

# ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

## Environmental Dynamics and Global Climate Change



Том  
Volume

**14**

Выпуск  
Issue

**2**

**2023**

# ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 14  
Issue 2  
**2023**

<https://edgcccjournal.org>

## EDITORIAL BOARD

### EDITORS-IN-CHIEF

*Elena D. Lapshina*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Khanty-Mansiysk, Russia)  
*Mikhail V. Glagolev*, PhD of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

### EDITORIAL BOARD

#### Executive Secretary

*Olga M. Shaduyko* (Tomsk, Russia)

*Elena V. Agbalyan*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Salekhard, Russia)

*Sergey A. Blagodatskiy*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Stuttgart, Germany)

*Vasilij A. Vavilin*, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Egor A. Dyukarev*, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tomsk, Russia)

*Dmitriy V. Karelin*, Dr. habil. of Biol. (Moscow, Russia)

*Roman A. Kolesnikov*, PhD. in Geogr. Sci. (Salekhard, Russia)

*Oleg P. Kotsyurbenko*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Khanty-Mansiysk, Russia)

*Alexei V. Kouraev*, PhD in Geogr. Sci., Assistant professor (Toulouse, France)

*Shamil S. Maksyutov*, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tsukuba, Japan)

*Vasilij B. Martynenko*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Ufa, Russia)

*Nsdezhdha V. Matveeva*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Sankt-Petersburg, Russia)

*Alexander V. Puzanov*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Barnaul, Russia)

*Andrey B. Rozanov*, PhD in Geogr. Sci. (Stellenbosch, South Africa)

*Viktor M. Stepanenko*, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Alexey L. Stepanov*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

*Evgeniy V. Shein*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

*Sergey A. Shoba*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor, Corresponding Member of the RAS (Moscow, Russia)

*Kirsi Latola*, PhD, Research coordinator (Oulu, Finland)

*Mariusz Lamentowicz*, Dr. habil., Full-Professor (Poznan, Poland)

*Kári Fannar Lárusson*, PhD, CAFF program manager (Akureyri, Iceland)

*Ivan Mammarella*, PhD, Assistant Professor (Helsinki, Finland)

*Timo Vesala*, Dr., Academy Professor (Helsinki, Finland)

*Vincent F. Warwick*, Dr., Full-Professor (Quebec Canada)

### Editorial Office

*O.A. Frolov*, managing editor (Moscow, Russia)

*N.M. Fazul'dinova*, technical editor (Moscow, Russia)

*D.D. Ochirova*, technical editor (Moscow, Russia)

Founder:

Yugra State University. 628012, Russia, Khanty-Mansi autonomous Area, Khanty-Mansiysk, Chekhova str., 16. Phone/fax: +7(3467)377-000, ext. 101, WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)

National Research Tomsk State University. 634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave, 36. Phone: +7(3822)58-98-52, fax: +7(3822)52-95-85, WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. 656038, Russia, Barnaul, Molodezhnaya str., 1. Phone: +7(3852)66-64-60, fax: +7(3852)24-03-96, WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)

Arctic Research Center of the Yamal-Nenets autonomous Area. 629001, Russia, Yamal-Nenets autonomous District, Salekhard, Respublic str., 73. Phone/fax: +7(34922)441-32, WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)

# ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 14  
Выпуск 2  
**2023**

Журнал издается с 2008 года

<https://edgcccjournal.org>

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

*Елена Дмитриевна Лапина*, д-р биол. наук, профессор (Ханты-Мансийск, Россия)  
*Михаил Владимирович Глаголев*, канд. биол. наук (Москва, Россия)

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

#### Ответственный секретарь

*О.М. Шадуйко* (Томск, Россия)

*Е.В. Азбалин*, д-р биол. наук (Салехард, Россия)

*С.А. Благодатский*, д-р биол. наук (Штутгарт, Германия)

*В.А. Вавилин*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

*Е.А. Дюкарев*, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)

*Д.В. Карелин*, д-р биол. наук (Москва, Россия)

*Р.А. Колесников*, канд. геогр. наук (Салехард, Россия)

*О.Р. Коцюрбенко*, д-р биол. наук (Ханты-Мансийск, Россия)

*А.В. Кураев*, канд. геогр. наук, доцент (Тулуза, Франция)

*Ш.Ш. Максотов*, канд. физ.-мат. наук (Цукуба, Япония)

*В.Б. Мартыненко*, д-р биол. наук, профессор (Уфа, Россия)

*Н.В. Матвеева*, д-р биол. наук (Санкт-Петербург, Россия)

*А.В. Пузанов*, д-р биол. наук, профессор (Барнаул, Россия)

*А.Б. Розанов*, канд. геогр. наук (Стелленбос, ЮАР)

*В.М. Степаненко*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

*А.Л. Степанов*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)

*Е.В. Шеин*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)

*С.А. Шоба*, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)

*Т. Весала*, д-р, профессор (Хельсинки, Финляндия)

*К. Латола*, д-р (Оулу, Финляндия)

*М. Ламентович*, д-р, профессор (Познань, Польша)

*К.Ф. Ларуссон*, д-р (Акурейри, Исландия)

*И. Маммарелла*, д-р, доцент (Хельсинки, Финляндия)

*В.Ф. Варвик*, д-р, профессор (Квебек, Канада)

### Редакция

*О.А. Фролов*, заведующий редакцией (Москва, Россия)

*Н.М. Фазульдинова*, редактор (Москва, Россия)

*Д.Д. Очирова*, редактор (Москва, Россия)

### Учредители:

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Ханты-Мансийск ул. Чехова, 16.

Тел./факс: +7(3467)37-70-00 (доб. 101), WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. Тел.: +7(3822)58-98-52, факс: +7(3822)52-95-85, WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

ФГБУН Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук.  
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Тел.: +7(3852)66-64-60, факс: +7(3852)24-03-96, WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)

ГКУ Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики».

629008, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 73. Тел./факс: +7(34922)441-32,  
WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций, связи и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77-82594 от 18.01.2022 г.

