-	-	-	-	-	28	46	19
15	29	23	48	26	47	25	45	33	-	27	49	35	49	23
16	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	30	30	30
17	-	12	28	-	22	-	25	23	20	-	-	22	28	12
18	-	-	21	-	-	-	-	41	-	27	-	30	41	21
19	-	-	28	-	43	-	35	-	-	-	-	35	43	28
20	-	15	20	13	18	15	21	-	23	-	26	19	26	13
21	37	36	64	36	78	35	68	71	31	32	92	53	92	31
22	-	-	29	-	36	-	42	52	-	16	32	34	52	16
Ср.	28	21	37	22	48	25	44	43	25	33	58	38	58	21
Макс.	47	36	73	40	78	39	71	71	31	59	92	58	92	31
Мин.	16	12	20	13	18	15	17	23	20	16	25	18	25	12

Как видим, преобладающей тенденцией в многолетнем распределении средних температур воздуха в бассейне Амура является стабильное повышение среднегодовых значений температуры воздуха (всреднем по всем станциям r=+0.52 и по бассейну Амура r=+0.53) от +0.34 (Верхняя Томь (№6)) до +0.69 (в Константиновке (№10; табл. 6)), что соответствует повышению среднегодовых температур воздуха от 1.0°С (мин.) до 2.6°С (макс.; равно как и для бассейна Амура), а всреднем по всем станциям и по бассейну Амура – на 1.7°С (табл. 4). Такое потепление происходит за счет повышения температуры воздуха как в холодные (абсолютно по всем станциям для всех холодных полугодий r лежит в пределах от +0.23 до +0.58, всреднем +0.42), так и в тёплые полугодия (всреднем по всем станциям для всех тёплых полугодий r=0.48, т.е. от +0.24 до +0.74; табл. 6). При этом фактическое повышение средней температуры воздуха всреднем по всем 22-м анализируемым метеостанциям составило (табл. 4): за основные тёплое (4-9) и холодное полугодие (1-3; 10-12) – на 1.3°С (от 0.7°С до 1.8°С) и на 2.1°С (от 1.1°С до 3.2°С) соответственно (почти также, как и для бассейна Амура, где чуть меньшие изменения произошли всреднем за тёплое полугодие – на 1.2°С); за одно из альтернативных тёплых (4-10) и холодных (1-3; 11-12) полугодий – на 1.2°С (от 0.7°С до 1.8°С) и на 2.3°С (от 1.1°С до 3.6°С) соответственно (для бассейна Амура чуть теплее всреднем изменения только для холодного полугодия – на 2.4°С); за другие альтернативные тёплое (5-10) и холодное (1-4; 11-12) полугодие – на 1.1°С (от 0.5°С до 1.7°С) и на 2.3°С (от 1.1°С до 3.4°С) соответственно (равно как и для бассейна Амура); за весну (3-5) – на 2.2°С (от 1.2°С до 3.1°С; почти также как и для бассейна Амура, где максимум достиг 2.9°С); за лето (6-8) – на 1.2°С (от 0.5°С до 1.8°С; аналогично для бассейна Амура); за осень (9-11) – на 1.3°С (от 0.5°С до 2.1°С; аналогично для бассейна Амура); за зиму (1-2, 12) – на 2.5°С (от 1.2°С до 3.7°С; аналогично для бассейна Амура).

Таким образом, установлена основная тенденция повышения среднегодовой температуры воздуха в бассейне Амура, которая происходит как за счет холодного полугодия, так и за счет тёплого полугодия. При этом увеличение температур в холодное полугодие по абсолютным значениям в два раза больше, чем в тёплое полугодие (табл. 4). Повышение средних температур воздуха происходит также во все сезоны года, однако, основная доля их приходится на зимний (на 2.5°С, от 1.2°С до 3.7°С) и весенний (на 2.2°С, от 1.2°С до 3.1°С) сезоны, поскольку летом и осенью повышение средних температур в два раза ниже – только на 1.2°С и 1.3°С (от 0.5°С до 1.8°С летом и от 0.5°С до 2.1°С – осенью; табл. 4). В бассейне Амура и в Хинганском заповеднике (по метеостанции Архара) на повышение среднегодовой температуры воздуха с акцентом на зимнее полугодие за многолетний период (по 2004 г.) указывли также П.В. Новороцкий (2006, 2007) и В.А. Кастрикин (2006).

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) *средних температур* воздуха в бассейне Амура (табл. 5) показал, что значимые достоверные изменения произошли в 94% случаев как от общего количества анализируемых кривых, так и только для бассейна Амура. При этом более половины (50.4% от всех установленных достоверных трендов и 51% от трендов для бассейна Амура) этих изменений лежат в пределах 31-50%, т.е. относятся к средним изменениям – к третьему классу ОКИ. А 44% от всех установленных трендов (и 43% от трендов только для бассейна Амура) имеют изменения в пределах 15-30% от амплитуды, т.е. относятся к слабым (2-ой класс ОКИ). Минимальных значений ОКИ (1 класс – очень слабые изменения 0.1-14% от амплитуды) практически нет (1.3% и 1% случаев от всех трендов и только для бассейна Амура), максимальных ОКИ (4 последний класс – сильные изменения 50-100% от амплитуды) также мало (4.0% и 5% соответственно). Таким образом, можно сказать, что повышение средних температур воздуха здесь безусловно и

повсеместно как для общего годового цикла (для 100% станций), так и для отдельных периодов и сезонов года (для 73-100% станций), а значения этих изменений достигают в общем от одной трети до половины от возможных и относятся к средним изменениям, т.е. к третьему классу ОКИ.

Для *абсолютных минимальных температур воздуха* (табл. 19) из всех 154 анализируемых кривых (для 7-и периодов 22-х метеостанций; табл. 23) только в 54% случаев зафиксированы достоверные тренды их многолетних изменений, во всех остальных случаях установленные коэффициенты корреляции недостоверны (табл. 7), поэтому считалось, что изменений в настоящее время не зафиксировано (табл. 14, 23). Для бассейна Амура все выявленные изменения положительные (табл. 7, 9, 14). Для 15 метеостанций изменения абсолютной минимальной температуры воздуха зафиксированы одновременно как в холодный период (год, полугодия, зима), так и в тёплые полугодия. Для оставшихся 6-и метеостанций изменения произошли в тёплые полугодия и тёплые сезоны года, например, летом (Верхняя Томь (№6), Елабуга (№8), Нижнетамбовское (№12)), осенью (Елабуга (№8), Смидович (№14), Хабаровск (№19)) или весной (Софийский прииск (№16); табл. 19).

При этом фактическое повышение абсолютной минимальной температуры воздуха (табл. 19) всреднем по всем 22-м анализируемым метеостанциям произошло: в целом за год (1-12), а также за зиму (1-2, 12) и все холодные полугодия (1-3, 10-12; 1-3, 11-12 и 1-4, 11-12) – на 3.7°С (от 1.8°С до 6.5°С; а для бассейна Амура всреднем – на 4.0°С); за весну (3-5) – на 4.2°С (от 2.2°С до 8.0°С; аналогично для бассейна Амура); за лето (6-8) – на 2.0°С (от 1.3°С до 3.3°С; аналогично для бассейна Амура); за осень (9-11) – на 3.8°С (от 2.3°С до 5.4°С; аналогично для бассейна Амура).

Таким образом, для территории бассейна Амура основной тенденцией является повышение абсолютных минимальных температур воздуха в годовом цикле за счет зимы и холодного полугодия, одновременно с их повышением в тёплые сезоны и полугодия, что само по себе очень хорошо, поскольку климат долин рек Приамурья отличается большей контрастностью и более низкими абсолютными минимумами с более высокими абсолютными максимумами по сравнению с окружающими водораздельными пространствами. Более слабой – дополнительной (неосновной) тенденцией является повышение абсолютных минимальных температур воздуха только в тёплые сезоны и полугодия, характерная в основном для средней части бассейна Амура.

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) *абсолютных минимальных* температур воздуха (табл. 14) в бассейне Амура показал, что значимые достоверные изменения абсолютных минимальных температур, произошли в 54% случаев от общего количества анализируемых кривых и в 59% случаев для бассейна Амура. При этом пока основная доля (70% от всех установленных достоверных трендов и 83% трендов для бассейна Амура) этих изменений лежат в пределах 15-30%, что соответствует слабой степени нарушений, т.е. второму классу изменений ОКИ для абсолютных минимальных температур воздуха. Минимальных (изменения слабые 1-го класса, 1-14%) и максимальных (изменения сильные 4-го класса, 50-100%) значений ОКИ очень мало – 4 и 1% случаев от всех установленных случаев соответственно и 3 и 1% случаев только для бассейна Амура. Невелика также доля средних изменений ОКИ (3-ий класс, 31-50%) – 12% случаев для всех 22 станций и 13% случаев для бассейна Амура (из 19 станций). Таким образом, можно сказать, что повышение абсолютных минимальных температур воздуха в данном регионе распространено повсеместно, хотя пока оно не очень велико по своей доле, поскольку изменения составляют до одной трети от возможных и, в основном, относятся к слабым – 2-го класса. В тоже время абсолютные значения изменений (в °С) абсолютной минимальной температуры воздуха достаточно велики, причем наибольшие из них происходят весной, а

наименьшие – летом.

Для *абсолютных максимальных температур воздуха* в многолетней динамике на территории бассейна Амура установлена самая меньшая доля изменений из всех анализируемых метеорологических характеристик (табл. 8, 20, 15, 23).

При этом, самой сильной тенденцией в изменении абсолютных максимальных температур воздуха следует назвать их повышение весной (для 19-и метеостанций из 22-х, а в бассейне Амура – для 16 метеостанций из 19-и). Кроме того, очень значительна и тенденция повышения абсолютных максимальных температур летом (в 68% случаев для всех метеостанций и в 74% случаев только для бассейна Амура), а также во все тёплые полугодия (табл. 20), которая сопровождается одновременным повышением абсолютных максимальных температур зимой и в холодные полугодия (в 59% случаев для бассейна Амура). И только для одной метеостанции (Солекуль (№15)) не установлено значимых достоверных трендов ни в один из семи анализируемых периодов.

Фактическое повышение абсолютной максимальной температуры воздуха (табл. 20) для установленных трендов составляет для всех 22-х станций: летом (т.е. за год и во все тёплые полугодия) – на 2.1°С (от 1.2°С до 3.4°С; только для бассейна Амура – на 2.0°С, от 1.2°С до 2.6°С); зимой (1-2, 12) – на 3.1°С (от 2.1°С до 5.5°С; аналогично для бассейна Амура); весной (3-5) – на 3.6°С (от 2.2°С до 6.7°С; только для бассейна Амура всреднем – на 3.5°С); осенью (9-11) – на 2.3°С (от 1.3°С до 3.2°С; аналогично для бассейна Амура); за основное холодное (1-3; 10-12) полугодие – на 2.5°С (от 2.2°С до 2.7°С; аналогично для бассейна Амура).

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) *абсолютных максимальных* температур воздуха (табл. 15) в бассейне Амура показал, что значимые достоверные изменения произошли только в 52% случаев от общего количества анализируемых кривых 22-х станций и в 55% случаев только для бассейна Амура. При этом более половины (76% от всех установленных достоверных трендов и 74% от трендов бассейна Амура) этих изменений лежат в пределах 15-30%, т.е. относятся к слабым изменениям 2-го класса. На долю средних величин ОКИ (3-го класса с изменениями 31-50%) приходится 18% и 19% случаев от всех анализируемых достоверных трендов и от трендов только для бассейна Амура соотвествтвенно). Минимальных величин ОКИ (т.е. очень слабых изменений 1-го класса) мало 6% и 5% соответственно, максимальные значения ОКИ (сильные изменения 4-го класса) – отсутствуют. Таким образом, можно сказать, что повышение абсолютных максимальных температур воздуха в данном регионе также стало одной из основных тенденцией в годовом цикле, хотя произошедшие изменения пока не очень значительны, составляя менее одной трети от возможных и пока относятся к слабым (2-го класса).

Для *средних минимальных температур воздуха* (табл. 17) величины значимых коэффициентов корреляции лежат в пределах от +0.20 (холодное полугодие в Черняево (№20)) до +0.78 (осень в Экимчан (№22; табл. 9)), при этом отрицательных значений коэффициентов корреляции нет, а сами значения этих коэффициентов являются по абсолютным значениям самыми высокими по сравнению со всеми остальными анализируемыми показателями метеорологических характеристик (осадки, средние температуры, абсолютные минимальные, абсолютные максимальные, средние максимальные температуры воздуха). При этом средние минимальные температуры (табл. 17) повысились всреднем по всем станциям: в целом за год – на 1.9°С (от 0.6° до 3.7°С; аналогично и для бассейна Амура); за основное холодное полугодие (1-3, 10-12) – на 2.5°С (от 1.3° до 4.8°С; аналогично и для бассейна Амура); за альтернативное холодное полугодие (1-3, 11-12) – на 2.8°С (от 1.4° до 5.3°С; аналогично и для бассейна Амура); за второе альтернативное холодное полугодие (1-4, 11-12) – на 2.6°С (от 1.1° до 5.1°С; аналогично и для бассейна Амура); за основное тёплое полугодие (4-9) – на 1.4°С (от 0.5° до 2.9°С; аналогично и для

бассейна Амура); за весну – на 2.4°С (от 1.1° до 4.7°С; чуть меньше всреднем для бассейна Амура – на 2.3°С); за лето – на 1.5°С (от 0.6° до 3.0°С; чуть меньше всреднем для бассейна Амура – на 1.4°С); за осень – на 1.6°С (от 0.9° до 2.5°С; аналогично и для бассейна Амура); за зиму – на 2.9°С (от 1.2° до 5.6°С; чуть больше всреднем для бассейна Амура – на 3.0°С).

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) *средних минимальных* температур воздуха (табл. 12) в бассейне среднего и нижнего Амура показал, что значимые достоверные изменения произошли в 90% случаев из всех 242 анализируемых кривых и в 94% случаях для бассейна Амура. При этом слабых (в пределах 2-го класса, 15-30%) изменений ОКИ значительно меньше чем средних (в пределах 3-го класса, 31-50%) – 35 и 51% случаев соответственно от всех установленных, и 36 и 48% случаев соответственно для бассейна Амура. При этом 13% случаев от всех установленных изменений (и 15% – для бассейна Амура) имеют уже очень высокие значения ОКИ 51-62% (4-ый класс, 50-100%). Минимальных значений ОКИ (1-го класса, 0.1-14%) практически нет – 1.0% случаевот всех трендов. Таким образом, можно сказать, что повышение средних минимальных температур воздуха здесь безусловно и повсеместно как для общего годового цикла, так и для отдельных периодов и сезонов года, а более половины от всех установленных повышений лежат в области средней (48-51% случаев) и высокой (13-15% случаев) степени изменений, т.е. в пределах 3-го и 4-го классов изменений.

Для *средних максимальных температур воздуха* (табл. 18) величины значимых коэффициентов корреляции лежат в пределах от +0.18 (зима в Бомнаке (№5)) до +0.67 (тёплое полугодие (4-10) в Смидович (№14)), т.е. все коэффициенты корреляции положительны (табл. 10) А повышение средней максимальной температуры воздуха (табл. 18) произошли: за годовой период для 20 метеостанций (из 22-х анализируемых) – всреднем на 1.8°С (от 0.8° до 2.6°С; аналогично в бассейне Амура для 17 станций из 19-и); для основного холодного периода (1-3, 10-12) по 18-и метеостанциям – всреднем на 2.1°С (от 1.5° до 3.2°С; аналогично в бассейне Амура для 15 станций из 19-и); для весеннего сезона по 20-и метеостанциям – всреднем на 2.3°С (от 1.2° до 3.4°С; чуть меньше всреднем для бассейна Амура – на 2.2°С для 17 станций из 19-и); для летнего сезона по 18-и метеостанциям – всреднем на 1.3°С (от 0.8° до 2.0°С; аналогично в бассейне Амура для 16 станций из 19-и); для осеннего сезона по 14-и метеостанциям – всреднем на 1.3°С (от 0.9° до 1.9°С; аналогично в бассейне Амура для 14 станций из 19-и); для зимнего сезона по 20-и метеостанциям – всреднем на 2.6°С (от 1.2° до 4.0°С; чуть меньше всреднем для бассейна Амура – на 2.5°С для 17 станций из 19-и).

Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) *средних максимальных* температур воздуха (табл. 13) в бассейне Амура показал, что значимые достоверные изменения произошли в 85% случаев от общего количества (242) анализируемых кривых и в 84% случаев для бассейна Амура. При этом половина случаев (49% от всех и 50% для бассейна Амура) этих изменений достигают средних величин (ОКИ 3-го класса с изменениями в пределах 31-50%). На долю слабых изменений (ОКИ 2-го класса с изменениями в пределах 15-30%) приходится по 47% случаев соответственно. Минимальных (ОКИ 1-го класса с изменениями от 0.1 до 14%) и максимальных (ОКИ 4-го класса с изменениями от 51 до 100) изменений мало – по 1-2% случаев. Таким образом, можно сказать, что повышение средних максимальных температур воздуха в данном регионе также стало одной из основных тенденцией в годовом цикле, а произошедшие изменения за многолетний период уже очень велики как по своим значениям, так и по своей доле, которая составляет около половины от возможных, т.е. половина случаев от всех трендов относится к 3-ему классу изменений, а другая половина – ко 2-му.

Изменение влажностно-температурного режима

Динамика индексов засушливости Педя. Приступая к анализу высчитанных индексов засушливости Педя ($И_{Педя\ 1}$ и $И_{Педя\ 2}$) следует сказать что амплитуда их изменений для всех 22 метеостанциям и всех исследуемых 11 временных периодов очень значительна ($И_{Педя\ 1}$ от -3.7 до 7.0 и $И_{Педя\ 2}$ от -4.3 до 4.2). При этом, следует заметить, что доля отрицательных индексов засушливости Педя очень мала: для Педя $_1$ – 8% из 242 значений (табл. 21) и для Педя $_2$ – 10% (табл. 22), и еще меньше только для бассейна Амура (т.е. для 19-и станций) – Педя $_1$ – 4% и Педя $_2$ – 7% соответственно.

Все эти установленные отрицательные индексы Педя $_1$ (19 индексов; табл. 21) и Педя $_2$ (25 индексов; табл. 22) характерны для тёплого времени года (для тёплых полугодий – 6 индексов Педя $_1$ и 9 – Педя $_2$, для весны – 2 индекса Педя $_1$ и 3 – Педя $_2$, для лета – 3 индекса Педя $_1$ и 4 – Педя $_2$, для осени – по 5 индексов Педя $_1$ и Педя $_2$) или всего годового периода (2 индекса Педя $_1$ и 3 – Педя $_2$). Поэтому эти установленные отрицательные индексы засушливости Педя связаны с тенденцией повышения увлажнения. Следует, однако, отметить, что отрицательные индексы засушливости Педя за различные временные периоды установлены только для 8-и и 10-и метеостанций из 22-х (для индекса Педя $_1$ и Педя $_2$ соответственно) и только для бассейна Амура – для 5 и 7 станций соответственно. При этом треть от этих метеостанций (Алдан (№1), Канку (№9) и Токо (№18)) расположены на самом севере и относятся к сибирскому (Ленскому) бассейну, еще одна треть относится к самой северной и северо-западной части Амурского бассейна (Экимчан (№22), Черняево (№21), Мазаново (№11)), оставшиеся – к самой восточной части Амурского бассейна – в его нижнем течении (Нижнетамбовское (№12), Солекуль (№15), Богородское (№4) и Смидович (№14). Кроме того, следует особенно подчеркнуть, что основная (или вся) доля отрицательных индексов засушливости Педя $_1$ и Педя $_2$ имеет низкие значения по модулю – менее 2 (от -0.2 до -1.4 – 63% для Педя $_1$ и от -0.2 до -1.7 – 96% для Педя $_2$), при этом только для бассейна Амура значения еще меньше, а индексов с меньшими значениями больше (от -0.2 до -0.8 – 67% для Педя $_1$ и от -0.2 до -1.7 – 100% для Педя $_2$). Эти низкие значения индексов засушливости Педя ($И_{Педя}$<2) отражают слабую аномальность или ее отсутствие в многолетних изменениях влажностно-температурного режима разных временных периодов исследуемого региона (табл. 21-22). Таким образом, можно считать, что отрицательные индексы засушливости Педя не играют какой-либо существенной роли в изменении влажностно-температурного режима бассейна Амура. Как видим, реальная тенденция повышения увлажнения в тёплое время года, способная существенно изменить водный режим рек в современный период отмечена нами только для северных территорий – для сибирского (Ленского) бассейна (летом $И_{Педя\ 1}$=-2.4 в Алдане (№1), весной и осенью $И_{Педя\ 1}$=-3.7 и $И_{Педя\ 1}$=-2.7 в Токо (№18)), а также для верхнего течения реки Амур (летом $И_{Педя\ 1}$=-2.1 в Мазаново (№11), осенью $И_{Педя\ 1}$=-2.5 в Экимчане (№22), летом и осенью $И_{Педя\ 1}$=-0.5 в Черняево (№21)). А, следовательно, увеличение водности реки Амур в летний период 2013 года скорее всего связано как с изменениями метеорологических условий в самом верховье Амура и его истоках (р. Аргунь и р. Шилка), расположенных в сибирском регионе, так и с изменением гидрологических и/или гидротехнических (связанных с антропогенным гидротехническим строительством) условий, в основном, на правых притоках Амура, расположенных в Китае.

В общем виде, соотношение малой доли отрицательных индексов Педя (с их низкими значениями) наряду с основной долей высоких положительных значений индекса показывает, что для годового цикла и тёплых периодов в бассейне Амура как в настоящее время, так и в перспективе характерно в целом потепление, связанное с иссушением территории, а для холодных периодов, наоборот, характерно потепление, связанное с

увеличением осадков в виде снега: всреднем для холодого времени, т.е. за холодные полугодия и зиму Педя $_1$=+3.1 и Педя $_2$=+2.9 (аналогично для бассейна Амура). Однако, принимая во внимание, что основная масса осадков в исследуемом регионе выпадает в тёплое время года, следует заранее учесть большее влияние вклада изменений от тёплого времени года в общегодовые изменения влажностно-температурного режима в многолетнем аспекте, т.е. тенденция к иссушению будет стабильна, вплоть до образования засух, что и показывают нам усредненные по всем 22-м станциям в тёплое время года (т.е. за тёплые полугодия, весну, лето и осень) индексы Педя (табл. 21-22): без учёта отрицательных индексов всреднем за год Педя $_1$=+2.0 и Педя $_2$=+1.5 (аналогично для бассейна Амура, т.е. по 19-и станциям); всреднем для тёплого времени Педя $_1$=+2.4 и Педя $_2$=+1.7 (для бассейна Амура чуть больше Педя $_1$=+2.5).

Анализируя кривые (рис. 2-4), построенные на основании полученных в процессе анализа таблиц 21 и 22 индексов засушливости Педя $_1$ ($И_{Педя\ 1}$; рис. 2а, 3а, 4а) и Педя $_2$ ($И_{Педя\ 2}$; рис. 2б, 3б, 4б), легко заметить, что изменения влажностно-температурного режима годового цикла (за период с 1 по 12 месяцы) почти полностью соответствуют таковым изменениям за тёплые полугодия (рис. 3а). Особенно тесно коррелируют индексы Педя $_1$ годового цикла с двумя тёплыми полугодиями – основным (4-9 месяцы; для всех 22-х станций $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.75 при α=0.001 и для бассейна Амура $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.69 при α=0.001) и первым альтернативным (4-10 месяцы; для всех 22-х станций $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}10)}$=0.79 при α=0.001 и для бассейна Амура $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.74 при α=0.001), корреляция со вторым альтернативным полугодием (5-10 месяцы) чуть меньше (для всех станций $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 5\text{-}10)}$=0.66 при α=0.001 и для бассейна Амура $r_{П1\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.55 при α=0.001). В тоже время, корреляция годовых индексов Педя $_2$ с таковыми за тёплые полугодия немного слабее; для всех станций $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.60 (при α=0.01), $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}10)}$=0.60, $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 5\text{-}10)}$=0.49 (при α=0.05) соответственно (рис. 3б), а только для бассейна Амура $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}9)}$=0.55 (при α=0.05), $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 4\text{-}10)}$=0.53 (при α=0.05), $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 5\text{-}10)}$=0.37 (при α=0.10) соответственно. Это говорит нам о том, что годовой цикл влажностно-температурного режима в настоящее ввремя полностью определяется ситуацией в тёплое полугодие. При этом на перспективу, т.е. в прогнозируемом будущем, такая тесная взаимосвязь может немного ослабнуть, однако, тем не менее будет преобладающей, полностью подтверждая, таким образом, отнесение в настоящем и в будущем бассейна Амура к климатической области с муссонным климатом (Хромов, 1983).

В то же время распределения кривых индексов засушливости Педя ($И_{Педя\ 1}$ и $И_{Педя\ 2}$) для годового цикла и холодного периода, включая зиму находятся в относительной противофазе (рис. 3а, 4б) – значимые коэффициенты корреляции индексов засушливости Педя $_1$ и Педя $_2$ между годовым циклом и холодными полугодиями здесь такие: для всех 22-х станций $r_{П1\ (1\text{-}12;\ 1\text{-}4,\ 11\text{-}12)}$=-0.51 (α=0.05), $r_{П1\ (1\text{-}12;\ 1\text{-}2,\ 12)}$=-0.36 (α=0.15), $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 1\text{-}3,\ 10\text{-}12)}$=-0.32 (α=0.15), $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 1\text{-}4,\ 11\text{-}12)}$=-0.36 (α=0.15) и только для бассейна Амура – $r_{П1\ (1\text{-}12;\ 1\text{-}4,\ 11\text{-}12)}$=-0.46 (α=0.05), $r_{П1\ (1\text{-}12;\ 1\text{-}2,\ 12)}$=-0.30, $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 1\text{-}3,\ 10\text{-}12)}$=-0.31, $r_{П2\ (1\text{-}12,\ 1\text{-}4,\ 11\text{-}12)}$=-0.31.

Как видно из рисунка 2а, годовой индекс засушливости Педя ($И_{Педя1}$), рассчитанный по отношению к базовому периоду (1961-1990 гг.), для основной доли метеостанций, за исключением пяти (Алдан (№1), Ленский бассейн); Канку (№9), Ленский бассейн; Мазаново (№11); Богородское (№4); Нижнетамбовское (№12)) довольно высок, достигая значений 2 и выше. Это означает, что в настоящее время общий годовой цикл по влажностно-температурному режиму в бассейне Амура по сравнению с периодом 1961-1990 гг. стал более засушливым и тёплым для 17-и метеостанций из 22-х анализируемых, вплоть до образования засух. Для пяти исключенных метеостанций, упомянутых ранее, находящихся на самом северо-западе (в сибирском – Ленском бассейне – Алдан (№1) и Канку (№9), а также на западе бассейна верхнего Амура – Мазаново (№11)) и крайнем северо-востоке (в

самом нижнем течении Амура – Нижнетамбовское (№12), Богородское (№4)) в общем годовом цикле влажностно-температурный режим практически не изменился, т.е. отмечались совсем слабые аномалии ($И_{Педя\ 1}$=0.4, 0.8, -0.7, 0.0, -0.4 – соответственно; табл. 21).

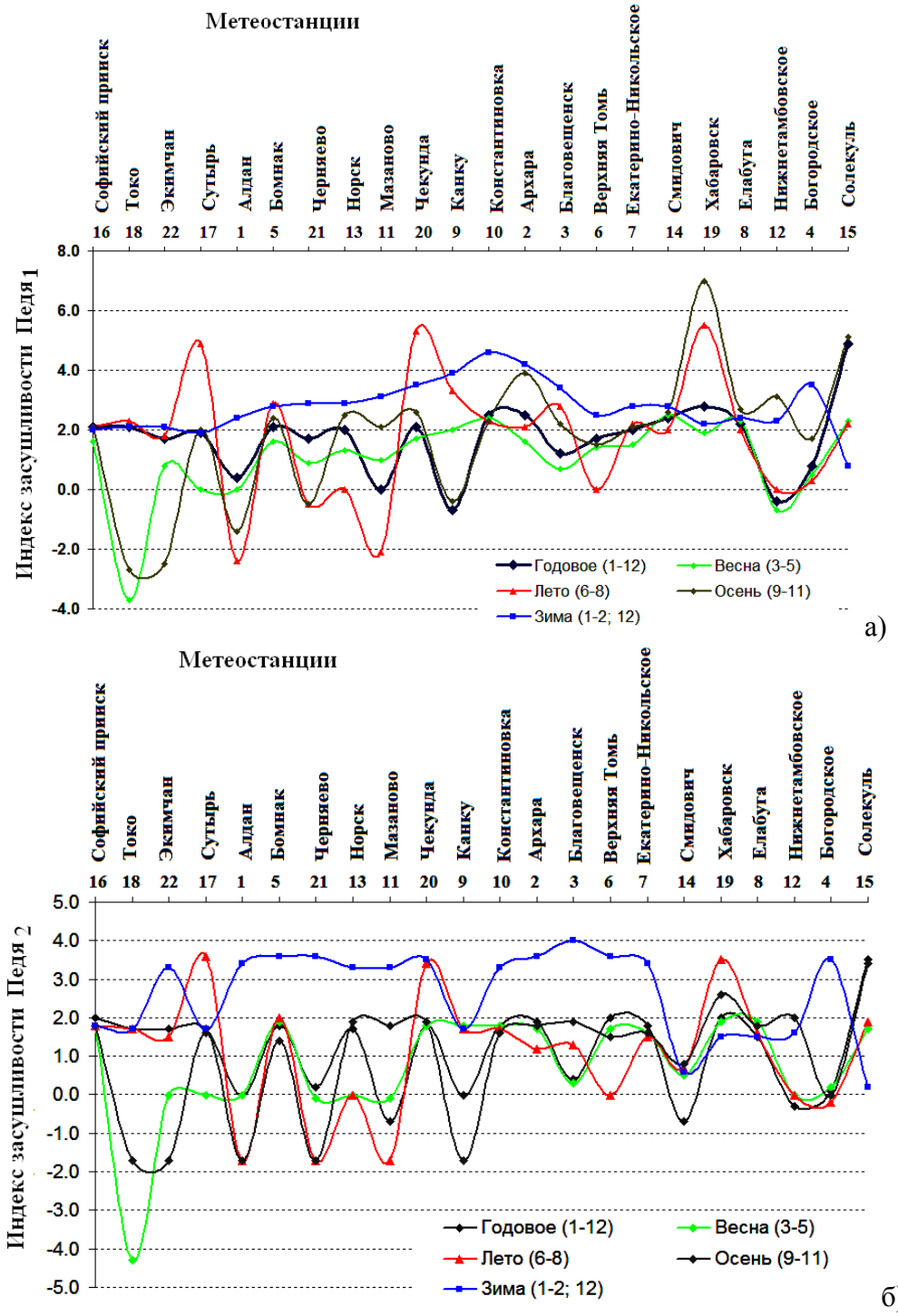


Рис. 2 а, б. Распределение индексов засушливости Педя $_1$ (а) и Педя $_2$ (б) за отдельные сезоны года (весна, лето, осень, зима) и общий годовой период по метеостанциям бассейна Амура и сибирского (Ленского) бассейна (Алдан, Канку, Токо). **Fig. 2 а, б.** Distribution of aridity Pedya $_1$ (a) and Pedya $_2$ (б) indices for separate seasons (spring, summer, autumn, winter) and total

annual period for weather stations of the Amur and Siberian (Lensky) basins (Aldan, Kanku, Toko).

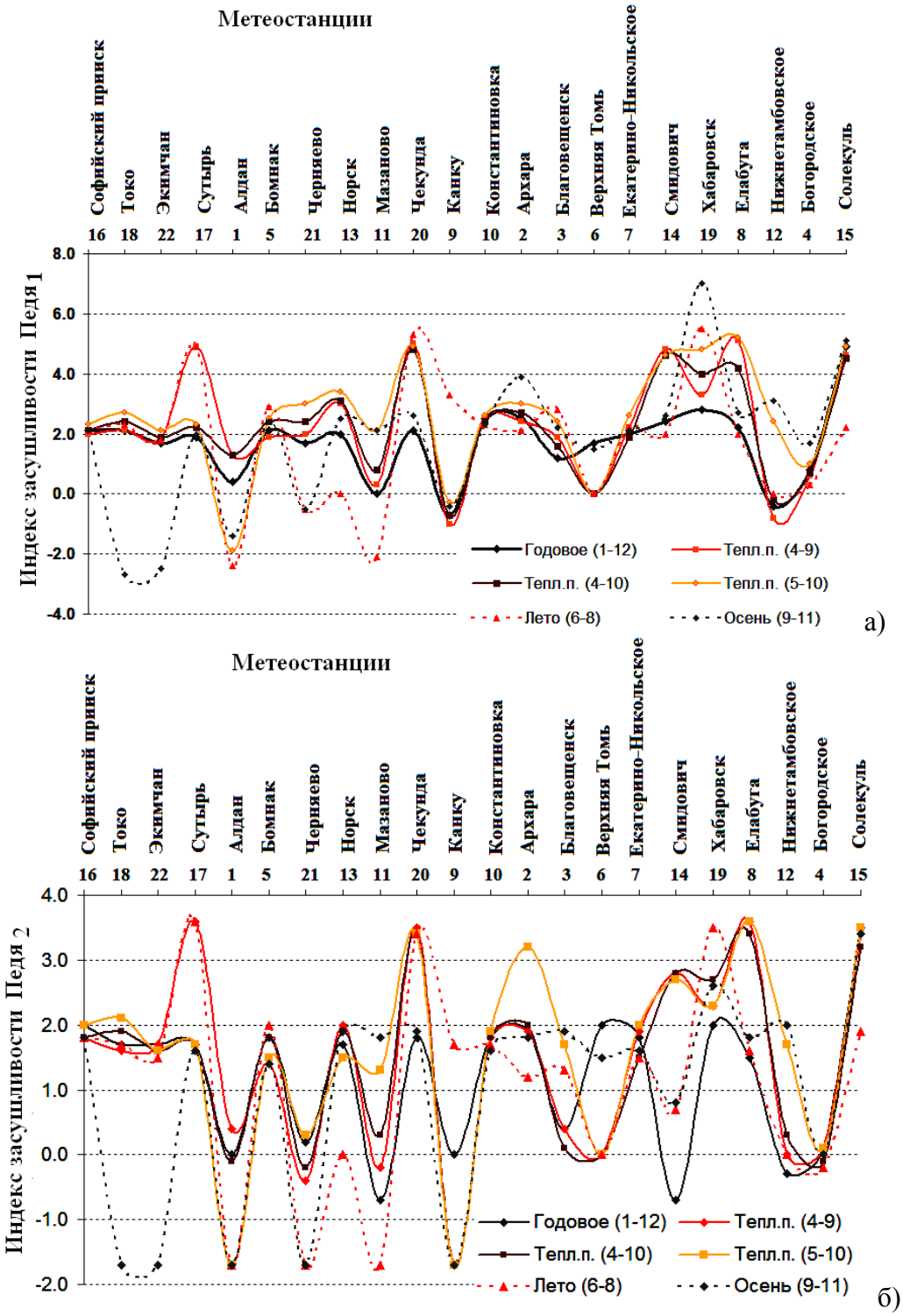


Рис. 3 а, б. Распределение индексов засушливости Педя $_1$ (а) и Педя $_2$ (б) за тёплые полугодия, лето, осень и общий годовой период по метеостанциям бассейна Амура и сибирского (Ленского) бассейна (Алдан, Канку, Токо). **Fig. 3 а, б.** Distribution of aridity Pedya $_1$ (a) and Pedya $_2$ (б) indices for warm halves of a year, spring and autumn, and total annual period for weather stations of the Amur and Siberian (Lensky) basins (Aldan, Kanku, Toko).

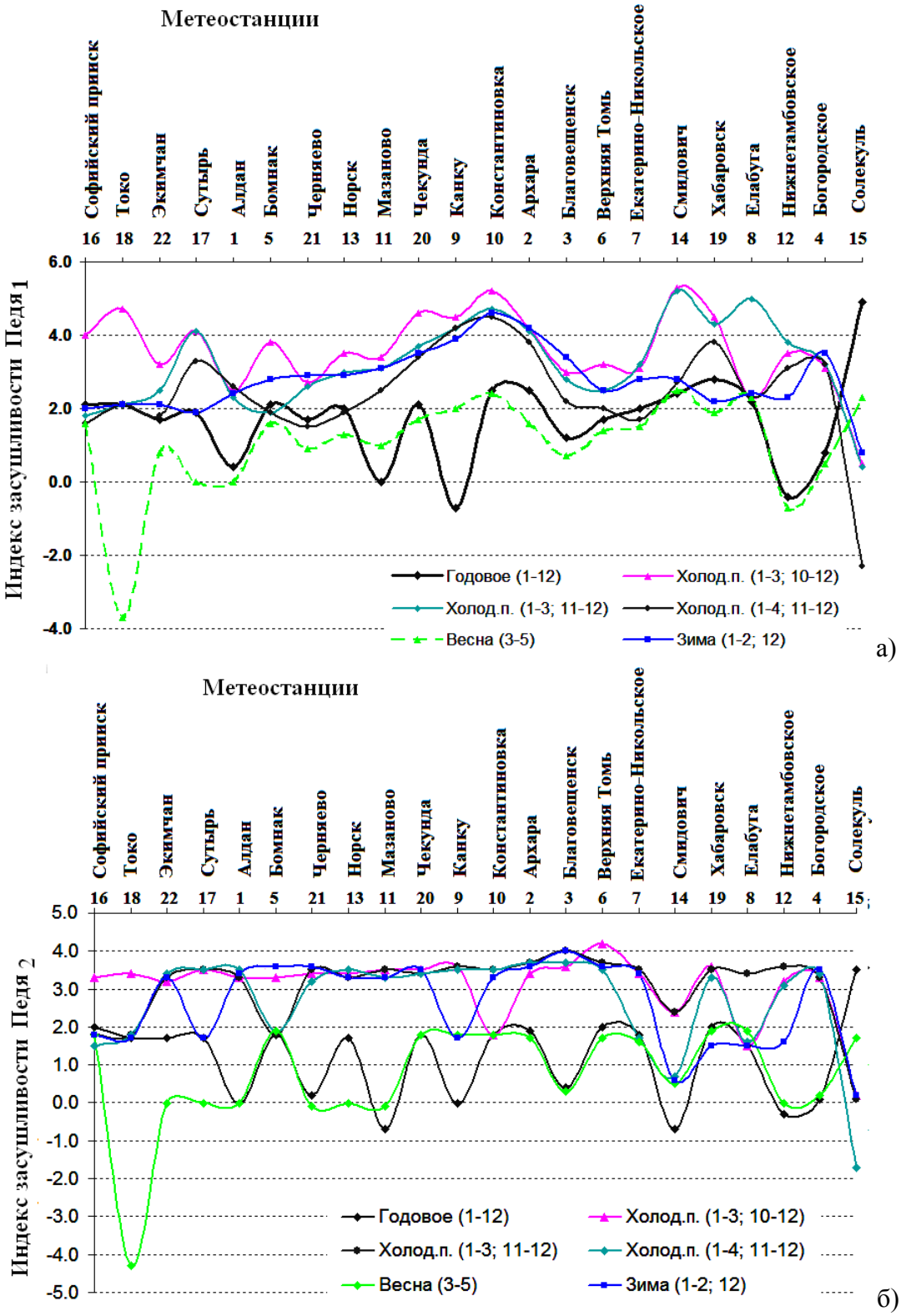


Рис. 4 а, б. Распределение индексов засушливости Педя $_1$ (а) и Педя $_2$ (б) за холодные полугодия, весну и общий годовой период по метеостанциям бассейна Амура и сибирского (Ленского) бассейна (Алдан, Канку, Токо). **Fig. 4 а, б.** Distribution of aridity Pedya $_1$ (a) and Pedya $_2$ (б) indices for cold halves of a year and springs, and total annual period for weather stations of the Amur and Siberian (Lensky) basins (Aldan, Kanku, Toko).

Однако если рассматривать изменения индекса засушливости за более длительный период (рис. 2б), т.е. индекс Педя $_2$, который отражает изменения по сравнению со всем периодом инструментальных наблюдений ($И_{Педя\ 2}$; табл. 22), то окажется, что он имеет тенденцию к изменению ($И_{Педя\ 2}$ от 1.5 до 3.5) только для 14-и станций из 22-х анализируемых. Для 4-х станций из этих 14 (Верхняя Томь (№6), Солекуль (№15), Софийский прииск (№16) и Хабаровск (№19)) значения индекса засушливости Педя ($И_{Педя\ 2}$) характеризуют усиление засушливости при повышении температур до критического уровня засух, при которых индекс Педя $_2$ равен или больше 2. Таким образом, в недалеком будущем, основываясь на прогнозе трендов и индекса засушливости Педя $_2$, можно сказать, что на остальных 8-и метеостанциях совокупное изменение температурного режима и увлажнения территории в общем годовом цикле, практически, будут незаметны ($И_{Педя\ 2}$ от -0.7 до 0.4). Таким образом, многолетний прогноз изменения влажностно-температурного режима по двум индексам засушливости Педя $_1$ и Педя $_2$ подтверждает тенденцию к увеличению засушливости и повышению температуры в бассейне Амура (для большей его части, особенно, среднего и нижнего Амура) в общем годовом цикле.

На то, что за последние 30 лет (1975-2004 гг.) «на фоне общего роста температуры воздуха … в Приамурье в основном происходит уменьшение годовых сумм осадков» указывал П.В. Новороцкий (2006, с. 37; 2007), одноко он не рассчитывал изменения по индексам засушливости или аридности и не оценивал долю изменений в многолетнем аспекте для осадков или температуры воздуха.

Как видно из таблиц 21 и 22, для бассейна Амура, помимо существенных изменений индекса засушливости Педя ($И_{Педя\ 1}$ и $И_{Педя\ 2}$) для всего годового цикла, выделяются также и значительные внутригодовые изменения в перераспределении совокупного воздействия влагообеспеченности и термического режима в результате климатических флуктуаций. Во все холодные полугодия (1-3, 10-12; 1-3, 11-12 и 1-4, 11-12 месяцы) и зимний сезон (1-2, 12 месяцы) для всех метеостанций (за исключением Солекуль (№15)) характерны максимально высокие положительные значения индексов засушливости Педя $_1$ ($И_{Педя\ 1}$ всреднем по всем станциям от 2.4 до 3.6; табл. 21) и Педя $_2$ ($И_{Педя\ 2}$ всреднем от 2.6 до 3.1; табл. 22). Как видим, всреднем для индекса засушливости Педя $_2$ ($И_{Педя\ 2}$), который отражает совокупную динамику изменений влажностно-температурного режима за весь многолетний период наблюдений, значения индекса несколько меньше, чем для индекса Педя $_1$ ($И_{Педя\ 1}$), который отражает таковые изменения по сравнению с базовым периодом (1961-1990 гг.). Так, для стандартного холодного полугодия (1-3, 10-12) значения индекса Педя $_1$ всреднем по всем станциям достигают значения 3.6 и лежат в пределах от 0.5 до 5.3 (табл. 21), в то время как для индекса Педя $_2$ они достигают 3.1 (от 0.2 до 4.2; табл. 22).

Для двух альтернативных холодных полугодий (1-3, 11-12 и 1-4, 11-12) индексы Педя достигают значений: $И_{Педя\ 1}$=3.2 (от 0.4 до 5.2) и 2.4 (от 1.5 до 4.5) и $И_{Педя\ 2}$=3.1 (от 0.1 до 4.0) и 2.7 (от 0.7 до 3.7) соответственно. Таким образом, в бассейне Амура хорошо просматривается тенденция климатических изменений в сторону значительно более тёплого и влажного – многоснежного холодного периода. Уже сейчас в основное холодное полугодие (1-3, 10-12) практически для всех станций (за исключением самой восточной – Солекуль (№15), расположенной на восточной границе бассейна Амура) индекс Педя $_1$ ($И_{Педя\ 1}$) лежит в пределах от 2.3 до 5.3, что означает чрезвычайно тёплую и многоснежную зиму. При этом в дальнейшем следует также ожидать аналогичных изменений в сторону потепления и увеличения выпадения атмосферных осадков в зимний период ($И_{Педя\ 2}$ от 2.4 до 4.2 для 19 станций из 22-х анализируемых).

Поскольку отрицательных индексов засушливости Педя для сезонных изменений отмечено очень мало, также как и для годового и полугодового периодов, основные

тенденции в сезонных изменениях подробно рассматриваются только для положительных значений индекса засушливости. Здесь следует отметить, что минимальные изменения влажностно-температурного режима выявлены для весеннего периода (рис. 2а, 2б) как по сравнению с базовым периодом (всреднем по всем станциям $И_{Педя\ 1}$=1.4; табл. 21), так и по сравнению со всем многолетним ($И_{Педя\ 2}$=1.1; табл. 22). В бассейне Амура в летний сезон тенденция повышения температур воздуха, сопровождающаяся иссушением, выражена достаточно сильно, вплоть до формирования засух ($И_{Педя\ 1}$=2.3), но меньше по абсолютным значениям чем таковая для осени ($И_{Педя\ 1}$=2.8). В тоже время, индекс засушливости Педя $_2$ по отношению к многолетнему периоду говорит, что эта тенденция, вероятнее всего будет ослабевать со временем: для весны $И_{Педя\ 2}$=1.1, для лета $И_{Педя\ 2}$=1.6, для осени $И_{Педя\ 2}$=1.7. Таким образом, вероятнее всего при потеплении воздуха и некотором иссушении территории бассейна Амура, в будущем засухи в весенне-летне-осенний период здесь все же не будут активно проявляться, хотя в несколько ближайших лет они вероятны.

Рассматривая внутрисезонные изменения влажностно-температруного режима по индексам засушливости Педя $_1$ и Педя $_2$ следует отметить, что в три из четырех сезонов года: в весенний, летний и осенний для метеостанций всречаются отрицательные значения индексов засушливости Педя $_1$ и Педя $_2$, которые отражают тенденцию увеличения увлажнения. Учитывая величины этих коэффициентов (табл. 21-22), следует отметить, что заметные изменения в многолетнем аспекте влажностно-температурного режима этих трех сезонов (относимых к тёплому времени года) будут наблюдаться только для шести станций из 22-х анализируемых, находящихся в сибирском Ленском бассейне (Алдан (№1), Канку (№9), Токо (№18)), а также на севере и западе бассейна Амура (Черняево (№21), Экимчан (№22), Мазаново (№11)): для лета ($И_{Педя\ 1}$=-2.4, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) и осени ($И_{Педя\ 1}$=-1.4, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) в Алдане (№1), для лета ($И_{Педя\ 1}$=-2.1, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) в Мазаново (№11), для весны ($И_{Педя\ 1}$=-3.7, $И_{Педя\ 2}$=-4.3) и осени ($И_{Педя\ 1}$=-2.7, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) в Токо (№18), для осени ($И_{Педя\ 1}$=-2.5, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) в Экимчане (№22), а также для осени ($И_{Педя\ 1}$=-0,4, $И_{Педя\ 2}$=-1,7) в Канку (№9) и для лета ($И_{Педя\ 1}$=-0.5, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) и осени ($И_{Педя\ 1}$=-0.5, $И_{Педя\ 2}$=-1.7) в Черняево (№21). Таким образом, тенденция увеличения увлажнения в тёплое время года наиболее выражена на этих станциях в настоящее время по сравнению с базовым периодом (1961-1990 гг.). В тоже время, в ближайшем будущем она не должна усилиться, а, наоборот, возможно ослабеет для основной доли метеостанций (Алдан (№1), Мазаново (№11), Токо (№18), Экимчан (№22)), которые находятся в сибирском (Ленском) бассейне и в верховьях Амура.

Таким образом, для бассейна Амура выявлена основная тенденция климатических изменений, заключающаяся в перераспределении увлажнения в годовом цикле с преобладающей повсеместной тенденцией увеличения увлажнения в холодное время года при повышении температурного режима как в холодное полугодие и зимний сезон, так и в тёплое полугодие и весенне-летне-осенний сезон. Кроме того, для бассейна среднего и нижнего Амура выявлена тенденция аридизации с увеличением засушливости при повышении температуры воздуха в общем годовом цикле. Одной из проявляющихся локальных тенденций является повышение увлажнения в тёплое время года для северо-западной части бассейна Амура, т.е. в его верхнем течении. Второй локальной тенденцией является понижение увлажнения в тёплое время года в юго-восточной части бассейна Амура, т.е. в его нижнем течении.

Кроме того, для большинства метеостанций бассейна Амура (исключая северные территории и бассейн верхнего Амура) отмечается формирование очень сильных экстремальных засух (при $И_{Педя}$≥2) в летний ($И_{Педя\ 1}$=+3.0 – средний по 12-и станциям: Архара (№2), Благовещенск (№3), Бомнак (№5), Екатерино-Никольское (№7), Елабуга (№8), Константиновка (№10), Смидович (№14), Солекуль (№15), Софийский прииск (№16), Сутырь (№17), Хабаровск (№19), Чекунда (№20)) и осенний сезоны ($И_{Педя\ 1}$=+3.0 – средний

по 15-и станциям: Архара (№2), Благовещенск (№3), Бомнак (№5), Екатерино-Никольское (№7), Елабуга (№8), Константиновка (№10), Мазаново (№11), Нижнетамбовское (№12), Норск (№13), Смидович (№14), Солекуль (№15), Софийский прииск (№16), Сутырь (№17), Хабаровск (№19), Чекунда (№20); рис. 2а, табл. 21).

Таким образом, второй особенностью климатических изменений для бассейна среднего и нижнего Амура является очень сильное увеличение аридизации в основной период вегетации – летом и осенью.

В тоже время весной совокупное воздействие влажностно-температурного режима почти не проявляется. Средний индекс засушливости Педя для весны по 18-и станциям (из 19-и) ниже 2 ($И_{Педя\ 1}$=+1.4), что говорит о погодных условиях со слабой аномальностью или иначе – об отсутствии изменений во влажностно-температурном режиме при совместном воздействии выявленных многолетних изменений в распределении выпадения осадков и температуры воздуха.

При этом, как видно из таблиц 21 и 22 из-за того, что не происходит существенных изменений во влажностно-температурном режиме весеннего сезона, а в осенний сезон, наоборот, отмечается сильное потепление, происходит некоторый сдвиг в распределении холодного и тёплого времени года в сторону увеличения тёплого периода вплоть до октября месяца таким образом, что основным тёплым периодом можно будет считать с 4-го по 10-ый месяцы года, а основными холодными месяцами – с 1-го по 3-ый и с 11-го по 12-ый месяцы года. Такое временно́е перераспределение длительности холодных и тёплых периодов в годовом цикле происходит за счет неизменной весны (для которой $И_{Педя\ 1=}$1.4) и сильно меняющейся осени ($И_{Педя\ 1}$=2.8).

Выводы

В ходе проведенных исследований, для бассейна Амура были установлены некоторые основные тенденции климатических изменений, а также оценена величина этих изменений для отдельных климатических характеристик за разные внутригодовые периоды в многолетнем аспекте.

1. Для бассейна Амура в многолетней динамике сумм атмосферных осадков, средних, абсолютных максимальных и минимальных температур воздуха установлены некоторые общие закономерности их изменений.
   - Основной тенденцией в многолетнем изменении *сумм атмосферных осадков* является их перераспределение в годовом цикле с единой повсеместной стабильной тенденцией к увеличению выпадения осадков в холодные полугодия и в зимний сезон. Для сибирского региона и бассейна верхнего Амура характерна также тенденция повышения выпадения атмосферных осадков в тёплый период (в тёплые полугодия, а также весной, летом и осенью), причем по своим абсолютным значениям это повышение в 2-2.5 раза больше, чем в холодный период. В тоже время для бассейна среднего и нижнего Амура проявляется тенденция снижения выпадения атмосферных осадков в тёплое время года (в тёплые полугодия, летом и осенью). В настоящее время увеличение выпадения суммарного количества осадков как в холодное время года, так и в тёплое достигает для разных станций от одной трети до половины от их среднемноголетних значений, т.е. пока ещё по оценке ОКИ (относительного коэффициента изменений) выявленные изменения в многолетней динамике осадков относятся ко 2-му классу (с изменениями 15-30% от возможных), т.е. к слабым изменениям. Однако, по абсолютным значениям, всреднем по всем станциям, изменения в выпадении осадков составили всё же довольно большую величину – 38% от их среднемноголетних значений за различные временные периоды.

- В изменении *средних температур воздуха* основной и единственной тенденцией является повышение среднегодовых температур воздуха за счет повышения их как в холодное, так и в тёплое полугодия. При этом повышение средних температур в холодное полугодие в два раза выше, чем в тёплое. В сезонном потеплении основная роль принадлежит зиме и весне (всреднем на 2.5 и 2.2°С соответственно), летом и осенью повышение средних температур воздуха в два раза ниже (всреднем на 1.2 и 1.3°С). Сходная тенденция в изменении средних температур воздуха отмечается и для всей Центральной России (Кузьмина, Трешкин, 2009; Кузьмина и др., 2011). При этом в бассейне Амура многлетние изменения средних температур воздуха уже очень значительны, более половины из всех установленных изменений достигают средних величин (т.е. 3-го класса ОКИ – со средними изменениями в 30-50%). Таким образом, изменения более чем в половине случаев уже составляют от одной трети до половины возможных.
- В многолетней динамике *абсолютных минимальных температур воздуха* отмечается только их повышение. Основной тенденцией является повышение температур за счет зимы и холодного полугодия одновременно с повышением в тёплые сезоны и полугодия. Более слабой – дополнительной (неосновной) тенденцией, в основном для среднего Амура, можно считать повышение абсолютных минимальных температур воздуха только в тёплое время года – сезоны и полугодие. Всреднем для бассейна Амура заморозки как в тёплое. так и в холодное полугодие снизились приблизительно на равную величину на 3.7 и 4.0°С соответственно. Однако, в сезонном повышении абсолютных минимальных температур воздуха летние изменения (всреднем на 2.0°С) оказались в два раза меньшими, чем весенние (всреднем на 4.2°С), которые максимальны по своим значениям среди всех внутригодовых периодов. Установленные тенденции в изменении абсолютных минимальных температур воздуха очень сходны с таковыми для средних температур воздуха, однако, для абсолютных минимальных температур воздуха по собственным значениям они больше в 1.5-2 раза по сравнению с изменениями средних температур. Повышение абсолютных минимальных температур воздуха в бассейне Амура в целом распространено повсеместно, хотя и не для всех сезонов года одновременно, как в случае со средними температурами. Кроме того, выявленные изменения пока относятся к слабой степени (ОКИ 2-го класса), т.е. изменения произошли на величину до одной трети от возможных, хотя по своим абсолютным значениям они больше, чем в случае со средними температурами воздуха. Таким образом, в бассейне Амура установлено ослабление как весенних заморозков, так и зимних морозов, что, наряду с повышением среднегодовых температур воздуха, может способствовать производству с/х продукции.
- В многолетней динамике *абсолютных максимальных температур воздуха* в бассейне Амура выделяется основная преобладающая повсеместно тенденция безусловного их повышения в весенний (на 3.5°С) и летний (на 2.0°С) сезоны года, что приводит к повышению абсолютных максимальных температур в тёплое полугодие (на 2.8°С). В 59% случаях это сопровождается повышением абсолютных максимальных температур также зимой (на 3.1°С) и в холодное полугодие (на 3°С). При этом изменения абсолютных максимальных температур в 1.2-2 раза ниже по своим абсолютным значениям, чем повышение минимальных температур воздуха и в 1.2-1.8 раза выше по сравнению с увеличением средних температур воздуха. Выявленные изменения в многолетней динамике абсолютных максимальных температур воздуха пока не очень сильны, составляя до одной третьей от возможных (относясь ко 2-му

классу слабых изменений ОКИ), а сами эти изменения пока не затронули все сезоны года одновременно, как это имеет место со средними температурами воздуха.