**Индексируется:** Science Index (РИНЦ), Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, EBSCO

**Техподдержка:** Рожкова-Тимина Инна Олеговна. Тел. +7 9539215004. E-mail: [inna.timina@mail.ru](mailto:inna.timina@mail.ru)

Архив журнала «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» размещен в сети Интернет [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), <https://edgcccjournal.org/EDGCC/issue/archive>

**ОБЗОРЫ И ЛЕКЦИИ / OVERVIEWS AND LECTURES***Lapshina E.D., Zarov E.A.*

Stratigraphy of peat deposits and mire development in the southern part of the forest zone of Western Siberia in Holocene 70-101

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS***Zhirenko N.G., Vu Manh, Nguyen Van Thinh, Kurbatova J.A.*

Photosynthetic gas exchange in seedlings of *Hopea odorata* ROXB. (South Vietnam) 102-115

*Ilyasov D.V., Mochenov S.Y., Rokova A.I., Glagolev M.V., Kupriyanova I.V., Suvorov G.G., Sabrekov A.F., Terentieva I.E.*

Moscow region's swamp forests mapping for inventory of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes 116-132

**ХРОНИКА / CHRONICLE***Kukurichkin G.M.*

The Fifth All-Russian Scientific and Practical Conference "Safe North – clean Arctic" 132-139



# STRATIGRAPHY OF PEAT DEPOSITS AND MIRE DEVELOPMENT IN THE SOUTHERN PART OF THE FOREST ZONE OF WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE

*Lapshina E. D.<sup>1\*</sup>, Zarov E.A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск*

\* [e\\_lapshina@ugrasu.ru](mailto:e_lapshina@ugrasu.ru)

**Citation:** Lapshina E.D. Zarov E.A. 2023. Stratigraphy of peat deposits and mire development in the south and middle taiga zones of Westerns Siberia in Holocene. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 70-101.

**DOI:** 10.18822/edgcc568688

**English text:** <https://edgccjournal.org/EDGCC/article/view/568688>

*В статье приведен исторический обзор изучения торфяных месторождений юга таежной зоны Западной Сибири, и обобщены данные о строении торфяных залежей болот региона накопленные автором в течение многих лет полевых исследований (1980–2004). Приводится характеристика основных типов стратиграфического строения и описание истории развития торфяных болот на основе детального изучения ботанического состава колонок торфа. Торфяные колонки отобраны в пределах ландшафтно-экологических профилей, охвативших все элементы рельефа от приподнятых поверхностей водораздельных равнин до болот долин рек и ложбин древнего стока в разных природно-климатических зонах и подзонах (подтайге, южной тайге и средней тайге). Наиболее древние торфяные отложения связаны с тальвегами и элементами древней гидрографической сети. Образование торфа началось одновременно в пределах таежной зоны и современной субарктической зоны Западной Сибири и достигло высокого уровня распространения в бореальный период. Процесс развития торфяников тесно связан с влажностью климата – во влажные периоды активно развивались водораздельные болота, а развитие пойменных болот сдерживалось процессом аллювиального осаждения; в засушливые периоды активно развивались пойменные болота, а рост водораздельных болот заставался.*

**Ключевые слова:** ботанический анализ торфа, торфяная залежь, водораздельные болота, пойменные болота, торфяники, палеоэкология, Западная Сибирь.

## ВВЕДЕНИЕ

Появление первых сведений о стратиграфическом строении торфяных болот лесной зоны Западной Сибири связано с работой экспедиции Государственного лугового института под руководством А.Я. Бронзова [Baryshnikov, 1929; Bronzov, 1930, 1936]. Однако решающее значение для изучения торфяных отложений Западной Сибири имели крупномасштабные торфоразведочные работы, развернутые в 50-х годах институтом «Гипроторфразведка» с целью выявления и оценки торфяных ресурсов региона [Loginov, 1957, 1958]. В 60-х годах аналогичные работы были продолжены в бассейнах рек Тромьегана, Ваха, Кети, Васюгана под руководством А.В. Предтеченского.

В результате проведенных исследований были составлены справочники торфяных месторождений Новосибирской, Омской, Томской и Тюменской областей, сводная карта (1:1000000) и атлас торфяных месторождений Западно-Сибирской равнины, выполнен первичный анализ торфяных ресурсов и региональных особенностей стратиграфии торфяных залежей [Erkova, 1957; Yasnopolskaya, 1964, 1965; Loginov, Khoroshev, 1972; Tyuremnov et al., 1971; Tyuremnov, 1976; Predtechensky, Skobeeva, 1974, etc.]. Изучение строения торфяной залежи входило также в программу гидрологических исследований, проводимых в 60-х годах экспедицией Государственного гидрологического института, результаты которых также частично опубликованы [Romanova, 1964, 1967; Romanova, Usova, 1969].

Большой вклад в изучение торфяных отложений и общих закономерностей развития торфяных болот Западной Сибири в голоцене внесен геоботаниками Московского государственного университета [Liss et al., 1976; 1988; Liss, Berezina, 1978, 1981; Liss, Polkoshnikova, 1979; Berezina, Liss, 1983; Liss, 1992, 1998]. Последней обобщающей работой в этом направлении явилась

коллективная монография «Болотные экосистемы Западной Сибири и их природоохранное значение» [Liss et al., 2001].

В результате был накоплен обширный материал о стратиграфическом строении торфяных болот Западной Сибири, основных стадиях, которые болота проходят в своем развитии и особенностях их проявления в разных природно-климатических зонах. Однако выявленные закономерности касаются в основном лишь очень крупных и обобщенных этапов развития болот, связанных преимущественно со сменой типа их водно-минерального питания вследствие нарастания толщи торфа и уменьшения роли почвенно-грунтовых вод в питании болот. Более мелкие смены в строении торфяной залежи оставались, как правило, вне поля зрения исследователей, что объясняется методикой отбора образцов торфа через 25 см, которая рассчитана на выявление обобщенных «пластообразующих» видов торфа без учета маломощных, однако нередко очень характерных и информативных слоев. Наступил момент, когда стало необходимым обратить более пристальное внимание на детальное строение торфяных отложений болот, которые являются богатейшим источником палеогеографической информации.

Начало изучению комплексного изучения болот Западной Сибири, основанного на очень внимательном отношении к детальному изучению торфяных залежей с отбором образцов торфа по вертикали через 10 см, было положено Ю.А. Львовым [Lvov, 1974].

В результате был накоплен большой фактический материал в виде стратиграфических колонок торфа, детально отражающих динамику смен растительности и строение торфяных залежей болот разных типов местоположений (пойменных, водораздельных, болот речных террас и долин древнего стока) [Lvov, Mul'diyarov, 1974; Lvov, 1977; Lapshina, 1985; Bazanov, 1980; Mul'diyarov, 1980, 1989; Lapshina et al., 2000a, b; Lapshina, Mul'diyarov, 2002, etc.]. На основе изучения детальной структуры торфяной залежи развиты теоретические представления о болотных фациях, прослежены закономерности их распределения по площади болотных массивов и в виде соответствующих пластов торфа в торфяной залежи [Lvov, 1974, 1977; Lapshina, 1987]. Разработаны новые методы изучения и анализа торфяных отложений, в том числе метод ретроспективного экологического анализа торфа [Lvov, 1979; Lapshina, 1987, 1995b], что открывает новые возможности для палеоклиматических реконструкций и установления связей в системе КЛИМАТ-РАСТИТЕЛЬНОСТЬ-ТОРФ-УГЛЕРОД.