- В многолетней динамике *средних минимальных температур воздуха* отмечается только их безусловное повышение для всех внутригодовых периодов одновременно, также как и для средних температур воздуха. Однако, для общего годового цикла (изменения произошлаи на 1.9°С), для холодного полугодия (на 2.6°С), зимнего (на 3.0°С) и весеннего (на 2.3°С) сезонов года эти изменения в бассейне Амура по своим абсолютным значениям в 1.5-2 раза выше, чем для тёплого полугодия (на 1.0°С), лета (на 1.4°С) и осени (на 1.6°С). В более половине случаев (63%) выявленные значимые повышения средних минимальных температур воздуха в бассейне Амура (по 19-и станциям и 11 временным периодам) лежат уже в области средних и высоких величин ОКИ, которые отражают изменения от 30 до 62% от возможных. Т.е. многолетние изменение средних минимальных температур воздуха сегодня очень высоки. Они самые высокие по ОКИ для всех 6-и метеорологических характеристик и соответствуют 3-ему классу средних изменений (для 45-51% случаев) и 4-ому последнему классу сильных изменений (для 13-15% случаев).
- В многолетней динамике *средних максимальных температур воздуха* также отмечается основная тенденция их повышения для всех внутригодовых периодов одновременно, равно как для средних и средних минимальных температур воздуха. Здесь также как и для средних минимальных температур воздуха, абсолютные значения изменений для холодного полугодия, зимнего и весеннего сезонов в 1.5-2 раза выше, чем для тёплого полугодия (на 1.0°С), лета (на 1.4°С) и осени (на 1.6°С). Повышение средних максимальных температур вохдуха в регионе также стало ведущей тенденцией климатических изменений, наряду с таковыми для средних и средних минимальных температур воздуха. В половине случаев (по 19-и станциям и 11 временным периодам) установленные достоверные повышения средних максимальных температур воздуха уже очень значительны и достигают средних значений изменений (ОКИ 3-го класса с изменениями в 31-50%), т.е. произошли на величину от одной трети до половины от возможных.

2. Анализ *относительных коэффициентов изменений* (ОКИ) многолетних метеорологических характеристик (совокупно /годовых, полугодовых и сезонных/ отдельно для сумм осадков, средней, абсолютной максимальной и минимальной температур воздуха) в бассейне Амура показал, что для большей части установленных достоверных трендов изменения достигают уже слабой и средней степени: изменения в пределах одной трети от возможных значений (2-ой класс ОКИ с изменениями в 15-30%) произошли в 72% случаев для осадков, в 83% случаев абсолютных минимальных температур, в 74% случаев для абсолютных максимальных температур; изменения в пределах от одной трети до половины от возможных значений (3-ий класс ОКИ с изменениями в 31-50%) произошли в 51% случаев для средних температур, в 48% случаев для средних минимальных температур и в 50% случаев для средних максимальных температур воздуха. При этом почти для всех рассмотренных метеорологических характеристик установлены максимальные изменения (4-ый класс ОКИ с изменениями в 50-100%), произошедшие более чем на половину от возможных: в 3% случаев для осадков, в 5% случаев для средней температуры, в 1% случаев для абсолютных минимальных температур, в 15% случаев для средней минимальной температуры, в 2% случаев для средней максимальной температуры воздуха.
3. В бассейне Амура повышение средней и абсолютной минимальной температуры воздуха наряду с увеличением выпадения общего количества атмосферных осадков в холодное

полугодие и зимний сезон, а также их перераспределение (увеличение увлажненности зимой и уменьшения ее летом в бассейнах нижнего и среднего Амура и увеличение осадков летом в верховьях Амура) способствует изменению сложившихся почвенно-грунтовых условий не только в поймах, но и на водораздельных территориях. Эти совокупные изменения приводят к стабилизации и подъему УГВ, заболачиванию и увеличению глееобразования в почвенном профиле, что может привести к сокращению ареалов распространения естественной эндемичной пойменной древесно-кустарниковой растительности Дальнего Востока. В тоже время потепление, сопровождающееся повышением иссушения в вегетационный период в средней и нижней частях бассейна Амура, наряду со строительством новых ГЭС может привести к полному обсыханию верхних уровней поймы, а также к существенному изменению экосистем среднего уровня поймы.

4. Оценивая произошедшие многолетние изменения в динамике 6-и метеорологических характеристик, следует отметить, что наибольшие относительные изменения (по ОКИ) произошли для средних минимальных и средних температур воздуха. Их амплитуда изменений уже достигла средних и максимальных величин по ОКИ (3-ий и 4-ый класс изменений) в более чем половине исследуемых случаев. Это означает, что установленные многолетние изменения произошли на величину более половины от возможной. Многолетние изменения в динамике остальных 4-х метеохарактеристик, несмотря на своё достаточно широкое распространение для бассейна Амура (для 72-83% случаев), пока имеют слабую амплитуду изменений и относятся ко 2-му классу изменений по ОКИ (15-30%), т.е. изменения произошли на величину только до одной трети от возможной. В тоже время, оценивая абсолютные значения произошедших изменений для 5 температурных метеохарактеристик необходимо указать, что наибольшие по амплитуде характерны для абсолютной минимальной температуры (изменения по 19 станциям бассейна Амура на 4.0°С; от 1.8 до 6.5°С). Таким образом, по абсолютным значениям более всего в бассейне Амура снизились экстремально холодные температуры воздуха в холодный период и особенно сильно – весенние заморозки (на 4.2°С; от 2.2 до 8.0°С). Сходные между собой тенденции изменений в абсолютных значениях за многолетний период имеют в бассейне Амура 4-е другие метеохарактеристики: средняя, средняя минимальная и средняя максимальная, а также абсолютная максимальная температура воздуха: изменения всреднем произошли на 1.7°С (от 1.0 до 2.6°С), 1.9°С (от 0.6 до 3.7°С), 1.8°С (от 0.8 до 2.6°С), 2.0°С (от 1.2 до 2.6°С) соответственно. Оценивая стабильность (распространение по площади) выявленных тенденций для 6-и метеохарактеристик следует указать, что для бассейна Амура (по 19 станциям для 11 временных периодов) наиболее устойчивыми, т.е. максимально распространёнными, являются тенденции для средних (в 94% случаев), средних минимальных (в 94%), средних максимальных (в 84%) и абсолютных максимальных (в 74%) температур воздуха. В тоже время, пока наименее распространенными для всего бассейна Амура следует считать установленные тенденции для многолетних изменений осадков (выявлено для 51% случаев) и абсолютной минимальной температуры воздуха (для 56%). Такое положение лишь указывает на то, что тенденции изменений двух последних метеохарактеристик (P и $T_{abs.min}$) следует рассматривать не для всей территории бассейна Амура, а отдельно для трех частей его бассейна: для верхнего, среднего и нижнего Амура.
5. На основе анализа индексов засушливости Педя для бассейна Амура были установлены определенные тенденции совокупного изменения влажностно-температурного режима, которые достаточно сильно проявляются как в общем годовом цикле, так и во

внутригодовых изменениях. Основная тенденция изменения влажностно-температурного режима в бассейне Амура (в основном в его среднем и нижнем течении) связана с потеплением и повышением иссушения территории как в общем годовом цикле, так и в тёплое время года (полугодия и сезоны), в то время как холодное время года наоборот, характеризуется потеплением сопровождаемым увеличением осадков в виде снега. Установлено, что многолетние изменения влажностно-температурного режима в общем годовом цикле в бассейне Амура полностью определяются изменением ситуации в тёплое полугодие. В настоящее время на большей части бассейна Амура климат стал более тёплым и засушливым, вплоть до образования засух в вегетационный период – летом и осенью. Вторая дополнительная тенденция (неосновная) совокупного изменения влажностно-температурного режима, связанная с повышением увлажнения в тёплое время года (в весенне-летне-осенний сезон), проявляется только для северных и северо-западных территорий бассейна Амура, в основном, в его верхнем течении. Особенностью изменения влажностно-температурного режима в бассейне Амура является то, что в весенний сезон их совокупное воздействие почти не проявляется. Несмотря на то, что в весенний сезон отмечаются наибольшие многолетние изменения в температурном режиме, весна характеризуется самыми минимальными совокупными изменениями (т.е. погодными условиями со слабой аномальностью), в отличие от всех остальных рассмотренных сезонов и периодов, которые отличаются сильной аномальностью.

6. Из-за слабых весенних аномалий и сильного потепления осенью в бассейне Амура наблюдается перераспределение по длительности тёплого и холодного полугодий, происходит увеличение на один месяц (включая октябрь) тёплого времени года таким образом, что за основной тёплый период года вскоре можно будет считать с 4 по 10 месяцы в годовом цикле.
7. Климатические изменения в бассейне Амура имеют как общие, так и отличительные черты с таковыми для всей России (Кузьмина, 2007; Кузьмина, Трешкин, 2007; Кузьмина и др., 2011). При этом, если в изменении средних, максимальных и минимальных температур очень много общего, то в изменении увлажнения больше отличий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Техническое резюме. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 89 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. Техническое резюме. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 93 с.

Дмитриев Е.А. 1995. Математическая статистика в почвоведении. М.: МГУ. 320 с.

Кастрикин В.А. 2006. Предварительный анализ влияния глобального потепления климата на изменение некоторых гидрологических и метеорологических характеристик территории Хинганского заповедника // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М.: WWF России. С. 42-46.

Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. 1981. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука. 255 с.

Кузьмина Ж.В. 2007. Анализ многолетних метеорологических трендов на Юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. Т. 13. № 32. С. 53-67.

Кузьмина Ж.В., Каримова Т.Ю., Трешкин С.Е., Феодоритов В.М. 2011. Влияние климатических изменений и зарегулирования речного стока на динамику растительности долин рек // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 2 (116). С. 34-40.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2009. Изменения основных метеорологических характеристик на юге Европейской части России // Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве / Ред. Иванов А.Л., Кирюшин В.И. М.: Россельхозакадемия. С. 402-416.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2014. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. Т. 20. № 3 (60). С. 14-32.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2016. Климатические изменения в Приаралье и Средней Азии // Аридные экосистемы. Т. 22. №4 (69). С. 5-20.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017 а. Методика оценки нарушений в наземных экосистемах и ландшафтах в результате климатических и гидрологических изменений // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 3. С. 146-188 [Электронный ресурс http://www.ecosystemsdynamic.ru/stati/ (дата обращения 20.02.2018)].

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017 б. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в зоне южной тайги Европейской части России (бассейн верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 3 (151). С. 56-65.

Новороцкий П.В. 2006. Изменение климата в бассейне Амура. // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М.: WWF России. С. 22-41.

Новороцкий П.В. 2007. Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет // Метеорология и гидрология. № 2. С. 43-53.

Педь Д.А. 1975. О показателях засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 156. С. 19-39.

Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Шерстюков Б.Г., Наумов Э.П., Шанталинский К.М., Гоголь Ф.В. 2008. Современные изменения климатат республики Татарстан // Вестник ВГУ. Серия: География, Геоэкология. № 2. С. 13-23.

Климатическое районирование. 1984. Атлас СССР. Москва: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров ССС. С. 98.

Хромов С.П. 1983. Метеорология и климатология для географических факультетов. Ленинград: Гидрометеоиздат. 455 с.

CLIMATIC CHANGES IN THE AMUR BASIN AND THE WAY THEY AFFECT ECOSYSTEMS

© 2018. Zh.V. Kuzmina*, S.E. Treshkin**

**Water Problems Institute of RAS*
Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: jannaKV@yandex.ru
***Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation*
Russia, 125009, Moscow, Tverskaya Str., 11. E-mail: biost@yandex.ru

Received 15.10.2018. Revised 15.10.2018. Accepted 01.11.2018.

Based on the analysis of perennial dynamics (which was over in 2013) of annual, semi-annual and seasonal values of the main meteorological characteristics (air temperature and precipitation for 22 weather stations), the trends of air temperature (average, maximal and minimal) changes and quantity of precipitation in the Amur basin were determined. With the help of relative coefficient of meteorological characteristics changes we evaluated the degree of changes for 6 characteristics (total precipitation, average air temperature, average maximal, average minimal and absolute maximal air temperature) for 11 periods of a year: annual, spring, summer, autumn, winter and 6 halves of a year – 3 warm (from the 4th month to the 9th, from 4th to 10th, from 5th to 10th), and 3 cold (the rest of the months). The trends of climatic changes in the Amur basin were determined. According to the analysis of Pedya (1) dryness index and its modifies version Pedya (2) for those 11 periods, the directions of

changes of total humidity-temperature regime in the Amur basin for the current moment and the closest future were detected. We also determined the trends of changes of terrestrial ecosystems in the Amur basin for the closest future.

Keywords: main meteorological characteristics, relative coefficient of meteorological characteristics changes, climatic changes, Pedya (1) dryness index and its modified version Pedya (2), changes of humidity-temperature regime, changes of terrestrial ecosystems.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10020

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, с. 61-74

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 551(902.66):911.6+551.435.3

ДИНАМИКА БЕРЕГОВ ТАМАНСКОГО И КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

© 2018 г. В.А. Дикарёв

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119992, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: asdikarev@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018. После доработки 25.10.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

Работа посвящена побережьям Черного и Азовского морей в пределах Таманского и Керченского полуостровов и их эволюции в голоцене в связи с изменением уровня моря. Рассмотрены последние данные о палеогеографии полуостровов в различные эпохи морских трансгрессий и регрессий. Приведены кривые изменения уровня моря за последние 6-7 тыс. лет для локальных реконструкций на Керченском и Таманском полуостровах. В обсуждении уделено внимание современной динамике региона, развитию рельефа береговой зоны в зависимости от продолжающегося изменения уровня моря. В заключение дана схематическая классификация берегов по степени устойчивости к морской абразии и опасности их разрушения при продолжающемся повышении уровня моря.

Ключевые слова: Керченский полуостров, Таманский полуостров, Черное море, Азовское море, изменение климата, повышение уровня моря, палеогеография, голоцен, греческая колонизация, эвстатическая кривая изменения уровня моря, абразия, устойчивость берегов.
DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10021

Проблема изменения уровня мирового океана и морей является одной из самых актуальных в физической географии наряду с вопросами изменения климата в XXI столетии. Усиление «парникового эффекта» может вызвать потепление, которое приведет к повышению глобальной температуры между 2025 и 2050 годами на 1.5-4.5°С по сравнению с современным значением. Потепление будет способствовать таянию ледников, изменению глобального водообмена, термическому расширению поверхностного слоя океана. Все это приведет к постепенному стабильному повышению океанического уровня. Существует несколько прогнозных сценариев изменения уровня Мирового Океана (МО) и очертаний береговой линии в различных регионах земного шара. Инструментальные наблюдения показывают, что в последние десятилетия уровень МО повышается со средней скоростью около 1.5 мм/год. Между тем, оценки средней величины подъема уровня в ближайшем столетии колеблются от 10-20 см до 4 м и более. Столь значительные различия в оценках базируются на сложности предсказания реакции Антарктического ледникового покрова на вероятное потепление климата (Каплин, Селиванов, 1999). Ниже приведен осредненный график инструментальных наблюдений за последние 150 лет и прогноз на ближайшее столетие по данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (2007).

Между тем, конкретные изменения очертания берегов, разрушение, изменение баланса наносов и другие параметры береговой зоны очень сильно зависят от каждой локальной ситуации и существенно различаются на побережьях океанов и мелководных внутренних морей. Автор с коллегами занимался исследованием берегов Керченского и Таманского полуостровов, начиная с 2003 года. Мы накопили большой объем литературных и полевых данных по изменению уровня моря в данном регионе и очертанию его береговой линии в прошлом и динамики в настоящем. В статье рассмотрены общие условия формирования

побережья полуостровов в послеледниковое время, характер изменения уровня Черного и Азовского морей в голоцене по данным различных исследователей, характер распределения поселений человека на территории полуостровов и современная динамика береговой зоны.

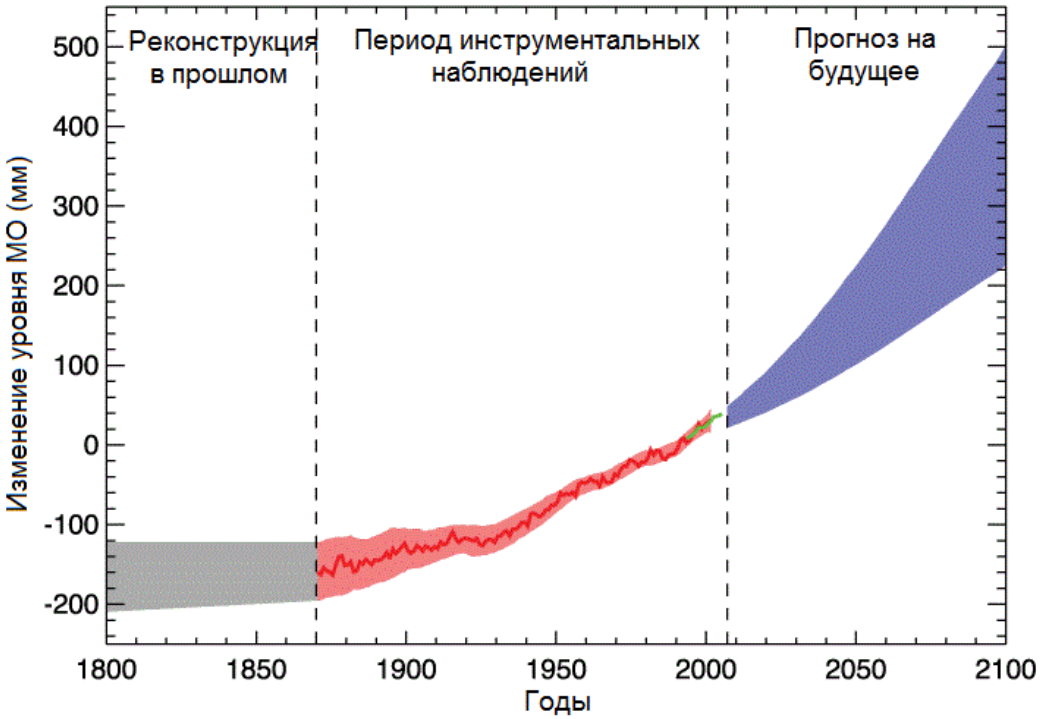


Рис. 1. Изменение уровня Мирового Океана и прогноз на ближайшее столетия по данным МГЭИК (2007). **Fig. 1.** Changes of the Global Ocean level and prognosis for the next century, according to Intergovernmental Panel on Climate Change data (2007).

Состояние проблемы

Согласно классификации берегов бывшего Советского Союза (Зенкович, 1962) Керченско-Таманская область охарактеризована как выровненный сложный берег в породах малой устойчивости, частично лиманный и лагунный. Область разделена естественным образом Керченским проливом на две подобласти – Керченский полуостров и пролив и Тамань. В Керченско-Таманской области на берегах развиты преимущественно малоустойчивые породы. В отдельных точках, на которые опираются вогнутые береговые дуги, имеются выходы слабоабрадируемых пород. На Керченском полуострове такими точками являются мыс Чауда, защищенный навалом плит ракушечников, гора Опук, сложенная сарматскими известняками, и сарматские мшанковые рифы, образующие ряд мысов далее к Керченскому проливу. На Таманской стороне такие же мшанковые рифы образуют мысы Тузла и Панагия. Мыс Железный Рог образован киммерийскими рудными пластами (Зенкович, 1962). Морфологический облик побережий Керченского и Таманского полуостровов существенно различаются. На фотографии 1 представлен типичный вид северного берега Керченского полуострова: абразионный уступ с небольшой волноприбойной нишей переходит в крутой склон коренных пород, поднимающийся до высоты 30-40 м н.у.м. БС, и далее становится пологой поверхностью основной территории Керченского полуострова, осложненной небольшими возвышениями – выходами мшанковых известняков и грязевым вулканизмом.

Протяженность берегов Таманского побережья составляет около 230 км. Около трети из

них представлены абразионным, абразионно-обвальным и абразионно-осыпным типами, характеризующимися современным размывом. Таманское побережье выглядит в общем виде более пологим и низким. Переход от береговой линии к основной поверхности полуострова плавный, абразионные уступы выработаны преимущественно в рыхлых породах, осложненных оползнями и осыпями. Рельеф полуострова, хотя в абсолютных отметках не уступает Керченскому, визуально кажется ниже и более пологим (фото 2). Наиболее высокая часть полуострова – гряда, расположенная на южном берегу Таманского залива, наивысшая точка г. Комендантская – 164 м н.у.м. БС. Таманский регион характеризуется вертикальными движениями земной коры, достигающими 1 мм/год (Земная кора ..., 1975).

Фото 1. Типичный берег на севере Керченского полуострова, сложенный миоценовыми известняками (здесь и далее – фото автора). **Photo 1.** Typical coast of the northern Kerch Peninsula, formed by Miocene limestones (all the photos were made by the author).

Поверхность полуострова осложнена многочисленными древними и действующими грязевыми вулканами. Грязевой вулканизм Керченско-Таманской области имеет длительную историю изучения, начиная с работ академиков А.Д. Архангельского и И.М. Губкина, посвященным приуроченности грязевого вулканизма к месторождениям нефти и газа. Вулканизм Керченско-Таманской области в основном приурочен к диапировой складчатости. Большинство вулканов представляют собой пологие конусы на поверхности полуострова, образованные в результате периодического поступления на поверхность полужидких масс (Шнюков, 1986). Всего на Таманском полуострове насчитывается более 20 активно действующих вулканов. На фотографии 3 г. Горелая (Куклаба) – это неактивный грязевой вулкан миоценового возраста, высота сопки – 103 м н.у.м. БС.

Фото 2. Типичный берег Таманского полуострова, сложенный рыхлыми породами.
Photo 2. Typical coast of the Taman Peninsula, formed with loose sediments.

Последние исследования показали, что облик Таманского полуострова в голоцене значительно изменялся и эти изменения были связаны с эвстатическим поднятием уровня моря в послеледниковое время. В данной статье мы попытаемся показать и проанализировать эти изменения и их связь с изменением уровня Черного и Азовского морей.

Материалы и методы

Новейшая история Черного и Азовского морей начинается с момента поступления соленых вод из Мраморного моря после соединения опресненного Новоэвксинского бассейна со Средиземноморским в результате подъема уровня Мирового Океана. Этот период в истории Черноморо-Азовского бассейна принято называть Понтическим. Относительно датировки этого события среди ученых еще нет однозначного мнения, но в большинстве случаев его относят к периоду 8-9 тыс. лет назад. В результате в обоих морях сформировался полуморской тепловодный режим с соленостью от 15‰ в Азовском море и до 18-20‰ в Черном. Вместе с водами Мраморного моря в Черноморо-Азовский бассейн проникли солелюбивые виды морских моллюсков *Cerastoderma, Chione, Mytilus* и другие (Янина, 2012). В течение голоцена уровень моря не оставался стабильным, а испытал ряд трансгрессий и регрессий, масштабы и временные рамки которых также являются предметом дискуссии, равно как и положение уровня моря относительно современного в различные периоды его голоценовой истории. Общая амплитуда колебаний достигала, по мнению И.П. Балабанова (2009), 40-50 м за последние 10 тыс. лет. Отечественные исследователи выделяли четыре основные трансгрессивные стадии, оставившие свои следы в виде морских отложений и береговых террас, а также погруженных береговых линий (табл.).

Трансгрессивные стадии разделены регрессивными, охарактеризованными как замедление темпа подъема или понижения уровня моря. Наиболее значительной была Древнечерноморская – Бугазская, Витязевско-Каламитская (Балабанов, 2009) трансгрессия.

Фото 3. Потухший грязевой вулкан Куклаба (г. Горелая) на Таманском полуострове.
Photo 3. Non-active mud volcano Kuklaba (Gorelaya Mountain) on the Taman Peninsula.

Таблица. Трансгрессивные и регрессивные эпохи Черноморо-Азовского бассейна в голоцене. **Table 1.** Transgressive and regressive periods of Black-Azov sea basin in Holocene.

Возраст, тыс. л. н. (по ^{14}C)	**Абсолютные отметки, м н.у.м. БС**	**Стадия**	**Название по П.В. Федорову (1978)**	**Название по И.П. Балабанову (2009)**	**По другим авторам**
–	0	Трансгрес-сивная	–	Современная	–
0.8	-3	Регрессивная	–	Поздне-средневековая	Корсуньская
1.1-2.0	0-1	Трансгрес-сивная	Нимфейская	Нимфейская	–
2.5-2.6	-5 – -6	Регрессивная	Фанагорийская	Фанагорийская	–
2.8-5.7	-8 – +2	Трансгрес-сивная	Новочерно-морская	Джеметинская	–
6.2-6.3	-16	Регрессивная	–	Каламитско-Джеметинская	Понтийская, Хаджибейская
6.5-8.7	-24 – -5	Трансгрес-сивная	Древнечерно-морская	Бугазская	–

Во время нее уровень моря поднялся с отметок около -30 м до почти современных значений после соединения Черного моря с Мраморным. Эта трансгрессия не оставила террас на суше, т.к. общий уровень моря во время нее никогда не превышал современный. Следующей значительной трансгрессией была Новочерноморская, оставившая по берегам Черного моря хорошо выраженную в рельефе террасу высотой от 2 до 3-4 м н.у.м. Превышал ли общий уровень моря современный в ходе этой трансгрессии, – этот вопрос остается дискуссионным, т.к. возвышенные террасы могли образоваться в ходе тектонических поднятий берега на 1-4 м за последние 5 тыс. лет, прошедших с начала трансгрессии. Следующим этапом, по мнению большинства авторов, являлась Фанагорийская регрессия, в ходе которой замедлился подъем уровня моря и произошло падение уровня до отметок -7 м (и более) ниже современного. Данная концепция имеет множество уязвимых мест, т.к. на этот период пришелся пик греческой колонизации, которая не могла происходить при столь значительном понижении уровня моря (Дикарев, 2011). Следующей стадией был подъем уровня моря после фанагорийской регрессии, которую П.В. Федоров выделил (1978) в самостоятельную Нимфейскую трансгрессию, оставившую по берегам неявно выраженную серию валов. Дальнейшее понижение уровня и начавшийся в новейшее время подъем были незначительны.

Столь значительные изменения решительным образом изменили береговую зону морей и в частности очертания Керченского и Таманского полуостровов. Исследования последних десятилетий позволили восстановить палеогеографию Таманского полуострова, опираясь на данные бурения и геоархеологические построения. Палеогеография Керченского полуострова пока изучена хуже, реконструированы лишь отдельные участки берега, аккумулятивные косы, гавани античных поселений.

В 2007-2008 годах автор принимал участие в бурениях на Таманском полуострове в составе совместной Российско-Германской группы. Исследования были направлены на восстановление береговой линии в различные периоды и, особенно в период пика греческой колонизации IV-VI века до н.э. На рисунке 2 показана береговая линия Таманского полуострова в V веке до н.э. (2500 лет назад). Полуостров в это время представлял собой архипелаг из нескольких островов, разделенных проливами, самый крупный из которых, представляющий собой дельту Палеокубани, получил название Боспор Кубанский (по аналогии с Боспором Киммерийским).

На Керченском полуострове наиболее значительные успехи были достигнуты в реконструкции Чокракского озера, бывшего в античный период заливом Азовского моря. Исследования показали, что пересыпь, отделяющая в настоящее время озеро от моря, постепенно нарастала вместе с подъемом уровня, начиная с 3 тысячелетия до н.э. Параллельно увеличивалась и акватория самого озера-залива. Наибольшую площадь оно занимало в период пика греческой колонизации вVI-IV вв. до н.э., оставаясь соединенным с морем небольшой протокой посередине пересыпи, достаточно глубокой для навигации легких судов. Скальный мыс Зюк, соединенный в настоящее время с Керченским полуостровом пересыпью-томболо, был в то время небольшим островом (рис. 3). На мысе Зюк, а также на Чокраксом мысу, представляющем собой вдающийся в озеро останец коренных пород, располагались античные поселения, существование которых было непосредственным образом связано с морем (Масленников, 1998).

Изменения положения береговой линии в описанных нами реконструкциях были непосредственно связаны с подъемом уровня моря. Однако изменения береговой линии – это не только пассивное затопление территории. В результате подъема уровня изменяется баланс наносов, активизируется абразия берегов, сложенных рыхлыми породами (суглинками). Изменения конфигурации береговой линии также связаны с изменением базиса эрозии речных долин и их заполнением речными наносами, выдвижением дельт, как мы видим на

примере дельты р. Кубань. Подобные изменения могут «переместить» береговую линию на десятки километров и за несколько тысяч лет полностью изменить облик прибрежной территории.

Рис. 2. Реконструкция Таманского полуострова в эпоху греческой колонизации (Kelterbaum et al., 2009). **Fig. 2.** Reconstruction of the Taman Peninsula during Greek colonization (Kelterbaum et al., 2009).

Изменение уровня моря. В ходе всестороннего анализа полученных палеогеографических данных, а также анализа характера расположения поселений человека на территории Керченского и Таманского полуостровов коллектив авторов предложил новую концепцию изменения уровня Черного и Азовского морей в позднем голоцене; она опирается на данные бурения и полученные в ходе анализа радиоуглеродные датировки раковин моллюсков и прослоев торфа. В ней явно выделяется общий подъем уровня моря с отметок -8-9 м ниже современного, со значительным замедлением подъема в период между 1000 до н.э. и 1000 н.э., что соответствует фанагорийской и нимфейской стадиям в отечественной классификации. Сколько-нибудь значительного понижения уровня в этот период не происходило, в противном случае в скважинах наблюдались бы прослои торфа, датируемые этим промежутком времени (Fouache at al., 2012).

Результаты и обсуждение

За последние десятилетия самой значительной глобальной тенденцией развития береговой зоны является ее интенсивный размыв. Эта тенденция характерна для берегов практически всех прибрежных стран и во многих местах приобретает катастрофический характер. При этом аккумулятивные берега вследствие своей высокой динамичности являются наиболее уязвимыми. В катастрофическом положении находятся многие отрезки побережья России. Например, на берегах Крымского полуострова при общей протяженности

в 705 км в настоящее время активно размывается 570 км, т.е. более 2/3. При этом начинают размываться и ранее стабильные аккумулятивные формы. Основным фактором, придающим процессу абразии глобальный характер, является продолжающийся подъем уровня моря. Остальные природные факторы, накладываясь на него, контролируют особенности развития процессов размыва и их интенсивность в конкретных районах (Каплин, 2010).

Рис. 3. Реконструкция озера Чокрак (Керченский п-ов) в эпоху пика греческой колонизации.
Fig. 3. Reconstruction of Chokrak lake (Kerch Peninsula) during the peak of Greek colonization.

Современное состояние берегов Керченского и Таманского полуостровов является следствием описанных выше факторов и событий и до сих пор видоизменяется в условиях продолжающегося поднятия уровня моря. Если для Керченского полуострова эти изменения не так заметны, то на побережье Таманского полуострова и в целом восточной части Азовского моря они приобретают характер катастрофы. Скорость отступания береговых уступов, сложенных лессовидными суглинками на некоторых его участках, уже сейчас достигает 5-8 м/год. Высокая чувствительность берегов к изменению уровня моря объясняется не только антропогенными факторами, но и преобладанием погружения суши со скоростью от 0.5 до 3 мм/год и, соответственно, увеличением влияния повышения уровня, а также интенсивным отступанием сложенных лессовидными породами уступов. Кроме того, значительное влияние оказывает сокращение речного стока и изменение баланса наносов в результате изъятия песка с пляжей (Селиванов, 2001). Например, питание косы Чушка сильно зависит от твердого стока наносов, выносимых р. Кубань. На фото 4 показан южный берег Таманского залива в районе с. Гаркуша. Интенсивность отступания берега здесь достигает нескольких метров в год. Дорога, проложенная по краю поля и отстоящая от моря

на 20-25 м, в настоящее время интенсивно размывается. Данный процесс наблюдается на многих участках побережья Таманского полуострова и зафиксирован автором на протяжении последних десятилетий экспедиционных исследований с 1994 по 2014 годы.

Фото 4. Разрушение берега Таманского залива.
Photo 4. Destruction of the Taman peninsula coast.

Побережье Керченского полуострова, сформированное рыхлыми отложениями со стороны пролива, также подвержено разрушению. Здесь непосредственно клиф защищен обвально-оползневыми конусами и небольшим пляжем или бенчем, выработанным в глинах, подстилающих рыхлые плейстоценовые отложения. Крупные шторма, тем не менее, достигают склона, вызывая абразию и стимулируя склоновые процессы, в основном обвалы отдельных блоков и осыпи. Коренной берег, сложенный выходами известняков, защищен гораздо лучше и меньше подвержен изменениям. Здесь в синклиналях между мысами образуются небольшие бухты протяженностью до 200-300 м, заполненные песком с ракушей. В наиболее вдающихся в берег бухтах прослеживается терраса высотой 2-3 м. Возраст ракушечного материала террас колеблется от 4000 до 2500 тыс. лет (cal BP), что соответствует периоду Новочерноморской трансгрессии (Дикарев, 2011). Прибрежная часть бухт занята пляжем неполного профиля, прислоненным либо к телу террасы, либо к склону коренных пород. Пляж сложен разнозернистым детритовым песком светло-коричневого цвета и ракушей.

Во время сильных штормов аккумулятивная часть пляжа может полностью изменить свой облик, а накопившийся материал может подвергнуться размыву. В небольших бухтах подобные события способны ежегодно менять конфигурацию береговой линии, нарастая и отступая за сезон на несколько метров.

Фото 5. Разрушение западного берега Керченского пролива в районе пос. Героевское или Эльтиген. **Photo 5.** Destruction of the west coast of the Kerch peninsula in the area of Geroyevskoye or Eltigen.

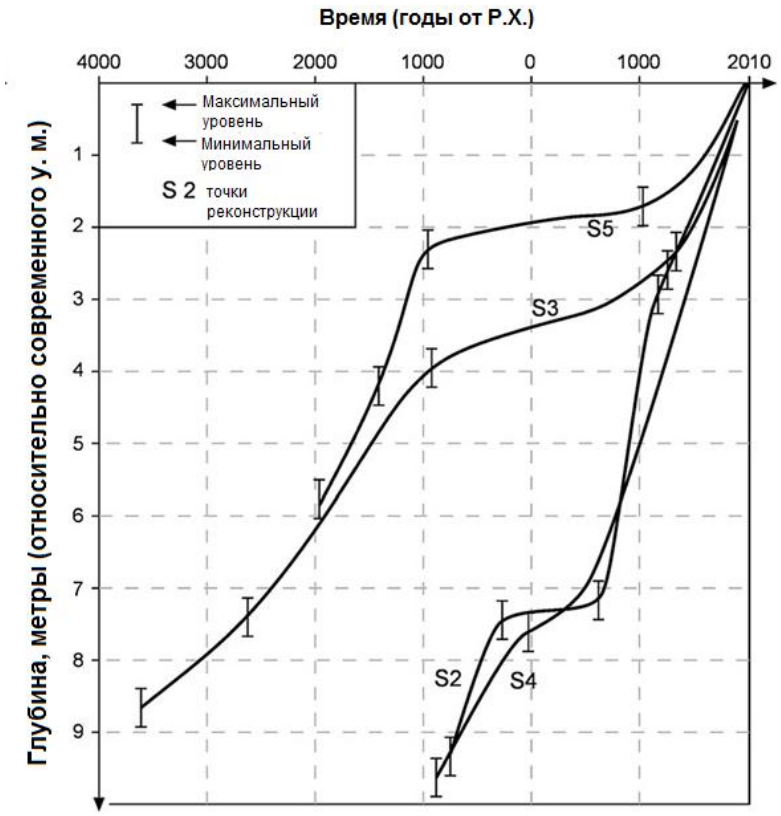


Рис. 4. Графики изменения уровня моря за последние 6 тыс. лет для побережья Таманского полуострова (Fouache et al., 2012).
Fig. 4. Graphs of the sea level changes during the last 6 thousand years on the coasts of the Taman peninsula (Fouache et al., 2012).

Фото 6. Строение северного берега (Каралавское побережье) Керченского полуострова.
Photo 6. Structure of the northern coast (Karalavsky coast) of the Kerch peninsula.

Выводы

В результате проведенного исследования мы можем сделать вывод о том, что берега Керченского и Таманского полуостровов были подвержены значительным изменениям в послеледниковое время. Берега Таманского полуострова, сложенные рыхлыми четвертичными отложениями, наиболее сильно подвержены изменению в настоящее время. Берега Керченского полуострова испытали меньше воздействия в связи с повышением уровня моря, и это воздействие не всегда хорошо заметно без детальных палеогеографических реконструкций. Скалистые берега, сложенные известняком, менее всего подвержены абразии. В целом на побережье Керченского полуострова по сравнению с Таманским побережьем лучше сохранились аккумулятивные формы рельефа, сформировавшиеся в эпоху максимума новочерноморской трансгрессии, по сравнению с Таманским побережьем.

Исследование позволяет разделить изученные нами берега на четыре условные группы: устойчивые, относительно устойчивые, неустойчивые и крайне неустойчивые. К первой группе относятся берега в основном Керченского полуострова, представляющие собой выходы коренных пород (известняков), осложненные небольшими бухтами между мысами. К таким побережьям относится весь северный берег Керченского полуострова от Казантипского залива до бухты Рифов, а также сам атолл Казантип, по типу берегов весьма схожий с описанным выше побережьем. К относительно устойчивому типу берега были отнесены крупные бухты, занятые пляжем, прислоненным к широкой террасе, и подверженные размыву только в пределах пляжа. Казантипский залив и часть Арабатского залива являются данным типом берега. Относительно неустойчивые – берега, сложенные

рыхлыми породами (лессовидными суглинками и глинами), защищенные пологим бенчем или обвально-осыпными конусами от непосредственного волнового воздействия. К данному типу относится часть побережья Таманского залива и Керченского пролива. Наиболее неустойчивые берега – это территории, где активно идет размыв берега и перераспределение размываемого материала вдоль береговой линии. К ним относится большая часть побережья Таманского полуострова, Арабатская стрелка (рис. 5, фото 7).

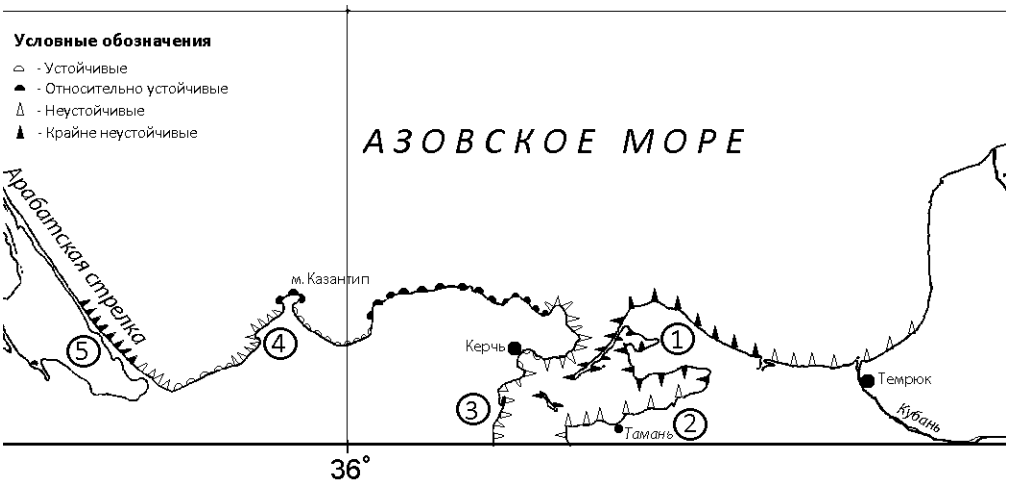


Рис. 5. Схема устойчивости берегов Керченского и Таманского полуостровов.
Fig. 5. Scheme of stability of the Kerch and Taman peninsulas coasts.

Фото 7. Берег полуострова Казантип, сложенный мшанковыми известняками.
Photo 7. Coast of the Kazantyp headland, formed by bryozoan limestone.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балабанов И.П. 2009. Палеогеографические предпосылки формирования современных природных условий и долгосрочный прогноз развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа. М.-Владивосток: Дальнаука. 352 с.

Дикарев В.А. 2011. О фанагорийской регрессии Черного моря // Вестник Московского Университета. Серия 5 «География». № 1. С. 35-40.

Земная кора и история развития Черноморской впадины. 1975. М.: Наука. 358 с.

Зенкович В.П. 1962. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. М.: Изд-во АН СССР. 710 с.

Каплин П.А. 2010. Вопросы геоморфологии и палеогеографии морских побережий и шельфа: Избранные труды. М.: Географический факультет МГУ. 620 с.

Каплин П.А.., Селиванов А.О. 1999. Изменения уровня морей России и развитие берегов: Прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС. 299 с.

Масленников А.А. 1998. Эллинская хора на краю Ойкумены. Сельская территория Европейского Боспора в античную эпоху. М.: Индрик. 304 с.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата. 2007. Изменение климата. Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Ред. Р.К. Пачаури, А. Райзингер. Женева, Швейцария. 104 с.

Селиванов А.О. 2001. «Береговая катастрофа» на Азовском море: Миф или реальная угроза? М.: ГЕОС. 84 с.

Федоров П.В. 1978. Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука. 166 с.

Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. 1986. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев: Наукова Думка. 149 с.

Янина Т.А. 2012. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географический факультет МГУ. 264 с.

Fouache E., Kelterbaum D., Bruckner H., Lericolais G., Dikarev V. 2012. The Late Holocene evolution of the Black Sea – a critical view on the so-called Phanagorian regression // UK, Quaternary International. Vol. 266. P. 162-174.

Kelterbaum D., Brückner H., Dikarev V., Gerhard S., Pint A. 2012. Palaeogeographic Changes at Lake Chokrak on the Kerch Peninsula, Ukraine, during the Mid- and Late-Holocene/Geoarchaeology // An International Journal. John Wiley & Sons Inc., USA. Vol. 27. No. 3. P. 206-219.

Keltenbaum D., Bruckner H., Porotov A., Schlotzhauer U., Zhuravlev D. 2009. Sea-level changes in the Black Sea and their impact on the palaeogeography of the Taman Peninsula (SW Russia) during the Greek colonization of the 1st millennium BC // IGCP 521 – INQUA 0501 Fifth Plenary meeting and field trip, Extended Abstracts. Izmir, Deu Publishing house. P. 96-97.

THE KERCH AND TAMAN PENINSULAS COAST DYNAMICS UNDER ANTICIPATED SEA-LEVEL RISE

© 2018. Dikarev V.A.

M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Department
Russia, 119992, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: asdikarev@yandex.ru

Received 15.10.2018. Revised 25.10.2018. Accepted 01.11.2018.

The article is devoted to the Black and the Azov seas coasts of Kerch and Taman peninsulas and their evolution under the sea level changes during the middle-late Holocene. Different transgressive and regressive periods and eustatic curves are presented. Local paleogeographical reconstructions of the

Taman peninsula and part of the Kerch peninsula are given. Modern situation of coastal abrasion under anticipated sea-level rise is discussed. Coastal vulnerability scheme of Kerch and Taman peninsulas is given as a result of our study.
Keywords: Kerch strait, Taman bay, the Black Sea, the Sea of Azov, climate change, sea level rise, paleogeography, Holocene, Greek colonization, eustatic curves, abrasion, coast vulnerability.
DOI: 10.24411/2542-2006-2018-1002

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, С. 75-105

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 574.47; 574.42; 574.2

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МОРДОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА ИМ. П.Г. СМИДОВИЧА И ТЕНДЕНЦИИ ЕЁ ТРАНСФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ[1]

© 2018 г. С.В. Черноруцкий

Институт водных проблем РАН
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: jannaKV@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.10.2018. После доработки 30.10.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

В статье рассмотрено состояние растительного покрова Мордовского государственного заповедника (по состоянию на 2014 г.). Подробно рассмотрены особенности сообществ различного типа, особое внимание уделено современным процессам изменений в растительности под влиянием смены экологических условий. Обследованы типы лесов и открытых пространств, в том числе тех, по состоянию которых можно определить воздействие климатических изменений на экосистемы заповедника.

В современной динамике сообществ различных типов выявлены тенденции, обусловленные естественными (климатическими) изменениями. Выявлены основные тенденции в современной динамике различных типов сообществ, обусловленные естественными (климатическими) изменениями. Показано, что климатические изменения последних десятилетий оказывают значительное влияние на состав и структуру растительности заповедника.

Соотношение площадей лесов различного породного состава в истории существования заповедника постоянно менялось. Вызвано это не только изменением границ заповедника и пожарами, но и современными изменениями климатических условий. Последний фактор влияет на увлажнение и температурный режим экосистем заповедника, на уровень грунтовых вод, а также – на режим затопления в поймах. Изменения климата Средней России, происходящие с начала 90-ых годов XX века, описываемые как гумидное потепление, связаны с общей тенденцией потепления (особенно в зимний период), увеличением осадков и сокращением весеннего половодья. Эти изменения, как показывает статья, отражаются на структуре и составе растительных сообществ, расположенных как в долинных, так и на водораздельных территориях.

Из основных диагностических изменений, свидетельствующих об идущей сукцессии, выделены формирование густого яруса подроста или второго яруса древостоя из липы или ели на фоне изреживания первого древесного яруса, закустаривание и зарастание пойменных лугов. Также отмечено формирование моновидовых или бедных видами сообществ, сложенных в травяно-кустарничковом ярусе видами-индикаторами повышения и стабилизации уровня грунтовых вод. Так как антропогенное влияние на экосистемы в Мордовском заповеднике минимально, всё вышеперечисленное является следствием современных естественных, в первую очередь, климатических изменений.

Ключевые слова: динамика растительности, Мордовский заповедник, сосновые леса, липовые леса, широколиственые леса, сукцессии, климатические изменения.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10022

[1] Работа выполнена в рамках раздела 2.6. Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях темы НИР Института водных проблем РАН «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002), № государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8.

Мордовский государственный природный заповедник им. П.Г. Смидовича (МГПЗ), согласно Н.П. Ремезову (1960а, с. 3), «расположен в восточной части Окско-Клязьминской геоморфологической и ландшафтной области». Территория лежит в междуречье р. Мокши и ее притока Сатиса. Согласно «Физико-географическому районированию СССР» (1968), территория эта принадлежит к Мещёрской провинции лесной зоны Русской равнины.

Согласно И.Г. Гафферберу (1960), заповедник расположен в пределах Окско-Клязьминской равнины, возникшей на месте Восточно-Русской впадины. Структура подстилающей поверхности – осадки палеозоя и мезозоя, выше которых лежит слой четвертичных отложений. Коренными породами исследуемой территории являются отложения каменноугольной системы – доломиты, доломитизированные и кремнистые известняки верхнего карбона. Вышележащие слои осадков, накопленные до четвертичного периода, были снесены Днепровским оледенением и флювиогляциальными водами.

Подстилающие породы особо охраняемой природной территории (ООПТ) – Днепровская морена, перекрытая на большей части площади слоем древнеаллювиальных и валунных песков (флювиогляциального происхождения). С геоморфологической точки зрения территория находится: на 4-ой Днепровской остаточно ледниковой террасе (наиболее высокая часть, расположенная на подстилаемых моренными суглинками песках), на 3-ей и 2-ой Валдайских остаточно ледниковых террасах (на глубоких песках) – в пределах водораздела рек Мокши и Сатиса и на 1-ой надпойменной террасе р. Мокши, а также в современной пойме р. Мокши (Ремезов, 1960б).

Почвы заповедника свойственны зоне широколиственных лесов Русской равнины. Первая надпойменная терраса (долинные ландшафты) занята чернозёмовидными пойменными почвами (Ремезов, 1960б), на которых произрастают или возобновляются: на наименее увлажненных участках преимущественно широколиственные породы – дуб (*Quercus robur*), липа (*Tilia cordata*); на более увлажнённых пойменных участках – перегнойно-глеевые почвы, занятые сообществами с преобладанием чёрной ольхи (*Alnus glutinosa*). Более высокие уровни надпойменных террас заняты слабодерново-подзолистыми песчаными почвами, покрытыми различными вариантами сосновых лесов. Также отмечено распространение бурых лесных почв, почв на кварцевых песках под моренными суглинками, почв с мощным перегнойно-аккумулятивным горизонтом (Потапов и др., 2006).

На верховых и переходных болотах, а также в переувлажнённых долгомошных и сфагновых сосновых лесах и редколесьях распространены торфянисто-глеевые и торфяно-глеевые почвы.

Помимо перечисленных, в пределах заповедника встречаются различные почвы, занимающие переходные положения между указанными выше.

Мещёрская физико-географическая провинция, в пределах которой находится ООПТ, характеризуется умеренно-континентальным, умеренно влажным климатом (Физико-географическое …, 1968). Годовая сумма температур воздуха выше 10°С составляет 2200-2400°С. Годовой показатель увлажнения 0.45-0.60. Средний из годовых абсолютных минимумов температуры воздуха -32-35°С.

За период с 1938 г. (год начала работы метеорологической станции Мордовского заповедника) по настоящее время климат изученной территории претерпел изменения, влияющие на процессы смен растительных сообществ. Метеорологические показатели на территории заповедника и ближайшей метеостанции г. Темников за 12-летний период наблюдений с 1938 по 1950 гг. (Гафферберг, 1960) и за современный период – за последние 30 лет (1981-2010 гг.) указывают на повышение среднегодовой температуры воздуха на 1°С, на повышение среднемесячной температуры января на 4°С и на увеличение годовой суммы атмосферных осадков почти на 100 мм (табл. 1). При этом теперь, самым холодным месяцем стал не январь, как это было ранее, а февраль со среднемесячной температурой воздуха -9°С

(Климат городов …, 2018), а наибольшее количество летних осадков стало выпадать в два летних месяца – в июне (72 мм) и в июле (71 мм). При этом летняя температура воздуха практически не изменилась (табл. 1). Таким образом, можно отметить, что в регионе расположения Мордовского заповедника происходят сходные с центральной Россией климатические изменения (Кузьмина и др., 2013; Кузьмина, Трешкин, 2017а, 2018) характеризующиеся, в целом, гумидным вариантом потепления с увеличением температуры воздуха, в основном за счёт холодного периода, и увеличением выпадения годового количества осадков.

Материалы и методы

Согласно схеме районирования растительности (Огуреева и др., 1999) исследованная территория лежит в пределах распространения восточноевропейских (днепровско-приволжских) лесов подзоны широколиственных лесов широколиственной зоны.

Однако, по схеме районирования Ф.К. Милькова (1977) заповедник лежит в южной части Мещёрской провинции зоны хвойно-широколиственных лесов (рис. 1).

Таблица 1. Климатическая характеристика Мордовского заповедника на основе литературных данных (Гаффенберг, 1960) и архивных данных метеостанции г. Темников.
Table 1. Climatic characteristics of Mordovsky Nature Reserve according to some literature (Гаффенберг, 1960) and archive data of weather station Temnikov.

Параметры	1938-1950 гг.	1981-2010 гг. (МС г. Темников)
Средняя годовая температура	3.4° (МС Мордовского заповедника) 4.1° (МС г. Темников)	5.1
Средняя месячная температура января	-12.4°(МС Мордовского заповедника) -12.6°(МС г. Темников)	-8.6°
Средняя месячная температура июля	19.8°	19.6°
Абсолютный максимум температур	39.5°	–
Абсолютный минимум температур	-46.5°	–
Годовое количество осадков	444.6 мм (МС Мордовского заповедника) 456.7 мм (МС г. Темников)	540
Максимум осадков летнего сезона	Июнь	Июль-Июль
Максимум осадков зимнего сезона	Январь	Декабрь
Продолжительность стояния снежного покрова	145 дней	–

Классификация растительного покрова была проведена по классической системе деления растительных сообществ, предложенной В.Н. Сукачёвым (1972).

Материалы для исследования были набраны в июле и августе 2014 года в ходе полевых работ по изучению растительного покрова заповедника. Было произведено 497 геоботанических описаний в различных типах растительных сообществ. Описания закладывались в типичных местообитаниях на площади 20х20 м в пределах лесных местообитаний и 10х10 м для открытых – свежих гарей, лугов, болот. В бланке описаний заносились сведения о каждом ярусе сообщества.

Для древесного яруса (по видам древостоя) – средняя высота, количество экземпляров, степень сомкнутости крон. Высчитывалась формула древостоя, отражающая соотношение пород на площадке описания.

Оценка обилия видов проводилась по стандартной методике (Полевая геоботаника …, 1964) с использованием шкалы Друде. Для подроста и подлеска (отдельно) учитывалось общее обилие яруса (1 – редкий подрост, 2 – подрост среднего обилия, 3 – густой подрост, 4 – очень густой подрост), видовой состав с указанием высоты каждого вида.