### **Особенности отражения климатических условий голоцена в торфе**

В целях восстановления климатических условий голоцена наиболее широко используют данные об эволюции лесной растительности окружающих болото ландшафтов, полученных с помощью послынного спорово-пыльцевого анализа торфяных отложений. Принято считать, что пыльцевые диаграммы позволяют воспроизводить общий ландшафтный облик растительного покрова. Поэтому палеоклиматические реконструкции на основе пыльцевого анализа, прежде всего, исходят из динамики температурной характеристики климата, способной вызвать смещение зональных границ, и уже на ее основе, с известной долей вероятности, делаются логические заключения о тех или иных изменениях увлажненности.

В Западной Сибири к настоящему времени накоплен большой объем палинологических данных. Наиболее полные разрезы, исследованные спорово-пыльцевым методом, приводятся для лесной зоны [Neishtadt, 1957; Glebov et al., 1974; Khotinsky, 1977; Arkhipov et al., 1980; Volkova, Levina, 1982; P'yavchenko, 1985]. Завершением целого этапа в изучении природы голоцена Западной Сибири явилось создание, с учетом данных абсолютного возраста, двух палеоклиматических кривых, характеризующих температуру и влажность климата [Volkova, 1999] за период 12 тыс. лет.

С другой стороны, по мере накопления радиоуглеродных данных о возрасте крупных природных исторических событий послеледникового периода удалось уточнить время наступления отдельных эпох выявленного А.В. Шнитниковым климатического ритма увлажненности [Shnitnikov, 1973]. Обращает на себя внимание высокая степень сходства кривой увлажненности климата Западной Сибири В.С. Волковой с эпохами разной увлажненности материков Северного полушария А.В. Шнитникова, полученных независимо друг от друга с использованием разных массивов исходных данных, что свидетельствует об объективности отражаемых ими процессов. Позже были получены более детальные палинологические данные, уточняющие общие закономерности [Blyakharchuk, Klimanov, 1989; Pitkänen et al., 2002; Blyakharchuk, 2000, 2012; Blyakharchuk et al., 2019, etc.].

Другим весьма информативным, но еще недостаточно оцененным источником палеогеографических сведений является детальный ботанический анализ торфа. Большинство

авторов исходит из того, что торф, будучи продуктом неполного разложения болотной растительности, отражает, хотя и в несколько измененном виде, основные особенности материнских сообществ [Bogdanovskaya-Guihéneuf, 1945; Tyuremnov, 1976; Lvov, 1974, 1977]. Искажение фитоценотической информации, как показали многочисленные исследования, обусловлены различной скоростью разложения болотных растений [Kozlovskaya et al., 1978; Kozlovskaya, 1984], а также спецификой торфонакопления у растений разных жизненных форм, в разной степени вызывающих вторичные изменения соотношения растительных остатков [Bogdanovskaya-Guihéneuf, 1945; Lvov, 1977; P'yavchenko, 1984].

Однако в большинстве случаев в растительном волокне торфа отражено доминантное ядро материнских фитоценозов [Lvov, 1977; Lvov, Mul'diyarov, 1984], поэтому по составу хорошо выраженного однородного пласта, с известной поправкой на различия в разрушении тканей и вторичного диагенеза, можно достаточно точно представить былой растительный покров. Точный ботанический анализ образца торфа в известной мере соответствует геоботаническому описанию, так как выявляет видовой состав и количественные соотношения доминирующих видов материнского фитоценоза [Lvov, 1977]. Следовательно, к торфу можно применять ботанические методы анализа, в частности метод фитоиндикационного определения экологических параметров местообитания по составу его растительного покрова [Ramenskiy et al., 1956].

Имеется опыт успешного применения стандартных экологических шкал Л.Г. Раменского для индикации болотных палеоэкоотопов по ботаническому составу торфа [Kurkin, 1976; Lvov, 1979; Lvov, Muldiyarov, 1984; Lapshina, 1987, 1995b; Tsyganov et al., 2021]. Основными факторами болотного процесса, по которым производится экологическая оценка местообитаний, являются: реальное (усвоенное растениями) плодородие, измеренное в ступенях экологической шкалы активного богатства почв, и общее увлажнение, измеренное в ступенях шкалы увлажнения [Ramenskiy et al., 1956]. Реальное плодородие торфяных почв изменяется постепенно или скачком, отражая этапы эндозоогенетического процесса обеднения минерального питания болотного массива по мере нарастания торфяной залежи, при этом скачок приходится на переход болота в омбротрофную стадию развития. В случае пойменных болот оно остается относительно постоянным в течение всего периода их существования.

Более динамичным в жизни болот оказывается фактор общего увлажнения. Болотные биогеоценозы реагируют на изменение увлажнения перестройкой своего состава и структуры. При обсыхании в болотных фитоценозах увеличивается доля менее влаголюбивых растений, при обводнении они сокращают свое обилие или полностью выпадают, уступая место топяным видам, что при достаточной длительности процесса отражается на ботаническом составе торфа. На болотных участках комплексного строения происходит изменение соотношения отдельных структурных элементов: в засушливый период увеличивается площадь кочек и гряд, во влажный – межкочечных понижений и мочажин. В колонке торфа, отобранной на границе таких элементов, прослеживается чередование топяных и грядовых торфов [Lvov, 1976, 1979; Vleeschouwer, 2010].

При послойном отборе образцов торфа и расчете по экологическим шкалам положения каждого образца в системе координат глубина–фактор, получают графики последовательных изменений местообитания с момента зарождения болота до настоящего времени [Blyakharchuk, Chernova, 2013]. Разрешающая способность метода зависит от частоты отбора проб. Так, при отборе торфяных образцов на Убинском займище (Бараба) через 25 см в общих чертах выявлены лишь многовековые колебания с периодом 1500–2000 лет [Kurkin, 1976]. При этом по кривой увлажненности торфяной залежи Чагинского болота (Томск), проанализированной с шагом в 10 см, хорошо различимы уже колебания двух типов: более крупные, соответствующие многовековым циклам увлажненности А.В. Шнитникова, которых насчитывается 4–5 на протяжении всего срока существования болота, и более мелкие, характеризующиеся меньшим периодом размаха отклонений [Lvov, 1979].

Таким образом, детальный ботанический анализ торфа дает возможность обоснованно выявлять климатические периоды голоцена разной степени увлажненности и в этом отношении существенно расширяет возможности палеогеографических реконструкций. Наиболее ярко изменения влажности климата голоцена отражаются в торфяных отложениях верховых грядово-мочажинных болот, в комплексном растительном покрове которых в качестве доминантов и эдификаторов выступают сфагновые мхи, смены которых непосредственно и адекватно отражаются в строении торфяных залежей [Lvov, 1977].