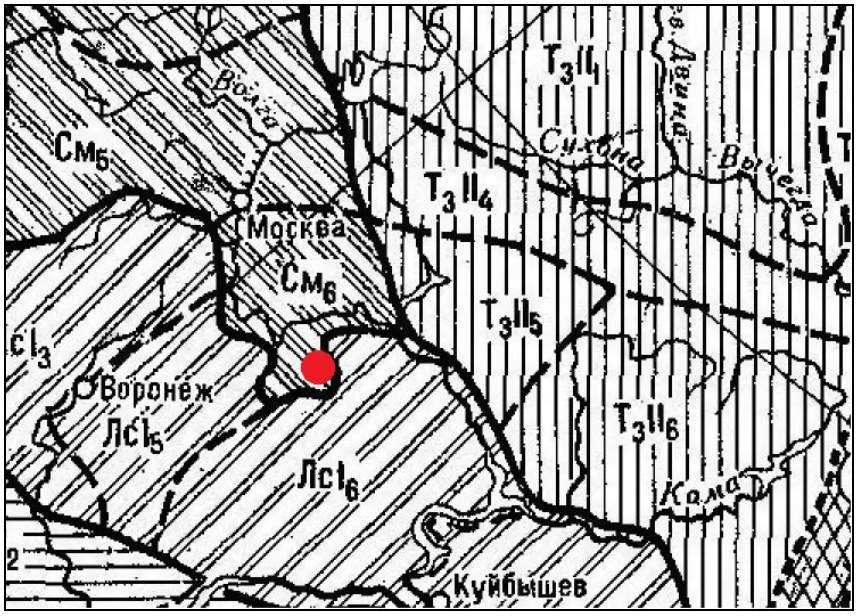


Рис. 1. Фрагмент карты «Природные зоны СССР» (Мильков, 1977). *Условные обозначения*: ● – участок полевых работ; T_3II – Восточно-Европейская таёжная область; T_3II_1 – Двинско-Мезенская провинция; T_3II_4 – Водораздельная провинция Северных Увалов; T_3II_5 – Провинция Низменного Заволжья; T_3II_6 – Провинция Вятско-Камской возвышенности; См – Зона хвойно-широколиственных лесов Русской Равнины; $См_5$ – Среднерусская провинция; $См_6$ – Мещёрская провинция; ЛсI – Лесостепная область Русской равнины; $ЛсI_3$ – Провинция Среднерусской возвышенности; $ЛсI_5$ – Провинция Окско-Донской равнины; $ЛсI_6$ – Провинция Приволжской возвышенности. **Fig. 1.** Fragment of “Nature zones of USSR” map (Мильков, 1977). *Legend*: ● – study plots; T_3II – East-European taiga region; T_3II_1 – Dvinsk-Mezensky province; T_3II_4 – watershed province of Northern Ridges; T_3II_5 – province of Low Transvolga; T_3II_6 – province of Vyatka-Kamsky Upland; См – zone of pine-broad-leaved forests of East European Plain; $Смц_5$ – Central Russian province; $См_6$ – Meshchyorsky province; ЛсI – forest-steppe zone of East European Plain; $ЛсI_3$ – province of Central Russian Upland; $ЛсI_5$ – province of Oka-Don Lowland; $ЛсI_6$ – province of Volga Upland.

Для травяного и кустарничкового ярусов учитывалось обилие каждого вида, общее проективное покрытие яруса. Для мохово-лишайникового яруса определялось проективное покрытие каждого вида отдельно и общее. Обилие указывалось по шкале Друде и включало

в себя 7 типов произрастания вида на площадке: cop3 – очень обильно, cop2 – обильно, cop1 – довольно обильно sp – скученно, sol – рассеянно, Un – единично, gr – группами.

Каждое описание имело порядковый номер и географическую привязку, произведённую при помощи GPS-приёмника.

Исследованием были охвачены все типы сообществ. После камеральной обработки описаний была составлена сводная таблица описаний, а также на основе космических снимков (Google карты, 2014) и данных полевых исследований была создана (в графическом редакторе MapInfo, версия 15.0) карта растительности заповедника, выполненная в масштабе 1:25000 и представленная в статье в масштабе 1:150000 (рис. 2).

Все фотографии в статье сделаны автором (Черноруцким С.В.) в июле и августе 2014 г. на территории заповедника в ходе проведения полевого обследования его растительного покрова. Все латинские названия растений приводятся по работе С.Н. Черепанова (1995).

Результаты и обсуждения

На основании имеющихся опубликованных литературных данных разных лет (Кузнецов, 1960, Гафферберг, 1960, Проект организации …, 1980) и результатов полевого обследования территории в 2014 году можно составить представление об изменениях площадей лесов заповедника с 1960 по 2014 год (табл. 2, рис. 3).

Как видно из таблицы 2 и рисунка 3, основные площади в заповеднике всегда занимали сосновые и березовые леса. До 1980 г. они в целом определяли облик заповедника, т.к. занимали как по абсолютной площади распространения (в га), так и в % от лесопокрытой площади первые две позиции (рис. 3а, в). Однако к 2014 г. в распределении лесов заповедника стали заметны существенные изменения. Распространение сосновых и березовых лесов существенно сократилось по площади, а березовых лесов также и в процентном соотношении (в %) от лесопокрытой площади. При этом, если сокращение сосновых лесов можно связывать в первую очередь с пожарами (поскольку в % от лесопокрытой площади изменения площадей сосняков не имеют тренда к снижению площадей), то сокращение березовых лесов, видимо, имеет более глобальный характер, т.к. тренд сокращения площадей достоверен как для абсолютных значений изменения площадей (при $r=-0.95$ и $\alpha=0.10$), так и для процентного соотношения (при $r=-0.87$ и $\alpha=0.15$). К 2014 г. на позиции вторыми по площади распространения и в процентном соотношении выходят липовые леса.

Вплотную к березовым по площади и в процентном соотношении приближаются леса из чёрной ольхи (рис. 3б, г). При этом пока только увеличение площадей ольховых лесов достоверно и значимо ($r=0.99$ при $\alpha=0.10$). В тоже время дубовые, осиновые и еловые леса сокращают свое присутствие в заповеднике как по площади, так и в процентном соотношении (рис. 3б, г). Хотя пока только для сокращения площадей осиновых лесов эти изменения статистически достоверны и значимы ($r=0.99$ при $\alpha=0.15$). Как видно из рисунка 3, особенно существенные изменения в типах леса заповедника начали происходить после 1980-х годов, что очень логично можно соотнести с усилившимися климатическими изменениями в этот период (Кузьмина, Трешкин, 2017б, 2018; Кузьмина и др., 2013).

Таким образом, изменения в распределении типов лесов в заповеднике в сторону уменьшения лесов с более сухими типами местообитаний (сосновых, березовых, дубовых) и увеличения площадей лесов более гидроморфных местообитаний (липовых и черноольховых) можно объяснить естественными причинами, а именно, гумидным вариантом климатических изменений, характерным для Центральной России (Кузьмина, Трешкин, 2017б, 2018; Кузьмина и др., 2013). Эти климатические изменения приводят к увеличению обводнения территорий и их заболачиванию не только в поймах и долинах рек, но также и на водосборных территориях.

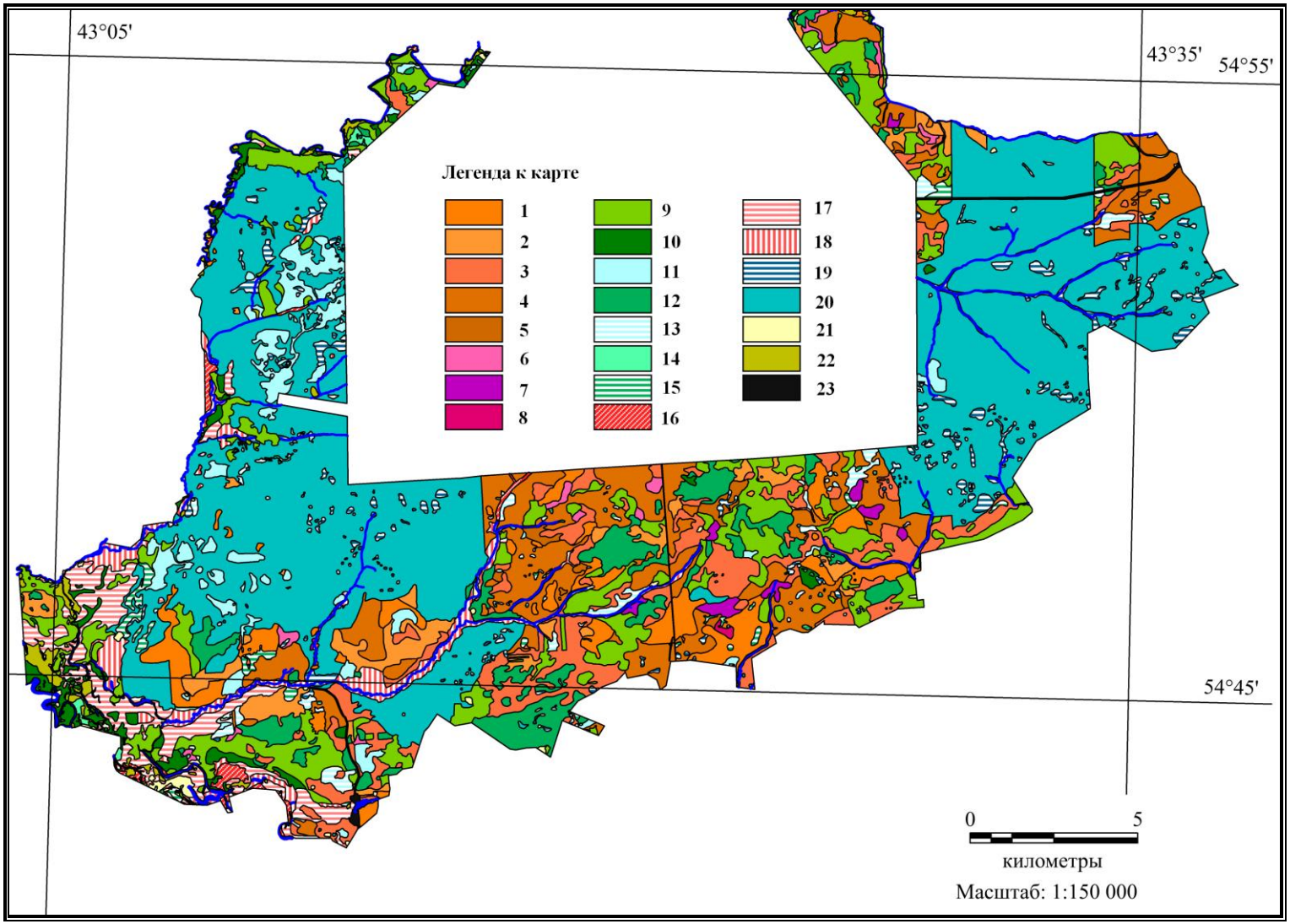


Рис. 2. Карта растительности Мордовского заповедника. **Fig. 2.** Map of Mordovsky Nature Reserve vegetation.

Условные обозначения к рис. 2. Сосновые леса и редколесья: 1) лишайниковые и злаковые, 2) орляковые, 3) широкотравные, 4) Елово-сосновые кустарничково-зеленомошные, 5) сфагновые; Еловые леса: 6) злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса, 7) зеленомошные и черничные леса, 8) сфагновые леса и редколесья; Широколиственные леса: 9) злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса, 10) (преимущественно липовые) крапивовые леса и редколесья переувлажненные; Мелколиственные леса: 11) Берёзовые злаковые леса, 12) Берёзовые и осиновые широкотравные и волосистоосоковые леса, 13) Берёзовые и осиновые кустарничковые и молиниевые леса, 14) Осиновые крапивовые леса, 15) Осиновые и берёзовые влажнотравные и сфагновые редколесья, 16) Черноольховые широкотравные леса, 17) Черноольховые таволгово-крапивовые леса, 18) Черноольховые осоковые, сфагновые и болотно-травяные леса и редколесья; Болота: 19) Осоково-сфагновые и осоковые; Гари: 20) с возобновлением берёзы и осины; Луга: 21) суходольные, 22) пойменные; 23) Дороги и населённые пункты.
Legend to Fig. 2. Pine forests and sparse forests: 1) with lichen and grass, 2) with eagle fern, 3) with broad-leaved grasses, 4) spruce-pine bushes-moss, 5) with sphagnum; Spruce forests: 6) with grass, *Carex pilosa* and broad-leaved grasses, 7) with moss and blueberry, 8) sphagnum forests and sparse forests; Broad-leaved forests: 9) with grass, *Carex pilosa* and broad-leaved grasses, 10) (mostly, linden forests) nettle overmoistened forests and sparse forests; Small-leaved forests: 11) birch with grass, 12) birch with pine, broad-leaved grasses and *Carex pilosa*, 13) birch with pine, bushes and Molinia, 14) aspen with nettle, 15) aspen and birch sparse forests with moist grasses and sphagnum, 16) black alder with broad-leaved grasses, 17) black alder with Filipendula and nettle, 18) black alder forests and sparse forests with sedges, sphagnum and moor with grasses; Moors: 19) with sedge-sphagnum and sedges only; Burn spots: 20) with recovering birch and aspen; Meadows: 21) uplands, 22) floodlands; 23) roads and human settlements.

Основные типы лесов заповедника

Сосновые леса. Значительную часть территории (8838.2 га или 27.4%) занимают леса с преобладанием сосны в древесном ярусе. На территории, не занятой свежими гарями, они является преобладающей формацией лесов заповедника. Сосновые леса преобладают на повышенных территориях с почвами лёгкого гранулометрического состава, подзолистыми, низким уровнем грунтовых вод (Проект организации ..., 1980). Сосняки заповедника каждого типа имеют различную степень сомкнутости – от 0.2 до 0.7. Иногда небольшая сомкнутость обусловлена экстремальными условиями увлажнения (в сухих лишайниковых и злаковых сосняках, в заболоченных сфагновых сосняках, на окраинах болот), иногда – естественным изреживанием первого яруса древостоя (в старых сосновых орляковых, широкотравных, зеленомошных лесах).

Сосновые леса и редколесья исследуемой территории можно подразделить на: 1) сосновые лишайниковые и злаковые, 2) сосновые орляковые, 3) сосновые широкотравные, 4) елово-сосновые кустарничково-зеленомошные, 5) сосновые сфагновые.

1) Сосновые лишайниковые и злаковые леса и редколесья. Занимают хорошо дренированные участки повышенных территорий на плакорах и ледниковых террасах, приуроченных к древнеаллювиальным и флювиогляциальным пескам. Почвы подзолистые, песчаные (Проект организации ..., 1980). Площадь лесов этого типа составляет 1265.0 га (4% территории заповедника). Коэффициент сомкнутости древостоя в сообществах этих типов не превышает 0.4-0.5. Эти леса особенно подвержены пожарам, поэтому большая их часть является стадией послепожарной сукцессии, и представляет собой либо сравнительно молодой разреженный лес с одновозрастным древостоем, восстанавливающийся после пожара, уничтожившего прежнее растительное сообщество, либо носит следы низового

пожара (фото 1, 2). Средняя высота древостоя колеблется от 15 до 25 м, по составу сосна абсолютно преобладает, как небольшая примесь встречаются берёза и дуб. Подрост отсутствует или представляет собой редкие экземпляры сосны, берёзы, дуба.

Таблица 2. Изменение площадей лесообразующих пород и безлесных сообществ Мордовского заповедника за последние 78 лет. **Table 2.** Changes of areas of forest-forming species and treeless communities of Mordovsky Nature Reserve during the last 78 years.

Доминирующая древесная порода	**Данные 1936-1938 гг.**		**Данные 1960 г.**		**Данные 1979-80 гг.**		**Данные 2014 г.**	
	га	**%***	**га**	**%**	**га**	**%**	**га**	**%**
Леса								
Сосна	21401	46.8	14550.3	50.5	17400	70.3	8840	47.7
Ель	1723	3.8	647.8	2.2	1130	4.6	342	1.8
Дуб	432	0.9	468.6	1.6	528	2.1	123	0.7
Берёза	12380	27.1	7681.0	26.7	2480	10.0	2242	12.1
Осина	5196	11.4	2598.0	9.0	н/д**	н/д	1089	5.9
Ольха чёрная	1730	3.8	1892.0	6.6	2045	8.3	2212	11.9
Липа	2835	6.2	865.8	3.0	1085	4.4	3609	19.5
Ива	н/д	н/д	103.0	0.4	17	0.1	н/д	н/д
Вяз	н/д	н/д	н/д	н/д	57	0.2	33	0.2
Клён	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	27	0.1
Всего лесопокрытая площадь	45697	100	28807.5	100	24742	100	18517	100
Безлесные территории								
Гари	н/д	–	н/д	-	н/д	-	12130	37.6
Луга	540	1.0	н/д	-	н/д	-	379	1.2
Вырубки	4507	8.4	н/д	-	н/д	-	н/д	-
Всего безлесная территория	53747	100	30139	100	н/д	-	32248	100

Примечания к таблице 2: * – приведён процент от покрытой лесом площади земель заповедника; **н/д – нет данных. **Notes to Table 2: *** – percent of the forest area in the reserve; **н/д – no data.

Подлесок редкий, состоит из отдельно произрастающих экземпляров *Genista tinctoria*, *Cytisus ruthensis*, *Sorbus aucuparia*, *Frangula alba*. Травяно-кустарничковый ярус имеет проективное покрытие от 5% в лишайниковых сосняках до 60% в злаковых. Преобладают *Agrostis teneus*, *Calamagrostis arundinaceae*, *C. epigeos*, *Festuca pretense*, *Melica nutans*, *Anthoxantum odoratum*, *Chimaphilla umbellate*, *Convallaria majalis*, *Polygonatum officinale*, *Vaccinium vitis-idaea*. Также встречаются *Anthennaria dioica*, *Solidago virgaurea*, *Campanula rotundifolia*, *Lusula multiflora*, *Hieraclium* sp., *Melampyrum nemorosum*, *Rubus saxatilis*, локально распространены *Pyrola chlorantha*, *Oxalis acetosella* и *Trientalis europaea*.

Мхово-лишайниковый ярус представлен лишайниками рода *Cladonia*, образующими плотный сомкнутый ярус в наиболее сухих местообитаниях в сочетании со мхами – *Dicranum undulatum*, а также *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum juniperinum*. Лишайниковые и сухие

злаковые сосняки заповедника морфологически сходны, часто встречается чередование лесов этих двух типов.

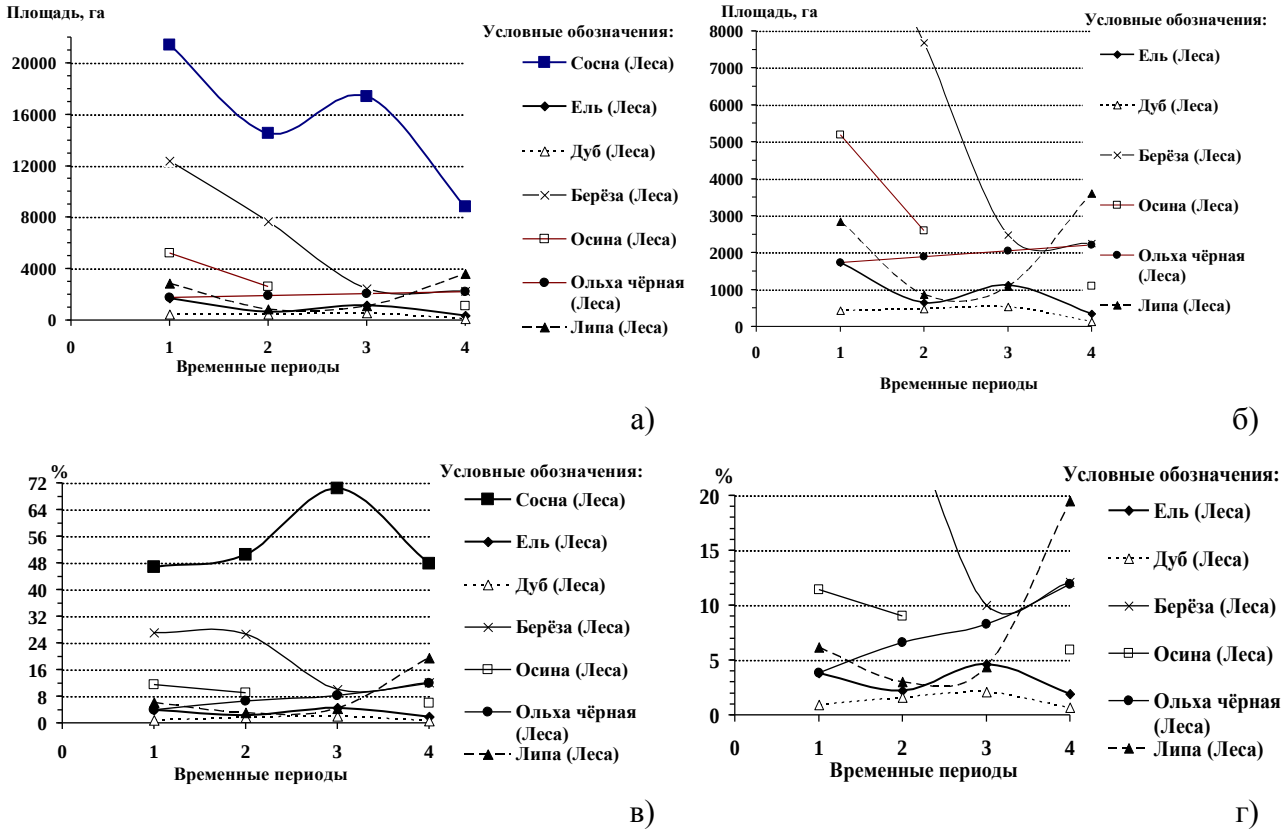


Рис. 3. Изменение площадей основных лесообразующих пород в гектарах (га) и в % от всей лесопокрытой площади Мордовского заповедника за последние 78 лет. *Условные обозначения.* По оси OX цифрами обозначены временные периоды: 1 – 1936-1938 гг., 2 – 1960 г., 3 – 1979-1980 гг., 4 – 2014 г. **Fig. 3.** Changes of areas of the main forest-forming species in hectares (ha) and percent (%) of the total forest area of the Mordovski Nature Reserve during the last 78 years. *Notes:* on the OX axe the numbers indicate the time periods: 1 – 1936-1938, 2 – 1960, 3 – 1979-1980, 4 – 2014.

2) Сосновые орляковые леса и редколесья. Сообщества данного типа распространены на приподнятых участках плакоров и речных террас в пределах распространения песчано-супесчаных оподзоленных почв (Проект организации ..., 1980). Площадь лесов этого типа составляет 925.4 га, что составляет 2.9% площади заповедника. В лесах данного типа *Pinus sylvestris* является безусловным доминантом сообществ (фото 3). Примесь *Picea abies*, *Betula pendula* незначительна. Сомкнутость крон сравнительна невелика, колеблется от 0.2 до 0.5, иногда достигая 0.6. Высота древостоя составляет 17-30 м. Сопутствующие древесные породы имеют в среднем такую же высоту, как и эдификатор сообщества, пользуясь низкой сомкнутостью древостоя и реализуя возможности для роста.

Подрост средней густоты и густой, состоящий из *Betula pendula*, *Picea abies*. *Pinus sylvestris* в ярусе подроста редка, в нижнем ярусе представлена незначительным количеством маложизнеспособных проростков. Берёза достигает высоты 2-5 м, а ель возобновляется под пологом сосны наиболее успешно, достигая высоты 15 м. Можно предполагать, что часть сосновых орляковых лесов представляет собой промежуточную стадию формирования елово-сосновых, а в будущем – еловых лесов. В нескольких описаниях также зафиксирован

редкий *Quercus robur* и *Tilia cordata*. Последняя достигает местами большого обилия, но большая её часть имеет кустарниковую (до 1 м высотой) форму и в ходе сукцессий, очевидно не будет участвовать в формировании древостоя.

Фото 1. Сосновый зеленомошно-лишайниковый лес после пожарной сукцессии. **Photo 1.** Pine forest with moss and lichen after succession, caused by fire.

Фото 2. Сосновый злаковый лес, восстановленный после низового пожара. **Photo 2.** Pine forest with grass, recovered after fire in the lowlands.

Фото 3. Берёзово-сосновый орляковый лес, естественно-восстанавливающийся на водосборе. **Photo 3.** Birch and pine forest with eagle fern, naturally recovering on a watershed.

Подлесок в орляковых сосновых лесах местами достигает значительной густоты, образуя сомкнутый ярус. Доминантом яруса является *Sorbus aucuparia*, изредка – *Frangula alnus*. Также были отмечены в небольшом обилии: *Euonymus europaea*, *Padus avium*, *Rubus idaeus*, *Sambucus nigrum*, *Viburnum opulus*.

Травяно-кустарничковый ярус имеет различное проективное покрытие, изреживаясь на

участках с развитым подростом и подлеском и достигая 60-70% на территориях со слабым развитием других ярусов.

Доминируют в травяном покрове *Convollaria majalis*, *Pteridium aquilinum*. Также отмечено произрастание *Antennaria dioica*, *Calamagrostis arundinaceae*, *C. epigeos*, *Chenopodium album*, *Eleocharis acicularis*, *Epilobium angustifolium*, *Galium boreale*, *Hieraclium umbellatum*, *Impatiens noli-tangere*, *Lathyrus pratensis*, *Lycopodium complanatum*, *Maianthemum bifolium*, *Melampyrum nemorosum*, *Melica nutans*, *Orthilia secunda*, *Oxalis acetosella*, *Phragmites australis*, *Pimpinella saxifrage*, *Potentilla erecta*, Pyrola *rotundifolia*, *Rubus saxatilis*, *Rumex acetosa*, *Solidago virgaurea*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Vicia cracca*, *Viola hirta*, *V. mirabilis*.

Мохово-травяной ярус слабо развит, местами встречаются пятна *Dicranum* и *Polytrichum*.

3) Сосновые широкотравные леса и редколесья. Леса данного типа занимают в пределах заповедника 2292.0 га или 7.1% площади заповедника (фото 4). Леса занимают участки выровненных и слабонаклонных водоразделов. Почвы подзолистые или бурые лесные, слабооподзолистые (Проект организации ..., 1980). Встречаются как участки с одной только сосной в первом ярусе древостоя, так и со значительной долей других пород – ели, берёзы, липы, реже – осины или дуба.

Фото 4. Сосновый широкотравный лес. **Photo 4.** Pine forest with broad-leaved grasses.

Эдафические условия, обуславливающие развитие широкотравья, также способствуют и возобновлению широколиственных пород, слагающих второй ярусы древостоя или подроста. Высота первого яруса достигает 30-35 м, на больших участках он изреживается (коэффициент сомкнутости крон падает до 0.3), что тоже обуславливает большую степень развития подроста. В первую очередь активно возобновляется липа, принимающая на различных участках кустарниковую (до 2 м высотой) или древовидную форму; также часто встречается клён. Высота широколиственных пород (не считая старых экземпляров, растущих как примесь в первом ярусе) достигает 10-15 м, в отдельных случаях до 20 м. Также на некоторых участках конкуренцию липе и клёну составляет ель, однако её участие в возобновлении значительно меньше и приурочено, скорее всего, к локальным изменениям

почвенно-грунтовых условий.

Подлесок редкий или среднего обилия, по-видимому, кустарники, такие как *Corylus avellana*, *Euonymus europaea*, *Lonicera xylosteum*, *Sorbus aucuparia* часто не могут развиться под пологом липы и клёна (на отдельных участках плотные стелющиеся заросли липы препятствуют развитию и травяного яруса), поэтому произрастают редко, одиночно или небольшими группами. Изредка наблюдается развитие *Rubus idaeus* или *R.caesius*.

В травяном ярусе доминируют *Aegopodium podagraria*, *Asarum europaea*, *Carex lasiocarpa*, *Convallaria majalis*, *Fragaria vesca*, *Glechoma hederaceae*, *Mercurialis perennis*. Также встречаются *Anthyrium filix-femina*, *Chelidonium majus*, *Dryopteris filix-mas*, *Galium odoratum*, *Geum urbanum*, *Impatiens noli-tangere*, *Lamium maculatum*, *Lathyrus vernus*, *Matteuccia struthiopteris*, *Melampyrum pratense*, *Rubus saxatilis*, *Stellaria graminea*, *S. longifolia*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium myrtillus*. Мхи отсутствуют в лесах данного типа, изредка произрастают в незначительном количестве *Dicranum spp*. и *Pleurozium schreberi*.

Структура этих лесов, в особенности, наличие хорошо развитого яруса широколиственных пород, говорит о том, что экологические условия (увлажнённости территории, температурного режима) изменились, причём эти изменения влияли на сукцессии около 25 лет с момента проведения исследований (июль-август 2014 г.).

4) Елово-сосновые кустарничково-зеленомошные леса и редколесья. Эти леса в пределах заповедника занимают площадь в 3177.2 га, то есть 9.9% площади заповедника (фото 5).

Фото 5. Сосновый зеленомошный лес. **Photo 5.** Pine forest with green moss.

Сообщества занимают части склонов и выровненных поверхностей с неглубоким залеганием грунтовых вод. Почвы подзолистые, слабо- и среднеоподзоленные, местами с признаками оглеения или слабо развитым торфяным горизонтом (Проект организации ..., 1980). Сосна в пределах сообществ этого типа имеет значительную среднюю высоту – от 25 до 35 м. Соответственно, сомкнутость верхнего яруса древостоя невелика (не больше 0.5). Характерной особенностью этого типа леса является непременное участие ели в составе сообщества. Чаще всего ель представлена экземплярами различной высоты – от годовалого

подроста и вплоть до старых деревьев, входящих в состав первого яруса (доля ели в составе первого яруса достигает 50%). Из-за такой возрастной дифференциации иногда нельзя выделить отдельно ярус подроста и ярусы древостоя. Также этот факт указывает на то, что переход от сосновых к еловым лесам проходит в сообществах этого типа давно и постепенно и обусловлен естественным ходом сукцессий. Также в составе первого яруса древостоя периодически присутствует берёза (чаще всего как незначительная примесь), а в подросте ель периодически заменяется дубом или липой, что можно связать с локальными изменениями почвенно-грунтовых условий.

Подлесок сложен *Sorbus aucuparia* и *Frangula alnus*. Местами подлесок представлен отдельными угнетёнными экземплярами, но в некоторых случаях составляет сомкнутый ярус. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает *Vaccinium myrtillus*, также большого обилия достигают *Oxalis acetosella, Maianthemum bifolium*, локально – *Pteridium aquilinum*. Также встречаются *Anthyrium filix-femina, Convallaria majalis, Dryopteris filix-mas, Fragaria vesca, Gymnocarpium dryopteris, Lusula multiflora, Lycopodium complanatum, Melampyrum pretense, M. nemorosum, Orthilia secunda, Rubus saxatilis, Solidago virgaurea, Trientalis europaea, Vaccinium vitis-idaea*.

Мохово-лишайниковый ярус хорошо развит, как правило, образует сплошной покров. Преобладает *Pleurozium schreberi*, также широко распространены *Polytrichum juniperinum, Dicranum undulatum*. В микропонижениях встречаются синузии *Polytrichum commune*, мхов рода *Sphagnum*, а на микроповышениях – лишайников рода *Cladonia*.

5) Сосновые сфагновые леса и редколесья. Небольшие участки этих лесов (160.1 га или 0.5% от общей площади заповедника) распространены в пределах замкнутых локальных понижений во внепойменных местообитаниях и поймах верховий малых рек и ручьёв. Почвы торфянистые (Проект организации ..., 1980). Древостой сфагновых сосняков характеризуется высотой 24-30 м для местообитаний со слабо выраженными процессами заболачивания. На наиболее заболоченных участках средняя высота уменьшается, образуя экотон между сосновым лесом и болотом. По составу и структуре сфагновые сосняки схожи с зеленомошными – небольшая примесь берёзы в древостое, ель занимает до 50% древостоя и также образует густой или среднего обилия разновозрастный подрост. Однако эдафические условия обуславливают полное отсутствие широколиственных пород в этих сообществах.

Как и в зеленомошных сосняках, подлесок, состоящий из *Sorbus aucuparia* и, в меньшей степени, *Frangula alba* варьируется от редких экземпляров до густого, сомкнутого яруса. Травяно-кустарничковый ярус представлен в первую очередь кустарничками рода *Vaccinium – V. myrtillus, V. uliginosum, V. vitis-idaea*, а также *Molinia coerulea* и осоками *Carex lasiocarpa, C. canescens*. В мохово-лишайниковом ярусе доминируют мхи рода *Sphagnum*, также отмечены *Polytrichum commune, Pleurozium schreberi*, на микроповышениях в небольшом количестве встречаются лишайники рода *Cladonia*.

Еловые леса занимают небольшую площадь – 342.0 га. Это составляет 1% от площади заповедника. Такая слабая их представленность объясняется, в первую очередь, широким распространением почв лёгкого гранулометрического состава. К тому же исследуемая территория находится на южной границе ареала ели, и климат в целом способствует развитию сообществ с преобладанием широколиственных пород или сосны, а не ели. Тем не менее в последние десятилетия на многих участках заповедника идёт активное возобновление ели. Согласно Н.И. Кузнецову (1960), эти леса произрастают в пределах речных долин, где расположены на надлуговых террасах. Еловые леса заповедника можно подразделить на: 6) еловые злаковые, волосистоосоковые и широкотравные, 7) еловые зеленомошные и черничные, а также 8) еловые сфагновые.

6) Еловые злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса. Площадь распространения этих лесов в заповеднике составляет 160.7 га (0.5% площади заповедника).

Небольшие участки этих растительных сообществ приурочены к чернозёмовидным, суглинистым почвам, местами оглеенным, либо – бурым лесным слабо- и среднеоподзоленным супесчаным, в пределах ровных поверхностей как на водораздельных поверхностях, так и в пределах высокой поймы (Проект организации ..., 1980). В лесах данного типа ель произрастает в сочетаниях с другими породами – берёзой, сосной, осиной, липой (фото 6-7). При этом доля ели может не превышать 50%. Ель чаще находится в первом ярусе высотой 22-30 м вместе с другими породами, но иногда составляет второй ярус высотой 14-16 м. Подрост часто густой, состоящий из широколиственных пород – липы, дуба, образующих густую поросль на участках разреженного древостоя или по окнам роста.

Подлесок также достигает значительного развития, состоит из *Sorbus aucuparia, Corylus avellana, Euonymus europaea*. Травяно-кустарничковый ярус хорошо развит, в нём большого обилия достигают *Melica nutans, Calamagrostis arundinaceae, Carex pilosa, Lathyrus vernus, Asarum europaea, Mercurialis perensis*. Также встречаются *Stellaria longifolia, Fragaria vesca, Urtica dioica, Gymnocarpium dryopteris, Anthyrium filix-femina*. Мхи и лишайники в лесах этого типа мало распространены; в незначительном обилии встречаются *Dicranum umbellatum* и *Pleurozium schreberi*.

7) Еловые зеленомошные и черничные леса. В пределах заповедника ельники-зеленомошники распространены на площади 166.4 га (0.5% площади заповедника). Произрастают в условиях большего увлажнения и худшего минерального питания, чем предыдущая группа, занимая ровные участки водоразделов со слабодерновыми слабо- и среднеподзолистыми супесчаными почвами; на пониженных участках – торфянисто-подзолистыми оглеенными опесчаненными (Проект организации ..., 1980). Леса этого типа имеют различную структуру, высота древостоя в них на разных участках колеблется от 17 до 30 м, коэффициент сомкнутости крон также сильно различается. К ели примешиваются берёза, чёрная ольха, сосна. В большей части ельников-зеленомошников идёт активное возобновление ели, подрост разновозрастный, переходящий в древостой. Иногда подрост составлен широколиственными породами – липой, дубом.

Фото 6. Еловый злаковый лес.
Photo 6. Spruce forest with grasses.

Фото 7. Еловый широкотравный лес.
Photo 7. Spruce forest with broad-leaved grasses.

Подлесок составлен *Sorbus aucuparia*, также отмечены *Salix cinerea, Viburnum opulus*. Травяно-кустарничковый ярус имеет проективное покрытие около 50%, в нём преобладают *Oxalis acetosella, Vaccinium myrtillus*, также встречаются *Convallaria majalis, Anthyrium filix-femina, Fragaria vesca, Solanum dulcamara*. Моховой ярус сомкнутый, на большей части территорий сомкнутый. Были отмечены *Polytrichum juniperinum, P. commune, Ptilium crista-*

castrensis, Pleurozium schreberi, Hylocomium splendens, Dicranum scoparium.

8) Еловые сфагновые леса и редколесья (фото 8) произрастают в условиях избыточного увлажнения, преимущественно на участках пойм в меандровых понижениях либо на речных террасах с неглубоким залеганием грунтовых вод. Почвы торфяно-болотные (Проект организации ..., 1980). Они мало распространены в пределах заповедника, их общая площадь составляет 14.9 га. По структуре древостоя они схожи с ельниками-зеленомошниками.

Кустарниковый ярус состоит из *Sorbus aucuparia, Frangula alnus, Padus avium*. Встречаются также участки распространения *Rubus idaeus*. В травяно-кустарничковом ярусе, в зависимости от эдафических характеристик и микрорельефа, могут доминировать *Phragmites australis, Typha latifolia, Caltha palustris, Vaccinium myrtillus, Lysimachia vulgaris, Phalaris arundinaceae, Glyceria* sp., *Carex cespitosa, C. lasiocarpa, Equisetum sylvaticum*. Моховой покров плотный, часто сплошной, состоит преимущественно изо мхов рода *Sphagnum*.

Широколиственные леса. Основной широколиственной породой заповедника является липа сердцелистная. Леса с её преобладанием занимают 3609.2 га в пределах заповедника, что составляет 11.2% от общей площади ООПТ. Липа распространена как на водораздельных поверхностях, так и в речных долинах. Незначительные площади занимают сообщества с преобладанием дуба (122.9 га или 0.4% площади заповедника), вяза (33.2 га), клёна (26.9 га). Леса с преобладанием широколиственных пород тяготеют к богатым хорошо дренируемым почвам. Широколиственные леса заповедника можно разделить на две группы, различающиеся главным образом режимами и высотой стояния грунтовых вод.

Фото 8. Осиново-сосново-еловое кустарниковое влажнотравно-сфагновое редколесье.
Photo 8. Aspen-pine-spruce sparse forests with bushes, moist grasses and sphagnum.

9) Широколиственные злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса (фото 9, 10). В пределах заповедника эти леса занимают площадь в 3268.2 га (10.1% площади заповедника). В эту большую группу входят леса с преобладанием липы, клёна остролистного, дуба черешчатого. Дубовые сообщества приурочены к хорошо

дренированным участкам пойм с чернозёмовидными почвами, а также на надпойменных террасах с бурыми лесными супесчаными почвами. Липовые (реже – кленовые) леса этих типов занимают среднеувлажнённые участки водоразделов с бурыми лесными среднеоподзоленными супесчаными почвами (Проект организации ..., 1980).

Фото 9. Липовый широкотравно-волосисто-осоковый лес. **Photo 9.** Linden forest with broad-leaved grass and *Carex pilosa*.

Фото 10. Липовый злаковый лес. **Photo 10.** Linden forest with grasses.

Липа присутствует во всех сообществах данного типа, образуя чистопородные насаждения или составляя древостой с дубом и клёном. Как примесь в древостое местами встречаются сосна, ель, осина, берёза, чёрная ольха. В ходе обследования заповедника были выявлены насаждения различной высоты – от 12 до 30 м. Ярус подроста хорошо развит, часто сомкнут. Преобладают в нём липа или клён.

Подлесок местами достигает значительной густоты. В его составе отмечены *Acer negundo, Corylus avellana, Euonymus europaea, Frangula alnus, Rubus idaeus, Sorbus aucuparia*. В поймах встречается *Padus avium*. Доминантами травяного яруса могут быть следующие виды: *Aegopodium podagraria, Agrostis capilaris, A. stolonifera, Asarum europaea, Carex pilosa, Convallaria majalis, Dryopteris filix-mas, Equisetum sylvaticum, Galium odoratum, Geum urbanum, Glechoma hederacea, Impatiens noli-tangere, Melampyrum pratense, Mercurialis perensis*. Также отмечены *Aconitum septentrionale, Anthyrium filix-femina, Chelidonium majus, Epilobium angustifolium, Lamium maculatum, Lathyrus vernus, Matteuccia struthiopteris, Melampyrum nemorosum, Polygonatum multiflorum, Rubus saxatilis, Scirpus sylvaticus, Stellaria longifolia, Urtica dioica, Vaccinium myrtillus*. Мхи и лишайники в лесах данного типа не встречаются.

10) Широколиственные (преимущественно липовые)крапивовые леса и редколесья переувлажненные (фото 11, 12). Эта группа типов леса занимает в заповеднике 524.1 га, то есть 1.6% площади заповедника. Согласно исследованиям 1979 года (Проект организации ..., 1980), сообщества данных типов сформированы в пределах среднедренированных участков пойм на чернозёмовидных оглеенных почвах. Однако проведённые в 2014 году исследования показали, что участки липовых крапивовых лесов сформировались и в пределах водораздельных поверхностей, что указывает на смену условий увлажнённости, связанное с естественными изменениями климата (Кузьмина, 2017; Кузьмина, Трёшкин, 2017а, 2018), обусловившими появление в широколиственных водораздельных лесах участков с перманентно высоким уровнем стояния грунтовых вод и, как следствие, с признаками

оглеения в почвах.

Доминантом древесного яруса в таких сообществах является липа, реже дуб или клён остролистный. Также в поймах рек встречаются небольшие участки вязовых (*Ulmus glabra*) снытево-крапивовых лесов. Остальные породы (сосна, ель, берёза, осина и чёрная ольха) встречаются как примесь. Высота древостоя различна, колеблется от 12 до 30 м. Подрост редкий или отсутствует в пойменных местообитаниях, однако вне пойм часто формируется ярус липового подроста, реже – дуба, клёна.

Фото 11. Липовый крапивовый лес.
Photo 11. Linden forest with nettle.

Фото 12. Вязовый крапивовый лес.
Photo 12. Elm forest with nettle.

Подлесок состоит из разреженно произрастающих экземпляров *Eunymus europaea*, *Frangula alnus*, небольшого количества *Rubus idaeus* и *R. caesius*. Однако в пойменных местообитаниях часто сформирован ярус *Padus avium*.

Травяный ярус сложен *Urtica dioica*, иногда в сочетании с *Aegopodium podagraria*. Под их пологом часто формируется второй травяной ярус из *Glehoma hederacea*. Другие виды встречаются редко и в небольшом обилии. Мхи и лишайники отсутствуют, изредка встречаются небольшие количества мхов рода *Mnium*.

Эти леса маловидовые по составу. Поскольку *Aegopodium podagraria* и *Urtica dioica* являются видами-индикаторами изменения почвенно-грунтового увлажнения, то сокращение видового состава в травяном ярусе связано также с изменениями увлажнённости территорий в результате гидрологических и климатических изменений (Кузьмина, Трёшкин, 2017б).

Мелколиственные леса. Мелколиственные леса территории заповедника можно поделить на две группы: к первой относятся леса с преобладанием осины *Populus tremula* (1089.7 га или 3.4% от площади заповедника) и берёзы *Betula pendula*, *B.pubescens* (2242.4 га или 7% от площади заповедника). Во вторую группу входят леса с преобладанием чёрной ольхи *Alnus glutinosa* (2212 га, что составляет 6.9% от площади ООПТ). Если осиновые и особенно берёзовые леса занимают самые различные местообитания, то черноольшанники распространены в переувлажнённых поймах рек.

Мелколиственные леса заповедника можно подразделить на берёзовые и осиновые, среди которых выделяются злаковые, широкотравные и волосистоосоковые, кустарничковые, крапивовые, влажнотравные и сфагновые, а также на черноольховые широкотравные, таволго-крапивовые, осоковые, сфагновые, болотно-травяные.

11) Берёзовые злаковые леса. Злаковые берёзовые леса занимают в заповеднике площадь 1027.9 га, то есть 3.2% от площади заповедника. Приурочены они к плоским поверхностям водоразделов. Почвы светло-бурые лесные, слабооподзоленные супесчаные и песчаные

(Проект организации ..., 1980). В лесах данного типа древостой одноярусный, высотой от 15 до 30 м. Преобладает берёза, однако до 50% занято другими породами – сосной и елью, реже – липой, дубом и осиной. Подрост, местами густой, сомкнутый, в зависимости от условий увлажнения и почвенных характеристик, сложен елью или липой.

Подлесок, сложенный *Sorbus aucuparia*, с участием *Frangula alnus*, среднего обилия или густой, но редко образует сомкнутый ярус. Доминанты травяного яруса – *Calamagrostis arundinaceae, Convallaria majalis, Deschampsia cespitosa, Millium effusum, Pteridium aquilinum, Rubus saxatilis*. Также произрастают *Asarum europaea, Cirsium heterophyllum, Equisetum sylvaticum, Melampirum nemorosum, Stellaria longifolia, Vaccinium myrtillus*. Мохово-лишайниковый ярус плохо развит, но местами встречаются пятна *Dicranum scoparium, Polytrichum juniperinum*, лишайников рода *Cladonia*.

12) Берёзовые и осиновые широкотравные и волосистоосоковые леса (фото 13). Эти леса занимают в заповеднике площадь 1604.1 га, то есть 5.0% всей территории. Эта группа типов леса включает в себя сообщества, занимающие плоские поверхности водоразделов. Почвы бурые лесные слабоподзолистые супесчаные, характеризующиеся средним увлажнением (Проект организации ..., 1980). В древостое преобладают берёза или осина, образующие, как однопородные насаждения, так и сочетания с другими породами – липой, елью, сосной, клёном, дубом. Леса эти являются вторичными, возникшими на месте гарей или сосновых лесов. В подавляющем большинстве лесов этого типа идёт активное возобновление ели, липы (реже – клёна) на разных этапах. На некоторых участках часть широколиственного подроста уже переходит в ярус древостоя, образуя широколиственно-мелколиственные леса.

Фото 13. Берёзовый орляково-вейниковый лес.
Photo 13. Birch forest with eagle fern and reed grass.

Ярус подлеска разреженный, что может быть объяснено сильным развитием подроста. Преобладают в нём *Sorbus aucuparia, Corylus avellana*, реже отмечены *Euonymus europaea, Frangula alnus, Lonicera xylosteum*, также вблизи опушек отмечен *Acer negundo*. В травяном ярусе преобладают *Aegopodium podagraria, Asarum europaea, Carex lasiocarpa, Convollaria*

majalis, Galium odoratum, Gllechoma hederaceae, Lamium maculatum. Также отмечены *Actaea spicata, Anthyrium filix-femina, Carex digitata, Dryupteris filix-mas, Filipendula ulmaria, Fragaria vesca, Gymnocarpium dryopteris, Impatiens noli-tangere, Lathyrus vernus, Maianthemum bifolium, Matteuccia struthiopteris, Melampyrum nemorosum, M. pratense, Mercurialis perensis, Rubus saxatilis, Urtica dioica*. Мхи и лишайники не распространены в описываемых лесах.

13) Берёзовые и осиновые кустарничковые и молиниевые леса (фото 14). Площадь этих лесов в пределах заповедника составляет 343.8 га, то есть около 1.1% территории. Леса этой группы произрастают на пониженных участках водоразделов и речных долин, характеризующихся близким залеганием грунтовых вод. Почвы дерново-подзолистые, супесчаные, оглеенные (Проект организации ..., 1980). Высота древостоя колеблется от 20 до 30 м. К мелколиственным породам – берёзе и осине, примешиваются дуб, ель, сосна, липа. Подрост густой, что указывает на то, что эти леса активно трансформируются. Под пологом мелколиственных пород восстанавливаются ель или липа.

Подлесок редкий или среднего обилия, состоит из *Sorbus aucuparia*. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает *Vaccinium myrtillus*, реже *Molinia caerulea*, также распространены *Convallaria majalis, Majanthemum bifolium*, отмечены *Asarum europaeum, Calamagrostis arundinaceae, Lysimachia vulgaris, Pteridium aquilinum, Rubus saxatilis, Trientalis europaea, Vaccinium vitis-idaea*. Мхи представлены видами рода *Dicranum*, произрастающим пятнами, и небольшим количеством *Sphagnum*, произрастающим в понижениях.

14) Осиновые крапивовые леса (фото 15). В пойменных местообитаниях с повышенным уровнем стояния грунтовых вод встречаются небольшие фрагменты осиновых крапивовых лесов. Для них характерны чернозёмовидные аллювиальные суглинистые почвы (Проект организации ..., 1980). Общая площадь сообществ этого типа составляет 40.1 га. В них осина произрастает в сочетании с липой, вязом или дубом, иногда образует однопородные участки леса. Древостой имеет высоту 20-25 м. Подрост в таких сообществах редкий, состоит из отдельно стоящих либо произрастающих в виде распластанных кустов лип.

Фото 14. Дубово-берёзовый ландышево-черничный лес.
Photo 14. Oak-birch forest may-lily and blueberry.

Подлесок редкий, отмечено произрастание *Padus avium*, также местами произрастает *Rubus caesius, R. idaeus*. Травяный ярус в целом схож с другими крапивовыми лесами заповедника – преобладают *Urtica dioica, Aegopodium podagraria, Glechoma hederacea*.

В целом леса этого типа характеризуются маловидовым составом и участием видов-индикаторов, изменения почвенно-грунтового увлажнения, что указывает на существенную трансформацию биотопов в связи с гидрологическими и климатическими изменениями (Кузьмина, Трёшкин, 2017б).

Фото 15. Осиновый снытево-крапивовый лес. **Photo 15.** Aspen forest with goutweed and nettle.

15) Осиновые и берёзовые влажнотравные и сфагновые редколесья. (фото 16, 17). Сфагновые варианты осиновых и берёзовых лесов (редколесий) в заповеднике занимают площадь 447.6 га, то есть 1.4% от общей площади ООПТ. Распространены они на выровненных пониженных участках междуречий и речных долин. Сфагновым лесам заповедника свойственны торфянисто-болотные почвы (Проект организации ..., 1980). Они отличаются малой сомкнутостью и различной высотой древостоя, в состав которого входят, помимо берёзы и осины, липа, чёрная ольха, сосна. Подрост липовый, местами густой, однако на наиболее переувлажнённых участках отсутствует.

Подлесок редкий, отмечены *Corylus avellana, Sorbus aucuparia*. В травяном ярусе преобладают *Vaccinium myrtillus, Anthyrium filix-femina*, виды осок (*Carex* spp.). В моховом покрове доминируют мхи рода *Sphagnum*, местами образующие плотный покров.

16) Черноольховые широкотравные леса (фото 18). Площади этих лесов в заповеднике составляют 153.8 га или 0.5% от общей площади. Леса данного типа занимают хорошо дренированные участки пойм с богатыми чернозёмовидными почвами. Древостой высотой 15-25 м. составлен, наряду с чёрной ольхой, липой, елью, дубом, вязом. Подрост различной густоты, преобладает в нём чёрная ольха.

Подлесок достигает значительной густоты, в нём отмечены *Acer negundo, Lonicera xylosteum, Padus avium, Ribes nigrum, Rubus caesicus, R. idaeus*. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают *Aegopodium podagraria, Athyrium filix-femina, Calamagrostis epigeos, Convallaria majalis, Impatiens noli-tangere, Melampyrum nemorosum*. Также отмечено произрастание *Filipendula ulmaria, Geum rivale, Gymnocarpium dryopteris, Lucopus europaeus, Lysimachia vulgaris, Ranunculus auricomus, Stellaria holostea, Typha latifolia, Urtica dioica*. В моховом ярусе преобладают мхи *Dicranum undulatum, Ptilium crista-castrensis*.

Фото 16. Берёзовый заболоченный влажно-травный лес. **Photo 16.** Swamped birch forest with moist grasses.

Фото 17. Берёзовый сфагновый лес. **Poto 17.** Birch forest with sphagnum.

17) Черноольховые таволго-крапивовые леса занимают большие площади речных пойм заповедника (1051.6 га или 3.3% территории заповедника). Почвы аллювиально-суглинистые, местами заболоченные, иловато-болотные, местами оторфованные (Проект организации ..., 1980). Характеризуются они средней сомкнутостью древостоя. Высота древостоя 18-25 м. Встречаются как участки однопородные, так и те, в которых ольха растёт вместе с берёзой, елью, осиной, дубом, липой, вязом. Подрост среднего обилия, преобладают в нём вяз и чёрная ольха.

Подлесок редкий, состоит по большей части из *Padus avium*. В травяном ярусе, помимо *Filipendula ulmaria* и *Urtica dioica*, отмечены *Anthyrium filix-femina, Arctium tomentosum, Lamium maculatum, Lysimachia vulgaris, Phragmites australis, Solanum dulcamara*. Мхи и лишайники в лесах данного типа отсутствуют.

Фото 18. Черноольховый широкотравный лес.
Photo 18. Black alder forest with broad-leaved grasses.

18) Черноольховые осоковые, сфагновые и болотно-травяные леса и редколесья (фото 19) занимают участки заболоченных и обводнённых пойм. Почвы иловато-болотные и торфяно-болотные (Проект организации ..., 1980). Площадь лесов этих типов составляет 1006.5 га, то есть 3.1% территории ООПТ. Древостой разреженный, высота древостоя различна от 15 до 27 м. Подрост сложен чёрной ольхой или отсутствует на наиболее переувлажнённых участках, состоит из ели на менее увлажнённых.

Фото 19. Черноольховый разнотравно-манниковый лес.
Photo 19. Black alder forest with mixed herbs and *Glyceria*.

Подлесок может быть достаточно хорошо развит, в его составе преобладают *Frangula alnus, Padus avium, Ribes nigrum, Rubus idaeus, R. nessensis, Salix acutifolia, Sorbus aucuparia,* единично отмечена *Viburnum opulus*. Травяно-кустарничковый моховой ярусы образуют различные группировки видов. В осоковых лесах доминируют *Carex nigra, C.vesicaria, C.* sp., *Erhiophorum* sp., *Filipendula ulmaria, Juncus bufonius, Lysimachia vulgaris,* на повышениях микроассоциации из *Asarum europaea, Angelica sylvestris, Pulmonaria obscura, Carex pilosa,* в подтоплениях *Phragmites australis* и *Typha latifolia*. Мхи отсутствуют (в незначительных количествах представлены виды рода *Mnium*).

В сфагновых лесах и редколесья покров мхов рода *Sphagnum* занимает 30-100% проективного покрытия. Видовой состав травяно-кустарничкового яруса мал, часто встречаются *Anthyrium filix-femina, Cicuta virosa, Juncus bufonius, Solanum dulcamara*.

В болотно-травяных черноольшанниках преобладают *Cicuta virosa, Filipendula ulmaria, Glyceria fluitans, Phragmites australis, Scirpus sylvaticus*. Также отмечены *Angelica sylvestris, Asarum europaeum, Dryopteris filix-mas, Matteuccia sthruthiopteris, Solanum dulcamara, Thyselinum palustre, Typha latifolia, Urtica dioica*. Мхи мало распространены, однако местами встречаются пятна *Polyrtichum commune* и мхов рода *Sphagnum*.

Болота. На территории заповедника находится большое количество сфагновых и осоково-сфагновых болот. Значительная часть болот находится в округлых понижениях, карстовых по происхождению. Большого размера болотные массивы не достигают. Древесная растительность на болотах отсутствует, однако часто по окраинам болот формируются полосы берёзового и соснового леса. Многие болота подверглись воздействию пожаров 2010 года. Эти участки характеризуются мозаичностью растительного покрова, часто

встречающимися заполненными водой углублениями на месте выгоревшего торфа.

19) Осоково-сфагновые и осоковые болота (фото 20, 21). Болота часто встречаются по всей территории заповедника, тяготея к пониженным выровненным водораздельным поверхностям. Однако также встречаются и участки болот, расположенные в пределах пойм. Почвы торфяно-болотные. Общая площадь болот заповедника составляет 943.0 га или 2.9% территории. Значительная часть болот расположена на зарастающих гарях, образовавшихся после пожаров 2010 года. Многие болота приурочены в своём распространении к понижениям карстового генезиса (Ремезов, 1960б). Древесная растительность представлена разреженно произрастающей берёзой (*Betula pubescens*) в угнетённом состоянии, преимущественно по окраинам болот. Большая часть болот лишена древесной растительности.

Фото 20. Молиниево-сфагновое болото, плакор. **Photo 20.** Swamp with Molinia and sphagnum, flat interfluve.

Фото 21. Осоковое болото, пойма. **Photo 21.** Swamp with sedges, floodplain.

Из кустарников присутствуют *Frangula alnus* и *Salix acutifolia*, также тяготеющие в своём распространении к окраинам болот. Доминанты травяного яруса – *Carex nigra, C. rostrata, C. vesicaria*. Также отмечены *Vaccinium uliginosum, Comarum palustre, Glyceria fluitans, Juncus bufonius, Menyanthes trifoliata, Molinia caerulea, Phragmites australis, Scirpus sylvaticus, Thyselinum palustre, Typha latifolia*. На повышениях сформированы микроассоциации из *Calamagrostis epigeios, Urtica dioica, Lysimachia vulgaris* либо *Vaccinium myrtillus* и *Linnea borealis*. На большей части болот заповедника сформирован плотный покров из мхов рода *Sphagnum*, местами с участием *Polytrichum commune, P. juniperinum*, лишайников *Alectoria* sp., *Cetraria islandica*.

Гари. Ввиду широкого распространения на территории заповедника, постпирогенные сообщества (по большей части на гарях 2010 года) являются одним из наиболее важных типов растительности территории. Располагаясь в различных ландшафтных условиях, на гарях формируются разнотравные сообщества с доминированием одного или нескольких пионерных видов. На большей части гарей идёт активное возобновление лесного полога. На момент проведения исследований, на значительной части постпирогенных сообществ территория была захламлена упавшими стволами деревьев.

20) Гари с возобновлением берёзы и осины (фото 22, 23). Большие территории (13251.5 га) покрыты гарями на месте бывших сосняков и смешанных лесов водораздельных поверхностей, образовавшимися после пожаров 2010 года. Доля земель заповедника, на которых на момент проведения полевых работ (июль-август 2014 года) происходили

послепожарные сукцессии, составляет 41.1% от общей. Гари приурочены к водораздельным поверхностям и речным террасам, так и к поймам. На момент проведения полевых исследований (июль-август 2014 года) на гарях происходило активное возобновление берёзы и осины, средняя высота которых составляла 1.5-2 м. На части пострадавших от пожара территорий сохранилась часть древостоя – чаще всего сосны, реже берёзы, в отдельных случаях – липы, дуба. Однако коэффициент сомкнутости уцелевшего древостоя в таких постпирогенных сообществах редко превышает 0.2 (максимальный зафиксированный – 0.4).

Фото 22. Сосновое кипреевое редколесье, гарь. **Photo 22.** Pine sparse forest with willow herbs, burnt spot.

Фото 23. Гарь кипреевая с возобновлением берёзы. **Photo 23.** Burn spot with willow herbs and recovering birch.

Перманентно присутствующим на гарях видом является *Chamaenerion angustifolium*, доминирующий на большей части молодых постпирогенных сообществ. Местообитания с уцелевшими элементами соснового древостоя схожи по травяному покрову другими сосновыми лесами территории (большая часть которых также сформировалась на месте старых пожаров). Их отличает наличие *Antennaria dioica*, *Convallaria majalis*, *Fragaria vesca*, *Pteridium aquilinum*. Также отмечены *Equisetum sylvaticum*, *Galium* sp., *Mercurialis perennis*, *Solidago virgaurea*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Viola canina*. Степень развития мохового яруса различна и зависит от увлажнённости конкретного участка. Сухие участки гарей лишены растительного покрова, а на переувлажнённых участках часто формируются пятна *Dicranum* spp., *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *P. juniperinum* и мхов рода *Sphagnum*.

Луга заповедника чётко делятся на два типа. К первому относятся небольшие участки суходольных лугов, расположенные среди лесных массивов. К ним же относятся открытые участки около построек заповедника. Пойменные луга территории имеют иной генезис и расположение. Пойменные луга заповедника являются растительными сообществами, особенно чувствительными к климатическим и гидрологическим изменениям. Такие проявления, как зарастание, закустаривание, обеднение видового состава, происходящие на значительной части пойменных лугов территории заповедника, говорят о влиянии гидрологических и климатических процессов на эти сообщества (Кузьмина и др., 2013; Кузьмина, Трешкин, 2017б).

21) Луга суходольные (фото 24). В пределах территории заповедника встречаются небольшие участки суходольных лугов, расположенные как на водораздельных поверхностях, так и в долинах рек. Общая площадь составляет 127.0 га (0.4% от территории ООПТ). Большая часть их не подвержена зарастанию, однако на некоторых присутствуют

разреженно или группами произрастающие *Acer platanoides*, *A. negundo*, *Betula pendula*, *Malus domestica*, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*. Кустарниковая растительность мало развита. Однако местами большого обилия достигает *Rubus idaeus*.

Фото 24. Злаково-разнотравный суходольный луг.
Photo 24. Upland meadow with grasses and mixed herbs.

В травяном ярусе отмечены следующие виды: *Achillea millefolium*, *Agrimonia pilosa*, *Agrostis canina*, *Agrostis capillaris*, *Agrostis stolonifera*, *Antennaria dioica*, *Asarum europaeum*, *Calamagrostis epigeios*, *Carex lasiocarpa*, *Chenopodium album*, *Convallaria majalis*, *Dactylis glomerata*, *Deschampsia caespitosa*, *Elytrigia repens*, *Festuca pratensis*, *Fragaria vesca*, *Galium boreale*, *Hieracium umbellatum*, *Hypericum perforatum*, *Leonurus villosus*, *Linaria vulgaris*, *Melampyrum nemorosum*, *M. pratense*, *Mentha arvensis*, *Phleum pratense*, *Potentilla erecta*, *Prunella vulgaris*, *Rumex confertus*, *Solidago virgaurea*, *Stellaria graminea*, *Urtica dioica*. Мхи и лишайники в пределах суходольных лугов не распространены.

22) Луга пойменные (фото 25). Большая часть лугов заповедника лежит в пределах речных пойм. Их общая площадь составляет 195.8 га или 0.6% от общей площади ООПТ. Почвы аллювиальные, различного гранулометрического состава. Значительная часть пойменных лугов заповедника в настоящее время зарастает *Alnus glutinosa*, *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Salix triandra*, *S. acutifolia*, *Frangula alnus*, *Padus avium*. Закустаривание пойм заповедника полностью связано с естественными изменениями гидрологического режима рек: с сокращением высоты и частоты паводковых затоплений в вегетационный период и со стабилизацией грунтовых вод (Кузьмина и др., 2013; Кузьмина, Трёшкин, 2017б).

Травяной ярус составлен видами: *Agrimonia pilosa*, *Alopecurus aequalis*, *Betonica officinalis*, *Calamagrostis epigeios*, *Carex vesicaria*, *Centaurea jacea*, *Convolvulus arvensis*, *Cuscuta europaea*, *Dactylis glomerata*, *Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum arvense*, *Festuca pratensis*, *Filipendula ulmaria*, *Fragaria vesca*, *Galium boreale*, *Galium mollugo*, *Glyceria*

fluitans, Gymnocarpium dryopteris, Humulus lupulus, Hypericum perforatum, Lathyrus pratensis, Lysimachia vulgaris, Menyanthes trifoliata, Millium effusum, Phleum pratense, Phragmites australis, Rumex acetosa, Rumex confertus, Scirpus sylvaticus, Solanum dulcamara, Solidago virgaurea, Typha latifolia, Urtica dioica, Vicia cracca.

Фото 25. Разнотравно-злаковый пойменный луг.
Photo 25. Floodplain meadow with mixed herbs and grasses.

Заключение

С точки зрения изучения растительных сообществ заповедник интересен наличием в его границах редких растительных сообществ – старовозрастных лесов. Вне границ заповедника подобные лесные сообщества были по большей части сведены в ходе хозяйственного освоения территории.

В ценотическом составе растительности ООПТ, отличающемся богатством, можно выделить широкие спектры сосновых (*Pinus sylvestris*), а также липовых (*Tilia cordata*) и черноольховых (*Alnus glutinosa*) лесов.

Также в пределах заповедника часто встречаются леса, эдификаторами в которых являются берёзы (*Betula alba, B. pendula*) и осина (*Populus tremula*), леса с преобладанием ели (*Picea abies*), дуба (*Quercus robur*), вяза (*Ulmus glabra, U. laevis*) и, во втором древесном ярусе, клёна (*Acer platanoides*). Также встречаются разнообразные типы необлесённых растительных сообществ – гарей, в меньшей степени – болот, лугов.

Проведённые исследования позволяют говорить об активно протекающих процессах смены растительных сообществ. Перестойные, изреженные леса с преобладанием сосны, берёзы, осины, реже – других пород, характеризуются активным развитием второго яруса древостоя или подроста. Возраст этого яруса приблизительно одинаков на территории большей части обследованной территории и указывает на одновременное изменение экологических условий на исследованной территории в течении последних десятилетий (с

90-ых годов XX века.

В результате происходящих изменений эдификаторная порода постепенно теряет своё экологическое значение, доминирующее положение в ярусе. Происходит выпадение её из древостоя, в результате порода остаётся присутствовать как второстепенная, формируя первый разреженный ярус.

Новым эдификатором в сообществах, характеризующихся средним уровнем увлажнённости (широкотравных, волосистоосоковых, частично – орляковых) становятся, как правило, липа, реже другие широколиственные породы – дуб, вяз. Густой подрост этих пород со временем преобразуется во второй ярус древостоя, сомкнутый и плотный. Освещённость, количество опада, и, отчасти, увлажнённость зависят уже от широколиственных пород, поэтому под их пологом образуется травяный ярус, состоящий из неморальных видов, характерных для флоры Мордовии.

Широколиственные породы приобретают в большом количестве местообитаний со средними условиями увлажнённости эдификаторное значение, определяя экологические условия под своим пологом и флористический состав кустарникового, травяных и мохово-лишайникового ярусов, не выходя на позиции первого яруса по высоте, уступая в этом старым соснам и мелколиственным породам, достигающим высоты 30-35 м.

Таким образом, в частности, в МГПЗ наблюдается широкое распространение лесов с более или менее изреженным первым древесным ярусом из сосны, осины, берёзы и, в то же время – с травяным ярусом, сложенным *Carex pilosa* и видами широкотравья, т.е. комплексами, свойственными широколиственным лесам. Соответственно, при дальнейших сукцессиях в этих сообществах, произойдёт окончательное выпадение старых деревьев, и сообщества полностью преобразуются в климаксовые широколиственные леса с доминированием дуба, липы и, иногда, вяза.

В то же время в более увлажнённых местообитаниях, маркируемых развитием в нижних ярусах кустарничков, молинии, зелёных и, местами, сфагновых мхов, также происходит повсеместная смена древесного яруса по вышеописанному типу, однако в этом случае доминирующей породой нижних ярусов древостоя (или подроста) является ель.

Во многих долинных местообитаниях (в первую очередь черноольховых, липовых, вязовых, осиновых) отмечено формирование особого типа сообществ – крапивовых лесов. *Urtica dioica* в них является абсолютным доминантом травяного яруса, часто ярус сформирован только им либо в сочетании с одним-тремя другими видами (*Filipendula ulmaria, Glechoma hederacea, Stachys sylvatica*). Это позволяет с уверенностью говорить о активно идущих в пределах этих участков процессов поднятия и стабилизации грунтовых вод (Кузьмина, 2017; Кузьмина, Трешикн, 2014, 2017б).

На водораздельных участках территории заповедника, покрытых опесчаненными почвами, произрастают преимущественно сосновые леса. Экологический спектр сообществ с преобладанием сосны широк – от лишайниковых лесов и редколесий в наиболее сухих местообитаниях до заболоченных сфагновых – в переувлажнённых. На участках, характеризующихся средним уровнем увлажнённости, сосна вытесняется дубом, липой и клёном, которые часто образуют плотный ярус подроста или второй ярус древостоя. В условиях недостаточного или избыточного увлажнения сосна удерживает доминантные позиции благодаря своей экологической пластичности. В ходе исследований на территории заповедника обнаружены значительные территории сосновых лесов без густого подроста. Эти сосновые сообщества можно условно отнести к климаксовым.

Пойменные местообитания заняты в основном черноольшаниками. Экологический спектр произрастающих в заповеднике черноольховых лесов также достаточно широк – чёрная ольха произрастает как на богатых почвах средней увлажнённости, где формирует густые леса с примесью широколиственных пород и ели в древостое и осоково-

широкотравным травяным покровом, так и в полузатопленных местообитаниях на болотных почвах, где отмечены черноольховые редколесья с болотным крупнотравьем и микроассоциациями мхов по повышениям, а также в переходных между ними по условиям увлажнения местообитаниям. Смена сообществ выражена слабо, но на многих участках пойменных лугов и редколесий отмечено закустаривание, зарастание древесными породами.

На больших участках гарей, в основном образовавшихся после пожаров 2010 года, формируются различные типы постпирогенных сообществ. На участках, ранее занятых лесами – сосновыми, еловыми и широколиственными, возобновляются мелколиственные, осиновые и берёзовые леса. Выгоревшие болота после пожаров преобразовались в топи, мелкие водоёмы, образовавшиеся в результате выгорания полостей, ранее занятых толщей сфагновых мхов. Древостой в результате пожаров уничтожен не на всей территории возгорания. На некоторых участках сформировались редколесья, сосновые или сложенные другими породами, доминировавшими до пожаров. Согласно имеющимся данным (Гришуткин, 2012), в результате пожаров 2010 года, в результате пожаров пострадало более 12 тыс. га, что составляет более трети территории заповедника.

В таблице 3 перечислены основные процессы изменения растительного покрова заповедника.

Встаёт вопрос о причинах смены во многих древесных сообществах, характеризующихся средним и значительным уровнем увлажнённости. Так как реки заповедника не являются зарегулированными, то основной причиной массово протекающих сукцессий является изменение климата. Последние десятилетия, с начала 90-ых годов 20 века в средней полосе Европейской России идёт потепление по гумидному типу; т.е. зафиксированы устойчивые тренды, показывающие увеличение среднегодовых температур воздуха и, одновременно, годового количества осадков (Кузьмина, Трёшкин, 2017а, 2018; Кузьмина и др., 2013). В связи с этим, экологические условия в различных типах ландшафта также меняются. Вероятно, что в лесах заповедника на водораздельных территориях увеличение уровня увлажнённости и связанный с ним подъём грунтовых вод на больших участках, занятых сосновыми лесами, благоприятствуют развитию на них широколиственных лесов с вытеснением старовозрастных сосны и иных древесных пород, ярусы которых развились при иных параметрах увлажнённости и температурного режима.

Выводы

Сравнение современного состояния растительного покрова заповедника с описанием, сделанным по результатам обследования 1979 года (Проект организации …, 1980), а также с другими научными источниками прошлых лет, связанными с исследованием растительности МГПЗ им. П.Г. Смидовича, можно сделать некоторые выводы о изменениях в растительном покрове заповедника последних десятилетий.

1) В заповеднике наблюдается постепенная смена перестойных лесов, сосновых и иных (осиновых, берёзовых) в условиях средней увлажнённости на широколиственные, главным образом, липовые, что может быть связано с изменениями климата последних десятилетий.

2) На обследуемой территории активно происходит возобновление ели на больших участках лесов, что также является следствием естественной смены условий местообитаний, вызванных изменениями климата.

3) Кроме того, повсеместно отмечается зарастание больших площадей гарей мелколиственными породами, осиной и берёзой. Причины столь широкого распространения пожаров также естественные – связанные с засушливым летом 2010 года.

4) Помимо этого также наблюдается закустаривание и зарастание пойменных лесов заповедника, что, скорее всего, связано с изменением гидрологического режима рек, инициированными как климатическими, так и гидротехническими воздействиями.

Таблица 3. Основные процессы изменения растительных сообществ Мордовского заповедника на момент проведения полевых исследований (июль-август 2014 г.).
Table 3. The main processes of changes in plant communities of Mordovsky Nature Reserve at the moment of field studies (July-August 2014).

Тип растительных сообществ	Процесс
Сосновые широкотравные леса и редколесья	Возобновление широколиственных пород
Еловые злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса	
Широколиственные злаковые, волосистоосоковые и широкотравные леса.	
Осиновые и берёзовые сфагновые редколесья	
Еловые зеленомошные и черничные леса	Возобновление ели или широколиственных пород
Берёзовые злаковые леса	
Берёзовые и осиновые широкотравные и волосистоосоковые леса	
Берёзовые и осиновые кустарничковые и молиниевые леса	
Елово-сосновые кустарничково-зеленомошные леса и редколесья	Возобновление ели
Сосновые сфагновые леса и редколесья	
Еловые сфагновые леса и редколесья	
Черноольховые осоковые, сфагновые и болотно-травяные леса и редколесья (наименее увлажнённые участки)	
Широколиственные крапивовые леса и редколесья	Формирование моновидового или бедного видами травяного яруса из *Urtica dioica* с участием *Filipendula ulmaria, Glechoma hederacea Aegopodium podagraria,* его деградация
Осиновые крапивовые леса	
Черноольховые таволго-крапивовые леса	
Гари	Развитие густого подроста из берёзы и осины, образование водоёмов на месте выгоревших болот
Пойменные луга	Закустаривание и зарастание древесными породами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бородина Н.В., Долматова Л.В., Санаева Л.В., Терёшкин И.С. 1987. Сосудистые растения Мордовского заповедника / Ред. В.Н. Тихомирова. М.: ВИНИТИ. 79 с.

Гафферберг И.Г. 1960. Мордовский государственный заповедник // Труды Мордовского государственного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 1. С. 5-24.

Гришуткин О.Г. 2012. Влияние пожаров 2010 года на болотные экосистемы мордовского государственного природного заповедника // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 10. С. 261-265.

Огуреева Г.Н., Микляева И. М., Сафронова И.Н., Юрковская Т.К. 1999. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных стран. Пояснительный текст и легенда карты / Ред. Г.Н. Огуреева. М.: ЭКОР Москва. 64 с.

Климат городов мира. 2018. Ежемесячные данные. Гидрометцентр России. [Электронный ресурс: https://meteoinfo.ru/climatcities?p=1682 (дата обращения 01.09.2014)].

Кузнецов Н.И. 1960. Растительность Мордовского государственного заповедника // Труды Мордовского государственного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 1. С. 129-220.

Кузьмина Ж.В. Динамические изменения экосистем и вопросы их оценки // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 1. С. 10-25 (доступно по ссылке http://www.ecosystemsdynamic.ru).

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2014. Обусловленные режимом водных объектов биологические показатели, отражающие структурно-функциональные изменения околоводных наземных экосистем // Изменение состава и структуры ландшафтов в условиях техногенеза. М. С. 87-115.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017а. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в зоне южной тайги Европейской части России (бассейн верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 4 (152). С. 50-61.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017б. Методика оценки нарушений в наземных экосистемах и ландшафтах в результате климатических и гидрологических изменений // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 3. С. 146-188 (доступно по ссылке http://www.ecosystemsdynamic.ru).

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2018. Многолетние изменения влажностно-температурного режима в зоне южной тайги европейской части России (бассейн верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. №2 (154). С. 55-63.

Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е., Каримова Т.Ю. 2013. Воздействие основных тенденций совокупного влияния климатических и гидрологических изменений на сукцессионную динамику растительности в мелиоративно трансформируемых экосистемах зоны южной тайги // Современные проблемы использования мелиоративных земель и повышения их плодородия. Материалы международной научно-практической конференции ГНУ ВНИИМЗ Россельхозакадемии, Тверь, 27-28 июня 2013 года. С. 253-272.

Мильков Ф.Н. 1977. Природные зоны СССР. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Мысль. 293 с.

Полевая геоботаника. 1964. Т. 3 / Ред. А.А. Корчагин, Е.М. Лавренко. М.-Л.: Наука. 530 с.

Потапов С.К., Бугаев К.Е., Долматова Л.В. 2006. Первичные наблюдения за лесовозобновлением в разных типах леса на территории ЗАТО г. Сарова и оценка запасов древесно-веточных кормов лося // Труды Мордовского государственного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 7. С. 36-82.

Проект организации и ведения лесного хозяйства Мордовского государственного заповедника им. П.Г.Смидовича Мордовской АССР. 1979-1980 гг. 1980. Краткая геоботаническая и лесопатологическая характеристика лесов. Главное управление охотничьего хозяйства и заповедников при Совете Министров РСФСР. Всесоюзное объединение «Леспроект». Поволжское лесоустроительное предприятие 1-ая Горьковская лесоустроительная экспедиция. 115 с.

Ремезов Н.П. 1960а. Предисловие к выпуску трудов // Труды МГЗ. Вып. 1. Саранск: Мордовское книжное издательство. С. 3-4.

Ремезов Н.П. 1960б. Генезис и лесорастительные свойства почв Мордовского государственного заповедника // Труды МГЗ. Вып. 1. Саранск: Мордовское книжное

издательство. С. 25-70.

Сукачёв В.Н. 1972. Основы лесной типологии и биогеоценологии // Избранные труды. Т. 1. М.: Наука. 424 с.

Терёшкин И.С., Терёшкина Л.В. 2006. Растительность Мордовского заповедника. Последовательные ряды сукцессий // Труды Мордовского государственного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 7. С. 186-287.

Физико-географическое районирование СССР. 1968. Характеристика региональных единиц / Ред. Н.А. Гвоздецкого. М.: Издательство МГУ. 575 с.

Хапугин А.А., Варгот Е.В., Чугунов Г.Г., Шугаев Н.И. 2012. Об изменениях в растительном покрове лесов разного типа после пожаров в Мордовском государственном природном заповеднике // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 10. С. 309-315.

Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья. 992 с.

Google карты. 2014. [Электронный ресурс: https://www.google.com/maps/@59.915188,30.437943,1588m/data=!3m1!1e3?hl=ru-RU (дата обращения 01.09.2014)].

MODERN CONDITION OF VEGETATION OF P.G. SMIDOVICH MORDOVSKY STATE NATURE RESERVE AND TRENDS OF ITS TRANSFORMATION IN PRESENT-DAY CONDITIONS

© 2018. S.V. Chernorutsky

Water Problems Institute of RAS
Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: jannaKV@yandex.ru

Received 20.10.2018. Revised 30.10.2018. Accepted 01.11.2018.

In this article we study the present conditions (as they were in 2014) of vegetation cover of Mordosky nature reserve. We investigate the features of various communities particularly and especially the modern processes of vegetation changes under the influence of ecological conditions transformation. We studied some types of forests and open communities, including those, the state of which can determine the climate changes influence on ecosystems of the nature reserve.

The ratio between the areas of forests of different species composition during the period of the reserve's existence was changing constantly. It was caused by the changes of the reserve's boundaries, forest fires and modern changes of climatic conditions. The last one affects the moistening and temperature regime of the reserve's ecosystems, ground waters level and flooding regime in the floodplains. The changes of Central Russia climate, which started in the beginning of 90's of XX century and were called 'humid warming', are connected to the global warming trend, especially in winter, growth of precipitations and decrease of spring flood. These changes, as the article shows, affect the structure and composition of plant communities of valleys and watershed areas.

On the basis of diagnostic changes, proving the current succession, we emphasize the processes of bushes and floodplain meadows overgrowing, as well as the forming of thick layer of undergrowth and the second one of forest stand, formed by linden and spruce, while the main layer is thinning. We also noted the forming of mono-species or species-deficient communities, consisting of the grass and bushes level with the species indicating increase and stabilization of ground waters level. Since anthropogenic impact on the ecosystems of the Mordovsky nature reserve is minimal, all of the above is a result of modern natural climatic changes.

Keywords: vegetation dynamics, Mordosky nature reserve, pine forests, linden forests, broad-leaved forests, successions, climatic changes.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10022

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, с. 106-131

ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 631.4

ОПЫТ СОСТАВЛЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА БАЗ ДАННЫХ ПО ЦЕЛИННЫМ КАШТАНОВЫМ ПОЧВАМ ПРИКАСПИЯ (РОССИЯ И КАЗАХСТАН) И МОНГОЛИИ[1]

© 2018 г. В.А. Ибрагимова*, М.В. Конюшкова*, **, Д.Л. Голованов*, **

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1. E-mail: ibragimova_valeriya@mail.ru
***Почвенный институт им. В.В. Докучаева*
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: dm_golovanov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2018. После доработки 30.09.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

Зона каштановых почв на территории Евразии протянулась от юга Украины до восточной границы Монголии. В задачи нашего исследования входило выявление зональных и провинциальных особенностей почв на основе сбора и анализа базы данных по субстантивным свойствам целинных каштановых почв Прикаспия (в пределах России и Казахстана) и Монголии с учетом климатических условий их формирования. Для сравнения брались сведения о профильном распределении свойств наиболее типичных каштановых почв по 7 основным почвенным показателям, характеризующим почвы указанных регионов: содержание гумуса и $CaCO_3$, емкость катионного обмена, гранулометрический состав, водная вытяжка (содержание хлора, сульфатов, кальция, магния и натрия). В базу данных было включено 49 разрезов по Прикаспию и 54 – по Монголии. Использовались фондовые материалы и опубликованные в литературе. Статистическая обработка и сопоставление данных по свойствам каштановых почв достоверно подтвердили различия сравниваемых почв. В результате исследования возникает ряд вопросов. Можно ли относить эти почвы к одному типу? Что является главными причинами в различиях свойств каштановых почв сравниваемых регионов – климатические различия или же разница в истории развития и почвообразующих породах?

Ключевые слова: Каштановые почвы, провинциальные особенности, анализ баз данных.
DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10023

Отличия каштановых почв Монголии от классических каштановых почв сухих степей Прикаспия отмечали уже первые исследователи – Л.И. Прасолов (1913), Б.Б. Полынов с В.И. Лисовским (1930), Н.Д. Беспалов (1951). Климатическую обусловленность этих различий на качественном уровне отмечал И.П. Герасимов (1933): он разработал представления о фациальных и провинциальных особенностях генетических типов почв и их связь с климатическими характеристиками местности. Он связывал данные различия, прежде всего, с континентальностью климата.

Цель работы – количественно оценить связь между климатическими параметрами различных почвенно-климатических фаций (Герасимов, 1933; Почвенно-географическое районирование …, 1962) и основными свойствами каштановых почв (содержание гумуса, карбонатов, pH, гранулометрический состав, засоленность) на основе создания и анализа базы данных по почвам Прикаспия и Монголии.

Выбранным объектом исследования стали каштановые почвы целинных дерновинно-злаковых сухих степей.

Экологическая ценность работы заключается в возможности прогноза изменения почвенных свойств в зависимости от изменения глобальных климатических показателей в

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-04-00570.

соответствии с различными вариантами их развития.

Задачи работы:

1) создание базы данных по каштановым почвам Монголии и Прикаспия (Российская и Казахстанская части),

2) географическая привязка почвенных разрезов,

3) статистическая обработка и геопространственный анализ составленной базы данных по субстантивным свойствам каштановых почв Монголии и Прикаспия в сопоставлении с условиями формирования почв с привлечением глобальной климатической карты (WorldClim), Global Aridity и Soil Water Balance.

Физико-географические условия района исследования

Монголия – страна, располагающаяся на стыке двух платформ: Китайской и Сибирской, приурочена к Центрально-Азиатскому складчатому поясу, части Урало-Монгольского складчатого геосинклинального пояса (Васильев, 1959).

Рельеф района мелкосопочный с участием возвышенных равнин и плоскогорий высотой более 600 м н.у.м. БС. *Породы* представлены различными комплексами: интрузивами, эффузивами и метаморфическими образованиями основного состава от позднепротерозойского до раннемезозойского возраста (филлиты, песчаники и кварциты); триасовыми эффузивными образованиями среднего состава; гранитными интрузивными, а также отложениями мезозойского возраста и континентальными отложениями, относящимися к позднему мелу/палеогену.

На территории района исследований встречаются два варианта древних кор выветривания: красноцветные суглинисто-глинистые на эффузивах триасового возраста и на интрузивных и метаморфических породах кислого состава, перекрытые молодым делювием песчано-супесчаного грансостава. Возраст кор выветривания оценить сложно. Расчетный возраст их появления датируется позднемеловым временем (Маринов, 1967).

Четвертичные отложения достигают мощности более 100 м (во впадинах) и представляют собой различные комплексы рыхлых осадков: аллювиальные песчано-галечные; аллювиально-пролювиальные супеси и суглинки; пролювиально-делювиальные супеси и суглинки.

Область рассматриваемых нами каштановых почв принадлежит к зоне элювиально-делювиальных и пролювиально-делювиальных почвообразующих пород легкосуглинистого состава (Уфимцева, 1984; рис. 1). Элювиальные и элювиально-делювиальные отложения сильнощебнистые и маломощные, располагаются в горных и высоких равнинных участках. Пролювиальные и делювиально-пролювиальные отложения наиболее распространены в данной местности. Они очень рыхлые, мощность варьирует в больших пределах. Состав наносов непостоянный, обычно представлен несортированным материалом с включениями гальки, щебня, осколками плотных пород. Отличительная особенность – наличие горизонта палеогидрогенной аккумуляции карбонатов. Механический состав в основном легкосуглинистый или супесчаный.

Климат – резко континентальный. Абсолютные колебания температур могут достигать 90°С, среднемесячные и среднесуточные – 50 и 30°С соответственно. Морозные зимы сменяются жарким летом.

Осадков мало – 150-250 мм, основной их объем выпадает с мая по сентябрь (максимум – 70-80% в июне-августе) в виде кратковременных ливневых дождей (Береснева, 1984, 1988). Зима из-за повышенного давления (антициклон) – ясная, малоснежная, осадков практически нет.Часты ураганы и пыльные бури с силой ветра до 20-35 м/с и более (преимущественно весной).

Климатические показатели непостоянны по годам и пространственно неоднородны.

Наблюдаются резкие и частые пространственные колебания и колебания по годам.

Из-за малого количества осадков, воздух обладает низкой относительной влажностью. Вследствие чего происходит интенсивная потеря влаги из почвы.

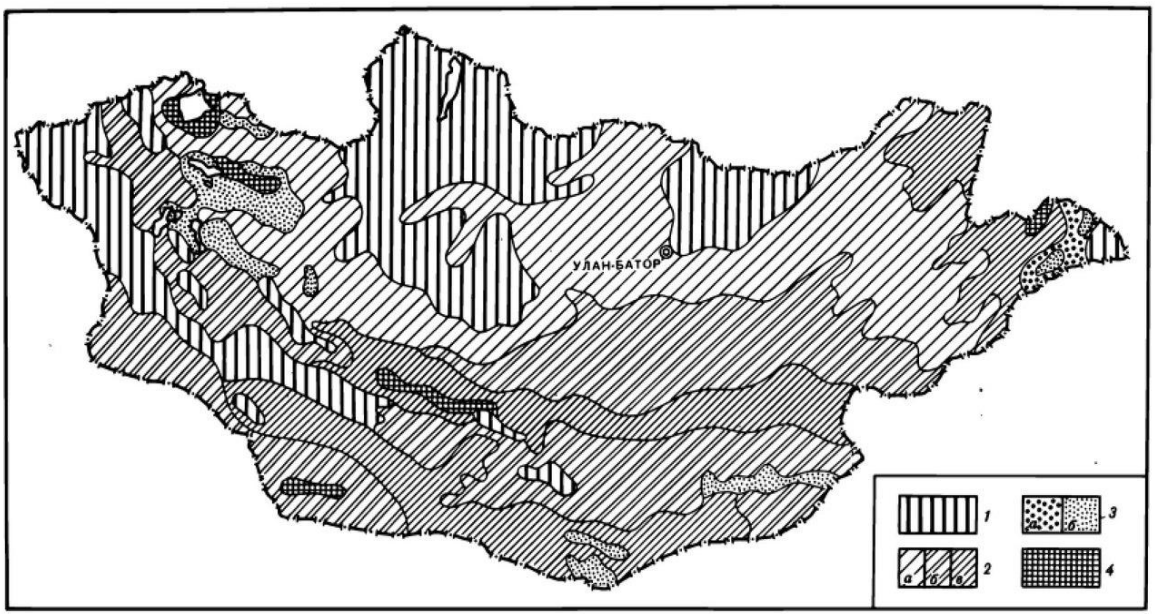


Рис. 1. Картосхема почвообразующих пород Монголии (Уфимцева, 1984). *Условные обозначения:* 1 – элювиальные и элювиально-делювиальные; 2 – элювиально-делювиальные и пролювиально-делювиальные: а – преобладают легкосуглинистые, б – преобладают супесчаные и легкосуглинистые, в – преобладают супесчаные и песчаные; 3 – эоловые: а – пески закрепленные, б – пески полузакрепленные и незакрепленные; 4 – озерные различного механического состава. **Fig. 1.** Schematic map of soil-forming rocks of Mongolia (Уфимцева, 1984). *Legend:* 1 – eluvial and eluvial-deluvial; 2 – eluvial-deluvial and proluvial-deluvial: a – sandy loams prevail; б – sabulous and sandy loams prevail, в – sabulous and sandy prevail; 3 – eolian: a – fixed sands, б – half-fixed and not-fixed sands, б – half-secured and not-secured sands; 4 – lake rocks of different mechanical composition.

Количество солнечных дней в году достигает 250, преобладает прямая солнечная радиация (55-65%), на долю рассеянной приходятся оставшиеся 35-45%. Как следствие отмечается высокий уровень влиянии рельефа на температурный режим почв.

Территория исследования приурочена к зоне дерновинно-злаковых сухих степей. Степень проективного покрытия – 50-70%. Растительный покров представлен различными видами ковыля, житняка, полыни, тонконога и караганы. Преобладают злаково-тырсовые и злаково-змеевковые степи. Согласно почвенно-географическому районированию Д. Доржготова (1992, 2003, 2009) и Д. Доржготова с Н.А. Ногиной (Почвенный покров …, 1978, 1984), район исследования относится к Центрально-Монгольскому округу каштановых почв Центрально-Азиатской почвенной фации.

Юго-восток европейской части России и Западный Казахстан. Эта зона каштановых почв приурочена к двум крупным геоморфологическим областям: северной части Прикаспийской низменности и возвышенности Ергени.

Ергени имеют неоднородное тектоническое строение: погребенный кряж на юге и плоский прогиб на севере. Сложены породами саратовского, сызранского, киевского и царицынского палеогена, перекрытыми толщей майкопских отложений мощностью от 50 до 300 м (Карандеева, 1957).

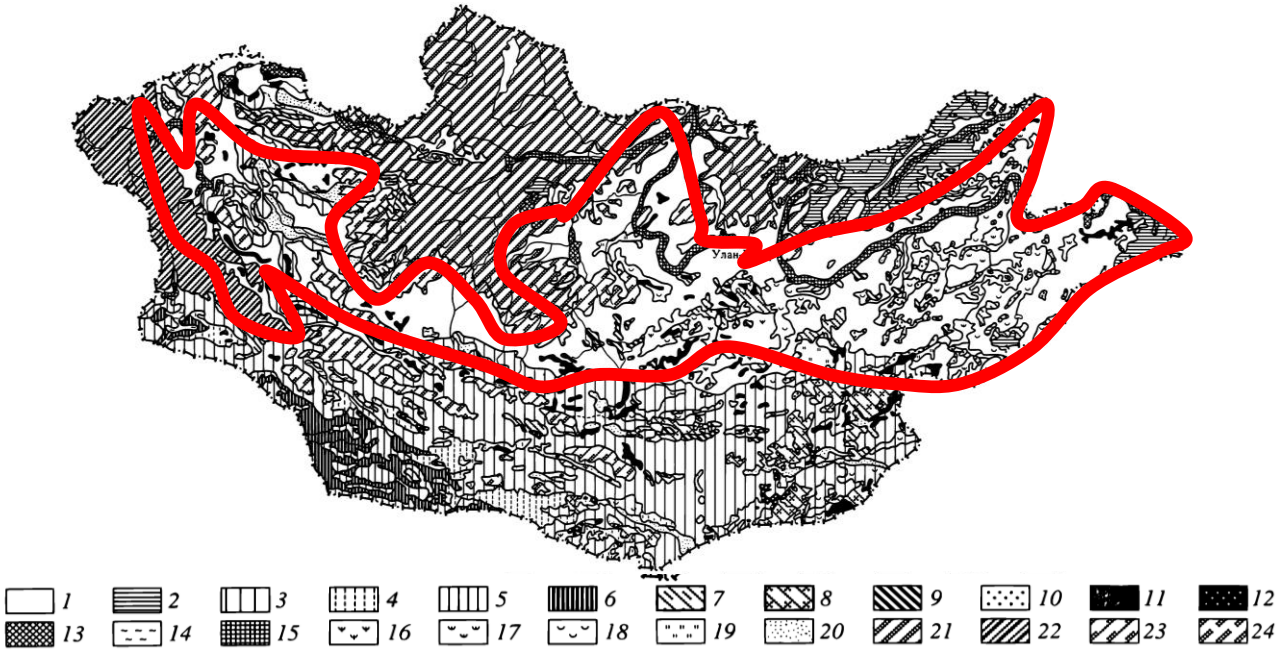


Рис. 2. Район исследования на почвенной карте Монголии (Панкова, 1997). *Условные обозначения. Почвы равнин и мелкосопочников*: 1 – каштановые (темно-каштановые, каштановые и светло-каштановые), 2 – черноземы; 3 – аридные (бурые пустынно-степные, палево-бурые и серо-бурые), 4 – серо-бурые средне-профильно-гипсоносные, 5 – крайнеаридные маломощные поверхностно-слабогипсоносные, 6 – крайнеаридные поверхностно-гипсоносные, 7 – каштановые и лугово-каштановые солонцеватые, 8 – бурые и серо-бурые солонцеватые, 9 – солонцы автоморфные, 10 – солонцы полугидроморфные и гидроморфные, 11 – солончаки, 12 – такыры, 13 – луговые засоленные мерзлотные (содовые), 14 – луговые засоленные, 15 – пойменные локально засоленные, 16 – участие солончаков, 17 – участие луговых солонцов, 18 – участие автоморфных солонцов и солонцеватых почв, 19 – участие луговых засоленных почв, 20 – пески. *Почвы горных территорий:* 21 – высокогорные и горные с участием мерзлотно-таежных, дерново-таежных, горно-луговых и горно-степных, 22 – высокогорные без участия мерзлотно-таежных и дерново-таежных, преимущественно горно-степные, сухостепные и таежно-горно-тундровые, 23 – горные, преимущественно сухостепные и степные, 24 – горные, преимущественно полупустынные и пустынные. **Fig. 2.** Area of researches on the soil map of Mongolia (Панкова, 1997). *Legend. Soils of plains and hummocky terrain:* 1 – chestnut (dark chestnut, chestnut and light chestnut), 2 – black earths, 3 – arid (brown desert-steppe, pale yellow-brown and gray-brown), 4 – gray-brown average-profile-gypsum-bearing, 5 – extremely arid shallow surface-weak-gypsum-bearing, 6 – extremely arid surface-weak-gypsum-bearing, 7 – chestnut and meadow-chestnut saliferous, 8 – brown and gray-brown saliferous, 9 – automorphic saline soils, 10 – half-hydromorphic and hydromorphic saline soils, 11 – salt-marsh, 12 – takyr, 13 – meadow saline soils cryosolic (soda), 14 – meadow saliferous, 15 – floodplain locally saliferous, 16 – with salt-marshes, 17 – with meadow saline soils, 18 – with automorphic saline soils andи saline soils, 19 – with meadow saliferous soils, 20 – sands. *Soils of mountain areas:* 21 – high-mountain and mountain with cryosolic-taiga, turfy- taiga, mountain-meadow and mountain-steppe, 22 – high-mountain without cryosolic-taiga and turfy- taiga, mostly mountain-steppe, dry steppe and taiga-mountain-tundra, 23 – mountain, mostly dry steppe and steppe, 24 – mountain, mostly semi-desert and desert.

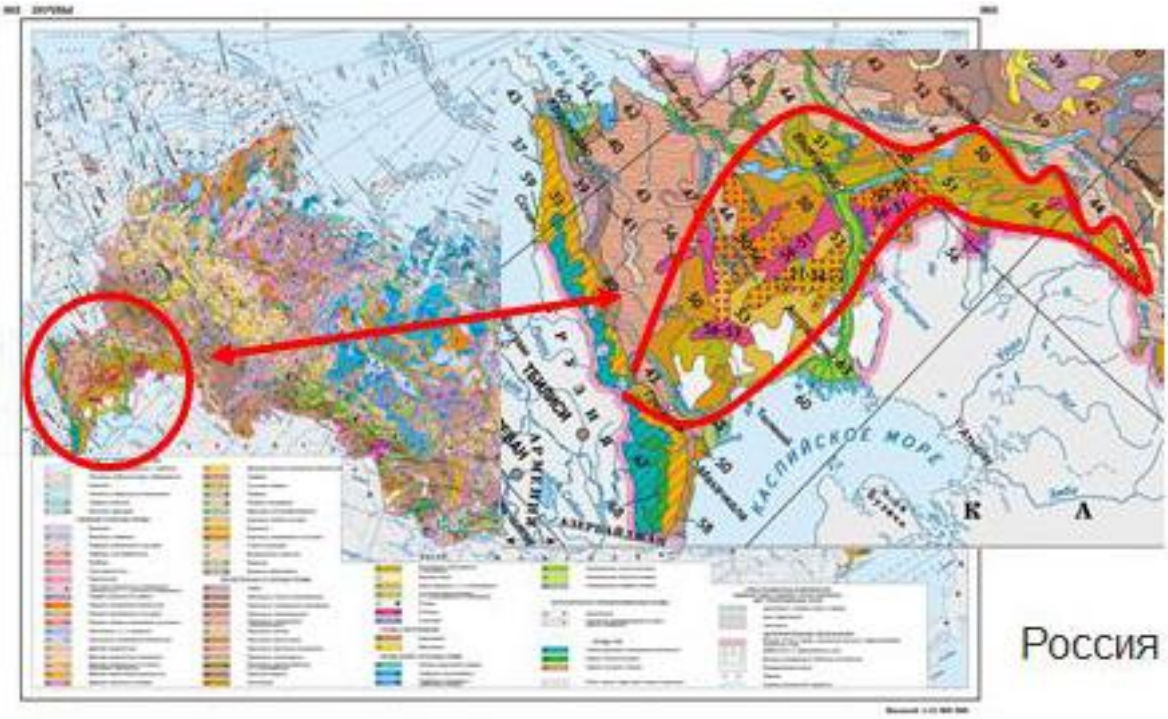


Рис. 3. Район исследования на почвенной карте России (Национальный Атлас России, 2004-2008). **Fig. 3.** Area of researches on the soil map of Russia (Национальный Атлас России, 2004-2008).

Поверх майкопских отложений располагаются континентальные Ергенинские, сложенные светлыми кварцевыми косослоистыми или горизонтальными песками с тонкими прослойками глин. На возвышенности Ергени мощность их снижается с севера на юг и в районе Прикаспия они уже не встречаются. На севере и местами на юге Ергенинские отложения перекрыты слоем неслоистых скифских глин мощностью от 3 до 50 м. И последний слой – лёссовидные суглинки мощностью до 70 м.

Рельеф Прикаспийской низменности преимущественно равнинный. Район представлен присыртовой хвалынской древней террасой, расположенной в пределах высот от 35 до 48 м н.у.м. БС. Для террасы характерно наличие пологих грив (невысоких, узких, линейно вытянутых поднятий), ориентированных с запада на восток, плоских широких ложбин (линейно вытянутых, незамкнутых, неглубоких понижений в рельефе), иногда низких курганов, мелких степных блюдец, падин (больших, порядка нескольких гектар, депрессий, глубиной 0.5-1 м). Микрорельеф территории сглажен и представлен небольшими западинами-депрессиями до 40 см глубиной и до нескольких десятков метров в диаметре.

Согласно геоморфологическому районированию, район исследования принадлежит Еруслано-Торгунской суглинистой сухостепной равнине. С юга и юго-востока к ней примыкает бессточная суглинистая Джаныбекская полупустынная равнина. Присыртовая терраса является типичной древней морской аккумулятивной террасой, на формирование которой в большой степени оказала влияние хвалынская трансгрессия. О происхождении элементов мезо- и микрорельефа существует несколько точек зрения. Некоторые склоняются к древней эрозионной деятельности (Ковда, 1950), многие другие исследователи – к их суффозионно-просадочному происхождению.

Климат. Район исследования находится в умеренном поясе, в континентальной восточноевропейской области (Алисов, 1936). *Климат* очень теплый, умеренно сухой. Суммарная солнечная радиация 4800-5050 МДж/м^2 в год, сумма температур воздуха выше

10°С – 2800-3400, средняя годовая разность осадков и испаряемости -400-700 мм. Согласно карте климатического районирования (Будыко, 1971), климат сухой, индекс сухости – больше 3 (отношение комплексной испаряемости к осадкам). Летом здесь тепло, сумма температур земной поверхности находится в пределах от 2200 до 4400°С. Зима умеренно мягкая, средняя температура января от 0°С до -13°С. Снежный покров имеет толщину до 10-15 см на севере, на юге же он неустойчив, зачастую сплошного покрова нет вовсе, так что почвы промерзают до глубины 80 см (практически как в тайге). Осадков мало – 300-400 мм/год, их количество немного увеличивается с юго-востока на северо-запад. Потенциальная испаряемость намного выше: Ку составляет 0.3-0.4, климат засушливый.

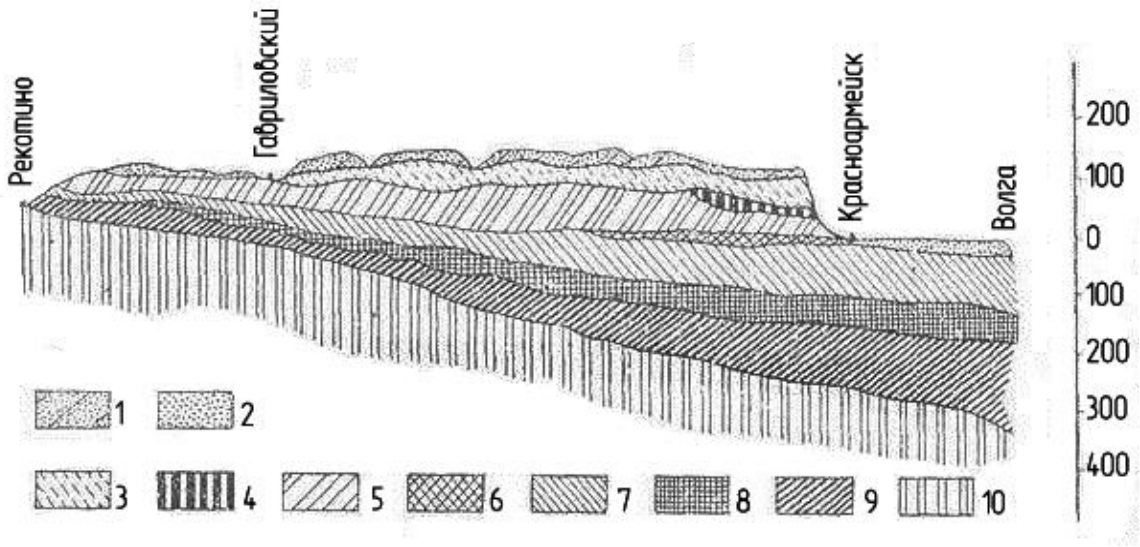


Рис. 4. Схематический геологический профиль через восточный склон возвышенности Ергени и Прикаспийскую низменность у Красноармейска (Исаченко, 1991). *Условные обозначения:* 1 – четвертичные континентальные отложения; 2 – каспийские, 3 – ергенинские; 4 – онкофоровые; 5 – майкопские; 6 – киевские, 7 – царицынские; 8 – саратовские; 9 – сызранские; 10 – меловые. **Fig. 4.** Schematic geological profile of the eastern slope of Yergeni and Caspian Depression near Krasnoarmeysk (Исаченко, 1991). *Legend:* 1 – quaternary continental deposits, 2 – Caspian, 3 – Yergeninsky, 4 – oncophora, 5 – Maykopsky, 6 – Kievsky, 7 – Tsaritsynsky, 8 – Saratovsky, 9 – Syzransky, 10 – chalky.

Растительность. Согласно И.Н. Сафроновой (2001-2002), северная часть Прикаспийской низменности относится к зоне полынно-дерновиннозлаковых южных (опустыненных) степей, заволжско-западноказахстанских из белой полыни Лерха и ковыля сарептского. Формирование этого типа растительности обусловлено климатическими особенностями (сухой климат, немногочисленные осадки, резкие перепады температуры) и геоморфологическим строением местности, сложением и составом почвообразующих пород, условиями водоснабжения и стока, возрастом земной поверхности (Ларин и др., 1954).

Согласно карте геоботанических областей и районов Северного Прикаспия в междуречье Волга – Урал (Ларин и др., 1954), район исследования принадлежит к северной части Прикаспийской низменности, группе переходных районов, району Хвалынской террасы. Значительная часть данной территории в прошлом была распахана, а в настоящее время представляет собой залежь. Хорошо дренированную наклонную равнину пересекают глубокие балки и овраги. Здесь распространены двучленные (чернополынная ассоциация на солонцах, житняковая – в мелких западинках с каштановой почвой) и трехчленные

(белополынная ассоциация на каштановой солонцеватой почве, житняковая – на каштановой почве, ковыльно-типчаковая – в западинах с лугово-каштановой почвой) комплексы. Крупные падины с каштановыми и лугово-каштановыми почвами обычно распаханы.

На возвышенности Ергени развит двучленный комплекс из чернополынных и ковыльных элементов. Типичные виды: ковыль, типчак, сорные злаки (мятлик, полевичка), осока, пыреи.

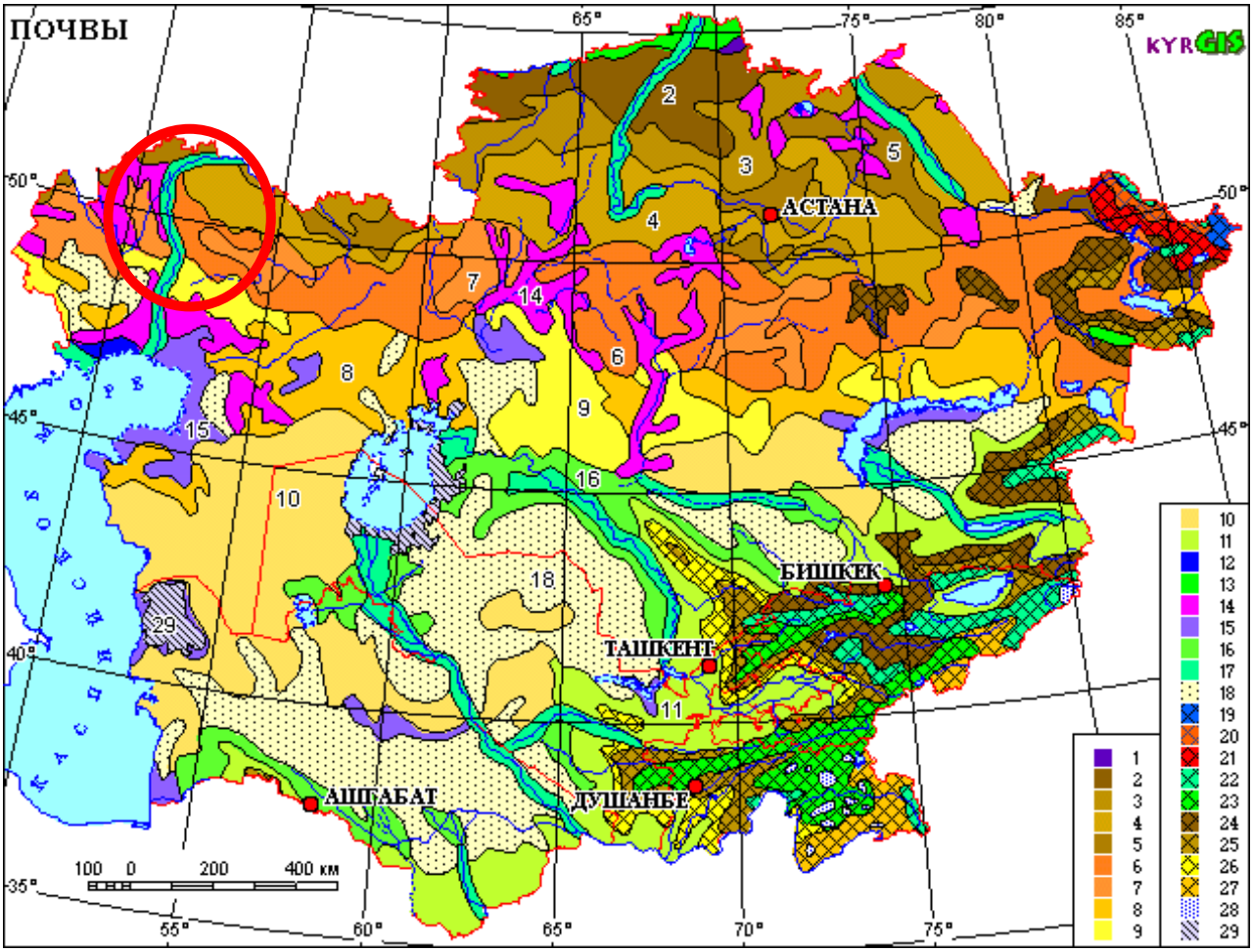


Рис. 5. Район исследования на почвенной карте Казахстана и Средней Азии (http://www.cawater-info.net/aral/land.htm). *Условные обозначения:* 1 – черноземы выщелоченные и оподзоленные, 2 – обыкновенные, 3 – южные, 4 – темно-каштановые и каштановые почвы, 5 – комплексы темно-каштановых и каштановых почв с солонцами, 6 – светло-каштановые, часто солонцеватые, 7 – комплексы светло-каштановых почв с солонцами, 8 – бурые полупустынные, часто солонцеватые, 9 – комплексы бурых полупустынных почв с солонцами, 10 – комплексы серо-бурых пустынных почв, 11 – сероземы на значительных площадях преобразованные орошением, 12 – болотные, 13 – комплексы и сочетания лугово-черноземных почв, солонцов и солодей, 14 – комплексы почв с преобладанием солонцов, 15 – солончаки, часто в сочетании с солонцами, 16 – сочетания такырных почв и такыров, 17 – аллювиальные и луговые почвы, 18 – пески и слаборазвитые песчаные почвы, 19 – горные тундровые, 20 – горные подзолистые кислые неоподзоленные, 21 – горные серые лесные, 22 – горные луговые, 23 – горные лугово-степные, 24 – горные черноземы и горные каштановые почвы, 25 – горные коричневые и горные серо-коричневые, 26 – горные сероземы, 27 – высокогорные пустынные, 28 – ледники, 29 – осушка Каспийского и Аральского морей. **Fig. 5.** Area of researches on the soil map of Kazakhstan and Central Asia (http://www.cawater-info.net/aral/land.htm). *Legend:* 1 – leached and podzolized

black earthes, 2 – normal soils, 3 – eastern soils, 4 – dark chestnut and chestnut soils, 5 – complexes of dark chestnut and chestnut soils with saline soils, 6 – light chestnut soils, often saliferous, 7 – complexes of light chestnut soils with saline soils, 8 – brown semi-desert soils, often saliferous, 9 – complexes of brown semi-desert soils with saline soils, 10 – complexes of gray-brown desert soils, 11 – gray earths on the big areas, transformed by irrigation, 12 – swamp soils, 13 – complexes and combinations of meadow black earths, saline and soloth soils, 14 – complexes of soils with saline soils prevailing, 15 – salt marshes, often combined with saline soils, 16 – combinations of takyr soils and takyrs, 17 – alluvial and meadow soils, 18 – sands and young sandy soils, 19 – mountain tundra soils, 20 – mountain podzolic acid non-podzolized soils, 21 – mountain gray forest soils, 22 – mountain meadow soils, 23 – mountain meadow-steppe soils, 24 – mountain black earths and chestnut soils, 25 – mountain brown and gray-brown soils, 26 – mountain gray earths, 27 – high-mountain desert soils, 28 – glacier, 29 – dewatering of Caspian and Aral seas.