Среди низинных торфяников достаточно информативны торфяники степной зоны, подвергающиеся в маловодные периоды сильному обсыханию [Shnitnikov, 1957; Kurkin, 1976]. Крайне редко для этой цели используются особенности строения низинных болот лесной зоны. Это

связано с тем, что низинные торфяники находятся в условиях постоянного обильного увлажнения, а с другой стороны, сложены растениями более или менее сходной экологии, но разных жизненных форм, которые в процессе торфонакопления существенно перерабатывают ранее отложенные слои залежи [Bogdanowska-Guihéneuf, 1945; Lvov, 1977], делая их гомогенными и поэтому малоинформативными. Тем не менее, как показывает наш опыт, при правильном выборе участка болотного массива для отбора колонки торфа и достаточной детальности ботанического анализа эти затруднения могут быть преодолены, и торфяная залежь низинных болот оказывается весьма пригодной для палеоклиматических реконструкций, в частности, для выявления ритмов увлажненности климата [Lapshina, 1987, 1995a, b].

Цель настоящей статьи – публикация материалов прежних лет, накопленных в ходе многолетних исследований стратиграфического строения торфяных болот, выявление закономерностей пространственно-временных изменений по ландшафтно-экологическому и географическому градиентам на юге таежной зоны Западно-Сибирской равнины.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для данной работы послужили результаты многолетних исследований торфяных залежей болот в южной части таежной зоны Западной Сибири. В основу работы положено детальное изучение 9 модельных территорий площадью около 100-200 км<sup>2</sup> каждая, охватывающих все разнообразие основных типов геолого-геоморфологических поверхностей юга лесной зоны Западно-Сибирской равнины в разных биоклиматических зонах и подзонах – подтайге, южной и средней тайге (рис. 1).

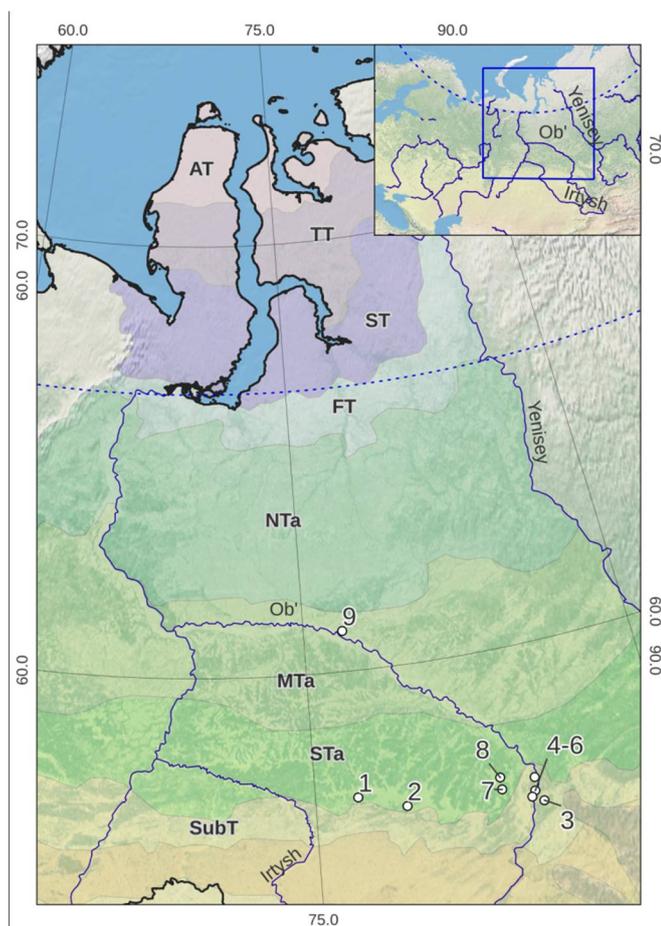


Рис. 1. Расположение ключевых участков. Ключевые участки (модельные территории): Большое Васюганское болото: 1 – «Узас», 2 – «Малая Ича»; 3 – 86 Квартал, Обь-Томское междуречье; сегменты поймы Оби: 4 – Подобинский, 5 – Шегарский, 6 – Десятковский; 7 – Плотниково (Бакчарское болото), 8 – Бородинск (болото Семеновское), 9 – Нижневартовск (болото Савкино).

Природно-климатические зоны [Il'ina et al., 1985]: AT – арктическая тундра, TT – типичная тундра, ST – южная тундра, FT – лесотундра, NTa – северная тайга, MTa – средняя тайга, STa – южная тайга, SubT – подтайга.

Всего было изучено 9 нивелировочных профилей, общей протяженностью более 50 км, на которых пробурено 355 пробоотборочных и зондировочных скважин.

Отбор образцов торфа проводился торфяным буром (3.5 x 50 см) сплошной колонкой через 10 см на всю глубину торфяной залежи [Lvov, 1974]. В образцах определялся ботанический состав и степень разложения торфа. Всего для характеристики стратиграфического строения торфяных залежей на ботанический состав было проанализировано около 5000 образцов торфа. С целью визуализации результатов ботанического анализа торфа и построения стратиграфических колонок использована специализированная программа PeatGraf [Dyukarev, 2003]. На основе отдельных торфяных колонок с известной объемной плотностью торфа изучалось фактическое распределение органического вещества и углерода в торфяных залежах на протяжении голоцена и его отдельные периоды.

Радиоуглеродный анализ выполнен в лаборатории Института геологии РАН. Образцы для определения абсолютного возраста отбирались из придонного слоя и двух глубин (обычно 50 и 200 см) в средней части залежи. В самых глубоких колонках возраст слоев был определен через каждые 50–100 см. Полученные методом радиоуглеродного анализа даты были преобразованы в дендрохронологические (калиброванные) даты [Stuiver and Reimer, 1993]. Для периодизации голоцена использовались соответствующие (уточненные по дендрохронологическим шкалам) возрастные границы периодов: предбореальный (PB) – 9980–11960, бореальный (BO) – 8830–9980, атлантический (AT) – 5300–8830, суббореальный (SB)–2740 – 5300, субатлантический (SA) – 2740 до настоящего времени. Всего в ходе исследований в пределах лесной зоны Западной Сибири было получено 134 датировки абсолютного возраста.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приводится характеристика основных типов стратиграфического строения и описание истории развития торфяных болот на основе детального изучения ботанического состава колонок торфа, отобранных в пределах ландшафтно-экологических профилей, проложенных от приподнятых поверхностей водораздельных равнин до болот долин рек и ложбин древнего стока в разных природно-климатических зонах и подзонах.

### **Стратиграфическое строение и история развития болот подтайги**

На юге лесной зоны Западной Сибири в пределах зоны мелколиственных (березово-осиновых) лесов или подтайги ключевые участки располагались на болотах водораздельных равнин междуречья Оби и Иртыша, в долинах древнего стока на Обь-Томском междуречье и в пойме р. Оби на юге Томской области.

#### *Болота водораздельных равнин*

Стратиграфическое строение и история развития болот водораздельных равнин подтайги изучено на примере южной части Большого Васюганского болота.

Большое Васюганское болото (БВБ) представляет собой систему большого числа изначально изолированных болотных массивов, возникших на протяжении всего голоцена и имевших тенденцию к слиянию по мере накопления торфа и роста их линейных размеров [Bleuten, Lapshina, 2001; Lapshina, Muldiyarov, 2002].

На современном уровне изученности торфяных отложений в пределах осевой части и южного склона Большого Васюганского болота можно выделить 3 основных типа стратиграфического строения торфяных залежей, отражающих общий ход развития и смен болотных фитоценозов в генетических центрах первичных болотных массивов:

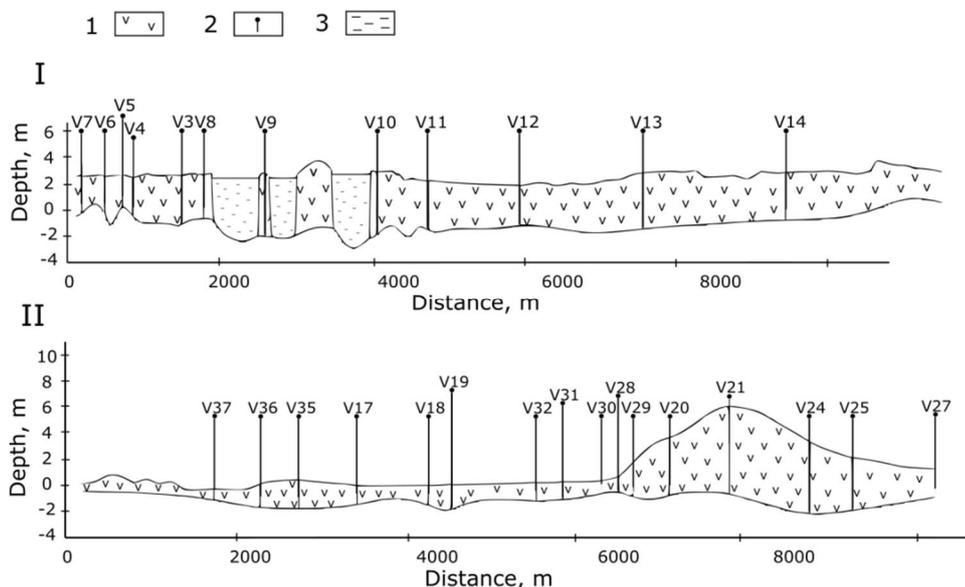
- верховая сфагновая (фускум) залежь в генетических центрах выпуклых олиготрофных рямов, примыкающих к акватории первичных внутриболотных озер;
- смешанная (преимущественно верховая сфагновая) залежь в генетических центрах суходольного эвтрофного заболачивания (древние плосковершинные верховые массивы комплексного строения в осевой части БВБ);
- преимущественно низинная осоково-травяно-гипновая залежь под открытыми низинными топиями эвтрофного суходольного заболачивания средне- и позднеголоценового возраста.

Принято считать, что средняя мощность торфяных залежей БВБ не превышает 2 м [Khotinsky et al., 1970; Inisheva et al., 2003]. Эти представления опираются на фондовые данные института «Гипроторфразведка», проводившего широкомасштабные изыскания, главным образом, в восточной части системы Большого Васюганского болота и его северных отрогов. В результате проведенных нами исследований установлено, что на обширной территории в центральной и западной части БВБ торфяные залежи составляют в среднем около 4 м, а возраст их значительно старше, чем считалось ранее. Согласно радиоуглеродным (калиброванным) данным отложение торфа в наиболее древних центрах торфонакопления на юге Обь-Иртышской водораздельной равнины началось в древнем голоцене около 9.5–10 тыс. лет назад. Начальные стадии накопления торфа в пределах БВБ связаны с многочисленными плоскими, реже более глубокими, озерными котловинами (депрессиями) либо переувлажненными низинами, где уровень грунтовых вод постоянно находился у поверхности.

При озерном пути заболачивания собственно торфяные отложения подстилаются озерными осадками с остатками водных макрофитов (*Potamogeton*, *Nymphaea*, *Typha*). Мощность слоя озерных отложений обычно не превышает 0.5 м, но изредка может достигать 2–2.5 м вблизи остатков водных акваторий первичных озер, многие из которых сохранились до настоящего времени. Общая мощность органических отложений в первичных генетических центрах болота, как правило, составляет 6.5–7.0 м.

Ниже приводятся **основные стратиграфические типы, выявленные в генетических центрах БВБ** в пределах подтайги [Lapshina, Muldiyarov, 2002; Lapshina, 2004].

1. Первый стратиграфический тип – верховая сфагновая (фускум) залежь – характерен для наиболее древних генетических центров озерного происхождения. В пределах крупных озерных котловин диаметром от первых сотен метров до 1.5–2 км, верхняя 5–6-метровая толща слабо до умеренно разложенного гомогенного сфагнового (фускум) торфа подстилается переходными (сфагновым магелланикум, кустарничково-сфагновым) и низинными (папоротниковым, осоково-папоротниковым) видами торфа, которые в сумме не превышают 1–1.5 м. Соотношение мощности слоев низинного, переходного и верхового (фускум) торфа на этих участках составляет в среднем 1:0.5:6–7 м (см. прил. 1, рис. 2, V24). Возраст придонного слоя торфа оценивается в 10 тыс. лет, а переход болота в переходную и верховую стадии развития на таких участках произошел, соответственно, около 9.5 и 9 тыс. лет назад.



**Рис. 2.** Профили торфяных залежей Большого Васюганского болота: I – западная модельная территория (МТ) «Узас», II – восточная МТ «Малая Ича». 1 – торф; 2 – вода; 3 – минеральное дно; 4 – точки бурения с номерами скважин.

Более простой вариант данного стратиграфического типа торфяной залежи развивается на береговых валах бывших озерных котловин с их южной стороны. Слабый уклон поверхности южного макросклона Васюганской равнины и постоянный приток поверхностных вод с более высоких гипсометрических уровней Обь-Иртышского водораздела обеспечили характерное смещение куполов

торфяных залежей олиготрофных рямов относительно их генетических центров к югу (рис. 2, II, V21, V24).

Одна из торфяных колонок, отобранных на нивелировочном профиле в центральном секторе БВБ, иллюстрирует такой тип залежи (см. прил. 2, рис. 1, V21).

Торфонакопление началось здесь около 9.5 тыс. лет назад со сравнительно короткого периода существования открытой мезотрофной сфагновой топи с доминированием *Sphagnum teres*, отложившего 40 см сфагнового терес торфа. Микроскопический ботанический анализ торфа показал, что типичная растительность олиготрофного верхового болота (ряма) с доминированием низкорослой сосны, кустарничков (*Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*) и *Sphagnum fuscum* сформировалась на этом участке еще в начале бореального периода (около 9 тыс. лет назад) и с тех пор сохранилась до настоящего времени без каких-либо существенных изменений.