Иногда можно встретить степные мхи и лишайники. Проективное покрытие достигает 80 процентов. Четко прослеживается комплексность.

Почвы. Каштановые почвы, согласно «Классификации и диагностике почв России» (2004) и «Полевому определителю почв» (2008), имеют характерный диагностический профиль (AU/AJ-BMK-BCA-Cca).

Каштановые почвы Монголии и Прикаспия имеют ряд различий в свойствах в связи с особенностями почвообразующих пород, что отмечалось в проведенных ранее исследованиях. Так для Монголии характерен супесчаный или легкосуглинистый состав пород, а для России средний или тяжелосуглинистый, что находит свое отражение в профильном распределении ила и физической глины. Он практически не дифференцирован в Монголии и имеет четко выраженное элювиально-иллювиальное распределение в Прикаспии. В связи с этим, каштановый морфологический горизонт (BMK) в почвах Монголии не всегда отчетливо выражен.

Почвообразующим породам Прикаспийской низменности присущи загипсованность и засоление и, как следствие засоленности, присутствие обменного натрия в почвенном профиле, также распределенного в почвенном профиле по элювиально-иллювиальному типу.

Материалы и методы

База данных. Почвенные характеристики. В ходе работы была создана базы данных каштановых почв по Юго-востоку Европейской России, Западному Казахстану и Монголии[2]. В нее вошли данные по каштановым, светло-каштановым и лугово-каштановым почвам, приуроченным к выбранным районам исследования.

Источниками для составления баз послужили работы прошлых лет. Для территории Монголии: «Почвенный покров основных природных зон Монголии» (1978), «Почвенный покров и почвы Монголии» (1984), Андроников В.Л. и Шершукова Г.А. (1975), Доржготов Д. (1973), Панкова Е.И. (1965, 1974, 1997). Для территории Юго-востока Европейской России и Западного Казахстана: «Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика» (1964), Ковда В.А. (1950), Сукачев В.Н. (1955), Буяновский М.С. с соавторами (1956).

Информация по каждому разрезу, внесенному в базу данных, включает в себя следующие показатели: содержание гумуса, величину pH, содержание $CaCO_3$, емкость

[2] База данных по Монголии и России доступна по ссылке на сайте журнала “Экосистемы: экология и динамика” и открыта для использования с указанием на источник (Ибрагимова В.А., Конюшкова М.В., Голованов Д.Л. Опыт составления и сравнительного анализа баз данных по целинным каштановым почвам Прикаспия (Россия, Казахстан) и Монголии // Экосистемы: экология и динамика. 2018. Т. 2. № 4. С. 106-131). По всем возникающим вопросам просим обращаться к авторам работы.

катионного обмена, содержание обменного натрия, процент натрия от емкости катионного обмена, гранулометрический состав по семи фракциям (>1 мм (крупнозем), 1-0.25 мм, 0.25-0.05 мм, 0.05-0.01 мм, 0.01-0.005 мм, 0.005-0.001 мм, <0.001 мм), водную вытяжку (сумма солей и содержание анионов CO_3^{2-}, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, содержание катионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+), содержание гипса ($CaSO_4*2H_2O$) и карбонатов ($CaCO_3$).

В общей сложности в базу вошла информация по 103 разрезам: 49 сделаны в юго-восточной части Европейской России и Западного Казахстана, 54 – в Монголии.

Выборки по показателям были составлены с учетом имеющейся информации, полученной из первоначальных источников:

– данные по гранулометрическому составу имеются для 49/49 разрезов (100%) по территории России и Западного Казахстана и для 45/54 разрезов (83.3%) по Монголии;

– данные по водно-солевой вытяжке имеются для 49/49 разрезов (100%) по территории России и Западного Казахстана и для 21/54 разрезов (40%) по Монголии;

– данные по содержанию гумуса имеются для 33/49 разрезов (68%) по территории России и Западного Казахстана и для 44/54 разрезов (81%) по Монголии;

– данные по содержанию карбонатов имеются для 30/49 разрезов (61%) по территории России и Западного Казахстана и для 40/54 разрезов (74%) по Монголии.

Климатические характеристики. В качестве биоклиматических параметров были взяты усредненные значения за 30 лет (1970-2000 гг.). Данные, полученные с сайта WorldClim (http://worldclim.org/version2), включили 19 характеристик: среднегодовую температуру, среднемесячную амплитуду колебаний температур в течение дня, изотермичность, сезонность температур, максимальную температуру самого теплого месяца, минимальную – самого холодного, годовой температурный диапазон, среднюю температуру самого влажного квартала, среднюю – самого сухого, среднюю температуру самого теплого квартала, среднюю – самого холодного, годовые осадки, осадки в самый влажный и самый сухой месяцы, их сезонность (коэффициент вариации), осадки в самый влажный и самый сухой кварталы, осадки в самый теплый и самый холодный кварталы.

Также были взяты данные по аридности и почвенной влаге за те же годы с сайта Cgiar (http://www.cgiar-csi.org/data).

В качестве показателя аридности был взят глобальный индекс аридности (Global-Aridity), созданный по модели и анализам А. Трабукко (http://www.cgiar-csi.org). Индекс связывает климатические данные с данными по процессу эвапотранспирации и дефициту осадков для потенциального вегетативного роста.

В качестве информативного показателя о состоянии почвенной влаги был взят глобальный водно-почвенный баланс высокого разрешения (Zomer et al., 2007, 2008). Баланс описывает действительную эвапотранспирацию и дефицит почвенной влаги.

Статистическая обработка данных. На первом этапе – предстатистической обработке – была произведена географическая привязка разрезов, попавших в базу данных, учитывая наличие такой информации в первоначальных источниках. По итогу этапа было привязано 47/49 разрезов по территории юго-востока Европейской России и Западного Казахстана и 33/54 по Монголии.

Данные из начальных источников были не структурированы и не готовы для прямой статистической обработки. Входные данные различались по размерности в некоторых показателях (состав водной вытяжки) и по разбиению на глубины. Для создания условий репрезентативного анализа был произведен перерасчет на одни единицы измерения внутри одного показателя и пересчет всех показателей на выбранные стандартные глубины: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70, 70-100 и 100-150 см. Пересчет основан на интерполяции данных по исходным глубинам методом сплайна (Malone et al., 2009; Мешалкина, Мартыненко, 2017).

Гармонизация данных производилась в программе R Studio с помощью процедур из пакета ithir, созданного для среды «R» Б. Мелоном (https://www.rstudio.com) Пакет находится в открытом доступе и открыт для свободного скачивания.

Загруженные данные были пересчитаны с помощью функции для подгонки сплайнов «ea_spline». Функция производит предсказание непрерывной функции показателя сверху вниз по профилю до максимальной глубины и интерполирует, охватывая диапазон как наблюдаемых значений, так и неизвестных. Стоит также отметить главный минус работы функции – это невозможность работы с пустыми ячейками. Поэтому все пустые ячейки были удалены перед запуском программы.

На выходе мы получили файл *.csv, содержащий гармонизированные данные.

Второй этап – обработка данных в программе STATISTICA и Excel, которая включила в себя поэтапный анализ включенных в базу данных почвенных и биоклиматических характеристик:

1. Анализ общей статистической характеристики по каждому рассмотренному почвенному свойству и выявление обобщенных свойств почвенных профилей.
2. Анализ климатических параметров методом главных компонент для обоих районов исследования по отдельности.
3. Анализ климатических параметров методом главных компонент для обоих районов исследования совместно.
4. Анализ корреляции между климатическими факторами для выделения свойств, близко коррелирующих друг с другом.
5. Многомерный корреляционно-регрессионный анализ для получения уравнений линейной множественной регрессии, связывающих почвенные и климатические свойства.

Общая статистическая характеристика почвенных свойств. С помощью программы STATISTICA были получены усредненные данные (медианы) и разбросы (квартили) по почвенным характеристикам (операнд Descriptive statistics). Далее проведено построение профильных распределений по каждому показателю и анализ получившихся картин, результатом которого стали выявленные в ходе анализа обобщенные свойства почвенных профилей.

Метод главных компонент (PCA) – метод, позволяющий уменьшить размерность входных данных. Он позволяет оценить большое количество заданных показателей на признаковой плоскости и вычленить те компоненты, что вносят больший вклад в распределение – выявить наиболее значимые компоненты, а также определить те параметры, которые очень близко коррелируют друг с другом.

Используя этот вид мультивариативного анализа, можно наглядно оценить большой массив данных на простой двухфакторной плоскости.

В работе метод был использован для выделения свойств объектов, разделяющих их на кластеры. В частности, отделение почв Монголии от почв юго-востока Европейской России и Казахстана по биоклиматическим характеристикам, включенным в фактор и дальнейшее определение этих самых характеристик.

Корреляционно-регрессионный анализ. Эта методика позволяет установить связи между показателями, оценить влияние факторов на объект изучения и составить прогноз дальнейшего поведения объекта при заданных показателях. В итоге мы получаем упрощенную модель исходной системы, которую можно использовать для дальнейшего анализа.

Результаты

Общая статистическая характеристика почвенных свойств. Итоговая база данных почвенных разрезов каштановых почв по территории Юго-Востока России и Западного

Казахстана (рис. 6) и Монголии (рис. 7) включила в себя данные 103 профилей (49 – Россия (Казахстан) и 54 – Монголия). Рассмотренные параметры: гранулометрический состав, содержание карбонатов, гумуса, сумма солей (табл. 1).

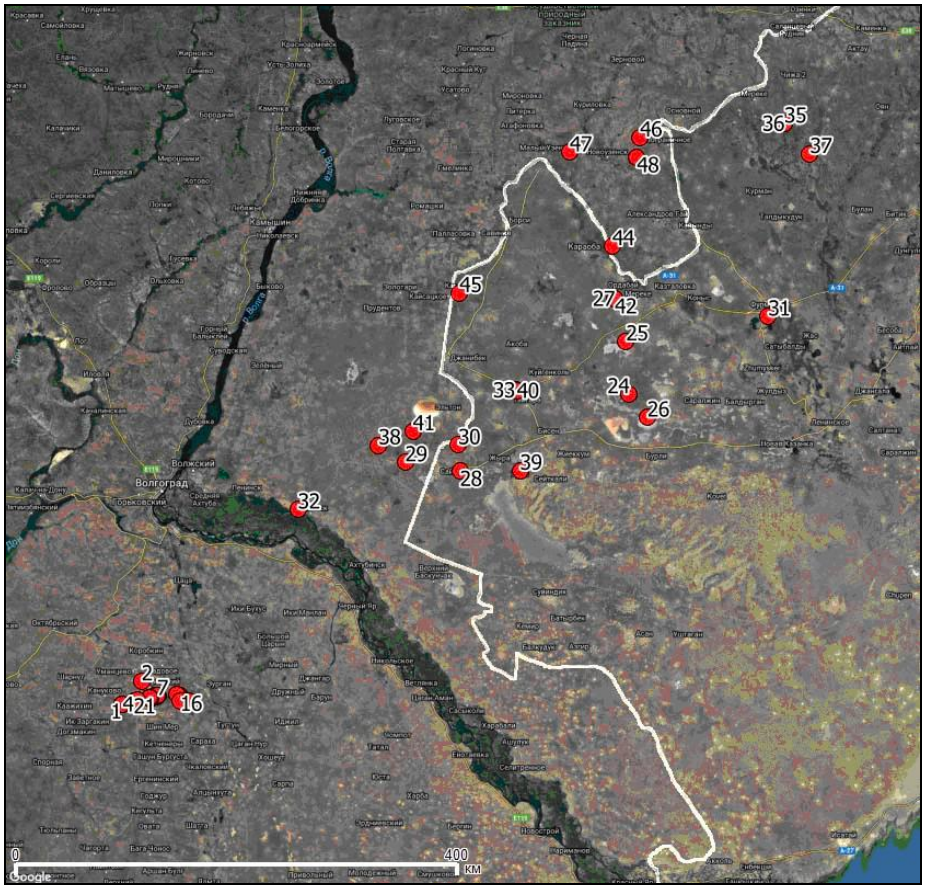


Рис. 6. Расположение почвенных разрезов на территории Прикаспия.
Fig. 6. Locations of soil profiles in the Caspian territory.

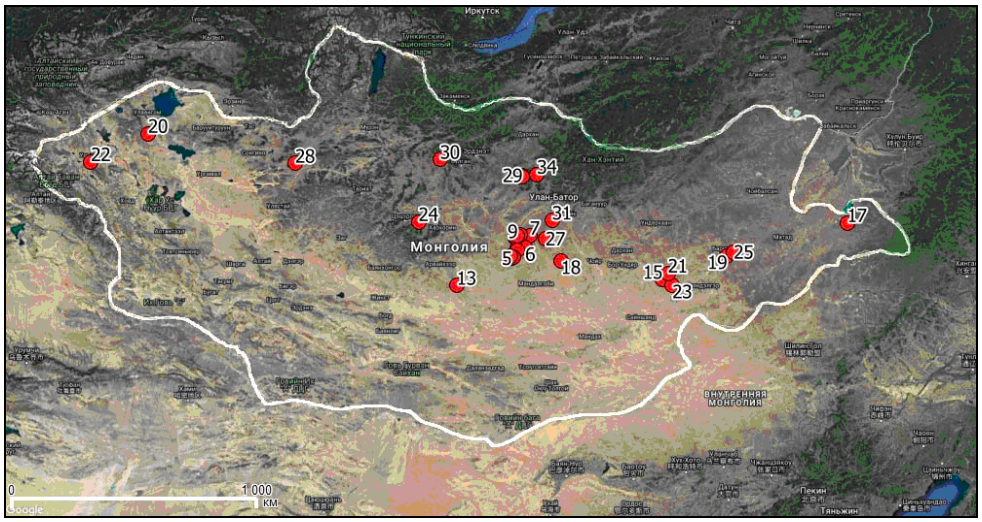


Рис. 7. Расположение почвенных разрезов на территории Монголии.
Fig. 7. Locations of soil profiles in Mongolia.

Таблица 1. Статистическая характеристика свойств каштановых почв, составленная на основе созданной базы данных. **Table 1.** Statistical characteristics of chestnut soils features, based on our database.

	Монголия	Глубина	Верхний квартиль	Нижний квартиль	Медиана	Прикаспий	Глубина	Верхний квартиль	Нижний квартиль	Медиана
<0.001, (%)	0-10	5	9.7	3.3	6.0	0-10	5	25.8	15.2	19.9
	10-20	15	10.8	4.6	6.4	10-20	15	28.9	20.1	25.1
	20-30	25	12.5	4.2	8.1	20-30	25	30.8	23.4	27.1
	30-40	35	15.8	5.0	9.2	30-40	35	31.0	22.6	27.3
	40-50	45	17.2	4.4	9.9	40-50	45	30.1	21.0	26.0
	50-70	60	15.6	6.0	9.5	50-70	60	28.5	21.7	25.0
	70-100	85	14.7	6.0	9.5	70-100	85	26.1	19.5	23.6
	100-150	125	13.2	5.0	9.3	100-150	125	27.7	17.8	22.8
Физ. Глина, (%)	0-10	5	23.9	10.3	15.1	0-10	5	44.2	27.7	37.6
	10-20	15	23.4	12.1	17.6	10-20	15	47.9	33.7	41.9
	20-30	25	24.4	11.6	18.5	20-30	25	50.2	36.7	43.9
	30-40	35	27.7	12.0	21.3	30-40	35	49.7	35.0	43.5
	40-50	45	29.5	12.1	20.8	40-50	45	45.1	32.9	39.8
	50-70	60	25.6	12.7	19.8	50-70	60	42.4	31.8	36.5
	70-100	85	23.5	10.3	16.3	70-100	85	41.3	25.2	33.9
	100-150	125	22.0	9.3	16.5	100-150	125	44.5	25.3	33.2
$CaCO_3$, (%)	0-10	5	1.1	0.0	0.0	0-10	5	0.5	0.0	0.1
	10-20	15	2.3	0.0	0.0	10-20	15	0.9	0.0	0.1
	20-30	25	8.4	0.0	0.5	20-30	25	3.6	0.2	1.1
	30-40	35	8.7	0.2	2.0	30-40	35	7.2	2.2	2.9
	40-50	45	12.4	0.6	3.5	40-50	45	14.3	3.2	5.9
	50-70	60	11.0	0.7	6.1	50-70	60	10.7	3.8	8.3
	70-100	85	13.9	0.8	4.4	70-100	85	11.5	2.7	5.5
	100-150	125	5.3	0.3	3.4	100-150	125	8.6	2.2	4.8
Гумус, (%)	0-10	5	2.7	1.6	2.0	0-10	5	3.7	1.6	2.1
	10-20	15	2.8	1.4	1.7	10-20	15	2.7	1.4	1.8
	20-30	25	2.3	1.0	1.5	20-30	25	2.0	1.2	1.5
	30-40	35	1.8	0.8	1.2	30-40	35	1.6	1.1	1.3
	40-50	45	1.3	0.4	0.9	40-50	45	1.3	0.8	1.0
	50-70	60	0.8	0.1	0.4	50-70	60	1.0	0.5	0.8
	70-100	85	0.3	0.0	0.0	70-100	85	0.7	0.3	0.5
	100-150	125	0.0	0.0	0.0	100-150	125	0.6	0.4	0.5
Сумма солей, (%)	0-10	5	0.06	0.03	0.04	0-10	5	0.07	0.03	0.05
	10-20	15	0.07	0.03	0.05	10-20	15	0.06	0.04	0.05
	20-30	25	0.10	0.04	0.06	20-30	25	0.07	0.04	0.05
	30-40	35	0.10	0.04	0.07	30-40	35	0.08	0.05	0.06
	40-50	45	0.11	0.05	0.07	40-50	45	0.10	0.06	0.07
	50-70	60	0.10	0.05	0.07	50-70	60	0.14	0.06	0.07
	70-100	85	0.10	0.05	0.07	70-100	85	0.26	0.06	0.10
	100-150	125	0.09	0.05	0.06	100-150	125	0.47	0.06	0.15

По вышеприведенной сводной таблице были построены профильные распределения по каждому показателю (рис. 8-12).

Профильные распределения гумуса для обоих районов исследования сходны. До глубины 80 см идет постепенное уменьшение содержания гумуса вниз по профилю. На глубинах 80-120 распределение не дифференцировано, однако отмечаются относительно повышенные значения для России и Западного Казахстана в сравнении с Монголией.

Анализируя графики распределения карбонатов, стоит отметить хорошо выраженный карбонатно-аккумулятивный горизонт, присущий данному типу почв. Максимум карбонатов располагается в срединных горизонтах на глубинах 50-70 см. Также заметно отличие в средних максимальных значениях, повышенное для территории России. Скорее всего, наблюдаемые значения связаны с подстилающей породой.

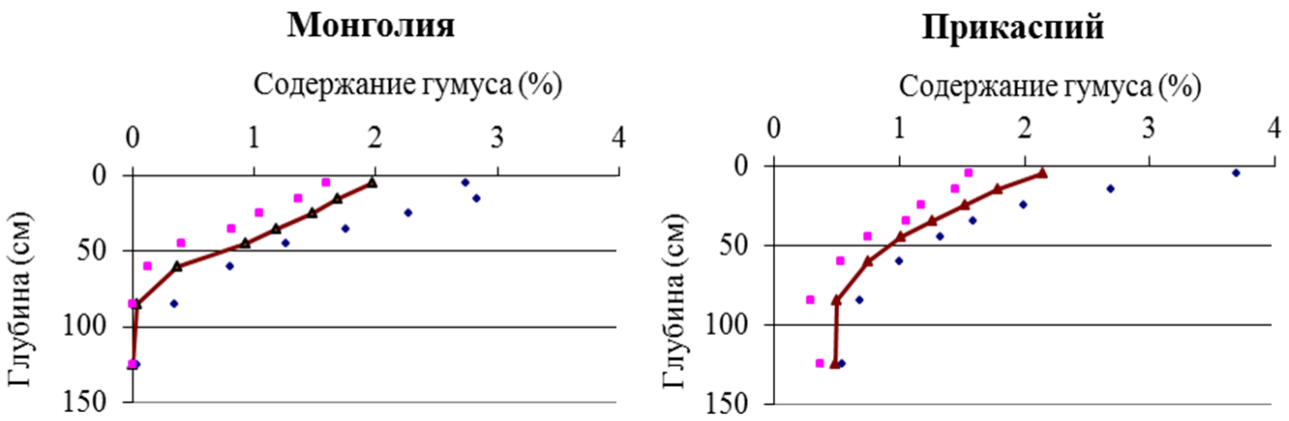


Рис. 8. Профильные распределения гумуса (медиана и квартили).
Fig. 8. Profile distribution of humus (median and quartiles).

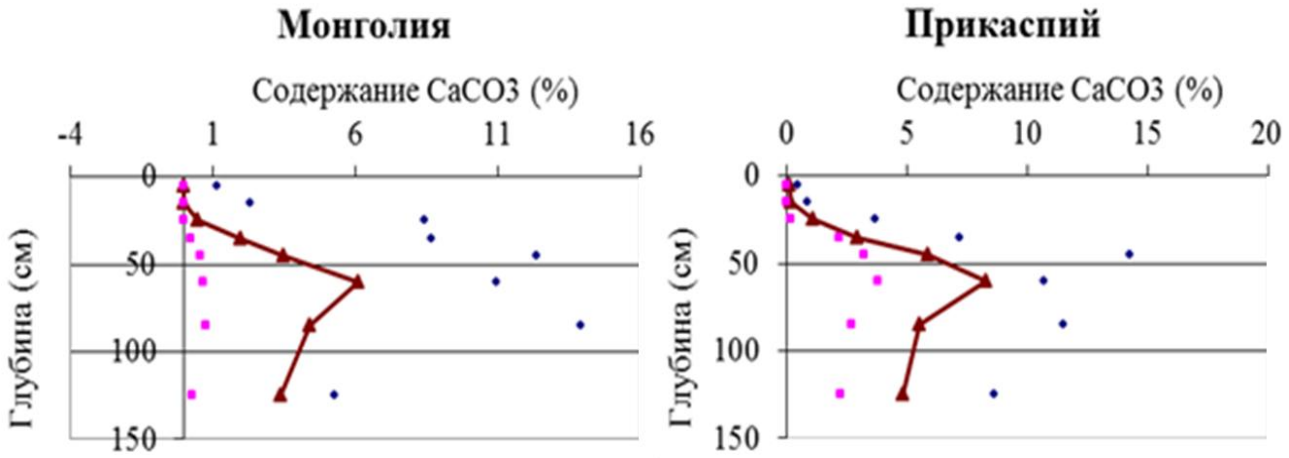


Рис. 9. Профильные распределения $CaCO_3$ (медиана и квартили).
Рис. 9. Profile distribution of $CaCO_3$ (median and quartiles).

Текстурная дифференциация по илу хорошо выражена в почвах Прикаспия, в отличие от почв Монголии. Это связано с характерным средне/тяжелосуглинистым гранулометрическим составом каштановых почв Прикаспийской низменности. В Монголии гранулометрический состав супесчаный/легкосуглинистый.

Для территории Прикаспия (Юго-восток Европейской части России и Западный Казахстан) характерны засоленные почвообразующие породы. Вследствие этого на графике прослеживается увеличение содержания солей вниз по профилю. Также отмечается большой разброс значений, возрастающих в том же направлении, возможно связанный с разным уровнем промытости почв от солей. Профиль распределения солей в почвах Монголии не дифференцирован в связи с незасоленной почвообразующей породой.

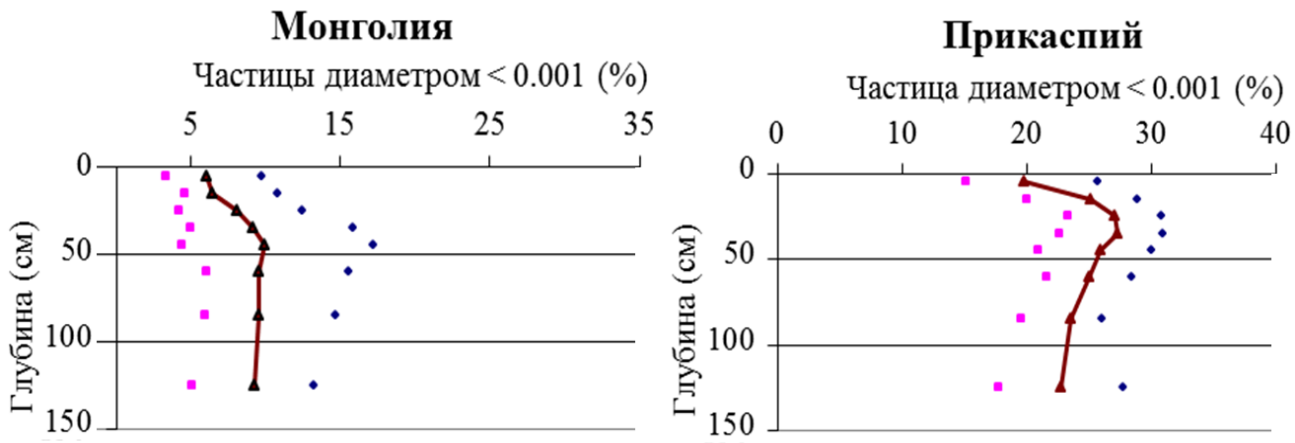


Рис. 10. Профильные распределения илистой фракции (медиана и квартили).
Fig. 10. Profile distribution of silty fraction (median and quartiles).

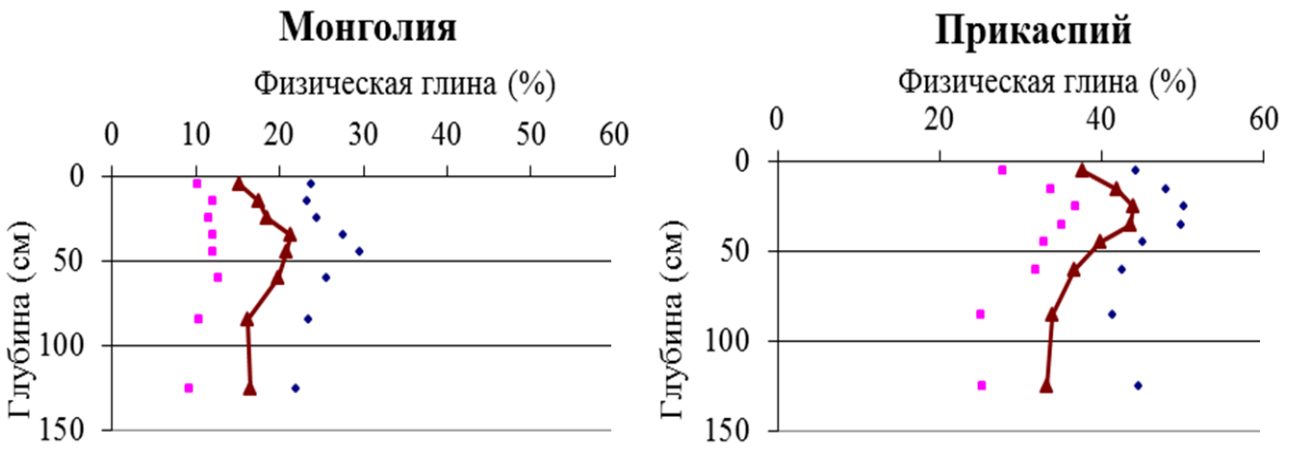


Рис. 11. Профильные распределения физической глины (медиана и квартили).
Рис. 11. Profile distribution of physical clay (median and quartiles).

Сравнительная статистическая характеристика обобщенных почвенных свойств каштановых почв Монголии и Прикаспия (Российской и Казахстанской частей). Для проведения анализа различий, было использовано 7 обобщенных свойств почвенных профилей для дальнейшего пространственного анализа данных: 1) средневзвешенное содержание гумуса в слое 0.5 м; 2) средневзвешенное содержание физ. глины в слое 1 м; 3) средневзвешенное содержание ила в слое 1 м; 4) средневзвешенное содержание солей в слое 1 м; 5) средневзвешенное содержание карбонатов в слое 1 м; 6) отношение ила в слое 20-40 см к слою 0-20 см; 7) отношение карбонатов в слое 50-70 см к слою 100-150 см.

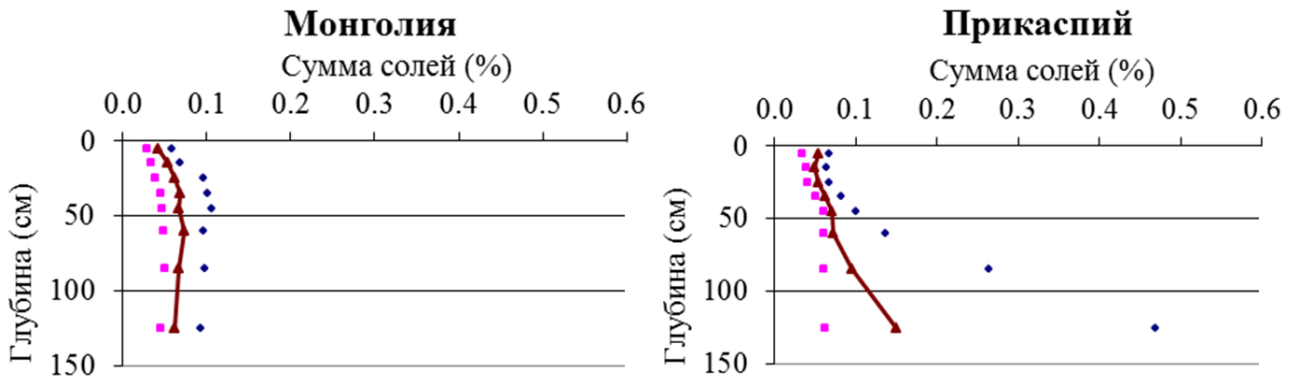
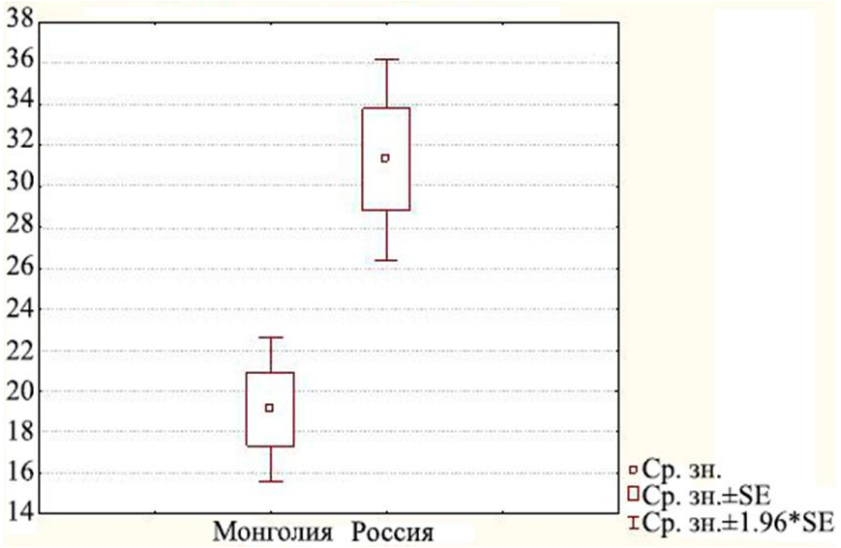


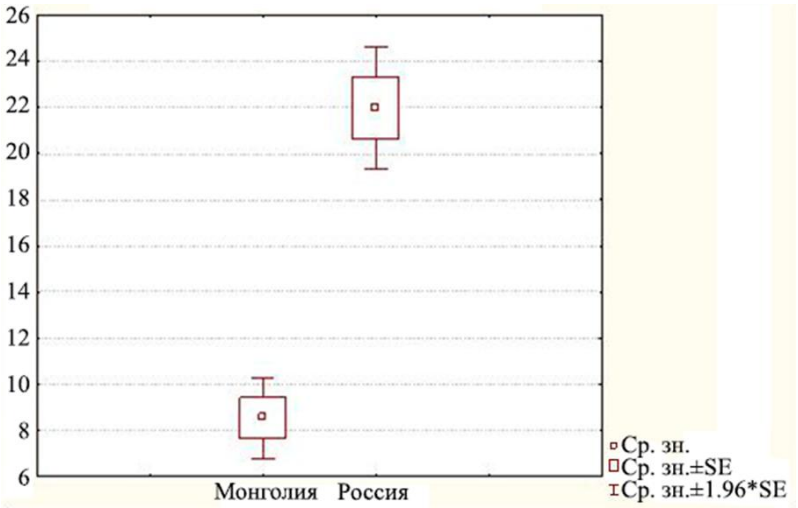
Рис. 12. Профильные распределения суммы солей (медиана и квартили).
Рис. 12. Profile distribution of salts sum (median and quartiles).



Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	19.1	-3.7	65	0.0005	28	9.47	2.71	0.0084
Россия	31.3				39	15.59		

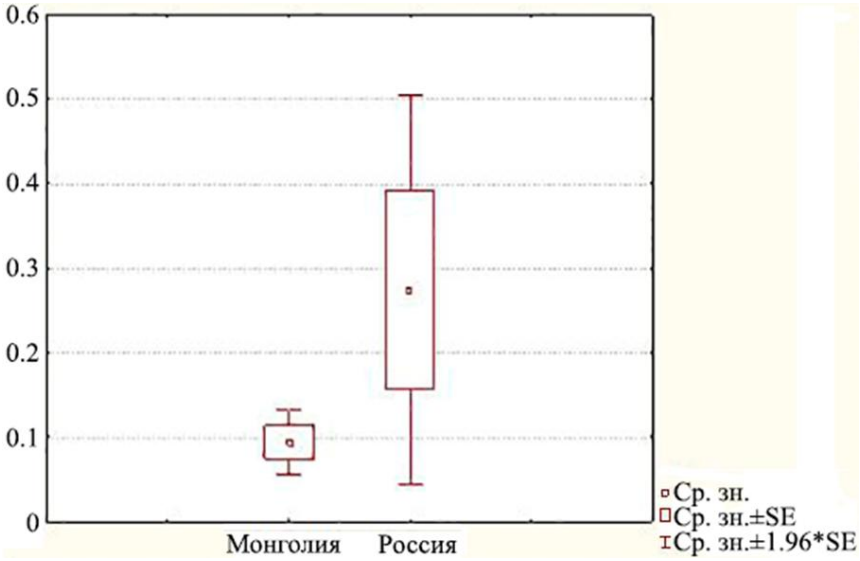
Рис. 13. Средневзвешенное содержание физической глины в метровом слое каштановых почв Монголии и Прикаспия. **Fig. 13.** Weighted mean of physical clay content in 1-meter-deep layer of chestnut soils of Mongolia and Caspian region.

Сравнение средних по t-критерию показало, что каштановые почвы юга Европейской России и Монголии сходны по содержанию гумуса и выраженности карбонатно-иллювиального горизонта (по соотношению содержания карбонатов в слое 50-70 и 100-150 см), то есть они схожи по основным диагностическим признакам каштановых почв. Почвы двух биоклиматических фаций различаются по гранулометрическому составу, выраженности текстурной дифференциации (по соотношению содержания ила в слое 20-40 и 0-20 см) и засоленности. Эти различия обусловлены литогенным фактором: различием в гранулометрическом составе и засоленности почвообразующих пород регионов. Отмечается высокая вариабельность по всем свойствам почв внутри климатических фаций.



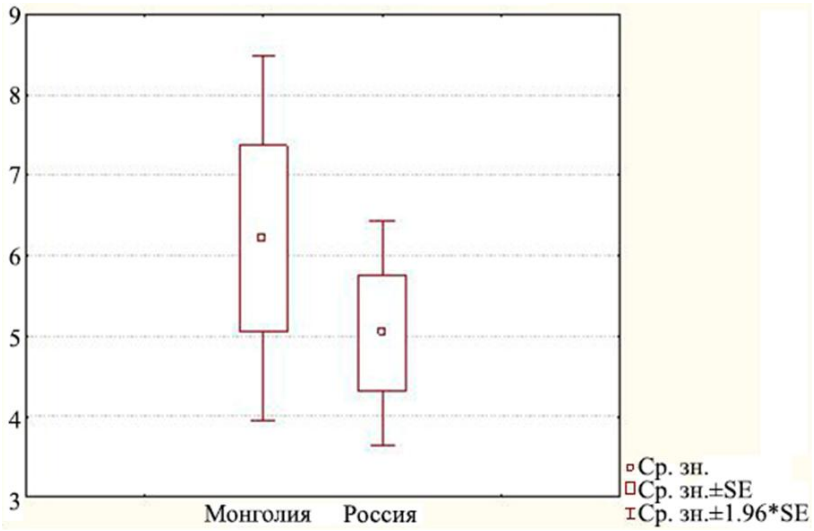
Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	8.54	-7.7	61	0.0005	27	4.69	2.97	0.0051
Россия	21.99				36	8.09		

Рис. 14. Средневзвешенное содержание ила в метровом слое каштановых почв Монголии и Прикаспия. **Fig. 14.** Weighted mean of silt content in 1-meter-deep layer of chestnut soils of Mongolia and Caspian region.



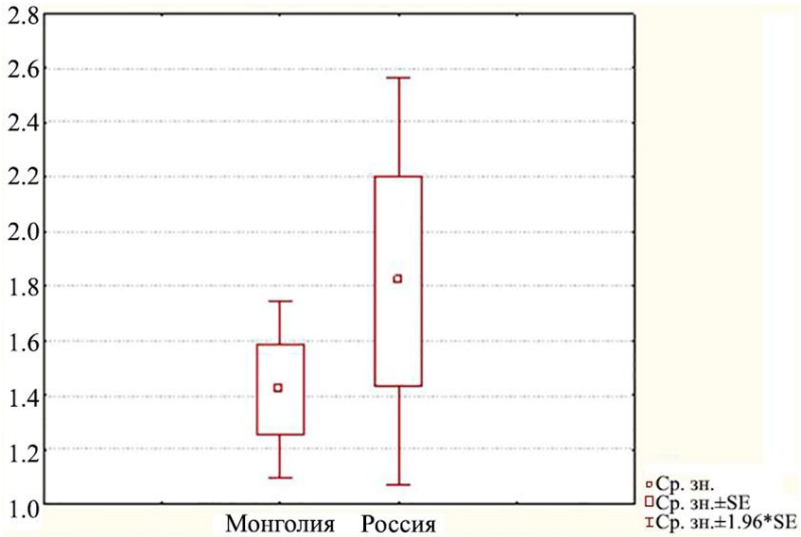
Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	0.094	-0.825	55	0.412	13	0.072	116.8	0.00000
Россия	0.27				44	0.78		

Рис. 15. Средневзвешенное содержание солей в метровом слое почв Монголии и Прикаспия. **Fig. 15.** Weighted mean of salts content in 1-meter-deep layer of chestnut soils of Mongolia and Caspian region.



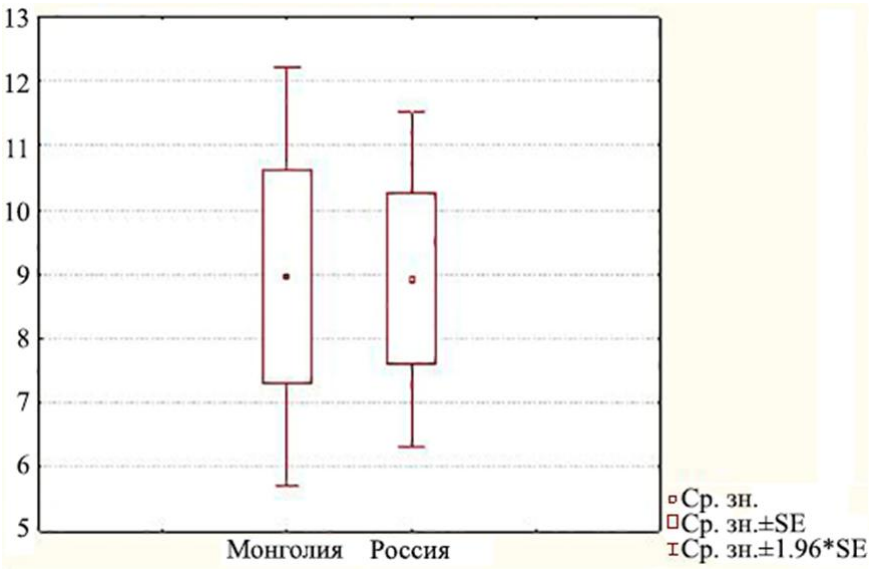
Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	6.21	0.89	56	0.38	27	6.01	2.29	0.030
Россия	5.04				31	3.96		

Рис. 16. Средневзвешенное содержание карбонатов в метровом слое почв Монголии и Прикаспия. **Fig. 16.** Weighted mean of carbonates content in 1-meter-deep layer of chestnut soils of Mongolia and Caspian region.



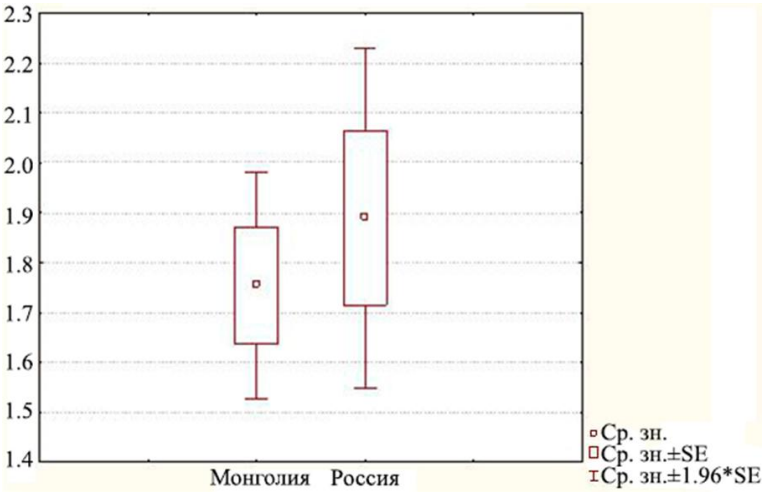
Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	1.42	-0.90	57	0.37	27	0.86	6.28	0.000009
Россия	1.82				32	2.16		

Рис. 17. Отношение ила в слое 20-40 см к слою 0-20 см в Монголии и Прикаспии.
Fig. 17. Ratio between silt in layer of 20-40 and 0-20 cm deep in Mongolia and Caspian region.



Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	8.96	0.018	43	0.985	24	8.16	1.80	0.188
Россия	8.92				21	6.08		

Рис. 18. Отношение карбонатов в слое 50-70 см к слою 100-150 см в Монголии и Прикаспии. **Fig. 18.** Ratio between carbonates in layer of 50-70 and 100-150 cm deep in Mongolia and Caspian region.



Страна	Среднее	Критерий Стью-дента	Число степеней свободы	Уровень значи-мости	Кол-во разре-зов	Стан-дартное отклонение	Крите-рий Фишера	Уровень значи-мости
Монголия	1.75	0.646	64	0.520	33	0.67	2.25	0.025
Россия	1.89				33	1.000		

Рис. 19. Средневзвешенное содержание гумуса в верхнем слое глубиной 50 см в Монголии и Прикаспии. **Fig. 19.** Weighted mean of humus content in 50-centimeter-deep layer in Mongolia and Caspian region.

Анализ сходства/различия климатических параметров. Большинство климатических факторов тесно связаны между собой, поэтому было принято решение сократить их количество, отсекая те, которые сильно коррелируют между собой.

Пороговым значением был выбран коэффициент корреляции, равный 0.8. Результаты этого анализа приведены в таблице 2. По итогам было выделено 11 климатических факторов, вошедших в последующие статистические анализы: среднегодовая температура, изотермичность, средняя температура самого сухого и самого влажного кварталов, минимальная температура самого холодного месяца, годовые осадки, осадки в самый сухой и самый влажный кварталы, сезонность температур, аридность, почвенная влага.

Анализ климатических параметров (метод главных компонент). Анализируя полученные результаты по распределению климатических характеристик на двухфакторной плоскости по почвам Монголии, следует отметить выделение в левую часть плоскости (фактор 1) разрезов, расположенных на западе и на востоке каштановой зоны Монголии (разрезы 17, 22, 20, 28, 24, 30). А также выделившиеся по второму фактору разрезы 30 и 24 (лугово-каштановые почвы) и 28 и 20 (каштановая и светло-каштановая почвы).

В первый фактор попали следующие показатели: осадки в самый сухой квартал (месяц) и в самый холодный месяц в году и аридность. Остальные параметры вошли во второй фактор. Такой разброс по данным признакам может быть объяснен различиями в континентальности климата и рельефом местности. Разрезы, находящиеся в центре каштановой зоны Монголии, расположились также вместе в центре двухфакторной плоскости распределения климатических показателей.

Двухфакторная плоскость распределения климатических признаков по территории Прикаспия имеет менее четкую дифференциацию. Показатели в первом факторе: максимальная температура самого теплого месяца, общие осадки и осадки в самый сухой и влажный кварталы, сезонность, аридность и водно-почвенный баланс. Второй фактор включил в себя осадки в самый холодный месяц. Однако при более детальном рассмотрении видно разделение по первому фактору. В левую часть выделились разрезы, расположенные на юго-западе исследуемого района (Россия), а в правую – на северо-востоке (Западный Казахстан). По второму фактору произошло разделение разрезов с территории Западного Казахстана с юга на север (сверху вниз соответственно).

Обобщенный анализ климатических параметров.

Обобщенный анализ климатических параметров методом главных компонент, выявил четкое разделение на двухфакторной плоскости (рис. 22). При этом в правую часть графика попали все разрезы, находящиеся на территории Монголии, а в левую – Прикаспийской низменности.

В первый фактор, описывающий 78% различий (рис. 22), вошли температурные показатели, осадки, сезонность и водно-почвенный баланс. Различия в данных показателях для анализируемых районов объясняются усиливающейся континентальностью климата.

Многомерный корреляционно-регрессионный анализ. Это последний этап статистической обработки. Он был проведен с целью выявления связей между почвенными свойствами и климатическими показателями. В качестве зависимых переменных рассматривались обобщенные свойства почвенных профилей, в качестве независимых – климатические показатели.

По результатам проведенного многомерного анализа корреляций климатических факторов и основных диагностических свойств каштановых почв (обобщенных свойств профилей), наибольшая связь была выявлена с содержанием ила и физической глины в метровом слое. Также была отмечена средняя степень корреляции с содержанием карбонатов и солей в метровом слое. Наименее достоверной оказалась взаимосвязь в регрессионной модели климатических факторов со средневзвешенным содержанием солей в метровом слое.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между климатическими параметрами. *Условные обозначения:* 1 – среднегодовая температура, 2 – среднемесячная амплитуда колебаний температур в течение дня, 3 – изотермичность, 4 – сезонность температур, 5 – максимальная температура самого теплого месяца, 6 – минимальная температура самого холодного месяца, 7 – годовой температурный диапазон, 8 – средняя температура самого влажного квартала, 9 – средняя температура самого сухого квартала, 10 – средняя температура самого теплого квартала, 11 – средняя температура самого холодного квартала, 12 – годовые осадки, 13 – осадки в самый влажный месяц, 14 – осадки в самый сухой месяц, 15 – сезонность осадков (коэффициент вариации), 16 – осадки в самый влажный квартал, 17 – осадки в самый сухой квартал, 18 – осадки в самый теплый квартал, 19 – осадки в самый холодный квартал, 20 – аридность, 21 – почвенная влага. **Table 2.** Coefficients of correlation between climatic indices. *Notes:* 1 – average annual t°C, 2 – average monthly amplitude of oscillation of t°C during the day, 3 – isotermality, 4 – seasonality of t°C, 5 – maximal t°C of the warmest month, 6 – minimal t°C of the coldest month, 7 – annual t°C range, 8 – average t°C of the wettest quarter, 9 – average t°C of the driest quarter, 10 – average t°C of the warmest quarter, 11 – average t°C of the coldest quarter, 12 – annual precipitation, 13 – precipitations of the wettest month, 14 – precipitations of the driest month, 15 – seasonality of precipitations (coefficient of variation), 16 – precipitations of the wettest quarter, 17 – – precipitations of the driest quarter, 18 – – precipitations of the warmest quarter, 19 – – precipitations of the coldest quarter, 20 – aridity, 21 – soil humidity.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**
1	1.00	-0.94	-0.51	0.87	0.99	0.97	0.96	0.53	0.99	0.77	-0.76	0.95	0.96	0.96	-0.78	-0.80	-0.95	-0.93	-0.88	0.66	0.82
2	-0.94	1.00	0.69	-0.79	-0.93	-0.94	-0.92	-0.48	-0.93	-0.72	0.84	-0.97	-0.96	-0.97	0.86	0.87	0.97	0.89	0.81	-0.62	[illegible]
3	-0.51	0.69	1.00	-0.67	-0.41	-0.51	-0.67	-0.33	-0.41	-0.28	0.75	-0.64	-0.58	-0.59	0.73	0.72	0.64	0.29	0.14	-0.19	[illegible]
4	0.87	-0.79	-0.67	1.00	0.79	0.81	0.96	0.53	0.79	0.58	-0.73	0.81	0.80	0.81	-0.74	-0.75	-0.82	-0.64	-0.56	0.43	0.60
5	0.99	-0.93	-0.41	0.79	1.00	0.97	0.91	0.50	1.00	0.79	-0.71	0.93	0.95	0.95	-0.74	-0.76	-0.93	-0.97	-0.94	0.69	0.84
6	0.97	-0.94	-0.51	0.81	0.97	1.00	0.92	0.49	0.97	0.80	-0.73	0.96	0.96	0.96	-0.76	-0.79	-0.95	-0.93	-0.88	0.70	0.84
7	0.96	-0.92	-0.67	0.96	0.91	0.92	1.00	0.55	0.91	0.68	-0.80	0.92	0.92	0.92	-0.82	-0.83	-0.93	-0.80	-0.72	0.55	0.72
8	0.53	-0.48	-0.33	0.53	0.50	0.49	0.55	1.00	0.49	0.45	-0.37	0.50	0.53	0.50	-0.37	-0.39	-0.47	-0.43	-0.40	0.41	0.50
9	0.99	-0.93	-0.41	0.79	1.00	0.97	0.91	0.49	1.00	0.79	-0.71	0.93	0.95	0.95	-0.75	-0.77	-0.94	-0.98	-0.95	0.69	0.84
10	0.77	-0.72	-0.28	0.58	0.79	0.80	0.68	0.45	0.79	1.00	-0.28	0.83	0.85	0.84	-0.32	-0.35	-0.79	-0.78	-0.77	0.94	0.96
11	-0.76	0.84	0.75	-0.73	-0.71	-0.73	-0.80	-0.37	-0.71	-0.28	1.00	-0.76	-0.74	-0.76	1.00	0.99	0.80	0.64	0.54	-0.21	[illegible]
12	0.95	-0.97	-0.64	0.81	0.93	0.96	0.92	0.50	0.93	0.83	-0.76	1.00	0.99	1.00	-0.79	-0.80	-0.99	-0.89	-0.82	0.75	0.86
13	0.96	-0.96	-0.58	0.80	0.95	0.96	0.92	0.53	0.95	0.85	-0.74	0.99	1.00	1.00	-0.77	-0.79	-0.99	-0.91	-0.85	0.77	0.88
14	0.96	-0.97	-0.59	0.81	0.95	0.96	0.92	0.50	0.95	0.84	-0.76	1.00	1.00	1.00	-0.78	-0.80	-0.99	-0.91	-0.85	0.76	0.87
15	-0.78	0.86	0.73	-0.74	-0.74	-0.76	-0.82	-0.37	-0.75	-0.32	1.00	-0.79	-0.77	-0.78	1.00	0.99	0.82	0.67	0.58	-0.24	[illegible]
16	-0.80	0.87	0.72	-0.75	-0.76	-0.79	-0.83	-0.39	-0.77	-0.35	0.99	-0.80	-0.79	-0.80	0.99	1.00	0.84	0.70	0.60	-0.29	[illegible]
17	-0.95	0.97	0.64	-0.82	-0.93	-0.95	-0.93	-0.47	-0.94	-0.79	0.80	-0.99	-0.99	-0.99	0.82	0.84	1.00	0.89	0.81	-0.70	[illegible]
18	-0.93	0.89	0.29	-0.64	-0.97	-0.93	-0.80	-0.43	-0.98	-0.78	0.64	-0.89	-0.91	-0.91	0.67	0.70	0.89	1.00	0.99	-0.71	[illegible]
19	-0.88	0.81	0.14	-0.56	-0.94	-0.88	-0.72	-0.40	-0.95	-0.77	0.54	-0.82	-0.85	-0.85	0.58	0.60	0.81	0.99	1.00	-0.71	[illegible]
20	0.66	-0.62	-0.19	0.43	0.69	0.70	0.55	0.41	0.69	0.94	-0.21	0.75	0.77	0.76	-0.24	-0.29	-0.70	-0.71	-0.71	1.00	0.97
21	0.82	-0.76	-0.29	0.60	0.84	0.84	0.72	0.50	0.84	0.96	-0.39	0.86	0.88	0.87	-0.42	-0.47	-0.82	-0.84	-0.82	0.97	1.00

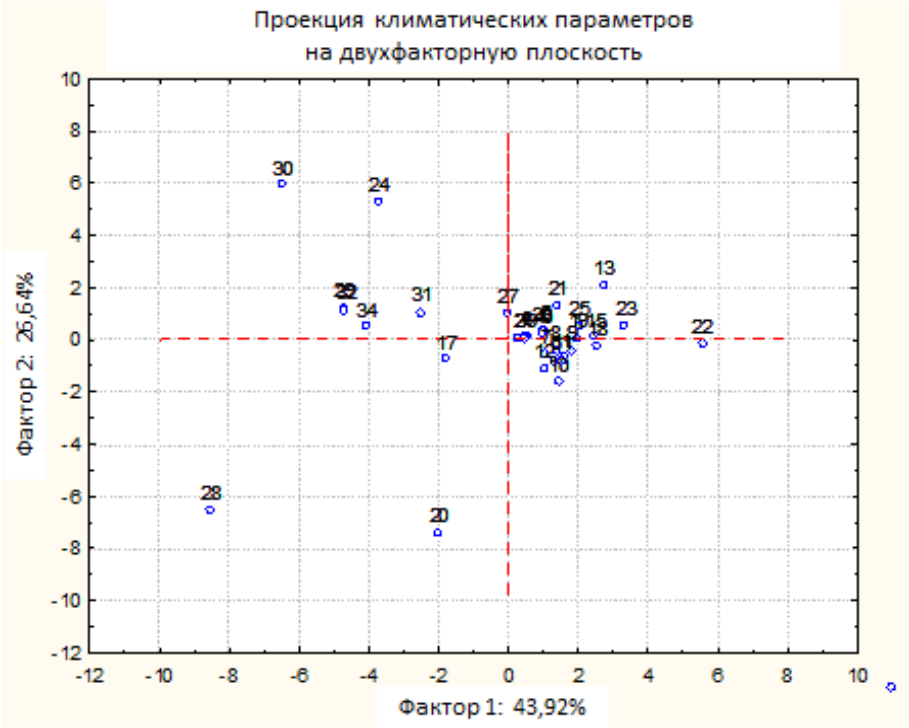


Рис. 20. Статистическое распределение климатических показателей на двухфакторной плоскости по разрезам на территории Монголии. **Fig. 20.** Statistical distribution of climatic indices on the two-factor plane in the soil profiles of Mongolia.