В настоящее время древние олиготрофные рьямы озерного происхождения куполообразно возвышаются на 6–8 м над поверхностью окружающих их более молодых осоково-гипновых топей. При этом общая мощность торфяной залежи в рьямах может достигать 11 м. В современном ландшафтном покрове БВБ подобные массивы, как правило, примыкают или окружают акватории крупных первичных озер. По своему происхождению, характеру торфяных отложений они во многом сходны с верховыми торфяниками (рямами) лесостепи (Украинский рям, Убинский рям и др.) [Khotinskiy, 1977].

2. Второй стратиграфический тип торфяной залежи характерен для крупных (до 7–10 км в поперечнике) сравнительно древних плосковершинных верховых массивов комплексного строения в осевой части и по южной окраине БВБ. Поперечный профиль, проложенный через один из таких массивов, показал, что обширные участки БВБ, нередко соседствующие с болотными массивами первичных озерных котловин, формировались путем суходольного заболачивания плоских депрессий с развитой в них гидрофильной травянистой растительностью (рис. 2, I, V11–13). Накопление торфа началось здесь позже, чем в озерных котловинах – в начале атлантического периода (около 8–8.5 тыс. лет назад)<sup>1</sup>.

В стратиграфическом строении торфяной залежи, как и на древних болотных массивах озерного происхождения, можно выделить три слоя, но в отличие от последних, здесь полностью отсутствуют озерные отложения, а мощность верхового торфа не превышает 3 м при средней глубине торфяной залежи 4,5–5 м. Нижний горизонт торфяной залежи сложен, как правило, хорошо разложившимися папоротниковым, осоково-папоротниковым или осоковым (из остатков *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*) видами торфа мощностью около 1 м (см. прил. 2, рис. 2, V12, 13).

Около 6–5.5 тыс. лет назад открытые папоротниковые и папоротниково-осоковые топи грунтового питания стали активно заселяться карликовой березкой. Эти кустарничковые (ерниковые) топи вскоре были перекрыты сообществами олиготрофных сфагновых мхов из *Sphagnum magellanicum*, реже *S. angustifolium* с участием пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*) и вересковых кустарничков (*Chamaedaphne calyculata*, *Ledum palustre*, *Oxycoccus palustris*). В целом мощность среднего (переходного) горизонта торфяной залежи может варьировать от 0.5 до 1 м. Его слагают кустарничковый, кустарничково-пушицево-сфагновый и сфагновый (магелланикум) виды торфа.

Уменьшение влияния грунтовых вод по мере накопления торфа и увеличения роли атмосферных осадков в водно-минеральном питании растений привело к резкой смене экологических условий. В результате в начале суббореального периода (5.5–5 тыс. лет назад) на месте мезотрофных сообществ формируется типичная сосново-кустарничково-сфагновая (рямовая) растительность верхового олиготрофного болота.

В течение последних 2.5–3 тыс. лет по мере латерального роста и замедления вертикального прироста болотных массивов, уплощения их поверхности и ухудшения стока в центральных частях началось развитие многочисленных обводненных мочажин и вторичных озерков, что привело к формированию на месте гомогенных выпуклых олиготрофных массивов (рямов) грядово-топяных и грядово-озерково-топяных комплексов. В торфяной залежи это отразилось в появлении обводненных горизонтов топяных сфагновых торфов из остатков *Sphagnum balticum*, *S. jensenii*, *S. papillosum* среди верхового сфагнового фускум торфа (см. прил. 1, рис. 2, V13). Мощность верхнего слоя залежи комплексного строения достигает 2–2.5(3)м.

---

<sup>1</sup> 1 здесь и далее при описании истории развития торфяных болот региона, а также в стратиграфических колонках (Прил. 1 и 2), в качестве истинного возраста используются калиброванные радиоуглеродные даты.

3. Третий стратиграфический тип – низинная осоково-травяно-гипновая залежь – широко распространен под открытыми низинными топиями эвтрофного суходольного заболачивания суффузионных западин средне- позднеголоценового возраста. Мощность такой залежи и ее стратиграфическое строение в отдельных частях БВБ зависят от возраста конкретных болотных массивов и стадии их развития. Как правило, мощность торфа варьирует от 1.8 до 3 м, достигая в наиболее древних генетических центрах такого рода болотных массивов 4–4.2 м.

Радиоуглеродный и детальный ботанический анализ торфяной залежи показал, что массовое развитие таких массивов началось в конце атлантического – первой половине суббореального периодов, около 5.5–4.0 тыс. лет назад, на месте сырых осоково-вейниковых и осоково-тростниковых растительных сообществ. В первую очередь заболачиванию подвергались более глубокие низины, но по мере развития болотообразовательного процесса и подъема уровня грунтовых вод процесс торфонакопления охватывал и более плоские западины. Постепенно гидроморфная травянистая растительность на минеральных почвах уступила место открытым травяным болотам с доминированием папоротника и крупных осок, отложивших около 1–1,5 м папоротникового, осоково-папоротникового или осокового торфа (см. прил. 1, рис. 2, V23; прил. 2, рис. 1, V26). По мере накопления торфа травяные топи богатого грунтового питания сменились открытыми осоковыми и осоково-гипновыми слабопроточными топиями смешанного атмосферно-грунтового питания, гомогенного или комплексного строения с пятнами карликовой березки и редкими цепочками древовидных берез. Общий ландшафтный облик и характер растительного покрова таких болот с небольшими вариациями сохраняются на обширных участках БВБ вплоть до настоящего времени.

В малопроточных осоково-гипновых топиях комплексного строения отмечен более сложный вариант данного стратиграфического типа торфяной залежи, в котором верхний слой мощностью около 1 м состоит из слабо до умеренно разложенного сфагнового (магелланикум, фускум) торфа. Такой тип залежи развивается под выпуклыми «островами» олиготрофной рямовой и росляровой растительности, которые возвышаются на 40–60 см над поверхностью топей и занимают, как правило, не более 1–2% (реже до 5%) площади низинного комплекса. Диаметр их в зависимости от возраста варьирует от 2–3 до 50 м.

Детальное изучение стратиграфического строения торфяных залежей показало, что иногда «острова» рослого рьяма в низинных осоково-гипновых топиях располагаются над повышениями минерального ложа, то есть они были выражены в растительном покрове и ландшафтной структуре болот, начиная с первых этапов их развития. Однако в большинстве случаев выпуклые «острова» с олиготрофной растительностью возникали на значительно более поздних стадиях развития торфяной залежи либо появились совсем недавно, не успев отложить сколько-нибудь выраженного слоя сфагнового торфа. Есть основания полагать, что происхождение рямовых островов («шеломков») среди низинных осоково-гипновых топей на юге лесной зоны Западной Сибири совпадает с регулярным развитием «перелетков» сезонной мерзлоты и возникновением островной многолетней мерзлоты в холодные периоды голоцена.