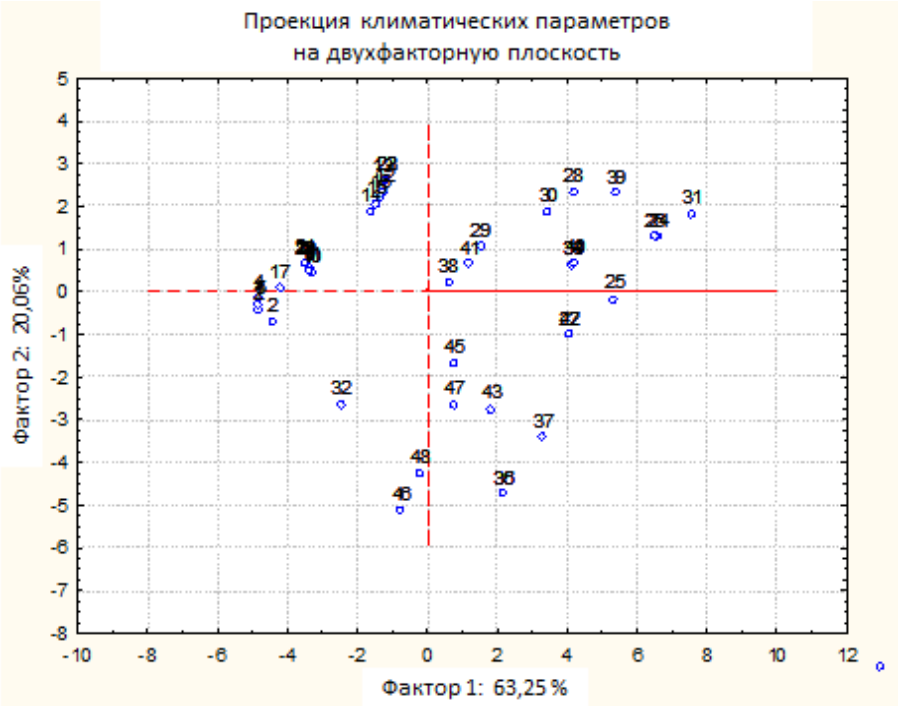


Рис. 21. Статистическое распределение климатических показателей на двухфакторной плоскости по разрезам на территории Прикаспия. **Fig. 21.** Statistical distribution of climatic indices on the two-factor plane in the soil profiles of Caspian region.

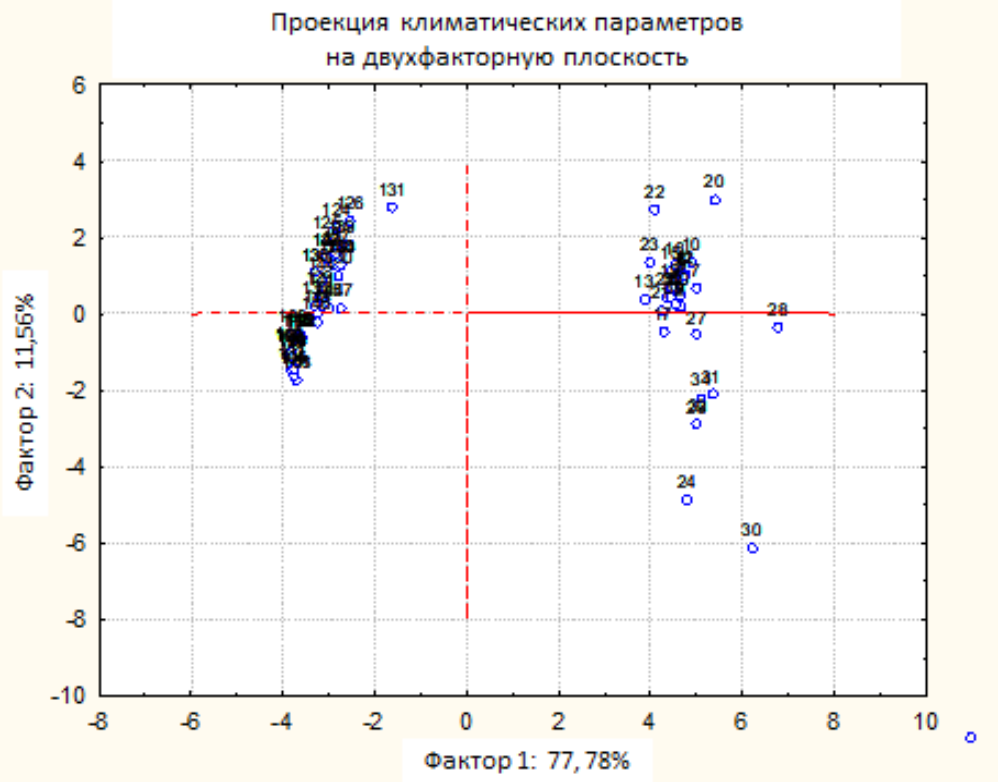


Рис. 22. Статистическое распределение климатических показателей на двухфакторной плоскости по разрезам в Прикаспии и Монголии. **Fig. 22.** Statistical distribution of climatic indices on the two-factor plane in the soil profiles of Mongolia and Caspian region.

Выводы

Была составлена и статистически проанализирована база данных по каштановым почвам юго-востока Европейской России, Западного Казахстана и Монголии, включающая в себя 103 разреза (49 на территории России и Западного Казахстана, 54 на территории Монголии). База содержит данные по почвенным свойствам и биоклиматическим характеристикам. На основе анализа базы данных выделены обобщенные свойства почвенных профилей каштановых почв: средневзвешенное содержание гумуса в верхнем 50 см слое, средневзвешенное содержание физической глины в верхнем метровом слое, содержание илистой фракции в верхнем метровом слое, содержание карбонатов в верхнем метровом слое, содержание солей в верхнем метровом слое, отношение ила в слое 20-40 см к слою 0-20 см, отношение карбонатов в слое 50-70 см к слою 100-150 см.

Сравнение значений свойств каштановых почв разных провинций по t-критерию, позволило сделать некоторые выводы.

1. Каштановые почвы юга Европейской России и Монголии достаточно сходны по содержанию гумуса и выраженности карбонатно-иллювиального горизонта (соотношению содержания карбонатов в слое 50-70 и 100-150 см), то есть они схожи по основным диагностическим признакам каштановых почв согласно критериям WRB (2014).

2. Почвы двух биоклиматических фаций резко различаются по гранулометрическому составу, выраженности текстурной дифференциации (соотношению содержания ила в слое 20-40 и 0-20 см) и засоленности. Эти различия обусловлены, в первую очередь, литогенным фактором: различием в гранулометрическом составе и засоленности почвообразующих пород юга Европейской России и Монголии.

Таблица 3. Результаты корреляционно-регрессионного анализа свойств каштановых почв и климатических параметров провинций. **Table 3.** Results of correlation-regression analysis of properties of chestnut soils and climatic parameters of provinces.

Почвенное свойство	Общий вид модели	R^2 модели	Ошибка оценки
Средневзвешенное содержание физ. глины в метровом слое	81.12+3.18x1–0.56x2–0.83x3+1.04x4– –1.22x5+0.49x6–0.58x7–1.19x8– –0.05x9+0.03x10–0.81x11	0.80	±8.96
Средневзвешенное содержание ила в метровом слое	108.24+1.35x1–2.12x2–0.64x3+0.56x4– –1.41x5+0.03x6+0.26x7+0.10x8– –0.07x9–0.08x11	0.82	±5.88
Средневзвешенное содержание солей в метровом слое	1.2–0.08x1+0.01x3+0.02x5	0.32	±0.11
Средневзвешенное содержание карбонатов в метровом слое	–13.05+5.52x1+0.66x2–0.09x3+0.02x4– –3.83x5+0.13x6–0.11x7–0.43x8– –0.06x9+0.03x10–0.60x11	0.38	±0.38
Отношение ила в слое 20-40 см к слою 0-20 см	8.78+0.52x1–0.20x2+0.03x3+0.01x4– –0.54x5–0.03x6+0.06x7+0.09x8– –0.01x9+0.01x11	0.39	±0.61
Отношение карбонатов в слое 50-70 см к слою 100-150 см	22.35+5.92x1+0.17x2–0.20x3+0.12x4– –5.43x5+0.21x6–0.06x7–0.58x8– –0.10x9+0.03x10–0.64x11	0.38	±7.32

Примечания к таблице 3: x1 – среднегодовая температура (t°C), x2 – изотермичность (б/р), x3 – средняя температура самого сухого квартала (t°C), x4 – средняя температура самого влажного квартала (t°C), x5 – минимальная температура самого холодного месяца (t°C), x6 – годовые осадки (мм), x7 – осадки в самый сухой квартал (мм), x8 – осадки в самый влажный месяц (мм), x9 – сезонность температур (б/р), x10 – аридность (б/р), x11 – почвенная влага (мм). **Note to Table 3:** x1 – average annual t°C, x2 – isothermality (б/р), x3 – average t°C of the driest quarter, x4 – average t°C of the wettest quarter, x5 – minimal t°C of the coldest month, x6 – annual precipitation (mm), x7 – precipitation of the driest quarter (mm), x8 – precipitation of the wettest month (mm), x9 – seasonality of temperatures (б/р), x10 – aridity (б/р), x11 – soil humidity (mm).

3. Отмечается высокая вариабельность по всем свойствам почв внутри климатических фаций.

4. В результате факторного анализа биоклиматических переменных было получено четкое разделение каштановых почв Прикаспийской низменности от почв Монголии по фактору, включившему в себя: температурные показатели, осадки, сезонность, а также водный баланс каштановых почв. (фактор «водно-почвенный баланс») указанных провинций.

5. Проведенный анализ с выбранными климатическими параметрами показал, что наибольшую связь с ними имеет средневзвешенное содержание физической глины и ила в метровом слое (R^2=0.8). Средней по выраженности оказалась связь между средневзвешенным содержанием солей в метровом слое (R^2=0.32) и средневзвешенным содержанием карбонатов в метровом слое (R^2=0.38).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алисов Б.П. 1936. Географические типы климатов // Метеорология и гидрология. № 6. С. 16-25.

Андроников В.Л., Шершукова Г.А. 1975. Почвы сухостепного стационара сельскохозяйственного объединения «Ялант» сомона Унжул Центрального аймака МНР. М.-Улан-Батор. Архив Совместной Российско-монгольской комплексной биологической экспедиции. 25 с.

Андроников В.Л., Шершукова Г.А. 1978. Почвенный покров госхоза Унжул // Почвенный покров основных природных зон Монголии. М.: Наука. С. 103-177.

Береснева И.А. 1984. Климат // Сухие степи МНР. Ч. 1. Стационарные исследования (сомон Унджул). Л.: Наука. С. 52-61.

Береснева И.А. 1988. Мезо- и микроклиматические ресурсы МНР // Природные условия, растительный и животный мир Монголии. Пущино. С. 15-38.

Беспалов Н.Д. 1951. Почвы Монгольской народной республики. М. 318 с.

Будина Л.П. 1964. Типы солонцовых комплексов // Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика / Ред. Е.Н. Иванова. М.: Наука. С. 196-258.

Будыко М.И. 1971. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат. 472 с.

Буяновский М.С., Доскач А.Г., Фридланд В.М. 1956. Природа и сельское хозяйство Волго-Уральского междуречья. М.: Издательство АН СССР. 229 с.

Васильев В.Г. 1959. Геологическое строение МНР. Л.: Государственная научно-техническая инициатива нефтяной и горно-топливной литературы. 494 с.

Герасимов И.П. 1933. О почвенно-климатических фациях СССР и прилегающих стран // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. Т. 8. Вып. 5. С. 38.

Доржготов Д. 1976. Классификация почв Монголии. Улан-Батор. 170 с.

Доржготов Д. 2003. Монгол орны хорс. Улан-Батор. 287 с.

Доржготов Д. 1973. Основные черты географии почв Северной Монголии и характеристика степных почв: дисс. … к.г.н. М.-Улан-Батор. 24 с.

Доржготов Д. 1992. Почвы Монголии: Генезис, систематика, география, ресурсы и использование. Диссертация на соискание степени доктора биологических наук. М. 529 с.

Доржготов Д., Батхишиг О. 2009. Почвы. Почвенно-географическое районирование Монголии // Национальный Атлас Монголии. Улан-Батор. С. 120-122.

Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

Исаченко А.Г. 1991. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа. 366 с.

Карандеева М.В. 1957. Геоморфология европейской части СССР. М: Изд-во МГУ. 314 с.

Ковда В.А. 1950. Почвы Прикаспийской низменности (северо-западной части). М.-Л.: Изд-во АН СССР. 255 с.

Кожемякин В.В. 1984. Млекопитающие // Сухие степи МНР. Ч. 1. Стационарные исследования (сомон Унджул). Л.: Наука. С. 93-95.

Лавренко Е.М. 1984. Сухие степи МНР. Академия наук СССР // Биологические ресурсы и природные условия МНР. Т. 29. Л.: Наука. 159 с.

Ларин И.В., Шифферс Е.В., Левина Ф.Я., Замятнин Б.Н., Иванина Л.И., Варивцева Е.А., Непли Г.Н., Сырокомская И.В. 1954. Основные закономерности распределения растительности и геоботаническое районирование северного Прикаспия в пределах междуречья Волга–Урал // Вопросы улучшения кормовой базы в степной, полупустынной и пустынной зонах СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. С. 9-30.

Маринов Н.А. 1967. Геологические исследования Монгольской Народной Республики М.: Недра. 842 с.

Мешалкина Ю.Л., Мартыненко И.А. 2017. Гармонизация данных по профилям, собранных из разных источников // Цифровая почвенная картография: учебное пособие / Ред. И.Ю. Савин, П.А. Докукин. М.: РУДН. С. 40-47.

Мозесон Д.Л. 1955. Микрорельеф северо-западной части Прикаспийской низменности и его влияние на поверхностный сток // Труды Института леса. Т. 25. Исследования Джаныбекского стационара. С. 55-65.

Мурзаев Э.М. 1952. Монгольская народная республика: Физико-географическое описание. М.: Географгиз. 422 с.

Национальный атлас России в 4 томах. 2004-2008 / Ред. А.В. Бородко, В.В. Свешников и др. М.: Роскартография. Т. 1. 496 с.; Т. 2. 495 с.; Т. 3. 495 с.; Т. 4. 495 с.

Николаева Т.В. 1971. Геоморфологическое строение Центральной Монголии. Л.: Изд-во ЛГУ. 152 с.

Ногина Н.А., Доржготов Д. 1982. Почвенно-географическое районирование Монголии // Почвоведение. № 4. С. 23-31.

Панкова Е.И. 1997. Закономерности формирования почвенного покрова и особенности почв степей и пустынь Монголии // Почвоведение. № 7. С. 789-798.

Панкова Е.И. 1974. Каштановые почвы Центрально-Азиатской почвенно-географической провинции // Почвоведение. № 12. С. 42-53.

Панкова Е.И. 1965. Каштановые почвы Монголии, их генетические и мелиоративные свойства. Диссертация на соискание степени к.г.н. М.: МГУ. 190 с.

Полевой определитель почв. 2008. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 182 с.

Полынов Б.Б., Лисовский В.И. 1930. Рекогносцировочные исследования в области Северной Гоби // Материалы комиссии по исследованиям Монгольской и Тувинской народных республик и Бурят-Монгольской АССР. Л.: Изд-во АН СССР. Вып. 9. 74 с.

Почвенно-географическое районирование СССР (в связи с сельскохозяйственным использованием земель). 1962. М.: Изд-во АН СССР. 422 с.

Почвенный покров основных природных зон Монголии. 1978 / Ред. Н.А. Ногина, Д. Доржготов. М.: Наука. 274 с.

Почвенный покров и почвы Монголии. 1984 / Ред. И.П. Герасимов, Н.А. Ногина, Д. Доржготов. М.: Наука. 194 с.

Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика. 1964. М.: Изд-во АН СССР. 292 с.

Прасолов Л.И. 1913. О мерзлоте в почвах юго-западной части Забайкальской области и в Монголии // Труды Троицко-Кяхтинского подотдела Приамурского отделения Русского географического общества. Иркутск-СПб. Т. 15. Вып. 2. С. 76-84.

Сафронова И.Н. 2001-2002. Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия // Геоботаническое картографирование. СПб.: БИН РАН. С. 44-65.

Селиванов Е.И. 1972. Неотектоника и геоморфология Монгольской Народной Республики. М.: Недра. 293 с.

Сукачев В.Н. 1955. Почвы и растительность опытных участков Аршань-Зельменского стационара // Труды института леса. Т. 28. М.: Изд-во АН СССР. 209 с.

Уфимцева К.А. 1984. Почвообразующие породы // Почвенный покров и почвы Монголии. М.: Наука. С. 15-21.

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 342 с.

Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity // Geoderma. No. 154. P. 138-152.

Zomer R.J., Trabucco A., Bossio D.A., van Straaten O., Verchot L.V. 2008. Climate Change Mitigation: A Spatial Analysis of Global Land Suitability for Clean Development Mechanism Afforestation and Reforestation // Agricultural Ecosystems and Environment. No. 126. P. 67-80.

Zomer R.J., Bossio D.A., Trabucco A., Yuanjie L., Gupta D.C., Singh V.P. 2007. Trees and Water: Smallholder Agroforestry on Irrigated Lands in Northern India // Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. P. 45.

Global Aridity and PET Database. Всемирная база растровых климатических данных в высоком разрешении [Электронный ресурс http://www.cgiar-csi.org/data (дата обращения 12.12.2017)].

RStudio. Свободная среда разработки программного обеспечения [Электронный ресурс https://www.rstudio.com (дата обращения 12.12.2017)].

Worldclim. Всемирная база климатических данных [Электронный ресурс http://worldclim.org/version2 (дата обращения 12.12.2017)].

PRACTICE OF COMPOSING AND APPLYING COMPARATIVE ANALYSIS TO THE DATABASES OF VIRGIN CHESTNUT SOILS OF CASPIAN REGION (RUSSIA AND KAZAKHSTAN) AND MONGOLIA

© 2018. V.S. Ibragimova*, M.V. Konyushkova*, **, D.L. Golovanov*, **

**M.V. Lomonosov Moscow State University*
Russia, 119991, Moscow, Leninsky Gory, 1. E-mail: ibragimova_valeriya@mail.ru
***V.V. Dokuchaev Soils Institute*
Russia, 119017, Moscow, Pyzhevsky Per., 7, Building 2. E-mail: dm_golovanov@mail.ru

Received 30.08.2018. Revised 30.09.2018. Accepted 01.11.2018.

Region of chestnut soils on the territory of Eurasia stretches from the southern part of Ukraine to the eastern boundary of Mongolia. The aims of our study include revealing zonal and provincial features of soils on the basis of collecting and analyzing the databases of the substantive features of virgin chestnut soils of Caspian region (Russia and Kazakhstan only) and Mongolia, with the regard to climatic conditions of the way they form. To make a comparison the data about profile distribution of the properties of the most typical chestnut soils, according to 7 soils indices which characterize the soils of these regions: humus and $CaCO_3$ composition, capacity of cation exchange, particle size distribution and aqueous extract (chlorine, sulfates, calcium, magnesium and sodium composition). We included 49 profiles to the database for Caspian region and 54 for Mongolia. We used stock information and published literature materials. Statistical analysis and data comparison proved the difference between the soils. As the result, some questions arose. Can we consider that these soils belong to the same type? What is the main reason of their properties' differences – climatic differences or different ways of historical evolution and soil-forming rocks?

Keywords: Chestnut soils, provincial features, database analysis.
DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10023

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, с. 132-143

ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК:911.52:502.52

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ (РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)

© 2018 г. С.Р. Тюлюова, Е.И. Голубева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: 77526602s@gmail.com, egolubeva@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2018. После доработки 17.10.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

На сегодняшний день проблема определения устойчивости экосистем сохраняет свою актуальность. Прежде всего, это обусловлено, с одной стороны, усилением антропогенного воздействия на природные системы, а с другой, значительно более медленным темпом исследования их устойчивости. Основная проблема связана с многообразием предлагаемых методов, недостаточной их систематизацией, а также недостатком исходных материалов, необходимых для объективного и полного изучения и оценки устойчивости экосистем.

В данной статье были подробно рассмотрены основные определения устойчивости, а также взгляды различных исследователей на данную тему; рассмотрены и систематизированы методы и подходы к оценке потенциала устойчивости экосистем, имеющих различный набор природных и антропогенных характеристик, и их применимость. На примере экосистем Костанайский области была разработана интегрированная методика, которая отражает как влияние гидротермических и почвенно-генетических, так и антропогенных факторов на формирование территории.

Результаты исследования позволили определить основные районы Костанайской области, характеризующиеся различной степенью потенциала устойчивости. К территориям с максимальной степенью устойчивости относятся экосистемы, приуроченные к лесным массивам и поймам рек. Наиболее уязвимые участки характеризуются высоким хозяйственным освоением. Полученные результаты показывают, что примененные методы, расчетные методики и данные дистанционного зондирования земной поверхности, могут в высокой достоверностью использоваться не только как самостоятельные подходы, но и в комплексе.

Ключевые слова: экосистема, потенциал устойчивости, дистанционное зондирование, интегральные методы, степной ландшафт, север Казахстана.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10024

Проблема оценки устойчивости экосистем сложная, разносторонняя и включает в себя необходимость применения количественных критериев, отражающих возможность системы сохранять равновесие под внешним воздействием. На сегодняшний день изучение устойчивости или гомеостаза экосистемы проходит по-разному, что привело к нескольким вариантам рассмотрения данной темы.

Экологические проблемы весьма актуальны для индустриальных районов Республики Казахстан и для Костанайской области в частности. Большое разнообразие природных ресурсов обусловило активное хозяйственное освоение области на протяжении 200 лет. На территории области активно ведется добыча минерального сырья (железные руды, бокситы и уголь) и сельскохозяйственное использование территории (растениеводство и животноводство).

Изучение устойчивости экосистем Костанайской области на сегодняшний день еще не нашло широкого распространения в науке и практике, хотя исследование потенциала устойчивости экосистем является необходимым для сохранения структуры и функций

природных комплексов региона. Важным является учет системной организации области, обеспечивающей устойчивость, саморегуляцию и самовоспроизводство ее ресурсного потенциала. Для рационального использования природных ресурсов территории с учетом оптимальных решений планирования и проектирования важным является изучение экологического состояния окружающей среды области и выявление последствий хозяйственной деятельности человека.

Понятия и подходы к оценке устойчивости

Исследование потенциала устойчивости экосистем территории представляет собой достаточно сложный процесс. В научной литературе обсуждаются разные подходы к изучению и расчету потенциала устойчивости экосистем. Однако метод, который бы всесторонне и комплексно рассматривал все компоненты природной среды, трудно сформировать, к тому же выбор подхода во многом зависит от характерных природно-климатических особенностей территории. Согласно ландшафтно-динамическому подходу, выделяются 3 вида устойчивости (Исаченко, Резников, 1996):

1. Потенциальная устойчивость – способность системы противостоять внешнему воздействию и сохранять свое состояние в течение определенного промежутка времени (резистентная устойчивость или буферность).
2. Восстанавливаемость подразумевает возвращение системы в исходное состояние, испытав возмущение (упругая устойчивость или эластичность).
3. Вариативность поведения – способность системы находить новое состояние равновесия после испытания внешнего воздействия связей (пластичность системы).

Под гомеостазом понимается стабилизирующая динамика в природных системах, играющая важную роль в восстановлении свойств и ресурсов природных систем. В основе восстановления лежит естественная саморегуляция систем. Саморегулирующие свойства отлично проявляют себя при рациональном использовании территорий, а также при отклонениях от нормальных значений временных циклов (сенокос, рациональная вырубка, холодный год и т.д.), которые помогают «сглаживать» колебания состояния природных систем, но по мере увеличения антропогенного воздействия функционирование данных свойств падает. В большинстве случаев восстановление лучше проходит на территориях с более высокими значениями тепла и влаги (Сочава, 1978).

Существуют два механизма устойчивости, которые позволяют экосистеме противостоять внешнему воздействию.

1. Положительная обратная связь – связь, усиливающая отклонение. Как пример можно привести образование оврагов, которые при увеличении осадков и водных потоков, увеличивают свои размеры.
2. Отрицательная обратная связь – связь, снижающая отклонение, т.е. направление действия изменяется на противоположное.

Сохранение устойчивости не может проходить бесконечно. Как отмечает G. Hardin (1968), существует «гомеостатичное плато», в пределах которого внешнее воздействие будет ассимилироваться, а экосистема восстанавливаться. Но как только оказываемое воздействие превысит либо верхний предел положительный обратный связи, либо нижний предел отрицательный обратный связи, систему ждет гибель (рис. 1).

Объекты и метод исследования

В нашей работе в качестве объекта исследования выбраны экосистемы Костанайской области, на примере которой авторы рассмотрели применимость выделенных методов и

подходов к изучению потенциала устойчивости для конкретных природных систем.

Костанайская область составляет значительную часть равнин Казахстана, занимая 7% от площади всей республики. Областной центр – г. Костнай. Как и весь Казахстан, область характеризуется внутриконтинентальным положением, что в значительной степени повлияло на формирование природных особенностей территории. Она простирается от юго-западной окраины Западно-Сибирской равнины на севере до границ Приаральской низменности и зажата между Уральским пенепленом на западе и Казахским мелкосопочником на востоке. В целом территория постепенно спускается к Тургайской ложбине (Вишниченко и др., 1994).

Точность исследования устойчивости экосистем во многом зависит от применяемых методов изучения объекта, определяемая такими факторами, как природная зона с набором определенных физико-химических свойств, уровень экономического развития и количество исходных данных. Проблема оценки устойчивости заключается в трудности ее измерения и отсутствии прямых показателей. Для решения этой проблемы многие авторы часто применяют косвенные показатели, а также вводят бальные системы оценки на основе интегральных показателей и экспертных оценок.

На основе анализа различных источников показана применимость и ограничения разных методов (табл. 1).

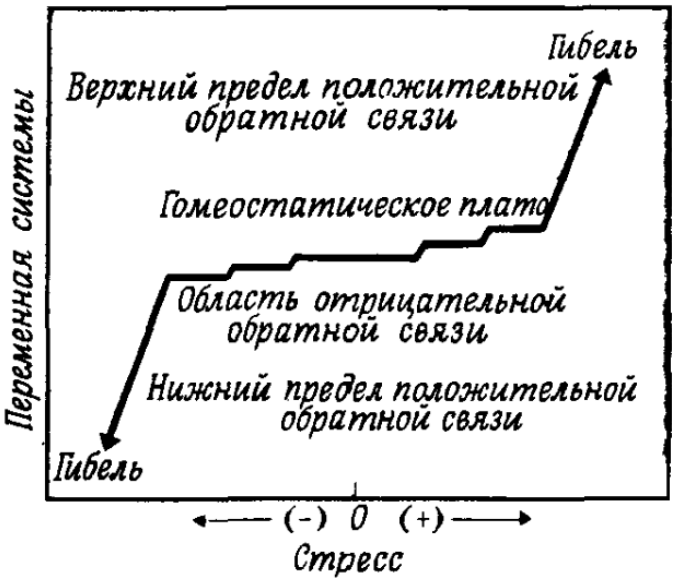


Рис 1. Кривая пределов и гомеостатического плато (Одум, 1975). **Fig 1**. Curve of limits and homeostatic plateau (Одум, 1975).

Индивидуальные особенности применения каждого отдельного метода (табл. 1) создают необходимость использования нескольких подходов одновременно. По нашему мнению, для изучения потенциала устойчивости территории целесообразно применение «Оценки экологической напряженности территории» (Морина, 2010), а также подходов на основе данных дистанционного зондирования. Комбинация методов, различных по способу и исходным данным, способствует более детальному рассмотрению экосистем и дополнению недостающих аспектов одного метода другим.

Предложенная методика (Морина, 2010) основана на расчётных методах и характеристиках. Рассматриваемые показатели базируются на геоморфологическом, климатическом, тектоническом и криогенном факторах. Недостатком данного метода является игнорирование растительного покрова как показателя устойчивости территории.

Для ликвидации данного пробела был использован метод, предложенный В.Г. Бондуром

с соавторами (2012), который рассматривает вегетационные индексы как показатель степени деградации растительного покрова и почв. Исходными данными этого подхода являются гиперспектральные космоснимки за разные промежутки времени.

Таблица 1. Территория применения различных методов и сопутствующие им ограничения.
Table 1. Area of various methods applying and concomitant restrictions.

№	Метод	Автор	Территория применения	Ограничение применения
1	Rapid Assessment of Circumarctic Ecosystem Resilience (Racer)	П. Кристи, М. Зоммеркорн (2014)	Арктические экосистемы	Ограничение применения для экосистем умеренных широт
2	Концепция критических нагрузок (КН)	В.Н. Башкин (1997)	Территориальное ограничение отсутствует, особое внимание уделяется почвам	Отсутствие информации о предельных концентрациях для естественных экосистем
3	EVI (Environmental Vulnerability Index)	Южнотихоокеанская комиссия по прикладным геонаукам (СОПАК), ООН, ЮНЕП	Нецелесообразно применение к природным системам высоких широт	Отсутствие статистической информации и неприменимость некоторых показателей
4	Оценка экологической напряженности территории	Л.П. Майорова; О.М. Морина (2010); Н.А. Нарбут	Относительно комплексная методика, но ее применение к субэкваториальным и экваториальным поясам нецелесообразно	Некоторая статистическая информация труднодоступна
5	Региональное моделирование устойчивости лесных экосистем	Э.Г. Коломыц, А.С. Керженцев, Л.С. Шарая (2011)	Лесные и степные экосистемы	Необходимы полевые исследования территории
6	Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем	В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов (2014)	В основном рассматривается почвенный покров	Отсутствует рассмотрение комплексности экосистем
7	Методы на основе данных дистанционного зондирования	В.В. Дмитриев; Р.А. Шовенгердт (2010); В.Г. Бондур, А.А. Рихтер, А.Б. Мурынин (2012)	Вся земная поверхность	–

Таким образом, совокупное применение данных методов обеспечит более разностороннее рассмотрение потенциала устойчивости экосистем Костанайской области.

Результаты и обсуждение

Применимость *расчетных методов* в изучении потенциала устойчивости была рассмотрена на основе методики, предложенной учеными из Тихоокеанского государственного университета (Морина, 2010).

На первом этапе были выделены подтипы рельефа Костанайской области и определено значение потенциала устойчивости по группе геоморфогенетических и близких к ним факторов для каждого из них. При расчете были учтены следующие факторы: дезинтеграция материнских пород, тектоническая активность местности, криогенные процессы и влияние почвенного генезиса (Морина, 2010).

Последствия антропогенной деятельности усиливают уже существующие природные процессы и риски. Территория Костанайской области в основном сложена суглинками, по мере продвижения на юг механический состав почв становится легче и переходит в пески. Исключением являются территории вдоль бывших и существующих русел рек и озер, гранулометрический состав которых представлен глиной, а также возвышенность Жыланшиктурум (юго-восток области), Тургайское и Зауральское плато, поверхность которых сложена суглинком с включениями гальки, щебня и дресвы (Баринова и др., 2002). В соответствии с выбранной методикой, коэффициент дезинтеграции пород варьирует от 1.7 до 2 (Морина, 2010). Под криогенными процессами понимается совокупность физических и физико-химических процессов, происходящих при колебании температур, которое приводит к замерзанию и оттаиванию почв. Криогенез оказывает негативное воздействие на функционирование как почвенного, так и растительного покровов. Многолетняя мерзлота даже в условиях летнего режима температур ограничивает прогрев почвенных грунтов, что приводит к недостатку тепла для произрастания растительности. Рост растений лимитируется нехваткой питательных веществ, что снижает рост и поступление органического вещества и особенно сильно сказывается на древесной растительности. Таким образом, при негативном антропогенном воздействии, приводящем к нарушению почвенного или растительного покровов, восстановление естественных связей между компонентами системы проходит очень медленно и не эффективно.

Для территории Костанайской области характерно наличие сезонного промерзания почвы, глубина которого увеличивается по мере продвижения с юга на север области с 1 до 2 метров (Национальный атлас …, 2006).

Потенциал устойчивости зависит не только от геоморфологических и генетических факторов, но также от климатических особенностей территории. Задачей второго этапа являлось выделение влияния климатических особенностей местности для каждого подтипа рельефа. Для этого были использованы метеорологические данные с сайта Казгидромета (2017) и Справочник по климату СССР (1966). На основе климатических данных определяется коэффициент опасности деградации почвенных режимов, приводящих к разрушению почвенного покрова (Морина, 2010). На основе расчетных методов была произведена интеграция результатов всех этапов и составлена карта потенциала устойчивости экосистем Костанайской области (рис. 2; Морина, 2010).

Расчеты показали, что территорию области можно разделить на четыре градации по потенциалу устойчивости (рис. 2): высокий (<=200), средний (201-350), низкий (351-650), очень низкий (>650).

Высоким показателем потенциала устойчивости характеризуются территории, приуроченные к крайним южным и северным частям Торгайской ложбины и востоку Западно-Сибирской низменности (Казахстанская часть), которая занимает 41620 км^2 (рис. 2) или 21% от площади области. Высокая устойчивость территории прежде всего

обусловливается более пологим и неизменным рельефом (низменные и низменно-увалистые равнины). Характерной их особенностью является низкая суммарная оценка геоморфологического фактора (6-9), где наибольшую опасность представляют пожары (Морина, 2010). Максимальный вклад в показатель потенциала устойчивости вносят климатические факторы (46-51%). Значения показателя варьируют от 154-189 на севере до 108-130 на юге.

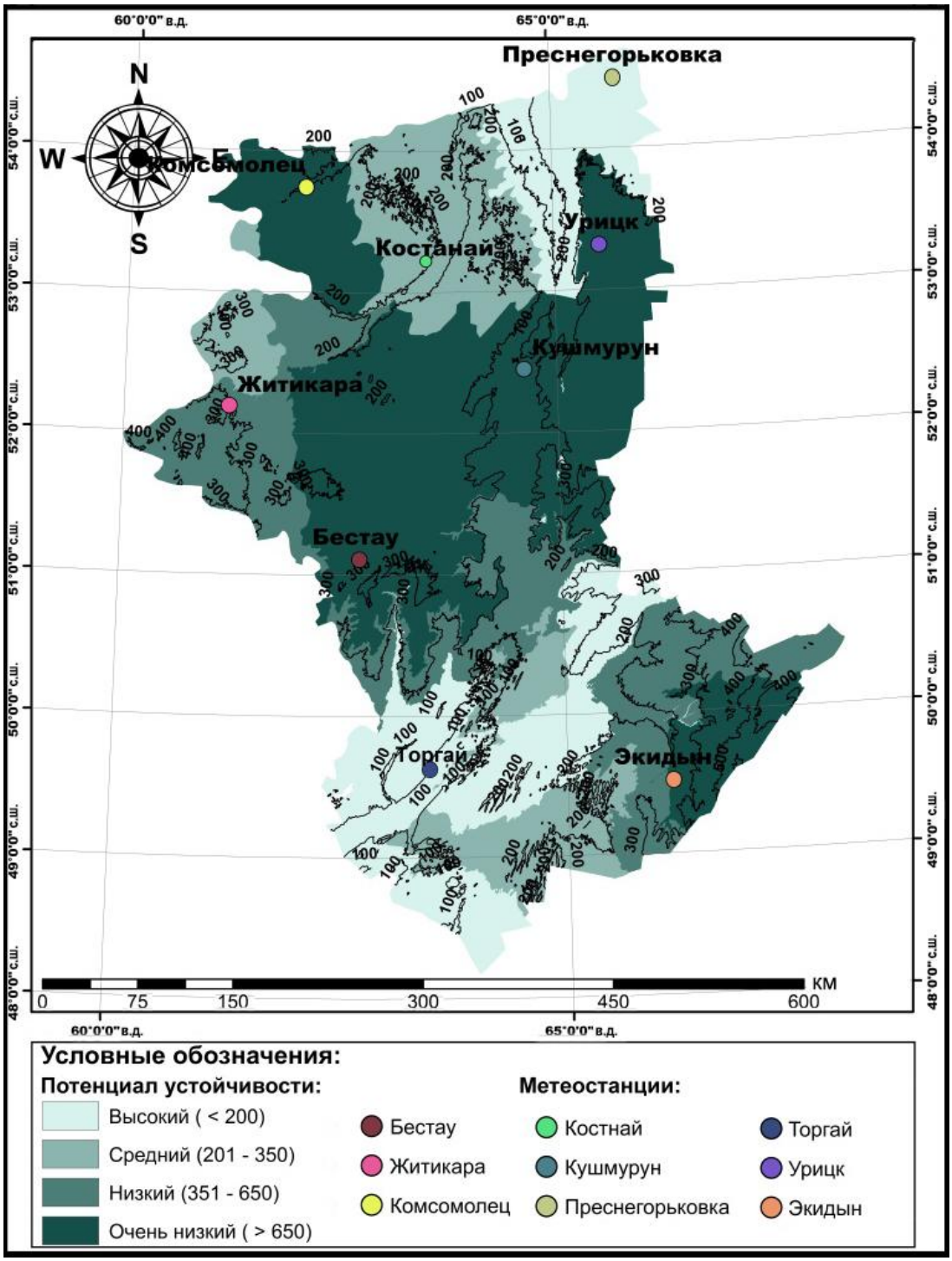


Рис. 2 Потенциал устойчивости экосистем Костанайской области. **Fig. 2.** Stability potential of Kostanay Region.

Средней степенью потенциала устойчивости характеризуются территории в пределах долины реки Улы-Жыланшик, Зауральского плато и Западно-Сибирской низменности (Казахстанская часть), они занимают 38072 км^2 от 19% всей области (рис. 2). Территорию области можно разделить на север и юг, для северных территорий характерны более высокие значения, лежащие в диапазоне 250-350, а для южных – низкие в диапазоне 212-246. Относительно высокие показатели потенциала устойчивости этих ландшафтов обуславливаются более расчлененным рельефом (столообразные плоскогорья и возвышенные равнины), чьи суммарные показатели по геоморфологическому фактору лежат в пределах 11-15. Максимальный вклад вносят пожары, на 50% определяемые климатическими условиями. Для северных участков основными лимитирующими факторами являются дефицит влаги (39%) и дефицит почвенного тепла (9%), приводящие к усложнению самовосстановления биоты. К основным разрушающим факторам относятся амплитуда температур на поверхности почв (26%), которая приводит к разрушению ее структуры, и поверхностный сток (9-13%), который способен привести к линейной эрозии в период снеготаяния. Помимо климатических факторов для северных частей ландшафтов этой группы также играют важную роль криогенные факторы (23%) и факторы разрушения биопродуцирующего слоя, в особенности для Западно-Сибирской низменности (20%). В южных частях несколько благоприятней, что связано с более низкими абсолютными высотами.

Низким потенциала устойчивости характеризуются ландшафты, расположенные в пределах западной части Зауральского и Торгайского плато, а также в пределах предмелкосопочной части на юго-востоке области и южных склонов Торгайского плато (рис. 2), они занимают 21% от площади области. Уменьшение показателя устойчивости связано с прохождением Тобыльского разлома через Зауральское и Торгайское плато, а Марьевского разлома – через южные склоны Торгайского плато. Широтная зональность Костанайской области приводит к влиянию дополнительных факторов на потенциал устойчивости; так, помимо климатического важную роль играет криогенный фактор (23%) на западе и ветровая эрозия на юго-востоке ландшафтов данной группы. Основными лимитирующими климатическими факторами, свойственными всем участкам данной группы, являются дефицит снега и воды (33-37%) и амплитуда температур на поверхности почвы (20-26%). Наличие Торгайской ложбины, абсолютная высота которой ниже окружающей ее территории, способствует активному поступлению воздушных потоков и увеличению ветровой эрозии (8%) юго-восточной части области, которая сложена дресвой и суглинком, имеющими высокие степень дезинтеграции.

Группа с *очень низким потенциалом устойчивости* (>650) характеризуется высокой уязвимостью к эрозионным и пирогенным процессам. К ней относятся земли Торгайского плато, центральной части Торгайской ложбины, восточная часть Зауральского плато и северо-западная часть Сары-Арки (рис. 2) – они занимают 39% от всей территории. Высокая уязвимость ландшафтов этих территорий обуславливается прежде всего наличием сильно расчлененных форм рельефа, таких как столообразные и холмистые плоскогорья, сложенные эффузивной породой с корой выветривания, волнистые и холмистые возвышенные равнины. Эти формы рельефа имеют высокий показатель геоморфологического фактора, где максимальную угрозу представляют эрозионные и пирогенные процессы. Характерной чертой, усиливающей лимитирующие и разрушающие процессы, является высокая степень дезинтеграции пород территории, что способствует ее дефляции и вымыванию. В отличие от предыдущих групп здесь помимо климатического фактора существенна степень опасности деградации почвенных процессов при нарушении растительного покрова (25-40%), что особенно актуально для центральной части Торгайского плато.

Одной из основных проблем применения расчетных методов является отсутствие или

недоступность статистических и фондовых данных. Для решения данной проблемы прибегают к использованию данных дистанционного зондирования, с помощью которых можно получить недостающую информацию, базирующуюся на использовании различных индексов, отражающих то или иное состояние компонентов окружающей среды в определенный момент времени. Так, для рассмотрения потенциала устойчивости экосистем Костанайской области была применена методика В.Г. Бондура с соавторами (2012), определяющая степень деградации растительности и базирующаяся на вегетационных и других индексах подстилающей поверхности.

Для исследования были использованы снимки Landsat 4 Level-1 за период 1990-1996 гг. и Landsat 8 Level-1 за период 2014-2017 гг. В условиях ограниченности доступа первичной информации и большой площади объекта исследования были детально изучены отдельные участки области:

1. Костанайский, Тарановский и Федоровские районы (северные территории области);
2. Аркалыкский регион (ЮВ Костанайской области).

На первом этапе для каждого пикселя территории были рассчитаны индексы условий роста VCI, солености SI, тепла NT, влаги NW и света NL для каждой избранной даты (Бондур и др., 2012).

Второй этап заключался в выявлении степени деградации растительности на основе обработки разновременных снимков. Для каждого пикселя было найдено уникальное значение степени деградации растительного покрова относительно разных индексов, полученное в результате нахождения среднего значения за исследуемый промежуток времени.

Определение потенциала устойчивости экосистем Костанайской области напрямую зависит от степени деградации растительного покрова как показателя ответной реакции на оказываемое воздействие. Полученные значения индексов лежат в промежутке от -1 до 1 (рис. 3, 4). Чем выше значение индекса на участке, тем ниже потенциал устойчивости территории. Согласно данному подходу, можно выделить различные факторы деградации растительности, которые находят отражение в значениях индексов.

Согласно индексу солености, вся территория относится к группе с деградирующим растительным покровом (рис. 3). Большая территории относится к слабо деградирующей подгруппе, степень которой лежит в диапазоне от 0 до 0.2. Повсеместный высокий фон солености прежде всего связан с геологическими особенностями формирования территории и берет свое начало в меловом периоде мезозойской эры, когда исследуемая территория соединяла два моря Каспийской и Северо-Западной низменности. 11% территории относятся к подгруппе со средней деградацией растительного покрова, площадь которой увеличивается с севера на юг. Наиболее крупный участок данной подгруппы приходится на западную и северо-западную части Тарановского района, а также на окрестности города Рудного. Данный участок окружен реками Аят и Тобол, русло которых зарегулировано водохранилищами. Одним из основных последствий строительства является повышение уровня грунтовых вод, в условиях засушливого климата приводящее к поднятию соленых грунтовых вод на поверхность и засолению почв, а местами и заболачиванию. Как видно на снимке, контуры данной подгруппы имеют ярко выраженные прямоугольные очертания (рис. 3). В 1990-х годах многие сельскохозяйственные поля, бывшие под богарным и орошаемым земледелием, были заброшены, что привело к вторичному засолению. Помимо сельского хозяйства воздействие оказывают предприятия по добыче железной руды, золота, меди и бокситов.

Аналогичная картина характерна для оценки степени деградации растительности по индексу влаги. Большая часть растительного покрова относится к среднедеградируемой подгруппе, что обусловлено резко континентальным климатом территории. К слабо

деградированным территориям относятся участки, имеющие лесные массивы, а также территории, расположенные вдоль основных водотоков исследуемой области, на которую приходится 15% территории. Помимо перечисленных участков к данной подгруппе относятся окрестности населенного пункта Федоровка. Причиной этому служит более высокая увлажненность территории относительно прилегающих территорий в совокупности с активным сельскохозяйственным освоением, что дает более высокую продуктивность растительного покрова.

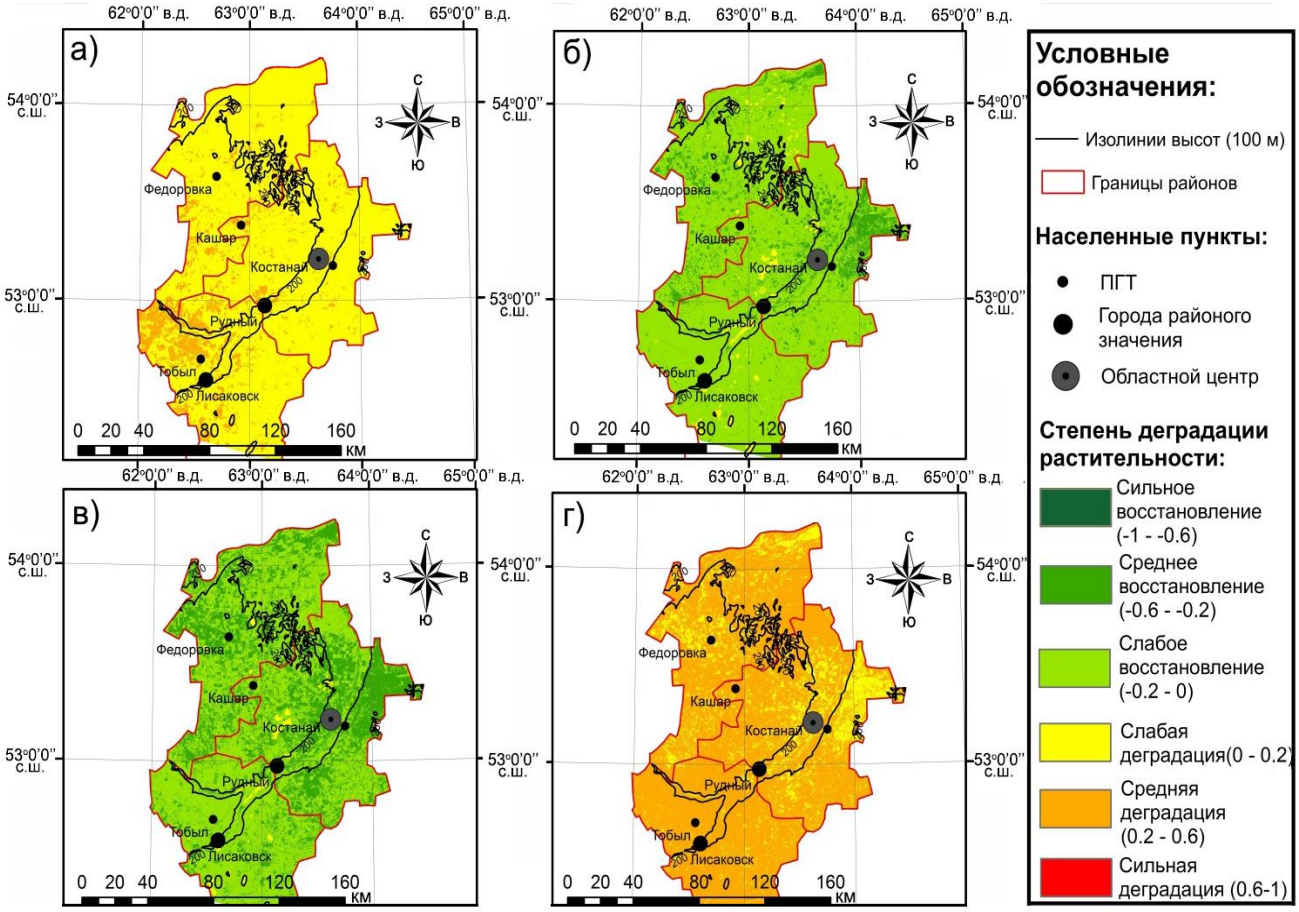


Рис. 3. Степень деградации растительного покрова северной части области (Костанайского, Федоровского и Тарановского районов) по индексам: а) солености, б) тепла, в) света, г) влаги. **Fig. 3.** Degradation levels of vegetation cover in the north part of region (Kostanay, Fedorovsky, Taranovsky districts) by the indices of: a) salinity, б) warmth, в) light, г) wetness.

Так как индекс тепла напрямую зависит от индекса света, деградация растительного покрова для данных показателей имеет общие тенденции (рис. 3), так как территория относится к подгруппе со средним (24%) и слабым восстановлением.

Для выявления закономерностей и особенностей потенциала устойчивости экосистем Костанайской области, как сравнение с северными территориями, была выбрана юго-восточная часть Костанайской области. Данная территория находится в южно-степной, полупустынной и пустынной зоне.

Южные территории области характеризуются более высокими температурами и меньшим количеством осадков. По индексу солёности большая часть растительного покрова относится к средне деградирующей подгруппе (рис. 4). Исключением являются поля и

естественные ландшафты, расположенные вдоль русел рек (12%).

Если рассматривать деградацию растительности по индексу тепла, исследуемая территория относится к группам со слабым восстановлением и слабой деградацией (40%). В худшем положении, согласно показателю, находится юго-западная часть Аракалыкского региона, которая относится к подгруппе со слабой деградацией, степень которой варьирует от 0 до 0.2 (рис. 4). По мере приближения к относительно возвышенным территориям деградация растительного покрова увеличивается, что может быть связано с природной сменой ландшафтов, которая приводит к изменению обилия и разнообразия видов растительных организмов.

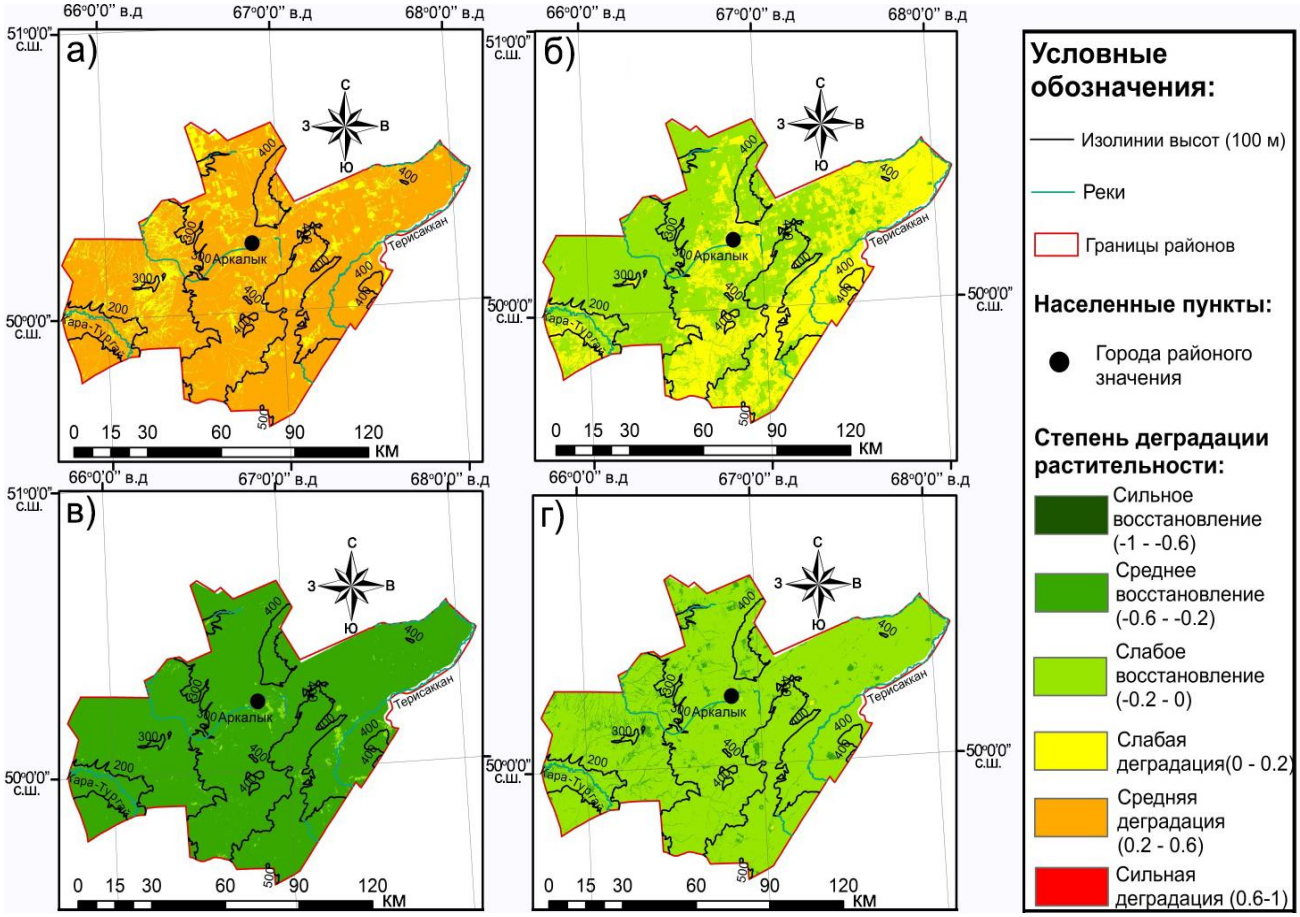


Рис. 4. Степень деградации растительности юго-восточной части Костанайской области (Аркалыкский регион) по индексам: а) солености, б) тепла, в) света, г) влаги.
Fig. 4. Degradation level of vegetation in the southeastern part of Kostanay region (Arkalyk district) by the indices of: a) salinity, б) warmth, в) light, г) wetness.