#### *Строение торфяных залежей в зонах слияния первичных болотных массивов.*

Описанные выше типы торфяной залежи преобладают по площади, но не исчерпывают всего разнообразия стратиграфического строения этой болотной системы. Иные типы торфяных залежей выявляются в зонах соприкосновения (слияния) первичных болотных массивов между собой, а также в периферийной полосе болотной системы и полосе современного заболачивания.

Строение торфяных залежей в зоне соприкосновения хорошо выраженных в ландшафтном отношении изолированных болотных массивов определяется стадией развития последних (мощностью торфа, типом водно-минерального питания), характером минерального ложа и положением контактной зоны в общей системе гидрологических потоков (парагенетических рядов болотных ландшафтов), обусловленных макрорельефом водораздельной равнины и мезорельефом поверхности торфяных отложений.

В ходе развития выпуклых олиготрофных верховых массивов происходит перекрытие поверхности окружающих их низинных топей. При этом в условиях постоянного притока вод со стороны топей на месте контакта формируются обширные болотные комплексы с плосковершинными омбротрофными сфагновыми кочками (островками) из *Sphagnum fuscum*, рассеянными среди низинных осоково-гипновых (*Carex rostrata*, *C. omskiana*, *Warnstorfia* spp., *Scorpidium scorpioides*, *Sphagnum teres*) топей. В результате в верхней части залежи формируется пласт комплексного торфа мощностью до 1–1.5 м, включающего остатки осок, очеретника, гипновых

и сфагновых мхов, который подстиляется типичными для низинных топей БВБ осоковыми и осоково-гипновыми торфами.

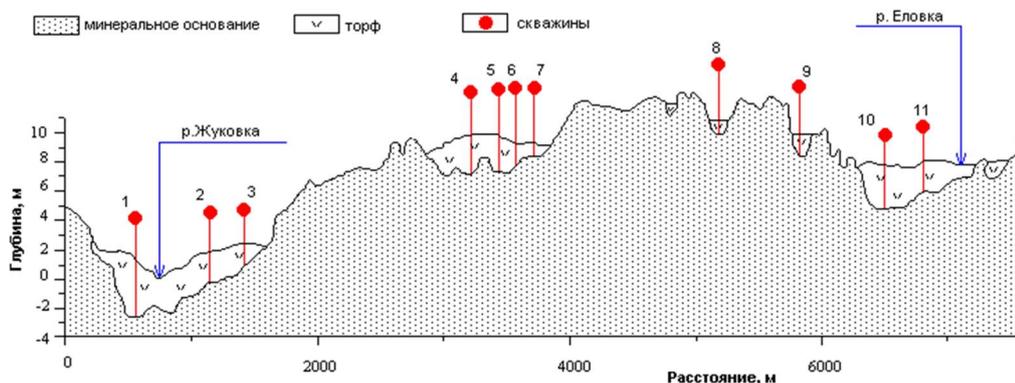
Торфяная залежь двухслойного строения развивается, как правило, с южной стороны выпуклых верховых массивов в зоне гидрологического влияния стекающих с них вниз по южному склону водораздела кислых олиготрофных вод. В этом случае низинная осоковая или травяно-осоково-гипновая залежь перекрывается пластом гомогенного переходного осоково-сфагнового, кустарничково-сфагнового или пушицево-осоково-сфагнового торфа из остатков *Betula nana*, *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum obtusum*, *S. fallax*, *S. angustifolium*. Сходный тип торфяной залежи выявлен в обширных мезотрофных топях, развивающихся в окружении выпуклых верховиков.

Над повышениями минерального ложа, долгое время оставшихся покрытыми автоморфными, а позднее заболоченными лесами, формируется лесотопяная торфяная залежь, нижняя часть которой сложена низинным древесным (согровым, березово-сосновым) или осоково-древесным торфом (см. рис. 2, II, V28, 30, 31; прил. 1, рис. 2, V28, 30). На границе олиготрофного рьяма с низинной топью такие участки непосредственно перекрываются сфагновым фускум торфом по мере расширения площади верховика.

Мезоолиготрофные водосборные топи («галыи») характерны в основном для северного склона БВБ и его северных отрогов и являются неотъемлемым элементом верховых водораздельных болот Среднего Приобья [Bronzov, 1930; Lapshina et al., 2000a, b]. В ландшафтной структуре южного макросклона БВБ в основании элементарных болотных водосборов, в которых начинается формирование истоков речной сети, развиваются слабозалесенные березой и сосной болотные ерники – сообщества с доминированием карликовой березки *Betula nana*. Низинная торфяная залежь на таких участках, как правило, не превышает 1,5 м и представлена чередованием осокового и древесно-осокового (кустарничково-осокового) видов торфа с высоким содержанием остатков хвоща, папоротника и тростника (см. прил. 1, рис. 2; V38).

#### Болота ложбин древнего стока

Болотные массивы различных типов залегания и водно-минерального питания были обследованы вдоль ландшафтно-экологического профиля, проложенного через локальный водораздел двух левых притоков р. Томи – рек Жуковка и Еловка, в пределах древней ложбины стока на Обь-Томском междуречье (рис. 3) [Bleuten, Lapshina, 2001].



**Рис. 3.** Распределение торфяных отложений на ландшафтно-экологическом профиле через долину древнего стока (86-й квартал, зона подтайги).

Болотные массивы (I–V) и номера торфяных колонок в пунктах бурения (1–11). I – Болото Жуковское: 1 – Zh0; 2 – Zh1; 3 – Zh2; II – болото Киргизное: 4 – Kir1; 5 – Kir2; 6 – Kir3; 7 – Kir4; III – болото Большое Еловочное: 10 – E2; 11 – E1; IV – болото Еловочное-1: 8 – E4; V – болото Еловочное-2: 9 – E3.

Генетическими центрами болота в долине р. Жуковки явились мелководные водоемы, о чем свидетельствуют озерные отложения мощностью 0,5–1 (1,5) м, залегающие в наиболее глубоких частях тальвега долины. По мере того как климат с наступлением бореального периода становился теплее и суше, большинство мелких водоемов стали мелеть и превращаться в болота. Сначала на их месте развивались рогозовые сообщества с вахтой, которые отложили нижний пласт торфа на глубине 7,3–8,0 м. Дальнейшее усыхание водоема привело к поселению гипновых мхов (*Drepanocladus*, *Warnstorfia* spp.) и обильному разрастанию вахты. Начиная с середины бореального

периода (8960±70), с глубины 7,3 м торфяная залежь имеет относительно монотонное строение и сложена закономерным чередованием вахтово-осоково-гипнового, гипнового и гипново-осокового видов торфа (см. прил. 2, рис. 2, Zh0).