Отдельно стоит отметить территории города Аркалык и ее периферию. Одной из основных сфер специализации района является добыча алюминиевой руды, карьеры с которой окаймляют город. Всего вокруг города насчитывают 6 месторождений, а также около 4 месторождений других металлов: свинца, иттрия и редко – земельных металлов. Воздействие антропогенной деятельности отразилось на состоянии растительного покрова, который по индексу тепла относится к слабо деградирующим землям.

Согласно индексам света и влаги, вся территория относится к средне- и слабовосстанавливающейся подгруппе (рис. 4). Причиной такого различия по отношению к

первым двум индексам может служить особенность произрастания местных видов растений, которые адаптированы к поступающему количеству тепла и влаги.

Выводы

Результаты проведенного исследования с применением различных методов показали возможность выделения территорий, различающихся по степени потенциала устойчивости экосистем.

- Согласно расчетному методу, большая часть исследуемых экосистем Костанайской области относится к группам с низким и очень низким потенциалом устойчивости (60%). К территории с низким потенциалом относится западная часть Тарановского района, город Аркалык и его периферия, которые характеризуются средней степенью деградации по индексу засоленности. Низкий потенциал устойчивости экосистем приурочен к максимально хозяйственно освоенным территориям, к которым относится западная часть Тарановского района.
- К экосистемам с высоким потенциалом устойчивости относится территории к востоку от г. Костанай, где произрастают леса, а также территории в окрестностях поселка городского типа Федоровка. Также к данной группе относится северо-западная часть Аркалыкского региона. Также высокой степенью устойчивости экосистем характеризуются территории, приуроченные к лесным массивам и поймам.
- Разнообразие местообитаний и, как следствие, различных участков с высоким потенциалом устойчивости позволяют данным территориям выполнять функции экосистемного донора при возникновении такой необходимости. Оставшуюся территорию можно отнести к группе со средним потенциалом устойчивости.
- Сравнительный анализ результатов применения двух разных методик для оценки потенциала устойчивости экосистем территории Костанайской области показал, что пространственные особенности размещения территорий с близкими значениями потенциала устойчивости экосистем имеют идентичный характер, что позволяет рекомендовать их для использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баринова С.С., Ковшарь А.Ф., Рачковская Е.И. 2002. Важнейшие водно-болотные угодья Северного Казахстана (в пределах Костанайской и западной части Северо-Казахстанской областей). М.: Русский университет. 156 с.

Башкин В.Н. 1997. Оценка степени риска при расчетах критических нагрузок загрязняющих веществ на экосистемы // Тяжелые металлы в окружающей среде. Пущино. С. 177-186.

Бондур В.Г., Рихтер А.А., Мурынин А.Б. 2012. Алгоритм расчета степени деградации почвы // Технические науки в России и за рубежом (II): материалы международной заочной научной конференции. Москва: Буки-Веди. С. 8-14.

Вишниченко В.Г., Бол Г.Б., Дейнека В.К. 1994. Среда и жизнедеятельность. Кустанайская область Республики Казахстан. Костанай: Костанайской печатный двор. 342 с.

Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. 2014. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных систем // Вестник Санкт-Петербургского университета Т. 4. № 7. С. 114-129.

Исаченко Г.А., Резников А.И. 1996. Динамика ландшафтов тайги Северо-Запада Европейской России. СПб.: Издательство СПбГУ. 166 с.

Казгидромет. 2017. Метеорологические данные за 2008-2013 г.г. [Электронный ресурс https://kazhydromet.kz (дата обращения 28.01.2017)].

Коломыц Э.Г., Керженцев А.С., Шарая Л.С. 2011. Опыт регионального моделирования устойчивости лесных экосистем (на примере Окского бассейна) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 13 № 5. С. 9-18.

Кристи П., Зоммеркорн М. 2014. RACER. Экспресс-оценка устойчивости арктических экосистем. Методика определения и нанесения на карту водных и наземных объектов, поддерживающих функционирование экосистем Арктики в условиях изменившегося климата // М.: WWF. 76 с

Морина О.М. 2010. Экологическая напряженность Приамурья: методологические указания. Хабаровск: Издательство ТОГУ. 42 с.

Национальный Атлас Республики Казахстан. 2006. Природные условия и ресурсы. Т. 1. / Ред. А.Р. Медеу. Алматы: Республиканская картографическая фабрика. 125 с.

Одум Ю. 1975. Основы экологии: учебное пособие. М.: Мир. 741 с.

Сочава В.Б. 1978. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. 319 с.

Справочник по климату СССР. 1966. Ч. II. Вып. 18. / Ред. Ц.Г. Канович. СПб: Гидрометеорологическое издательство. 656 с.

Шовенгердт Р.А. 2010. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М: Техносфера. 32с

Hardin G. 1968. The Tragedy of the Commons // Science. Vol. 162. No. 3859. P. 1243-1248.

ASSESSMENT OF POTENTIAL SUSTAINABILITY OF KOSTANAY REGION ECOSYSTEMS (REPUBLIC OF KAZAKHSTAN)

© 2018. S.R. Tyulyuova, E.I. Golubeva

M.V. Lomonosov State University

Russia, 119991, Moscow, Leninsky Gory. 1. E-mail: 77526602s@gmail.com, egolubeva@gmail.com

Received 17.10.2018. Revised 17.10.2018. Accepted 01.11.2018.

Today, the problem the sustainability assessment of ecosystems remains relevant. First of all, this is because, on the one hand, of the increased anthropogenic impact on natural systems, and on the other, of the much slower rate of research works on their sustainability. The main problem is related to the diversity of the proposed methods, their insufficient systematization, as well as the lack of field data necessary for an objective and complete study and assessment of the ecosystems sustainability.

This article examined in details the basic definitions of sustainability, as well as the views of various researchers on this topic. Methods and approaches for assessing the sustainability potential of ecosystems with a different set of natural and anthropogenic characteristics and their applicability have been reviewed and systematized. Taking the Kostanay region as an example, we developed an integrated methodology that reflects both the influence of hydrothermal and soil genetic and anthropogenic factors on the formation of the territory.

The results of the study allowed to determine the main areas of the Kostanay region, characterized by varying degrees of potential for sustainability. The territories with the maximum degree of sustainability include ecosystems confined to forests and floodplains of rivers. The most vulnerable areas are characterized by high economic development. The obtained results show that the applied methods, calculation methods and data of remote sensing of the earth's surface can be used with high confidence not only as independent approaches, but also as complex methodology.

Keywords: ecosystem, sustainability potential, remote sensing, integral methods, the steppe landscape of Northern Kazakhstan.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10024

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2018, том 2, № 4, с. 144-171

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК: 628.357

МЕХАНИЗМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (АЗОТА И ФОСФОРА) В ФИТО-ОЧИСТНЫХ СИСТЕМАХ

© 2018 г. К.Ю. Рыбка, Н.М. Щеголькова

Институт водных проблем Российской академии наук
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3
E-mail: kseniarybka@gmail.com, nshegolkova@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018. После доработки 15.10.2018. Принята к публикации 01.11.2018.

Удаление биогенных элементов является приоритетной задачей при очистке сточных вод различного происхождения. В данной статье рассматриваются механизмы очистки стоков от азота и фосфора в фито-очистных сооружениях – водотоках искусственного происхождения (поверхностных или подземных), засаженных высшей водной растительностью. В биохимических циклах азота и фосфора в фито-очистных системах принимают участие неорганические и органические соединения, связанные между собой в последовательность реакций, происходящих в воде, донных отложениях и биомассе растений и микроорганизмов. В работе подробно рассмотрены основные механизмы преобразования и удаления соединений азота – азотфиксация, аммонификация, нитрификация, денитрификация, анаэробное окисление аммония (анаммокс), атмосферное осаждение, сорбция и испарение. Описано влияние абиотических и биотических факторов на протекание этих процессов, перечислены основные группы микроорганизмов, осуществляющих микробиологические процессы удаления соединений азота, приведены уравнения реакций, проведено сравнение химизма процессов очистки стоков от азота на традиционных очистных сооружениях и в фито-очистных системах. К процессам преобразования соединений фосфора, рассмотренным в данной работе, относятся сорбция, ассимиляция в биомассу, аккреция, осаждение и испарение. Описана локализация соединений фосфора в фито-системах и её изменение при их эволюции, а также особенности круговорота фосфора в зависимости от типа фито-очистного сооружения. В заключении даны рекомендации по интенсификации этих процессов и проектированию фито-очистных сооружений в климатических условиях России.

Ключевые слова: очистка сточных вод, азот, фосфор, фито-очистные системы.
DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10025

Фито-очистные системы (ФОС) – это природно-техногенные системы очистки сточных вод, состоящие из водоупорного слоя, фильтрующего слоя (загрузки) и высших водных растений (макрофитов) со встроенными техническими элементами для регулирования потока (Щеголькова и др., 2014а, 2014б, 2015). Очистка воды от загрязняющих веществ в таких системах происходит посредством природных механизмов самоочищения, а технические элементы конструкции позволяют управлять этими процессами, интенсифицировать их.

В рамках общепринятой классификации по местоположению гидравлической проектной линии и варианту проектирования можно выделить три основных типа ФОС, каждый из которых имеет свои функциональные особенности:

1. ФОС с открытой водной поверхностью (есть открытая акватория, застой воды, плавающая и надводная растительность) – системы высокой производительности, применяются в случае высокой или изменчивой гидравлической нагрузки и, как правило, в регионах без длительного морозного периода. Часто используются для доочистки. Также могут выполнять функцию буферных водоемов для ливневых сточных вод.
2. ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком (не имеют открытых акваторий,

сточные воды протекают горизонтально под поверхностью через фильтрующий слой и произрастающие в нем растения) – используются, как правило, для вторичной очистки муниципальных стоков. Также эффективно справляются с некоторыми видами промышленных загрязнений. Используются при меньших скоростях потока, но эффективны в условиях холодного климата.

3. ФОС с вертикальным подповерхностным потоком (схожи с вариантом выше, но поток воды фильтруется вертикально, а не горизонтально) – эффективны для получения нитрифицированных стоков, используются для очистки фильтратов свалок, стоков пищевой промышленности (отходов с повышенным содержанием аммиака), а также сильно загрязненных промышленных стоков. Могут быть как с восходящим, так и с нисходящим потоком.

Кроме того, существуют гибридные ФОС (комбинация двух или более перечисленных выше разновидностей) – часто они обладают максимальной эффективностью.

Очистка сточных вод от загрязняющих веществ в ФОС осуществляется за счёт физических, химических и биологических процессов с участием минеральной загрузки, растительности и ассоциированной с ней биоты. Механизмы удаления токсикантов зависят от природы загрязнения, концентрации загрязняющего вещества и типа ФОС и могут включать в себя фильтрацию, седиментацию, осаждение, окисление и восстановление, ионный обмен, сорбцию, ассимиляцию в биомассу, бактериальное разложение и т.д. При этом важную роль играют процессы, осуществляемые биотой ФОС (растительно-бактериальным сообществом) – особенно при очистке от азота и фосфора. Подробный анализ литературных данных показал, что ФОС способны очищать стоки от широкого спектра поллютантов – взвешенных веществ, органических токсикантов (в т.ч. ксенобиотиков), азота, фосфора, серы, тяжелых металлов и бактериального загрязнения с высокой эффективностью.

Соединения азота в сточных водах требуют особого внимания из-за их роли в эвтрофикации, влияния на содержание кислорода в водоприёмниках и токсичности для гидробионтов. Однако азотсодержащие вещества, как и другие биогены, необходимы для роста и развития растений, которые, в свою очередь, стимулирует биохимические циклы ФОС. Контроль цикла азота в ФОС является важной задачей при проектировании очистных сооружений, так как с этим циклом связано удаление органического вещества.

Источники поступления и формы азота в ФОС. Азот в поверхностных водах представлен неорганическими и органическими соединениями различной природы. Для оценки их содержания используют следующие показатели:

- общий азот по Кьельдалю (TKN) = органический азот + аммонийный азот;
- окисленные формы азота = нитраты + нитриты;
- неорганический азот = окисленный + аммиачный азот;
- органический азот = TKN – аммиачный азот;
- общий азот = TKN + окисленный азот.

Каждый из этих показателей характеризует протекающие в ФОС процессы, которые формируют качество воды на выходе из сооружения, в зависимости от природы стоков и нормативных требований к очищенной воде.

Наиболее важными неорганическими формами азота в ФОС, очищающих городские или бытовые сточные воды, являются аммиачный азот, нитриты (NO_2^-), нитраты (NO_3^-), закись азота (N_2O), а также растворенный элементный азот и газообразный азот (N_2).

Аммиачный азот присутствует в ФОС либо в виде газа (NH_3), либо как катион аммония (NH_4^+), в зависимости от температуры воды и pH:

$$NH_3+H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- \quad (1).$$

Таким образом, общий аммиачный азот представлен суммой неионизированных и

ионизированных форм аммиака. Долю неионизированной формы можно оценить следующим образом:

$$\lg K_d = \lg \frac{C_{IA}}{C_{UA}} = 0.09018 - \frac{272.992}{T+273.16} - pH \quad (2),$$

где K_d – константа диссоциации; C_{IA} – концентрация ионизированного аммиака, мг/л; C_{UA} – концентрация неионизированного аммиака, мг/л; T – температура воды, °C.

Благодаря близкой к нейтральной pH и естественной температуре в большинстве ФОС преобладает аммонийный азот. При температуре 25°C и pH 7 неионизированная форма составляет лишь 0.6% от общего содержания аммиачного азота, но при pH 9.5 и температуре 30°C содержание аммиака повышается до 72%. При концентрации более 0.2 мг/л аммиак оказывает токсичное воздействие на рыб и другие формы водной биоты.

Аммиачный азот обычно составляет более половины от общего азота в коммунальных и бытовых сточных водах, при этом его концентрация часто находится в диапазоне 20-60 мг/л. Концентрация аммиачного азота в сточных водах пищевой промышленности может превышать 100 мг/л (Kadlec et al., 1997), а в фильтратах свалок она может достигать нескольких сотен мг/л (McBean, Rovers, 1999; Kadlec, 2003). ПДК аммиака и аммоний-ионов в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 1/5 мг/л по азоту (4 класс опасности).

Окисленные формы азота представлены нитратами и нитритами. В состав нитритов азот входит в промежуточной степени окисления (+3) между аммиаком (-3) и нитратом (+5). Из-за этого в поверхностных водах нитриты нестабильны и встречаются в низких концентрациях. Нитраты, наиболее окисленная форма азота, мало подвержены химическим превращениям, но являются неотъемлемой частью биологических циклов ФОС. Они могут служить питательным веществом для роста растений, но избыток нитратов приводит к эвтрофикации в водоемах, принимающих очищенные стоки ФОС. Давно известно, что нитраты и нитриты в организме человека могут привести к развитию такого заболевания, как метглобинемия. ПДК нитратов в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 45.0 мг/л по NO_3 (3 класс опасности), нитритов – 3.3 мг/л по NO_2 (2 класс).

Нитраты могут быть доминирующей формой азота в нитрифицированных вторичных стоках, поступающих в ФОС на доочистку, а также присутствуют в сельскохозяйственных стоках как результат окисления аммиачных удобрений в зоне аэрации сельскохозяйственных полей, и их концентрация в некоторых случаях может достигать 45 мг/л и более.

Органический азот в ФОС представлен различными соединениями, в том числе аминокислотами, мочевиной и мочевой кислотой, пуринами и пиримидинами. Органические формы азота, прежде всего, в виде аминокислот (основного компонента белков), составляют, как правило, 1-7% от сухого веса растений и животных. Пиримидины и пурины, гетероциклические производные аминокислот, служат в организме основными строительными блоками нуклеотидов в составе ДНК. Мочевина CNH_4O, образующаяся в процессе дезаминирования аминокислот при производстве энергии, и мочевая кислота $C_4N_4H_4O_3$ являются одними из простейших форм органического азота в ФОС. Органические формы азота в растворенной фазе легко гидролизуются (химически или микробиологически) с выделением аммиака.

Сточные воды содержат различные количества органического азота, в зависимости от источника загрязнения и первичной обработки стоков. Очистка с помощью активного ила, как правило, значительно уменьшает долю органического азота в сточных водах, в отличие от аэробно-анаэробных накопителей, в которых происходит, как правило, лишь снижение содержания общего азота. Стоки пищевой промышленности могут содержать очень большое количество органического азота (Kadlec, Wallace, 2009).

По мере развития технологии ФОС всё больше внимания уделяется небытовым сточным водам, что вызывает повышенный интерес к другим соединениям азота. Среди них:

- амины (RNH_2, где R – алифатический углеводород), содержащиеся в сточных водах полимерной промышленности (Beeman, Reitberger, 2003);
- имиды (RCO-NH-OCR′, где R и R' – алифатические углеводороды), которые содержатся, например, в стоках после обработки картофеля (Kadlec et al., 1997);
- цианиды (CN^-), образующиеся в процессе выщелачивания алюминия и золота (Bishay, Kadlec, 2005; Gessner et al., 2005);
- хлорамины (NHxCly), источником которых являются хлорированные сточные воды (Zheng et al., 2004);
- триазиновые пестициды сельскохозяйственных стоков (например, атразин, $C_8H_{13}N_5Cl$) (Moore et al., 2000).

Процессы трансформации азота в ФОС. Основные компоненты цикла азота в ФОС представлены на рисунке 1.

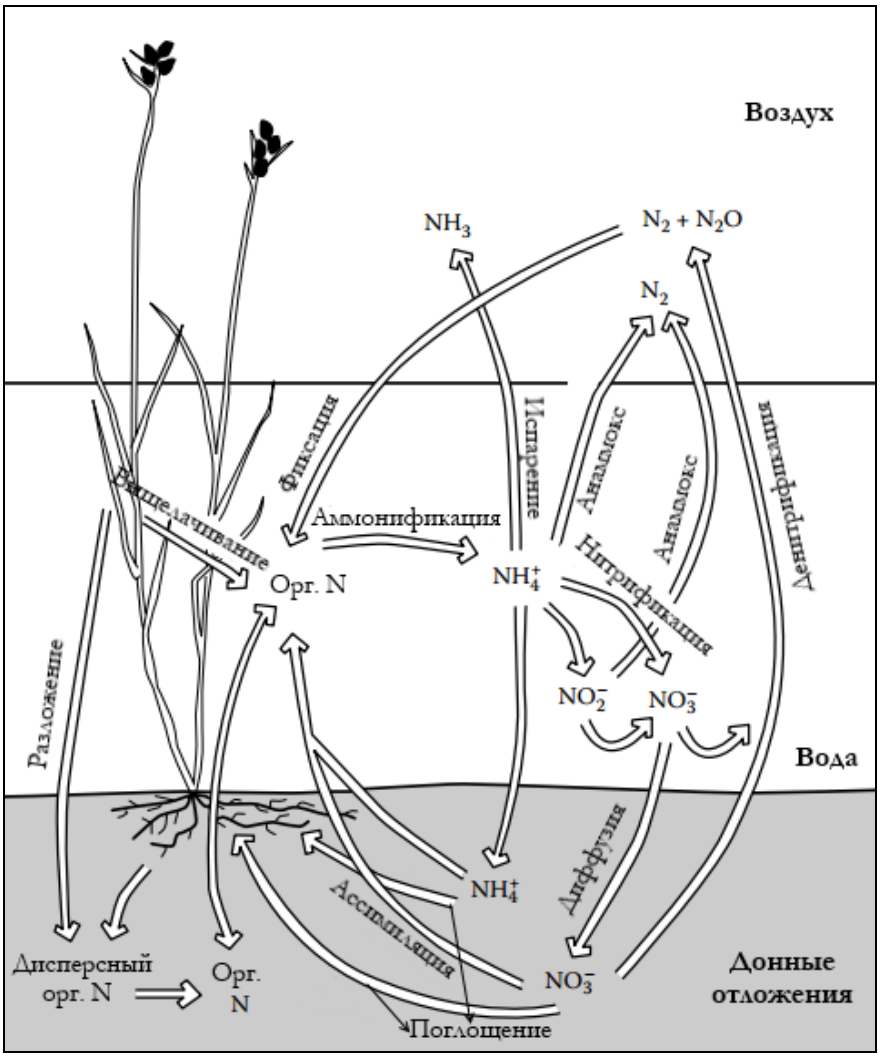


Рис. 1. Цикл азота в ФОС (Kadlec, Wallace, 2009).
Fig. 1. Nitrogen cycle in constructed wetlands (Kadlec, Wallace, 2009).

Формы азота в ФОС связаны между собой в последовательность реакций, происходящих в воде, донных отложениях (ДО) и биомассе растений и микроорганизмов. Некоторые из

этих реакций требует энергии (как правило, получаемой из органического источника углерода), а другие высвобождают энергию, которая используется организмами для роста и развития. Большинство этих процессов управляются посредством ферментов и катализаторов, вырабатываемых микроорганизмами и подчинены определенным пространственным закономерностям. Для ФОС характерна пространственная стратификация на зоны с преобладанием тех или иных процессов (например, зоны с открытой водной поверхностью и засаженные макрофитами, верхние и нижние слои воды, донные отложения, различные по происхождению пленочные живые структуры). Необходимо особенно выделить микросреды вокруг корневых систем растений (ризосферные зоны), которые могут значительно отличаться свойствами от окружающего их объема (Reddy, D'Angelo, 1994).

Ряд процессов способствует перемещению соединений азота в пространстве без изменения их молекулярной структуры (физические процессы). К ним относятся:

- осаждение частиц и ресуспендирование;
- диффузия растворенных форм;
- транслокация;
- выпадение в осадок;
- улетучивание аммиака;
- сорбция растворимого азота на субстратах.

В дополнение к процессам физической транслокации в ФОС происходят пять основных процессов преобразования азота из одной формы в другую:

- аммонификация (минерализация);
- нитрификация;
- денитрификация;
- ассимиляция;
- трансформация органических азотсодержащих молекул.

Рассмотрим подробнее эти процессы и регулирующие их факторы.

1. Физические и химические процессы не приводят к молекулярной трансформации затронутых ими соединений азота. Рассмотрим процессы поступления атмосферного азота в ФОС, адсорбцию и испарение аммиака.

1.1. Атмосферному осаждению подвержены все формы азота, как дисперсные, так и растворенные, органические и неорганические. Выпадение атмосферных осадков способствует осаждению, причём дождь в большей степени, чем снег. Концентрация азота в осадках сильно варьирует в зависимости от атмосферных условий, загрязнения воздуха и положения ФОС в ландшафте. Средняя концентрация азота, привносимого с атмосферными осадками, составляет 0.5-3.0 мг/л, большая часть из которых представлена аммиачным и нитратными формами (Kadlec, Wallace, 2009).

Кроме того, привнос азота в ФОС может быть связан с выпадением пыли, содержащей органический и аммонийный азот. Однако количества азота, поступающего при сухом выпадении, намного меньше, чем при влажном. Для расчёта последних могут быть использованы данные метеорологического мониторинга – зная количество осадков, выпавшее за определенное время в определенной местности и среднюю концентрацию азота в них, можно узнать общее количество азота, поступившее за это время на определенную территорию. Однако вклад атмосферного осаждения по сравнению с другими источниками поступления азота в ФОС достаточно мал.

1.2. Сорбция аммиака. Аммиак, в отличие от окисленных форм азота, сорбируется на органических и неорганических субстратах. Ион аммония в ФОС с открытой водной поверхностью может быть удален из воды при ионном обмене с детритом и неорганическим осадком, а в ФОС с подповерхностным потоком – при ионном обмене с загрузкой. Однако

сорбированный аммоний слабо связан со средой и может быть легко высвобожден при изменении химических характеристик воды.

При данной концентрации аммония в толще воды адсорбируется определенное его количество вплоть до насыщения всех центров сорбции. Важную роль в этом процессе играет природа субстрата. Так, например, природные цеолиты обладают в 100 раз более высокой поглотительной способностью, чем гравий, который часто используется в ФОС в качестве загрузки (фильтрующей среды). Максимальные значения сорбции на клиноптилолите составляют 6.9 г/кг, мордените – 13.1 г/кг, шабазите – 50 г/кг (Weatherly, Miladinovic, 2004; Lahav, Green, 2000). Органические субстраты и торф в ФОС с открытой водной поверхностью по своей поглотительной способности находятся между цеолитами и гравием.

Обменная реакция происходит между протоном субстрата и протоном аммиака:

$$RH^{+}+NH_4^{+}+OH^{-}\leftrightarrow RNH_4^{+}+H_2O \quad (3),$$

где R – лиганд (например, гумусовые вещества, содержащиеся в торфе).

Другие катионы, в том числе натрий, магний и кальций конкурируют с аммонием за обменные центры и, таким образом, уменьшают потенциал для сорбции последнего (Weatherly, Miladinovic, 2004). Высокая концентрация ионов водорода (низкие значения pH) также уменьшает сорбцию аммиака (McNevin, Barford, 2001).

Когда концентрация аммония в воде уменьшается, некоторое количество аммиака десорбируется, а при увеличении концентрации аммония в воде происходит обратный процесс. H.B. Wittgren с T. Maehlum (1997) рассматривали влияние на сорбцию сезонного фактора. Они предположили, что в одни периоды года аммоний может накапливаться, а в другие – высвобождаться и использоваться живыми организмами.

Отметим, что для расчета баланса азота количество сорбированного на донных отложениях аммиачного азота в ФОС с открытой водной поверхностью невелико и очень лабильно. Верхний слой торфяного субстрата толщиной 20 см может содержать до 20 г азота в обменной форме на квадратный метр при нагрузке до 10 мг/л аммонийного азота. Эта концентрация при умеренных нагрузках достигается достаточно быстро.

Средняя нагрузка по аммиаку для систем с горизонтальным подповерхностным потоком составляет около 1.0 г/м^2 в день, а средняя входящая концентрация – 20 мг/л. При этом равновесная сорбция аммиака составляет от 2 до 25 г/м^2 в пределах слоя толщиной 60 см. Таким образом, донные отложения могут содержать в сорбированном виде количество аммиака, которое поступало в сооружение в течение 25 дней (что, однако, составляет небольшой процент от общего поступления азота в ФОС).

Тем не менее, если субстрат подвергается воздействию кислорода (например, при периодическом обмелении или спуске воды), то может произойти окисление сорбированного аммония до нитрата. Нитраты не связываются с субстратом и вымываются при последующем увлажнения. Эта концепция является основополагающей для ФОС с пульсирующей, периодической нагрузкой, для осушаемых ФОС и систем с вертикальным потоком, а также для других систем с периодическим затоплением и осушением.

1.3. Испарение аммиака. Неионизованный аммиак относительно летуч и может быть удален из ФОС в атмосферу посредством диффузии через водную среду к поверхности раздела фаз и последующего переноса с поверхности воды в атмосферу. Процесс состоит из четырех последовательных стадий:

1. диссоциация (частичный переход катиона аммония в свободный аммиак);
2. диффузия к поверхности раздела воздух-вода (перенос вещества в водной фазе);
3. высвобождение в воздух около поверхности раздела фаз (испарение);
4. диффузия из приповерхностного слоя воздуха в атмосферу (перенос вещества в воздушной фазе).

Равновесие на границе вода-воздух (иными словами, растворимость) описывается законом Генри по формуле:

$$C^*_{AL} = \frac{C_{AG}}{H} \quad (4),$$

где C^*_{AL} – равновесная концентрация свободного аммиака в воде, г/м^3; C_{AG} – концентрация свободного аммиака в воздухе, г/м^3; H – константа Генри (зависит от температуры).

Таким образом, растворимость зависит от температуры, а степень ионизации – от температуры и pH. Процесс испарения аммиака подразумевает перенос протона и, теоретически, снижение pH, которое было зафиксировано в лабораторных опытах (Shilton, 1996). Интересно, что в ФОС температура и pH могут подвергаться значительным суточным колебаниям: температурные изменения – до 8°C и более, изменения pH – до двух единиц. В некоторых ситуациях может наблюдаться вертикальная стратификация толщи воды по соотношению растворенного и газообразного аммиачного азота, когда значения поверхностной температуры и pH значительно отличаются от таковых в низлежащих слоях (Jenter et al., 2003).

На перенос вещества в водной среде влияет степень турбулентности, которая, в свою очередь, зависит от глубины, скорости потока, количества погруженной растительности и донных отложений (Serra et al., 2004), а также скорости ветра (Liang et al., 2002). В воздушной среде перенос вещества зависит от степени турбулентности воздуха, что, в свою очередь, определяется скоростью ветра, характером и высотой растительного покрова. Таким образом, при оценке потерь аммиака необходимо учитывать не только температуру и pH, но и другие условия, характерные для данной конкретной системы.

Полевые измерения указывают на то, что ФОС с открытой водной поверхностью теряют гораздо меньше аммиака путем испарения, чем пруды. Это может быть связано с растительностью, которая снижает скорость ветра и, таким образом, уменьшает скорость переноса вещества как в водной, так и в воздушной среде. Из этого следует, что включение открытых участков воды, лишенных растительности, в структуру ФОС способствует испарению аммиака (Poach et al., 2004).

2. Биологические процессы. ФОС – благоприятная среда для развития и роста широкого спектра микроорганизмов, которые обеспечивают или осуществляют многочисленные биохимические реакции с участием азота. Гетеротрофные бактерии получают углерод из готовых органических соединений, в то время как автотрофы получают энергию и углерод из неорганических источников. Денитрификация в ФОС часто (хотя и не всегда) осуществляется гетеротрофами, в то время как нитрификация проходит автотрофно. Микроорганизмы также продуцируют ферменты, которые способны к деструкции сложных молекул, как внутри, так и вне клетки. Микроорганизмы преимущественно адгезированы на твердых субстратах, что определяет протекание основных процессов превращения азота в ФОС в биопленках, расположенных в загрузке, донных отложениях и на подводных частях растений. Рассмотрим эти микробиологические процессы более подробно.

2.1. Аммонификация органического азота представляет собой биологическую трансформацию органического азота (например, из отмерших клеток) до аммиака, что является первым шагом на пути его минерализации. Этот процесс осуществляется гетеротрофными организмами, как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Реакции могут проходить внутри клетки или внеклеточно, посредством ферментов, действующих на белки, нуклеиновые кислоты и мочевину.

Типичные реакции аммонификации включают в себя:

1. разложение мочевины:

$$CO(NH_2)_2+H_2O \rightarrow 2NH_3+CO_2 \quad (5),$$

2. разложение аминокислот:

$$RCH(NH_2)COOH+H_2O \rightarrow NH_3+CO_2 \quad (6).$$

Кинетически аммонификация протекает более быстрыми темпами, чем нитрификация, что может привести к повышению концентрации аммиака по мере прохождения воды через ФОС. Однако часто из-за недостаточного времени пребывания воды в системе аммонификация в ФОС идет не до конца (Kadlec, Wallace, 2009).

2.2. Нитрификация аммиака (преобразование аммиачного азота в окисленный) является основным механизмом снижения концентрации аммиачного азота во многих системах очистки. Нитрификацию традиционно связывают с хемоавтотрофными микроорганизмами, но этот процесс могут проводить и гетеротрофы (Keeney, 1973; Paul, Clark, 1996).

Процессы нитрификации на станциях водоочистки (при традиционной технологии очистки сточных вод). Системы биологической очистки в целом могут быть классифицированы как реакторы с суспензионной культурой (например, активный ил) или как системы очистки посредством закрепленных микроорганизмов или организмов-обрастателей (например, биофильтры). В таких устройствах происходит двухступенчатая нитрификация (Голубовская, 1978):

1. окисление аммония до нитритов:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ \quad (7),$$

2. окисление нитритов до нитратов:

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- \quad (8).$$

Первый этап осуществляется, главным образом, автотрофными бактериями из рода *Nitrosomonas*, а второй – *Nitrobacter*. Оба этапа протекают в аэробной среде, и, таким образом, фактической скоростью нитрификации можно управлять потоком растворенного кислорода в систему.

Из стехиометрии реакций выше следует, что теоретическое потребление кислорода на первом этапе составляет около 3.43 г на 1 г окисленного NH_3-N и 1.14 г на втором этапе, что в сумме составляет 4.57 г. Фактическое же потребление несколько меньше – 4.3 г O_2 на грамм NH_3-N (Metcalf, Eddy, 1991).

Реакции окисления высвобождают энергию, используемую бактериями родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* для синтеза клеток. Для получения 0.17 г сухого веса биомассы расходуется один грамм аммонийного азота. В результате нитрификации снижается щелочность и pH воды (на каждый нитрифицированный грамм аммиачного азота высвобождается два моля H^+ (U.S. EPA, 1993а, 1993б).

Процессы нитрификации в ФОС. Естественная среда, подобная той, что формируется в ФОС, значительно сложнее, чем контролируемые условия на традиционных станциях водоочистки. В природных системах и в ФОС в нитрификации участвует и другие бактерии, помимо тех, которые были упомянуты выше. К бактериям-нитрификаторам относятся также роды *Nitrosospira*, *Nitrosococcus* и *Nitrosomonas*, которые обильно представлены в ФОС. Кроме того, нитрит окисляется родами *Nitrospira* и *Nitrobacter*, которые также распространены в ФОС (Austin et al., 2003). Также к нитрификации способны гетеротрофные бактерии, например, *Paracoccus denitrificans* и *Pseudomonas putida* (Bothe et al., 2000). Окисление аммиака до нитрита в природных системах состоит из двух шагов, катализируемых ферментами (Bothe et al., 2000):

$$NH_3 + O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NH_2OH + H_2O \quad (9)$$

(катализируется аммоний-монооксигеназой),

$$NH_2OH + H_2O \rightarrow NO_2^- + 5H^+ + 4e^- \quad (10)$$

(катализируется гидроксиламиноксидоредуктазой).

Эта схема предполагает, что промежуточным продуктом реакции является гидроксиламин. Кроме того, донором одного из атомов кислорода для нитрита является O_2, а другого – H_2O. Нитритокисляющие бактерии в ФОС представлены двумя основными

родами: *Nitrospira* (около 4% от общей численности бактерий) и *Nitrobacter* (около 0.1%; (Flood et al., 1999; Austin et al., 2003). Важно отметить, что нитрит, как будет показано ниже, может быть удален напрямую, без превращения в нитрат. Таким образом, в ФОС одновременно в одном микрообъеме протекают сразу несколько процессов трансформации форм азота.

Эти соображения ставят под сомнение возможность применять стехиометрию реакций традиционной очистки к ФОС. Например, потребность в растворенном кислороде для реакций, протекающих в ФОС, составляет 1.14 г O_2 на грамм аммиачного азота, а не 3.43 г как в сооружениях с активным илом. Необходимая щелочность также значительно снижается. Оптимальный диапазон pH для нитрификации в ФОС составляет примерно 7.2-9.0 (Metcalf and Eddy, Inc, 1991).

Условие соблюдения низких значений соотношения углерод-азот, которое необходимо для работы активного ила или прикрепленных микроорганизмов, по-видимому, не является обязательным для ФОС. Они функционируют при различных отношениях БПК/TKN в поступающих водах, от 0.28 до 4.41; в то время как для сооружений с активным илом минимально возможной величиной этого соотношения (для успешной очистки стоков от азота) является 3, а оптимальным – 4-6 (Хенце и др., 2006). Корреляция между отношением БПК/TKN и эффективностью нитрификации в ФОС не найдена (R^2=0.037; Kadlec, Wallace, 2009).

2.3. Денитрификация (нитрат диссимиляция) определяется как процесс, в котором нитрат преобразуется в молекулярный азот через промежуточные соединения – нитрит, оксид азота и закись азота (Голубовская, 1978):

$$2NO_3^- \rightarrow 2NO_2^- \rightarrow 2NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (11).$$

Денитрификация осуществляется факультативными гетеротрофами – в качестве акцептора электронов может использоваться как кислород, так и нитраты.

К денитрификации способны различные организмы, как органотрофы, например, *Pseudomonas, Alcaligenes, Bacillus, Agrobacterium, Flavobacterium, Propionibacterium, Vibrio*), хемолитотрофы (например, *Thiobacillus, Thiomicrospira, Nitrosomonas*), фотолитотрофы (например, *Rhodopseudomonas*), диазотрофы (например, *Rhizobium, Azospirillum*), археи (например, *Halobacterium*) и другие, такие как *Paracoccus* или *Neisseria*.

Процессы денитрификации на станциях водоочистки (при традиционной технологии очистки сточных вод). Стехиометрически итоговую реакцию диссимиляции нитрата на основе метанола как источника углерода можно описать уравнением:

$$NO_3^- + 0.833CH_3OH \rightarrow 0.5N_2 + 0.833CO_2 + 1.167H_2O + OH^- \quad (12).$$

Также источником углерода в процессе денитрификации может служить глюкоза:

$$NO_3^- + 0.206C_6H_{12}O_6 \rightarrow 0.5N_2 + 1.25CO_2 + 0.75H_2O + OH^- \quad (13).$$

Таким образом, на один грамм нитратного азота расходуется 1,90 г метанола или 2.67 г глюкозы. Часть нитратов и углерода используются денитрифицирующими бактериями для синтеза клеток. Так, еще 0.57 г метанола требуется для роста бактерий, в результате чего в общей сложности при денитрификации 1 грамма нитратного азота расходуется 2.47 г метанола. Таким образом, оптимальный уровень углерода составляет около 2.3 г БПК на грамм NO_3-N (Gersberg et al., 1984). При недостатке углерода денитрификация ингибируется.

Как следует из уравнений выше, денитрификация способствует повышению щелочности воды. Выход этого процесса составляет около 3.0 г щелочности (по $CaCO_3$) на грамм NO_3-N. Это увеличение щелочности сопровождается увеличением pH воды.

Процессы денитрификации в ФОС

Источники углерода. Источником углерода в ФОС является не метанол и не глюкоза, а органическое вещество, которое может характеризоваться отношением углерода к азоту и к фосфору (соотношение Редфилда). Согласно этому соотношению оптимальной для роста

растений является пропорция C:N:P=106:16:1 (Redfield, 1934). Тогда реакцию денитрификации можно записать с помощью уравнения:

$$NO_3^- + 0.206C_6H_{12}O_6 \rightarrow 0.5N_2 + 1.25CO_2 + 0.75H_2O + OH \quad (14).$$

Эта реакция является необратимой и происходит в присутствии доступного органического субстрата только в анаэробных или аноксидных условиях (Eh от +350 до +100 мВ), где азот используется в качестве акцептора электронов вместо кислорода.

В процессе денитрификации в ФОС расходуется 3.02 г органического вещества на грамм нитратного азота. Кроме того, высвобождается некоторое количество аммиака, который может пойти на рост или добавиться к общему пулу аммиака в ФОС.

Поскольку денитрификация осуществляется по большей части гетеротрофными бактериями, то она сильно зависит от наличия в системе углерода. Денитрификация зависит от содержания растворимого органического вещества, но более тесная зависимость наблюдается от скорости нитрификации (поступление нитритов/нитратов) и от скорости гидролиза органического вещества (поступление легко разлагающегося или водоэкстрагируемого органического углерода; Broadbent, Clark, 1965; Paul, Clark, 1996). Органические вещества, способные выступать в качестве источников энергии и доноров водорода могут присутствовать в донных отложениях и почвах как результат разложения отмерших тканей или в виде корневых выделений (Stefanson, 1973; Bailey, 1976).

В ряде исследований ФОС был апробирован метод увеличения концентрации углерода путём увеличения биомассы растений или добавления метанола – эти эксперименты осуществлялись в период первых опытов с данной технологией (Gersberg et al., 1984; Burchell et al., 2002; Hume et al., 2002). Burgoon (Burgoon, 2001) использовал для денитрификации углерод путем прямой подачи стоков после обработки картофеля. Все эти исследования показали, что углерод может быть лимитирующим фактором в ФОС при высоких нагрузках по нитратам. L.A. Baker (1998) предположил, что для того, чтобы углерод не был лимитирующим фактором, отношение C:N должно быть не менее 5:1, что в его работе составило 20% C. Таким образом, если углерод ограничен (при высоких нагрузках по нитратам), то скорость денитрификации будет сильно зависеть от скорости его поступления (Hume et al., 2002).

Следует отметить, что наиболее лабильной характеристикой органического углерода в ФОС является БПК сточных вод, поступающих на очистку, которое, вероятно, преимущественно и расходуется на уменьшение содержания окисленных форм азота. При этом доля БПК по сравнению с ХПК по мере продвижения стоков в ФОС, несомненно, увеличивается, так как часть трудноокисляемого органического вещества переходит в доступную для биоты форму. Такой процесс характерен для всех речных зон ниже выпусков сточных вод и протекает он в течение первых суток (аналогично времени пребывания в ФОС; (Щеголькова и др., 2011).

Кислородное ингибирование. Денитрификация многократно наблюдалось в ФОС со значительным содержанием растворенного кислорода в поверхностном слое (van Oostrom, Russell, 1994; Phipps, Crumpton, 1994). Эта кажущееся аномалия связана со сложной пространственной стратификацией ФОС. В ФОС между поверхностью воды и донными отложениями возникает кислородный градиент, что позволяет аэробным и анаэробным реакциям происходить в непосредственной близости по вертикали (на расстоянии нескольких миллиметров от ДО; рис. 2). Таким образом, нитрат, образованный в процессе нитрификации у поверхности воды, может диффундировать в верхние анаэробные слои донных отложений, где происходит его денитрификация (Reddy, Patrick, 1984).

Значительный объем кислорода поступают по стволам растений к корням (Brix, Schierup, 1990; Brix, 1993). Некоторое его количество расходуется на дыхание (Brix, 1990).

Тем не менее, в микрозонах возле корней происходит множество химических реакций с участием кислорода.

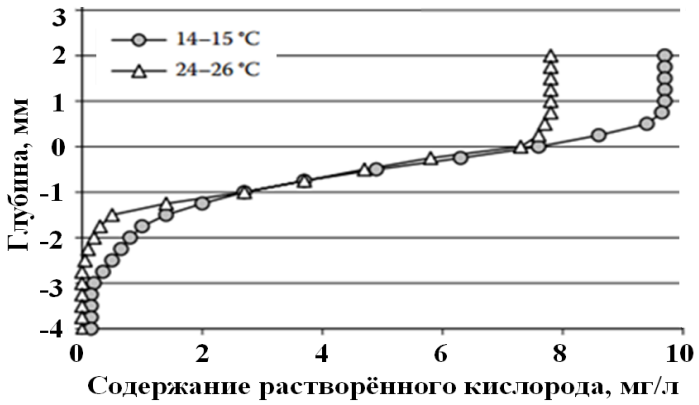


Рис. 2. Распределение кислорода выше и ниже поверхности донных отложений при двух различных температурах (Crumpton, Phipps, 1992). **Fig. 2.** Oxygen distribution higher and lower to the surface of bottom sedimentations under two different temperature indices (Crumpton, Phipps, 1992).

Рисунок 3 иллюстрирует, что в аэробной микрозоне вокруг корешка могут проходить реакции нитрификации, а рядом, в анаэробном объеме загрузки – денитрификация. Диффузия легко объединяет эти зоны благодаря их непосредственной близости.

В ФОС бактерии, прикрепленные к поверхности, как правило, более многочисленны, чем свободно живущие (Bastviken et al., 2003, 2005). Прикрепленные бактерии образуют микробные сообщества (биопленки) на полисахаридных субстратах, и бактериальная активность в этих биопленках регулируется диффузией питательных веществ в биопленки и внутренними процессами в них. Биопленки в ФОС содержат 10^8-10^9 организмов на см^2, включая *α*, *β* и *δ Proteobacteria*, *Acidobacteria* и *Bacteroidetes* (Flood et al., 1999; Iasur-Kruh, 2012). При этом бактерии-окислители аммиака более распространены у входа в ФОС, а денитрификаторы – на выходе.

Очевидно, что распределение кислорода в ФОС описывается гораздо сложнее, чем в реакторах полного смешения, которые доминируют при очистке стоков активным илом или с помощью биофильтров. Таким образом, результаты, полученные на основе исследований этих технологий, не могут быть экстраполированы на ФОС.

Влияние растительности и температуры на денитрификацию. Принципиальным отличием ФОС является то, что ФОС – это экосистемы с пастбищной трофической цепью, в отличие от детритной в системах с активным илом. Это означает, что в ФОС образуется биомасса за счет фотосинтеза с использованием минеральных соединений с биогенными элементами. Кроме того, растения являются источником углерода и субстратом для прикрепленных микроорганизмов. Лишенные растительности зоны открытой воды не способствуют денитрификации (скорость использования нитрата в реакции денитрификации в таких зонах составляют примерно треть от той, которая характерна для участков с растительностью (Arheimer, Wittgren, 1994). ФОС с древесными и кустарниковыми видами также имеют относительно низкие темпы денитрификации (DeLaune et al., 1996), вероятно, из-за недостатка углерода.

Надводная или подводная растительность поддерживает развитие эпифитных биопленок, которые присутствуют как на живом, так и на мертвом растительном материале (Eriksson, Weisner, 1997). Тем не менее, живые подводные растения производят кислород, который ингибирует денитрификацию.

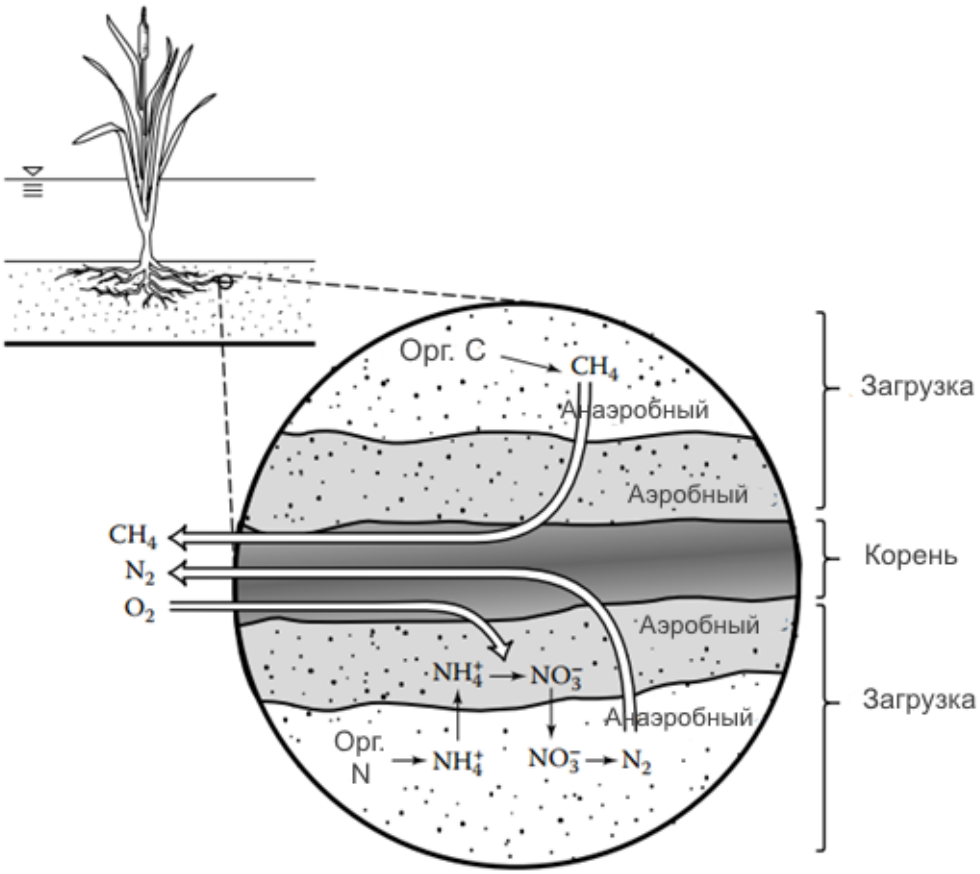


Рис. 3. Пути преобразования азота в непосредственной близости от корневой системы растений; приведено по (Kadlec, Wallace, 2009). **Fig. 3.** Ways of nitrogen transformation close to the root systems of plants; given according to (Kadlec, Wallace, 2009).

Денитрифицирующие бактерии в ФОС более многочислены, чем нитрификаторы. Максимальная численность бактерий наблюдается весной и летом (около 10^6/г против 10^5/г осенью и зимой; Herskowitz, 1986), что, по всей видимости, связано с приростом растительной биомассы. Кроме того, температура влияет на скорость денитрификации напрямую. Формула по Хальтману:

$$\rho D_t=\rho D_{20}\bullet 10^{kt(t-20)} \quad (15),$$

где ρD_t и ρD_{20} – скорости денитрификации при температуре t и при температуре 20°C соответственно; k_t – температурная константа (Яковлев, Карюхина, 1980). Значит, процесс денитрификации наиболее активно протекает в теплое время года.

Автотрофная денитрификация в присутствии серы. Сера является донором электронов для автотрофной денитрификации, в качестве альтернативы хорошо изученной гетеротрофной денитрификации, в которой в качестве питательной среды микроорганизмы используют углерод (Koenig, Liu, 2001; Soares, 2002). Бактерия *Thiobacillus denitrificans* может восстанавливать нитраты до газообразного азота в процессе окисления элементной серы или восстановленных соединений серы, включая сульфиды (S_2^-), тиосульфаты ($S_2O_3^{2-}$) и сульфаты (SO_3^{2-}). B. Batchelor и A.W. Lawrence (1978) предлагают уравнение в случае реакции с элементной серой:

$$NO_3^-+1.1S+0.40CO_2+0.76H_2O+0.08NH_4^+\rightarrow 0.5N_2+0.08C_5H_7O_2N+1.1SO_4^{2-}+1.2H^+ \quad (16).$$

Если основной формой восстановленной серы являются сульфиды, то предлагается уравнение (Komor, Fox, 2002):

$$NO_3^- + 0.74S^{2-} + 0.1886CO_2 \rightarrow 0.48N_2 + 0.037C_5H_7O_2N + 0.78SO_4^{2-} + 0.1H^+ + 0.37H_2O \quad (17.)$$

Эта реакция требует 1.69 г сульфидной серы на грамм нитратного азота. Существуют также и другие возможные варианты. Например, окисление дисульфида железа в уравнении (Pauwels, Talbo, 2004):

$$14NO_3^- + 5FeS_2 + 4H^+ \rightarrow 7N_2 + 5Fe^{2+} + 10SO_4^{2-} + 2H_2O \quad (18).$$

В ФОС сера в различных формах может присутствовать в осадках, выпадающих при поступлении сульфатов со сточными водами. При этом в ДО накапливаются сульфиды и элементарная сера. Эти осадки содержат также соединения углерода, и, следовательно, одновременно может происходить как гетеротрофная (с участием углерода), так и автотрофная (с участием серы) денитрификация (Nahar et al., 2000; Komor, Fox, 2002; Wu et al., 2013). При этом в автотрофном процессе производство газообразного азота сопровождается окислением сульфида до сульфата.

Учитывая разнообразие альтернативных доноров электронов для денитрифицирующих организмов ФОС, не удивительно, что во многих случаях углерод не является лимитирующим фактором процесса денитрификации.

Аэробная денитрификация долгое время считалась строго анаэробным процессом. Тем не менее, она может проходить и в аэробных условиях (Robertson et al., 1995). Аэробная денитрификация и гетеротрофная нитрификация часто сочетаются в одном организме, примером может служить *Thiosphaera pantotropha* (Ludwig et al., 1993; Jetten, 2001). Поскольку нитрификация, как правило, регистрируется путем измерения концентрации образовавшегося нитрата или нитрита в кислородных условиях, сочетание нитрификации и аэробной денитрификации довольно сложно наблюдать в стандартных обогатительных культурах. Аэробные денитрификаторы присутствуют в большом количестве, например, в почвах и способны обеспечить большой вклад в разложение нитратов (Jetten et al., 1997).

Диссимиляционная нитратредукция до аммонийного азота (нитрат-аммонификация). Удаление нитратов в ФОС часто относится исключительно на счёт денитрификации, тем не менее, известны и другие механизмы – ассилимяция растениями и микробиотой и диссимиляционное разложение до аммонийного азота (DNRA). Эти альтернативные процессы обеспечивают от 1% до 34% от общего разложения нитратов (Bartlett et al., 1979; Stengel et al., 1987; Cooke, 1994; van Oostrom, Russell, 1994). М.С. Барлетт измерил продукцию аммиака, молекулярного азота и закиси азота почвами ФОС, лишенных растительности (Bartlett et al., 1979). От 1% до 6% составлял аммонийный азот, остальное – молекулярный азот, а закись азота присутствовала лишь в следовых количествах. Дж.Г. Кук измерил содержание нитратов, аммония и органического азота, меченных атомами ^{15}N в ФОС без растительности (Cooke, 1994). Он обнаружил, что 34% $K^{15}NO_3$ было преобразовано диссимиляционными процессами, 6% пришлось на счёт микробной ассимиляции и 60% – денитрификации. Другие исследователи отметили 16-процентное диссимиляционное снижение концентрации нитратов в системе с *Glyceria maxima* (van Oostrom, Russell, 1994).

Диссимиляционная нитратредукция является результатом анаэробного дыхания хемоорганотрофов, использующих нитрат в качестве акцептора электрона вместо кислорода при окислении органического вещества, как показано в уравнении (Lam, Kuypers, 2011):

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NH_4^+ \quad (19).$$

В отличие от денитрификации, диссимиляционная нитратредукция сохраняет биодоступный азот внутри ФОС в виде растворимого аммония, а не переводит его в газообразный азот, обладающий низкой химической активностью. Процесс может осуществляться как прокариотическими, так и эукариотическими организмами (Preisler et al., 2007; Stief et al., 2014).

Денитрификация может быть доминирующим процессом в средах с высоким содержанием нитратов, но бедных углеродом, в то время как диссимиляция нитратов и

нитритов до аммония, как правило, доминируют в богатых углеродом средах, которые предпочитают колонии ферментативных бактерий (Tiedje et al., 1982). Так нитрат-аммонификаторы могут преобладать в условиях ограниченного содержания нитратов (Laanbroek, 1990). Нитрат аммонификация осуществляется факультативными анаэробными бактериями, принадлежащих к родам *Bacillus, Citrobacter* и *Aeromonas*, или *Enterobacteriaceae* (Cole, Brown, 1980; MacFarlane et al., 1982; Grant, Long, 1985). Однако строго анаэробные бактерии, принадлежащие к роду *Clostridium*, также могут переводить нитрат в аммиак (Caskey, Tiedje, 1979, 1980).

Темпы преобразования NO_3^- в NH_4^+ и в органический азот заметно повышается с уменьшением окислительно-восстановительного потенциала, повышением pH и увеличением количества легкоокисляемых органических веществ (Rutting et al., 2011; Zhang et al., 2014; Hasari, 2015).

2.4. Анаэробное окисления аммония (анаммокс). В среде с присутствием нитритов и аммиака, реакцию образования газообразного азота можно описать уравнением:

$$NO_2^-+NH_4^+\rightarrow N_2+2H_2O \quad (20).$$

Реакцию проводят анаэробные микроорганизмы, например, *Plantomycetes Nitrosomonas eutropha*. Общий химизм можно описать уравнением (Furukawa et al., 2001):

$$NH_3+0.08O_2\rightarrow 0.44N_2+0.11NO_3^-+0.14H^++1.43H_2O \quad (21).$$

Реакция идёт через нитрит, а потребность в кислороде составляет всего 1,94 г на один грамм NH_4-N. Процесс автотрофный, органический углерод не требуется (в отличие от традиционной денитрификации). Эти преимущества делают анаммокс весьма перспективным процессом в дальнейшем развитии технологии ФОС (особенно с насыщенным подповерхностным потоком).

В природной среде бактерии, осуществляющие анаммокс, присутствуют в обводненных почвенных горизонтах (Fox, Gable, 2003; Gable, Fox, 2003). Они были также найдены в ФОС с открытой водной поверхностью и подповерхностным потоком. В составе микробиологического сообщества ФОС с вертикальным подповерхностным потоком было обнаружено 13% *Plantomycetes* (Austin et al., 2003). Эти микроорганизмы были также найдены в ФОС с открытой водной поверхностью, очищающей частично нитрифицированные бытовые сточные воды (Shipin et al., 2004).

2.5. Азотфиксация. Биологическая фиксация азота – процесс, при котором газообразный атмосферный азот диффундирует в раствор и превращается в аммиачный азот – осуществляется автотрофными и гетеротрофными бактериями, цианобактериями и высшими растениями. Предполагается, что процесс состоит из трех этапов, на каждом из которых задействованы два электрона, уравнение 22 (Winter, Burris, 1976):

$$N\equiv N\rightarrow HN=NH\rightarrow H_2N–N_2H\rightarrow NH_3 \quad (22).$$

Промежуточными продуктами реакции являются диимид и гидразин.

В почвах встречаются 6 основных типов азотфиксирующих организмов (Killham, 1994):

1) свободно живущие бактерии, такие как *Bacillus, Klebsiella* и *Clostridium,* фиксирующие N_2 в анаэробных условиях (первые два являются факультативными анаэробами и могут фиксировать азот при пониженных концентрациях кислорода, тогда как *Clostridium* – облигатный анаэроб);

2) бактерии рода *Rhizobium*, которые фиксируют N_2 в основном в корневых клубеньках бобовых растений;

3) актиномицеты рода *Frankia*, фиксирующие N_2 в корневых клубеньках небобовых покрытосеменных, таких как ольха *Alnus glutinosa* (эти ассоциации иногда называют «актиноризами»);

4) свободно живущие цианобактерии на поверхности почвы, такие как *Nostoc* и *Anabaena;*

5) симбиотические цианобактерии лишайников;

6) N_2-фиксирующие бактерии, свободно связанные с корнями некоторых растений, их иногда называют «ризоценозы» (например, *Azotobacter*, *Beijerinckia* и *Azospirilllum*).

В ФОС наиболее важными N_2-фиксирующими организмами являются свободно живущие бактерии, цианобактерии, N_2-фиксирующие бактерии, слабо связанные с корнями некоторых растений, и, вероятно, *Frankia*. Также было обнаружено, что фиксировать атмосферный азот способен водный папоротник *Azolla* и некоторые виды сосудистых растений рода *Alnus* и *Myrica* (Waughman, Bellamy, 1980).

Было показано, что в анаэробных условиях микробная ассоциация в корневой зоне *Typha* spp. и *Glyceria borealis* фиксирует значительное количество атмосферного азота (Bristow, 1974; Reddy, DeLaune, 2008). При 20°C азотфиксация составила 33.6 и 35.3 мг/кг корней в день для *Typha* и *Glyceria* соответственно. В аэробных условиях эти значения на порядок уменьшились. Также считается, что с (Postgate, 1998; Paneque et al., 1990). Общий же вклад этого процесса в цикл азота невелик, особенно в ФОС, богатых этим химическим элементом.

Соединения фосфора. Фосфор также является биогенным элементом для растений, он часто лимитирует их развитие в водных экосистемах. Оптимальное соотношение питательных элементов в биомассе можно выразить как мольное отношение C:N:P=106:16:1 или 41:7:1 по массе (соотношение Редфилда). Это соотношение очень редко соблюдается в сточных водах, и в муниципальных и бытовых стоках обычно наблюдается избыток фосфора в связи с его поступлением в сточные воды с продуктами метаболизма жителей и детергентами. ПДК фосфатов в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 3.5 мг/л, а в водоемах рыбохозяйственного назначения – 0.2 мг/л по P.

Цикл фосфора включают в себя большое количество химических реакций, но только загрузка обладает достаточным потенциалом для долгосрочного хранения фосфора в ФОС, причем процессы накопления и высвобождения фосфора в ней могут сменять друг друга на достаточно малых промежутках времени. В придонных слоях ФОС наблюдается замедление окислительных процессов, что играет важную роль в долгосрочном накоплении и хранении фосфора. Скорость аккумуляции фосфора в ДО может составлять порядка нескольких миллиметров в год (Mitsch, Gosselink, 1993).

Превращения фосфора происходят в различных компонентах ФОС: вода, растения, микрофлора, донные отложения и загрузка (рис. 4). Наиболее активными формами фосфора в ФОС являются растворенные фосфаты, которые изменяют степень гидратации в зависимости от pH. Наиболее распространены моно- и двухосновные фосфаты, доминирующие при типичных для ФОС pH 4-9, уравнение 23 (Morel, Hering, 1993):

$$H_2PO_4^- \leftrightarrow HPO_4^{2-} + H^+ \quad (23).$$

Кроме того, в ФОС присутствует обменный и коллоидно связанный фосфор (Baldwin, 1988; Hens, Merckx, 2002); фосфор легко соединяется с растворенным органическим веществом. В ФОС происходит взаимодействие всех этих форм фосфора, в результате чего может наблюдаться выпадение разнообразных катионов в осадок. Основными минеральными осадками в ФОС являются апатит $Ca_5(Cl,F)(PO_4)_3$ и гидроксиапатит $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ (Reddy, D'Angelo, 1994). Фосфор также может соосаждаться с другими минералами, такими как гидроксид железа или карбонатные минералы, например, кальцит $CaCO_3$ (Reddy, D'Angelo, 1994).

Общий химизм превращений фосфора в ФОС достаточно сложен, из-за чего количественные расчеты, как правило, невозможны. Общая тенденция выглядит следующим образом (Reddy, D'Angelo, 1994):

- при низких значениях pH фосфор фиксируется ионами алюминия и железа, если

таковые имеются;

- в щелочной среде фосфор фиксируется кальцием и магнием;

восстановительные условия приводят к увеличению растворимости минералов железа и высвобождению фосфора.

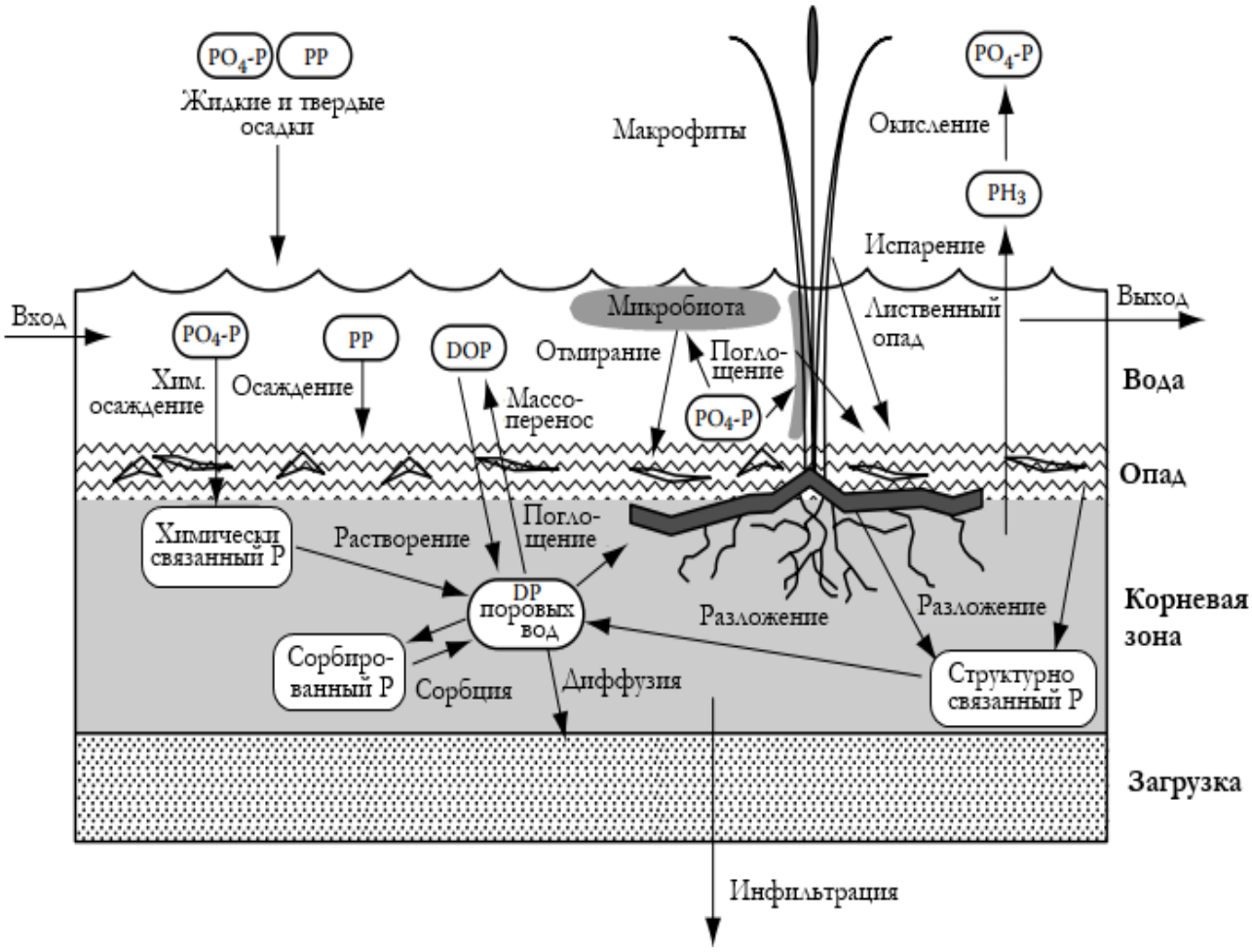


Рис. 4. Трансформация фосфора в ФОС. *Условные обозначения:* PO_4-P – фосфор ортофосфатов, PP – дисперсный (корпускулярный) фосфор, DP – растворенный фосфор, DOP – растворенный органический фосфор, PH_3 – фосфин (Kadlec, Wallace, 2009).

Fig. 4. Phosphorous transformation in the constructed wetlands. *Legend:* PO_4-P – phosphorous of orthophosphates, PP – dispersed (coursus) phosphate, DP – dissolved phosphate, DOP – dissolved organic phosphate, PH_3 – phosphine (Kadlec, Wallace, 2009).

Если в ФОС присутствуют свободные сульфиды, то они связываются с образованием сульфида железа, что исключает минерализацию фосфора за счет железа.

Соединения фосфора составляют значительную долю сухого веса растений, микроорганизмов, донных отложений и других компонентов ФОС, хотя концентрация фосфора в них примерно в десять раз меньше, чем азотных соединений. Доля фосфора в этих компонентах варьирует в зависимости от типа ФОС и сезона года. Доминирующая доля фосфора содержится в загрузке и донных отложениях. Далее идут растения и растительный опад, и очень малую часть фосфора содержат микроорганизмы, водоросли и вода.

Некоторые соединения фосфора поглощаются растениями и накапливаются в тканях растений или сорбируются частицами в составе донных отложений или загрузки.

Органический фосфор может быть высвобожден в качестве растворимого фосфора в случае окисления органической матрицы. В некоторых случаях образуются нерастворимые осадки, которые могут переходить в растворимое состояние при изменении условий среды.

Большое количество фосфора в загрузке и ДО присутствует в составе органической фракции. Органические формы фосфора можно разделить на:

1) легко разлагаемые (нуклеиновые кислоты, фосфолипиды, фосфорные соли сахарных кислот);

2) трудно разлагаемые (инозитолфосфаты или фитин).

Органические формы фосфора могут быть классифицированы в порядке убывания биодоступности следующим образом: фосфор микробной биомассы, лабильный органический фосфор, фосфор фульвокислот, фосфор гуминовых кислот и остальные формы органического фосфора (Kadlec, Wallace, 2009). В ФОС, как правило, большая часть органического фосфора иммобилизовано в загрузке, и только небольшая его часть доступна для биоты.

Локализация фосфора в ФОС и её изменение при эволюции ФОС. Содержание фосфора в тканях растений ФОС составляет 0.1-0.64% по сухому веществу (Bedford et al., 1999) и увеличивается с ростом входящей концентрации и биодоступности фосфора. Причем в надземных частях растений весной содержится больше фосфора, чем в конце вегетационного периода (Klopatek, 1978), в то время как его содержание в корнях практически не подвержено сезонной изменчивости. Растения могут вносить значительный вклад в накопление фосфора в ФОС. Например, в ФОС в городе Лауверсуг в Нидерландах при нагрузке 30-40 г фосфора на м^2 в год на долю растений приходилось 10 г фосфора на м^2 в течение 100-дневного вегетационного периода (Kadlec, Wallace, 2009), то есть во время роста растения утилизировали 100% поступающего в ФОС фосфора. Необходимо помнить, однако, что в период осеннего отмирания этот фосфор возвращается в ФОС – за исключением некоторого неразлагаемого количества.

При эволюции ФОС формы фосфора несколько изменяют свою локализацию. В состав загрузки ФОС входит малорастворимый фосфор минералов (органический и неорганический). В поровых водах и сорбированном виде содержится небольшое количество фосфора. Со временем в ФОС образуется слой органических отложений и формируется гидроморфная почва. Этот процесс начинается с образования несвязанного мобильного рыхлого слоя – флокулята, который частично разлагается, но со временем формирует консолидированный почвенный слой. Содержание фосфора в подобных флокулярных слоях составляет 0.1-0.4% по сухому весу, что при плотности 0.02-0.04 г/см^3 и мощности 20-30 см оставит 4-40 г фосфора на м^2 (Kadlec, Wallace, 2009).

В сформировавшихся почвах ФОС содержание фосфора варьирует от 300-500 мг/кг при низких нагрузках по фосфору до 1000-2000 мг/кг при нагрузках более 3 мг/л с максимумом в верхних слоях (Kadlec, Wallace, 2009). Минеральные формы фосфора практически не подвержены дальнейшей трансформации, однако органические формы могут разлагаться при изменении условий среды; например, при иссушении возможно окисление органических соединений фосфора, которые были стабильны под водой (Olila et al., 1997; Pant, Reddy, 2001). Фосфор, связанный с ионами железа, может высвобождаться при изменении Eh (Soto-Jimenez et al., 2003).

Механизмы удаления фосфора в ФОС: сорбция, ассимиляция в биомассу и захоронение в виде трудноразлагаемых остатков (аккреция). Количество фосфора, которое может быть удалено за счёт двух первых механизмов конечно, в то время как аккреция может происходить постоянно. Кроме того, большое количество фосфора может быть удалено из ФОС в результате гравитационного осаждения частиц (это особенно актуально для ливневых сточных вод, содержащих много фосфора в виде взвешенных веществ).

1. Сорбция фосфора описывается уравнением Ленгмюра или Фрейндлиха, при этом предел насыщения зависит от содержания в ФОС железа и алюминия (Lijklema, 1977; DeBusk et al., 1994; Reddy et al., 1998). Анализ литературных данных (15 систем) показал, что для ФОС с открытой водной поверхностью максимальные значения сорбции находятся в диапазоне 150-5000 мг фосфора на 1 кг субстрата (Yoo et al., 2006; Sakadevan, Bavor, 1998). Если после достижения равновесия между содержанием фосфора в воде и его сорбцией на субстрате концентрация фосфора снижается, то происходит вторичное загрязнение за счёт десорбции фофора. Такое наблюдается, например, на начальной стадии функционирования ФОС, в которых в качестве загрузки используется богатая фосфором почва.

Процесс сорбции/десорбции состоит из двух этапов:

1) быстрый обмен фосфором между поровыми водами и поверхностью частиц субстрата (адсорбция);

2) медленное поглощение фосфора всем объемом субстрата (абсорбция).

Время насыщения субстрата для таких материалов как песок, гравий и торф составляет около года при нагрузке по фосфору 3 мг/л, гидравлической нагрузке 5 см/сутки, мощности субстрата 0.3 м и требуемой концентрации фосфора на выходе 1 мг/л (CH2M HILL Inc., 2003; Breen, 1990; Richardson, Vaithiyanathan, 1995), однако необходимо помнить, что на этом способность ФОС очищать воду от фосфора не исчерпывается, так как другие механизмы всё ещё продолжают работать. Примером может служить крупномасштабная ФОС с открытой водной поверхностью в Орландо, США, осуществляющая третичную очистку стоков уже более 30 лет (U.S. EPA, 1993а, 1993б; Jackson, Sees, 2001; Wang et al., 2006). Система площадью 4.9 км^2 была создана в 1987 году, средняя гидравлическая нагрузка – 54000 м^3/сут, среднее содержание общего фосфора в поступающих стоках – 280 мкг/л. В течение первых 10 лет функционирования ФОС эффективность удаления P составляла 70-80% (средняя концентрация P в очищенных стоках была порядка 64 мкг/л). Во время второй декады наблюдалось снижение эффективности в зимнее время (при незначительном уменьшении среднегодовой эффективности), обусловленное чрезмерным накоплением осадка в начальной части системы и связанными с этим проблемами гидравлического характера. После очистки ФОС от излишнего осадка, произведенной на 15 году работы системы, эффективность восстановилась. При этом наибольшее снижение концентрации фосфора наблюдается в начальной зоне системы (рис. 5).

2. Ассимиляция в биомассу. В цикле фосфора в ФОС задействованы микроорганизмы, водоросли, макрофиты, а также водоплавающие животные и птицы. Некоторые исследователи считают, что на долю микробиоты приходится до 50% P, поглощаемого в ФОС (Richardson, Vaithiyanathan, 1985; Reddy et al., 2002). Однако из-за короткого жизненного цикла микроорганизмов практически весь поглощенный ими фосфор вскоре снова высвобождается. Тем не менее, благодаря высоким скоростям поглощения микроорганизмы являются первым звеном в цепи утилизации фосфора в ФОС, при отмирании микроорганизмов поглощенный ими фосфор осаждается на дно ФОС, где происходят дальнейшие процессы его трансформации.

Макрофиты (особенно полупогруженные и погруженные растения) влияют на трансформацию фосфора в ФОС двумя способами:

1) сезонное накопление и высвобождение фосфора;

2) захоронение в составе ДО.

При этом необходимо учитывать не только общее количество фосфора, поглощаемое растениями, но и потери при отмирании и разложении растительной ткани, происходящие с разной скоростью в течение всего периода вегетации. В условиях холодного климата отмиранию подвержено около 20% от общего ежегодного количества растительной биомассы (Whigham et al., 1978), в то время как в теплых регионах за год биомасса сменяется

до 10 раз в зависимости от культуры (Davis, 1994). В умеренном климатическом поясе максимальная скорость ассимиляции наблюдается весной и в начале лета, минимальная – осенью. По усредненным оценкам, при длительности вегетационного периода 8 месяцев в году растения поглощают около 12 г Р/м^2 в год, из которых в виде трудноразлагаемого остатка захоранивается 2 г, а 8 г возвращается в воду (Kadlec, Wallace, 2009). Таким образом, ассимиляция в биомассу обеспечивает в основном кратковременную аккумуляцию фосфора, а также вносит вклад в его накопление в ДО.

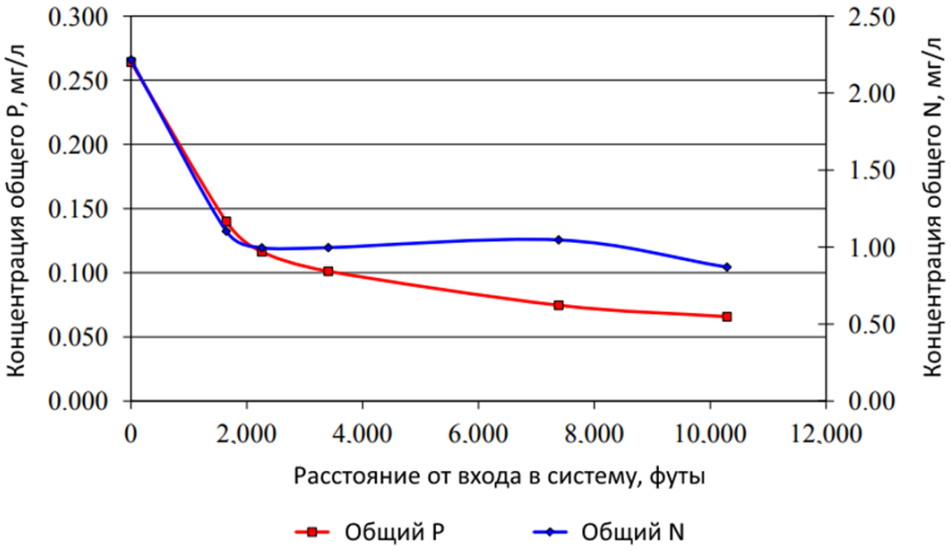


Рис. 5. Концентрация общего фосфора и общего азота в водах ФОС «Orlando Easterly» (продольный профиль), усредненные значения за 1988-2011 годы (Sees, 2014).
Fig. 5. Concentration of total phosphorus and total nitrogen in the waters of constructed wetlands «Orlando Easterly» (longitudinal profile), average values for 1988-2011 years (Sees, 2014).

Некоторые исследователи указывают на необходимость периодического изъятия растительной биомассы из ФОС с целью удаления ассимилированного ей фосфора (Wang, Mitsch, 2000). Однако практика показывает, что даже в ФОС с высокой нагрузкой по фосфору за счет сбора биомассы удаляется лишь небольшое количество фосфора – не более 10% (Toet et al., 2005; Herskowitz, 1986). С учётом сложности данной процедуры (особенно если система засажена корневыми погруженными видами растений) и необходимости утилизировать отходы, сбор биомассы обычно не производится.

3) *Аккреция.* Основным устойчивым механизмом удаления фосфора в ФОС является аккреция – включение Р в состав химически стабильных трудноразлагаемых соединений, образующихся на месте в результате отмирания флоры и фауны (донные отложения и почвы ФОС). Как было отмечено раньше, аккреции подвержено около 20% от общего количества поглощаемого растениями фосфора. Скорость аккреции может достигать нескольких сантиметров в год, в результате чего в ФОС в трудноразлагаемой форме, по различным данным, накапливается от 0.06 до 13.7 г Р на м^2 в год (Craft, Richardson, 1993; Kadlec, 1997). При этом наибольший вклад вносит растительный опад (преимущественно листья макрофитов), а также водоросли и бактерии.

4) *Осаждение.* Гравитационное и химическое осаждение также является устойчивым механизмом очистки воды от фосфора, особенно в ФОС, принимающих поверхностный сток с сельскохозяйственных территорий. Например, удаление фосфора в ФОС, очищающей стоки, богатые минеральным фосфором в Норвегии, составило 26-71 г/м^2 в год (Braskerud, 2002). Эффективность удаления фосфора в составе органических ВВ, как

правило, ниже. Анализ 13 ФОС показал, что эффективность удаления общего P в них варьирует от 3 до 62% (средняя – 38%), а фосфора в виде ВВ – от 9 до 73% (средняя – 46%).

Химическое осаждение фосфора происходит в виде аморфных или слабокристаллизованных соединений, образующихся при взаимодействии фосфатов с такими катионами, как Fe, Al, Ca и Mg. При этом в ФОС формируются такие минеральные образования, как апатит, гидроксилапатит, варисцит, штренгит, вивианит и вавеллит (Reddy, D'Angelo, 1994). Кроме того, фосфор соосаждается с метагидроксидом железа и кальцитом. Реакции с участием фосфора зависят от pH, Eh и температуры.

5) *Испарение.* Теоретически возможно испарение фосфора из ФОС в виде токсичных газов фосфина (PH_3) или дифосфина (P_2H_4). Однако эти соединения формируются при очень низких значениях Eh и присутствуют в столь малых количествах, что измерение их эмиссии требует высокоточных аналитических приборов. Исследователи сообщают об эмиссии 16 мкг фосфора на $м^2$ в год, что не вносит значительного вклада в общую схему процессов удаление фосфора в ФОС (Han et al., 2000).

Подповерхностные ФОС для очистки стоков от фосфора. Считается, что в долгосрочной перспективе ФОС с подповерхностным потоком менее эффективно удаляют фосфор, чем системы с открытой водной поверхностью, из-за возможности заиливания в результате аккреции – основного устойчивого механизма удаления фосфора в ФОС (Kadlec, Wallace, 2009). Однако такие системы часто используются для быстрой очистки вод, содержащих большие количества фосфора. При этом преобладает механизм сорбции, так как поверхность контакта воды с загрузкой значительно увеличивается. Сорбционная емкость загрузки по отношению к фосфору сильно зависит от химического состава. В некоторых случаях для увеличения эффективности очистки от P в загрузку добавляют оксиды железа и алюминия (Kickuth, 1980; Rustige et al., 2003). В Норвегии для этих целей успешно применяют керамзит и легкие заполнители, используемые в строительстве, – LWA (Zhu et al., 1997; Jenssen, Krogstad, 2003). Также были созданы искусственные загрузки, предназначенные для сорбции фосфора (Filtralite-P® и Utelite®).

При этом увеличивается влияние температуры. Так как хемосорбция фосфора – процесс эндотермический, то наибольшее количество P сорбируется при повышенной температуре воды. Так, при уменьшении температуры с 20°C до 5°C сорбция фосфора на керамзите с размером частиц 2-4 мм сократилась на 64% (Zhu et al., 2003).

При проектировании ФОС, очищающих стоки от фосфора, необходимо в первую очередь учитывать:

- химический состав загрузки (наличие карбонатов кальция, оксидов железа и алюминия, органического вещества);
- гранулометрический состав загрузки (соотношение между сорбцией и гидравлической проводимостью);
- гидравлический режим (постоянный или пульсирующий поток);
- нагрузку по фосфору и длительность функционирования системы.

Средний срок службы подповерхностных ФОС, очищающих стоки от P за счёт сорбции, составляет от нескольких месяцев до нескольких лет, после чего сорбционная емкость субстрата истощается. Для дальнейшей очистки было предложено сменять загрузку на новую, что в случае подповерхностных систем является сложной и дорогостоящей процедурой. В качестве альтернативного решения было предложено помещать сменную загрузку, сорбирующую фосфор, в специальные устройства, расположенные до входа в ФОС или после выхода из неё. Такие системы используется в Дании, Норвегии и Канаде (Arias et al., 2003; Cameron et al., 2003; Zhu et al., 1997).

Периодическое иссушение, характерное для некоторых ФОС, оказывает негативное влияние на удаление фосфора. При этом уменьшаются темпы аккреции и сорбции

(Baldwin, 1996), происходит окисление метагидроксидов железа (Watts, 2000) и минерализация осадка. При последующей подаче гидравлической нагрузки наблюдается высвобождение фосфора в минеральном виде (Olila et al., 1997).

Существует большое количество данных по ФОС, очищающим стоки с различной входящей концентрацией P (от менее 20 мкг/л до более чем 100 мг/л). При этом количество P, иммобилизованного в ФОС, варьирует от 0.1 до 100 г/м^2 в год. В настоящее время основное применение ФОС для очистки стоков от фосфора – вторичная и третичная очистка коммунальных сточных вод, а также очистка городских и сельскохозяйственных ливневых стоков.

Заключение

Механизмы удаления биогенных элементов в ФОС разнообразны и включают в себя химические, физические и биологические процессы. Круговороты азота и фосфора осуществляется во всех компонентах ФОС (вода, донные отложения/загрузка, воздух, биомасса), происходит трансформация органических и неорганических компонентов.

Вклад физических процессов (осаждение, сорбция, испарение) в цикл азота в ФОС невелик. Основные процессы его трансформации носят микробиологический характер. К ним относятся аммонификация, нитрификация и денитрификация, анаммокс и азотфиксация. Направленность и соотношение этих процессов зависит от состава поступающих стоков и условий среды: температуры, содержания растворенного кислорода, pH, Eh и т.д.

Процессы же преобразования соединений фосфора, напротив, имеют преимущественно физико-химический характер: сорбция, аккреция, химическое и гравитационное осаждение. ФОС способны с высокой эффективностью очищать стоки от фосфора как в долгосрочной, так и в краткосрочной перспективе. Для повышения эффективности удаления биогенов в ФОС рекомендуются следующие технические приемы:

1) полифункциональная загрузка – как сорбент, носитель бактериального сообщества и каркас для водных растений;
2) гибридные системы ФОС, состоящие из нескольких подсистем, в которых протекают разные биологические и биохимические процессы;
3) принудительная аэрация для создания регулируемых аэробно/аэробных зон;
4) создание теплоизоляционного слоя над загрузкой.

На территории РФ фито-очистные системы пока не получили широкого распространения. Использование ФОС в холодном климате накладывает ряд конструктивных ограничений, связанных в первую очередь с необходимостью изолировать «деятельный слой» от сезонных колебаний. Наличие холодных зим требует устройства терморегулирующего слоя, защищающего сооружение от промерзания зимой. В качестве изолирующей прослойки может использоваться слой снега, льда, опилок, мульчи, отмершая биомасса растений или воздушная прослойка. Толщина этого слоя определяется расчетом теплового баланса ФОС. Понижение уровня воды в зимний период создает дополнительный термоизолирующий слой сухой загрузки. Обустройство такой защиты не требует серьезных затрат и не связано с использованием больших объемов дополнительных материалов.

В случае очистки теплых стоков (а это, как правило, все бытовые стоки, стоки ТЭЦ и некоторые промышленные) могут использоваться ФОС открытого типа или ФОС без мульчирующего слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубовская Э.К. 1978. Биологические основы очистки воды. Учебное пособие для студентов строительных специальностей вузов. М.: Высшая школа. 268 с.

Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. 2006. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М.: Мир. 471 с.

Щеголькова Н.М., Диас В., Криксунов Е.А., Рыбка К.Ю. 2014б. Применение фито-систем для очистки сточных вод в России // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. № 5 (77). С. 20-31.

Щеголькова Н., Рыбка К., Диас В., Криксунов Е. 2014а. Природный механизм с техническими элементами. Применение фито-сооружений для очистки сточных вод в различных климатических зонах // ВОДА MAGAZINE. № 12 (88). С. 12-18.

Щеголькова Н.М., Диас В.Н., Криксунов Е.А., Рыбка К.Ю. 2015. Фито-системы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. № 2. С. 46-55.

Яковлев С.В., Карюхина Т.А. 1980. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат. 200 с.

Arheimer B., Wittgren H.B. 1994. Modelling the effects of wetlands on regional nitrogen transport // Ambio. No. 23 (6). P. 378-386.

Arias C.A., Brix H., Johansen N.H. 2003. Phosphorus removal from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system equipped with a calcite filter // Water Science and Technology. No. 48 (5). P. 51-58.

Austin D., Lohan E., Verson E. 2003. Nitrification and denitrification in a tidal vertical flow wetland pilot // Proceedings of the Water Environment Technical Conference WEFTEC 2003, Los Angeles. P. 333-357.

Bailey L.D. 1976. Effects of temperature and root on denitrification in a soil // Canadian Journal of Soil Science. No. 56. P. 79-87.

Baker L.A. Design consideration and applications for wetland treatment of high-nitrate waters // Water Science and Technology. 1998. No. 38 (1). P. 389-395.

Baldwin D.S. 1988. Reactive “organic” phosphorus revisited // Water Research. No. 32 (8). P. 2265-2270.

Baldwin D.S. 1996. Effects of exposure to air and subsequent drying on the phosphate sorption characteristics of sediments from a eutrophic river // Limnology and Oceanography. No. 41 (8). P. 1725-1732.

Bartlett M.S., Brown L.C., Hanes N.B., Nickerson N.H. 1979. Denitrification in freshwater wetland soil // Journal of Environmental Quality. No. 8. P. 460-464.

Bastviken S.K., Eriksson P.G., Martins I., Neto J.M., Leonardson L., Tonderski K.S. 2003. Potential nitrification and denitrification on different surfaces in a constructed treatment wetland // Journal of Environmental Quality. No. 32 (6). P. 2414-2420.

Bastviken S.K., Eriksson P.G., Premrov A., Tonderski K. 2005. Potential denitrification in wetland sediments with different plant species detritus // Ecological Engineering. No. 25 (2). P. 183-190.

Batchelor B., Lawrence A.W. 1978. Autotrophic denitrification using elemental sulfur // Journal of the Water Pollution Control Federation. No. 55. P. 1986-2001.

Bedford B.L., Walbridge M.R., Aldous A. 1999. Patterns in Nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands // Ecology. No. 80 (7). P. 2151-2169.

Beeman R.E., Reitberger J.H. 2003. An integrated industrial management facility for biological treatment of high nitrate and carbonaceous wastewater // Environmental Progress. No. 22 (1). Pp. 37-45.

Bishay F., Kadlec R.H. 2005. Wetland treatment at Musselwhite Mine // Natural and Constructed Wetlands: Nutrients, Metals, and Management. Leiden: Backhuys Publishers. P. 176-198.

Bothe H., Jost G., Schloter M., Ward B.B., Witzel K.P. 2000. Molecular analysis of ammonia oxidation and denitrification in natural environments // FEMS Microbiology Reviews. No. 24.

P. 673-690.

Braskerud B.C. 2002. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution // Ecological Engineering. No. 19 (1). P. 41-61.

Breen P.F. 1990. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment // Water Research. No. 24 (6). P. 689-697.

Bristow J.M. 1974. Nitrogen fixation in the rhizosphere of freshwater angiosperms // Canadian Journal of Botany. No. 54. P. 217-221.

Brix H. 1990. Gas exchange through the soil-atmosphere interphase and through dead culms of Phragmites australis in a constructed reed bed receiving domestic sewage // Water Research. No. 24 (2). P. 259-266.

Brix H. 1993. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: Transport mechanisms and rates // Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Boca Raton: Lewis Publishers. P. 391-398.

Brix H., Schierup H.H. 1990. Soil oxygenation in constructed reed beds: The role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport // Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Oxford: Pergamon Press. P. 53-66.

Broadbent F.E., Clark F. 1965. Denitrification // Agronomy. No. 10. P. 344-359.

Burchell M.R., Skaggs R.W., Broome S.W., Lee C.R. 2002. Effect of Substrate Organic Matter Addition on Nitrate Removal Efficiency in Surface-Flow Constructed Wetlands // 2002 American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual Meeting, St. Joseph.

Burgoon P.S. 2001. Denitrification in free water surface wetlands receiving carbon supplements // Water Science and Technology. No. 44 (11-12). P. 163-170.

Cameron K., Madramootoo C., Crolla A.M., Kinsley C.B. 2003. Pollutant removal from municipal sewage lagoon effluents with a free-surface wetland // Water Research. No. 37. P. 2803-2812.

Caskey W.H., Tiedje J.M. 1979. Evidence for clostridia as agents of dissimilatory reduction of nitrate to ammonium in soils // Soil Science Society of America Journal. No. 43. P. 931-936.

Caskey W.H., Tiedje J.M. 1980. The reduction of nitrate to ammonium in soils // Journal of General Microbiology. No. 119. P. 217-223.

CH2M HILL Inc. 2003. Report Prepared for the South Florida Water Management District. West Palm Beach. 263 p.

Cole J.A., Brown C.M. 1980. Nitrite reduction to ammonia by fermentative bacteria: a short circuit in the biological nitrogen cycle // FEMS Microbiology Letters. No. 7. P. 65-72.

Cooke J.G. 1994. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment // Water Science and Technology. No. 29. P. 209-217.

Craft C.B., Richardson C.J. 1993. Peat accretion and phosphorous accumulation along an eutrophication gradient in the Northern Everglades of Florida, United States // Biogeochemistry. No. 22. P. 133-156.

Crumpton W.G., Phipps R. 1992. Water Quality, Report on the Des Plaines River Wetlands Demonstration Project to USEPA. Vol. 3. Chicago. 19 p.

Davis S.M. 1994. Phosphorus inputs and vegetation sensitivity in the Everglades // Everglades: The Ecosystem and Its Restoration. Delray Beach: St. Lucie Press. P. 357-378.

DeBusk W.F., Reddy K.R., Koch M.S. 1994. Spatial Distribution of Soil Nutrients in a Northern Everglades Marsh: Water Conservation Area 2A // Soil Science Society of America Journal. No. 58. P. 543-552.

DeLaune R., Boar R.R., Lindau C.W., Kleiss B.A. 1996. Denitrification in bottomland hardwood wetland soils of the Cache River // Wetlands. No. 16 (3). P. 309-320.

Eriksson P.G., Weisner S.E.B. 1997. Nitrogen removal in a wastewater reservoir: The importance of denitrification by epiphytic biofilms on submersed vegetation // Journal of Environmental

Quality. No. 26 (3). P. 905-910.

Flood J.A., Ashbolt N.J., Pollard P.C. 1999. Complimentary independent molecular, radioisotopic, and fluorogenic techniques to assess biofilm communities in two wastewater wetlands // Water Science and Technology. No. 39 (7). P. 65-70.

Fox P., Gable J. 2003. Sustainable nitrogen removal by anaerobic oxidation during soil aquifer treatment // Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2003. Alexandria. P. 77-87.

Furukawa K., Rouse J.D., Imajo U., Sugino H., Fujii T. 2001. Sustainable nitrogen removal by anaerobic oxidation during soil aquifer treatment // Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2001. Alexandria. P. 84-95.

Gable J., Fox P. 2003. Measurement of anaerobic ammonium oxidation activity in soil systems and identification of Planctomycetes // Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2003. Alexandria. P. 636-645.

Gersberg R.M., Elkins B.V., Goldman C.R. 1984. Use of artificial wetlands to remove nitrogen from wastewater // Journal of the Water Pollution Control Federation. No. 56. P. 152-156.

Gessner T.P., Reaves R.P., Kadlec R.H. 2005. Wetland remediation of cyanide and hydrocarbons // Ecological Engineering. No. 25 (4). P. 457-469.

Grant W.D., Long P.E. 1985. Environmental Microbiology // Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 1. Pt. D: The Natural Environment and Biogeochemical Cycles. Berlin: Springer-Verlag. P. 125-237.

Han S.H., Zhuang Y.H., Liu J.A., Glindeman D. 2000. Phosphorus cycling through phosphine in paddy fields // Science of the Total Environment. No. 258 (3). P. 195-203.

Hasari M. 2015. Master's thesis. University of Jyväskylä, Finland. 40 p.

Hens M., Merckx R. 2002. The role of colloidal particles in the speciation and analysis of "dissolved" phosphorus // Water Research. No. 36 (12). P. 1483-1492.

Herskowitz J. 1986. Town of Listowel artificial Marsh project, Project Report 128 RR. Ontario Ministry of Environment, Toronto. 276 pp.

Hume N.P., Fleming M.S., Horne A.J. 2002. Denitrification potential and carbon quality of four aquatic plants in wetland microcosms // Soil Science Society of America Journal. No. 66. P. 1706-1712.

Iasur-Kruh L. 2012. Bacterial composition of constructed wetland's biofilm: the influence of biotic and a-biotic parameters on the composition of the biofilm. Hebrew University, Jerusalem. 102 p.

Jackson J.A., Sees M. 2001. Rerating capacity of a constructed treatment wetland system // Water Science and Technology. No. 44 (11-12). P. 435-440.

Jenssen P., Krogstad T. 2003. Design of constructed wetlands using phosphorus sorbing lightweight aggregate (LWA) // Advances in Ecological Sciences. No. 11. P. 259-272.

Jenter H.L., Schaffanek R.W., Smith T.J.I. 2003. Joint Conference on the Science and Restoration of the Greater Everglades and Florida Bay Ecosystem // Thermally-Driven Vertical Mixing in the Everglades. Palm Harbor. P. 290-292.

Jetten M.S.M. 2001. New pathways for ammonia conversion in soil and aquatic systems // Plant and Soil. No. 230. P. 9-19.

Jetten M., Logemann S., Muyzer G.M., Robertson L.A., de Vries S., van Loosdrecht M.C.M., Kuenen J.G. 1997. Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compounds // Antonie van Leeuwenhoek. No. 71. P. 75-93.

Kadlec R.H. 1997. An autobiotic wetland phosphorus model // Ecological Engineering. No. 8 (2). P. 145-172.

Kadlec R.H. 2003. Integrated natural systems for land ll leachate treatment // Wetlands – Nutrients, Metals, and Mass Cycling. Leiden: Backhuys Publishers. P. 1-33.

Kadlec R.H., Burgoon P.S., Henderson M.E. 1997. Integrated natural systems for treating potato processing wastewater // Water Science and Technology. No. 35 (3). P. 263-270.

Kadlec R.H., Wallace S.D. 2009. Treatment Wetlands. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press. 1016 p.

Keeney D.R. 1973. The nitrogen cycle in sediment-water system // Journal of Environmental Quality. No. 2. P. 15-29.

Kickuth R. 1980. Method for building up defined phosphate deposits from waste phosphates, 4,331,538,

Killham K. 1994. Soil Ecology. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press. 264 p.

Klopatek M. 1978. Nutrient dynamics of freshwater riverine marshes and the role of emergent macrophytes // Freshwater Wetlands: Ecological Processes and Management Potential. New York: Academic Press. P. 195-216.

Koenig A., Liu L.H. 2001. Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors // Water Research. No. 35 (8). P. 1969-1978.

Komor A., Fox P. 2002. Evaluation of denitrification rates and mechanisms in microcosms with sediments and plants // Proceedings of the 75th Annual WEFTEC Conference in Anaheim, California. Alexandria. P. 496-514.

Laanbroek H.J. 1990. Bacterial cycling of minerals that affect plant growth in waterlogged soils: a review // Aquatic Botany. No. 38. P. 105-125.

Lahav O., Green M. 2000. Ammonium removal from primary and secondary effluents using a bioregenerated ionexchange process // Water Science and Technology. No. 42 (1-2). P. 179-185.

Lam P., Kuypers M. 2011. Microbial Nitrogen Processes in Oxygen Minimum Zones // Annual Review of Marine Science. No. 3. P. 317-345.

Liang Z.S., Westerman P.W., Arogo J. 2002. Modelling ammonia emission from swine anaerobic lagoons // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. No. 45 (3). P. 787-798.

Lijklema L. 1977. The role of iron in the exchange of phosphate between water and sediments // Interactions between Sediments and Fresh Water. The Hague: B.V. Publishers. P. 313-317.

Ludwig W., Mittenhuber G., Friedrich C.G. 1993. Transfer of *Thiosphaera pantotropha* to *Paracoccus denitrifcans* // International Journal of Systematic Bacteriology. No. 43. P. 363-367.

MacFarlane G.T., Herbert R.A. Nitrate dissimilation by Vibrio sPp. isolated from estuarine sediments // Journal of General Microbiology. 1982. No. 128. Pp. 2463-2468.

McBean E., Rovers F.A. 1999. Landfill leachate characteristics as inputs for the design of wetlands // Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. Boca Raton: Lewis Publishers. P. 1-17.

McNevin D., Barford J. 2001. Inter-relationship between adsorption and pH in peat biofilters in the context of a cation exchange mechanism // Water Research. No. 35 (3). P. 736-744.

Metcalf and Eddy Inc. 1991. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. 1334 p.

Mitsch W.J., Gosselink J.G. 1993. Wetlands. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 722 p.

Moore M.T., Rodgers J.H., Cooper C.M., Smith S. 2000. Constructed wetlands for mitigation of atrazine-associated agricultural runoff // Environmental Pollution. No. 110 (3). P. 393-399.

Morel F.M., Hering J.G. 1993. Principles and Applications of Aquatic Chemistry. New York: John Wiley & Sons. 608 p.

Nahar S., Fox P., Wass R. 2000. Sulfur Driven Autotrophic Denitrification in Constructed Wetlands // Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2000. P. 38-49.

Olila O.G., Reddy K.R., Stites D.L. 1997. Influence of draining on soil phosphorus forms and

distribution in a constructed wetland // Ecological Engineering. No. 9 (3-4). P. 157-169.

Paneque A., Cejudo F.J., Ruiz M.T., de la Vega M.G. 1990. Nitrogen Metabolism in Heterotrophic Bacteria. Simultaneous Ammonia Inhibition of Nitrogen Fixation and Nitrate Uptake and Divalentation Regulation of Nitrate Uptake in Azotobacter Chroococcum // Inorganic Nitrogen in Plants and Microorganisms. Berlin: Springer-Verlag. P. 93-98.

Pant H.K., Reddy K.R. 2001. Hydrologic influence on stability of organic phosphorus in wetland detritus // Journal of Environmental Quality. No. 30 (2). P. 668-674.

Paul E.A., Clark F.E. 1996. Soil Microbiology and Biochemistry. 2nd ed. San Diego: Academic Press. 340 p.

Pauwels H., Talbo H. 2004. Nitrate concentration in wetlands: assessing the contribution of deeper groundwater from anions // Water Research. No. 38 (4). P. 1019-1025.

Phipps R., Crumpton W.G. 1994. Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads // Ecological Engineering. No. 3 (4). P. 399-408.

Poach M.E., Hunt P.G., Reddy G.B., Stone K.C., Johnson M.H., Grubbs A. 2004. Swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands under varying nitrogen loads // Ecological Engineering. No. 23 (3). P. 165-175.

Postgate J. 1998. Nitrogen Fixation. Cambridge: Cambridge University Press. 112 p.

Preisler A., de Beer D., Lichtschlag A., Lavik G., Boetius A., Jørgensen B. 2007. Biological and chemical sulfide oxidation in a Beggiatoa inhabited marine sediment // The ISME Journal. No. 1 (4). P. 341-353.

Reddy K.R., D'Angelo E.M. 1994. Soil process regulating water quality in wetlands // Global Wetlands: Old World and New. Amsterdam: Elsevier. P. 309-324.

Reddy K.R., DeLaune R.D. 2008. Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. CRC Press. 800 p.

Reddy K.R., Patrick W.H. 1984. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments // CRC Critical Reviews in Environmental Control. No. 13. P. 273-309.

Reddy K.R., Wang Y., DeBusk W.F., Fisher M.M., Newman S. 1998. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of the Florida Everglades // Soil Science Society of America Journal. No. 62. P. 1134-1147.

Reddy K.R., White J.R., Wang Y., Newman J. 2002. Stability and Bioavailability of Recently Accreted Phosphorus in Stormwater Treatment Areas. West Palm Beach (Florida). 63 p.

Redfield A.C. 1934. On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton // James Johnstone Memorial Volume. Liverpool: University Press of Liverpool. P. 176-192.

Richardson C.J. 1985. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands // Science. No. 228. P. 1424-1427.

Richardson C.J., Vaithiyanathan P. 1995. Phosphorus sorption characteristics of Everglades soils along a eutrophication gradient // Soil Science Society of America Journal. No. 59 (6). P. 1782-1788.

Robertson L.A., Dalsgaard T., Revsbech N.P., Kuenen J.G. 1995. Confirmation of 'Aerobic Denitri cation' in batch cultures, using gas chromatography and 15N mass spectrometry // FEMS Microbiology Ecology. No. 18. P. 113-120.

Rustige H., Tomac I., Höner G. 2003. Investigations on phosphorus retention in subsurface flow constructed wetlands // Water Science and Technology. No. 48 (5). P. 67-74.

Rutting T., Boeckx P., Muller C., Klemedtsson L. 2011. Assessment of the importance of dissimilatory nitrate reduction to ammonium for the terrestrial nitrogen cycle // Biogeosciences. No. 8. P. 1779-1791.

Sakadevan K., Bavor H.J. 1998. Phosphate adsorption characteristics of soils, slag, and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems // Water Research. No. 32 (2). P. 393-399.

Sees M.D. 2014.City Academy Presentation, City of Orlando, Public Works Department, Wastewater Division. 35 p.

Serra T., Fernando J.S., Rodriguez R.V. 2004. Effects of emergent vegetation on lateral diffusion in wetlands // Water Research. No. 38. P. 139-147.

Shilton A. 1996. Ammonia volatilization from a piggery pond // Water Science and Technology. No. 33 (7). P. 183-189.

Shipin O., Koottatep T., Nguyen T.T.K., Polprasert C. 2004. Integrated natural treatment systems for developing communities: low-tech N-removal through the fluctuating microbial pathways // Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 26-30 September 2004, Avignon. Pp. 75-82.

Soares M.I.M. 2002. Denitrification of groundwater with elemental sulfur // Water Science and Technology. No. 36 (5). P. 1392-1395.

Soto-Jimenez M.F., Paez-Osuma F., Bojorquez-Leyva H. 2003. Nutrient cycling at the sediment-water interface and in sediments at Chiricahueto marsh: a subtropical ecosystem associated with agricultural land uses // Water Research. No. 37. P. 719-728.

Stefanson R.C. 1973. Evolution of patterns of nitrous oxide and nitrogen in sealed soil-plant systems // Soil Biology and Biochemistry. No. 5. P. 1441-1445.

Stengel E., Carduck W., Jebsen C. 1987. Evidence for denitrication in articial wetlands // In: Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery. Orlando (Florida): Magnolia Publishing. P. 543-550.

Stief P., Fuchs-Ocklenburg S., Kamp A., Manohar C., Houbraken J., Boekhout T., de Beer D., Stoeck T. 2014. Dissimilatory nitrate reduction by *Aspergillus terreus* isolated from the seasonal oxygen minimum zone in the Arabian Sea // BMC Microbiology. No. 14 (35).

Tiedje J.M., Sextone A.J., Myrold D.D., Robinson J.A. 1982. Denitrification ecological niches, competition, and survival // Antonie van Leeuwenhoek. No. 48. P. 569-583.

Toet S., Van Logtestijn R.S.P., Kampf R., Schreijer M., Verhoeven J.T.A. 2005. The effect of hydraulic retention time on the removal of pollutants from sewage treatment plant effluent in a surface-flow wetland system // Wetlands. No. 25 (2). P. 375-391.

U.S. EPA. 1993a. Constructed wetlands for wastewater treatment and wildlife habitat: 17 case studies. Washington: U.S. EPA Office of Research and Development. 184 p.

U.S. EPA. 1993б. Manual: Nitrogen control. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. 311 p.

Van Oostrom A.J., Russell J.M. 1994. Denitrification in constructed wastewater wetlands receiving high concentrations of nitrate // Water Science and Technology. No. 29 (4). P. 7-14.

Wang H., Jawitz J.W., White J.R., Martinez C.J., Sees M.D. 2006. Rejuvenating the largest municipal treatment wetland in Florida // Ecological Engineering. No. 26 (2). P. 132-146.

Wang N., Mitsch W.J. 2000. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands // Ecological Modelling. No. 126. P. 101-130.

Watts C.J. 2000. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs // Hydrobiologia. No. 431. P. 27-39.

Waughman G.J., Bellamy D.J. 1980. Nitrogen fixation and the nitrogen balance in peatland ecosystems // Ecology. No. 6 (5). P. 1185-1198.

Weatherly G.J., Miladinovic N.D. 2004. Comparison of the ion exchange uptake of ammonium ion onto New Zealand clinoptilolite and modenite // Water Research. No. 38 (20). P. 4305-4312.

Whigham D.F., McCormick J., Good R.E., Simpson R.L. 1978. Biomass and Primary Production in Freshwater Tidal Wet- lands of the Middle Atlantic Coast // Freshwater Wetlands: Ecological Processes and Management Potential. New York: Academic Press. P. 3-20.

Winter H.C., Burris R.H. 1976. Nitrogenase // Annual Review of Biochemistry. No. 45. P. 409-430.

Wittgren H.B., Mæhlum T. 1997. Wastewater treatment wetlands in cold climates // Water Science

and Technology. No. 35 (5). P. 45-53.

Wu S., Kuschk P., Wiessner A., Müller J., Saad R.A.B., Dong R. 2013. Sulphur transformations in constructed wetlands for wastewater treatment: A review // Ecological Engineering. No. 52. P. 278-289.

Yoo J.H., Ro H.M., Choi W.J., Yoo S.H., Han K.H. 2006. Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in Korea // Ecological Engineering. No. 27 (2). P. 109-117.

Zhang J., Lan T., Müller C., Cai Z. 2014. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) plays an important role in soil nitrogen conservation in neutral and alkaline but not acidic rice soil // Journal of Soils and Sediments. No. 15. P. 523-531.

Zheng A., Dzombak D., Luthy R.G. 2004. Formation of free cyanide and cyanogens chloride from chlorination of publicly owned treatment words secondary effluent: laboratory study with model compounds // Water Environment Research. No. 76 (2). P. 113-120.

Zhu T., Jenssen P., Mæhlum T., Krogstad T. 1997. Phosphorus Sorption and Chemical Characteristics of Lightweight Aggregate (LWA) – Potential Filter Media in Treatment Wetlands // Water Science and Technology. No. 35. P. 103-108.

Zhu T., Mæhlum T., Jenssen P.D., Krogstad T. 2003. Phosphorus sorption characteristics of a light-weight aggregate // Water Science and Technology. No. 48 (5). P. 93-100.

MECHANISMS OF NUTRIENTS (NITROGEN AND PHOSPHORUS) REMOVAL FROM WASTEWATER IN CONSTRUCTED WETLANDS

© 2018. K.Yu. Rybka, N.M. Shchegolkova

Water Problems Institute RAS

Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: kseniarybka@gmail.com, nshegolkova@mail.ru

Received 15.10.2018. Revised 15.10.2018. Accepted 01.11.2018.

Removal of nutrients is a priority while treating wastewater of different nature. This article discusses the mechanisms of wastewater purification from nitrogen and phosphorus in constructed wetlands – water streams of artificial origin (surface or underground), planted with higher aquatic vegetation. Biochemical cycles of nitrogen and phosphorus in constructed wetlands include inorganic and organic compounds, which are interconnected in a sequence of reactions occurring in water, bottom sediments and biomass of plants and microorganisms. The paper discusses in details the basic mechanisms of nitrogen compounds conversion and removal – nitrogen fixation, ammonification, nitrification, denitrification, anaerobic ammonium oxidation (anammox), atmospheric deposition, sorption, and evaporation. The influence of abiotic and biotic factors on the course of these processes is described, the main groups of microorganisms carrying out microbiological processes of nitrogen removal are listed, reaction equations are given, the chemistry of wastewater treatment processes taken place at traditional wastewater treatment plants and in constructed wetlands are compared. The processes of conversion of phosphorus compounds considered in this work include sorption, assimilation into biomass, accretion, precipitation, and evaporation. The localization of phosphorus compounds in constructed wetlands and its change during their evolution, as well as features of the phosphorus cycle depending on the type of constructed wetland, are described. In conclusion, recommendations on the intensification of these processes and design of constructed wetlands in the climatic conditions of Russia are given.

Keywords: wastewater treatment, nitrogen, phosphorus, constructed wetlands.

DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10025