Гипновые мхи, имея сходные экологические требования к условиям увлажнения местообитаний с осоками и другими болотными травами (вахтой, хвощом, папоротником), не выносят сколько-нибудь длительного затопления с поверхности. Отсюда можно предположить, что увеличение роли осок и вахты в составе растительных сообществ осоково-гипновых топей и их остатков в торфе в целом соответствовало влажным климатическим периодам, когда торфяник заливался полыми речными водами, либо водами, стекающими со склонов долины, сброс которых в речную сеть был затруднен. В сухие периоды постоянное и обильное питание напорными грунтовыми водами обеспечивало пышное развитие гипновых мхов, доля которых в торфе заметно возрастала, по сравнению с осоками и вахтой. В результате в течение длительного времени в конце атлантического – начале суббореального периода откладывался почти чистый гипновый торф (см. прил. 2, рис. 2, Zh0).

По периферии болотного массива и вдоль русла реки в условиях относительно хорошего дренажа развиваются темнохвойные и полидоминантные болотнотравно-кочкарноосоковые болота лесного облика – согры, отложившие пласты древесного торфа мощностью 1.5–4 м (см. прил. 1, рис. 3, Zh1). Ширина полосы прирусловых согр менялась в соответствии с изменениями увлажненности климата, вызывавших изменение условий дренажа. Это нашло отражение в чередовании древесных и топяных видов торфа в торфяной залежи. По окраине болотного массива торфяная залежь, формирующаяся под притеррасными сограми на всю глубину сложена древесным согровым торфом.

Болото «Большое Еловочное» полностью занимает сравнительно неглубоко врезанную долину р. Еловки. Торфонакопление началось здесь в конце атлантического периода в наиболее глубокой присклоновой части долины (рис. 3; см. прил. 1, рис. 3, E2, 5970±80) с отложения древесного согрового торфа. Трехметровая торфяная залежь отличается частым чередованием травяных из остатков вахты и хвоща, древесно-травяных и кочкарноосокового из остатков *Carex juncella* видов торфа, что отражает изменение экологических условий, связанных прежде всего с динамикой увлажненности климата, водностью реки и количеством влаги, поступающей со склонов долины на протяжении развития болотного массива. По направлению к реке и по мере улучшения условий дренирования торфяная залежь становится более однородной и почти на всю глубину сложена древесными видами торфа с тонкими слоями травяных торфов (рис. 3; см. прил. 2, рис. 2, E1).

Принципиально иной путь развития и иное строение торфяной залежи имеют болота в разнообразных по форме и размерам депрессиях за пределами речных долин.

В глубоких котловинах на высоких уровнях поверхности процесс заболачивания начался значительно позже, чем в тальвеге древней ложбины стока, унаследованной современной долиной р. Жуковки, а именно в конце атлантического периода (рис. 3; см. прил. 2, рис. 3, Kir1, 5943±100). Развитие болота «Киргизного» шло путем суходольного заболачивания и формирования осоково-тростниковых и осоково-травяных (*Thelypteris palustris*, *Menyanthes trifoliata*) сообществ с редким ярусом березы. Низинная стадия развития болотного массива характеризуется широким распространением открытых сфагново-тростниковых, осоково-тростниковых и осоково-сфагновых сообществ с участием в моховом ярусе *Sphagnum teres*, *S. obtusum*, *S. subsecundum*, и гипновых мхов из родов *Warnstorfia* и *Calliergon*.

По мере накопления торфа и заполнения им первичной котловины основная роль в питании болота переходит к мягким поверхностно-сточным водам. Непродолжительная переходная стадия в развитии болотного массива представлена мезотрофными шейхцериево-осоковыми, шейхцериево-осоково-сфагновыми растительными сообществами, отложившими одноименные виды торфа. Дальнейшее нарастание торфяной залежи привело к формированию выпуклой поверхности и переходу болота в стадию атмосферного (омбротрофного) питания. В результате верхние 2 м торфяной залежи «Киргизного» болота сложены олиготрофным пушицево-сфагновым (*Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum angustifolium*, *S. magellanicum*, *S. fuscum*) и чистым фукусум-торфом (см. прил. 2, рис. 3, Kir1; прил. 1, рис. 3, Kir3).

На склонах глубоких котловин и в различных менее глубоких депрессиях, питающихся поверхностно-сточными и бедными грунтовыми водами, процесс заболачивания начинается сразу с мезотрофной стадии (см. прил. 1, рис. 3, Kir2,4). Средняя мощность верховых сфагновых торфов в пределах ключевого участка составляет 1–1.5 м. Наиболее старый (древний) пласт верхового торфа в этом районе появился в субатлантическом периоде около 2 тыс. лет назад.

Таким образом, в пределах более или менее глубоко врезанных тальвегов древних ложбин стока, освоенных небольшими современными реками, в строении торфяных залежей болот абсолютно преобладают низинные осоково-гипновые и древесные (древесно-травяные) виды торфа. За пределами речных долин, в различного рода депрессиях локального водораздела, представлены виды торфа всех типов. Только торфяные залежи глубже 2.5 м имеют более или менее выраженный пласт эвтрофного низинного торфа, обычно мощностью не более 1–1.5 м. Торфяные залежи менее 2–2.5 м сложены на всю глубину только мезотрофными или мезотрофными и олиготрофными видами торфа.

#### *Пойменные болота Оби*

В пойме Оби на юге лесной зоны Западной Сибири развиваются болотные массивы двух типов местоположений: плоских межривных понижений центральной поймы и глубоких впадин притеррасья. Притеррасные торфяники характеризуются асимметричным строением. Их торфяное тело имеет наибольшую глубину под круто обрывающимся бортом террасы и вытянуто в сторону центральной поймы. Поверхность болота слегка выпуклая с едва заметным уклоном в сторону реки. Торфяники центральной поймы, полностью изолированные от террасных вод, имеют плоскую или слегка вогнутую поверхность, более симметричную форму тела и строение торфяной залежи [Lapshina, 1995a; Lapshina, 2004, 2006; Lapshina, Bleuten, 2000] (рис. 4).

Непосредственное влияние насыщенных аллювием полых вод наблюдается лишь на торфяниках центральной поймы, реже в узкой периферийной полосе притеррасных болот. Основная же часть болотных массивов насыщается влагой за счет грунтовых и поверхностно-сточных террасных вод, которые лишь подпруживаются в половодье речными водами [Schipper et al., 2007].

Основные черты строения пойменных болот обусловлены изменением свойств (химизма и динамики) водного потока, направленного от террасы к реке и дифференцирующего пойму на 5 зон водно-минерального питания [Lapshina, 1995a]:

I – зона ключевого питания, которая представляет собой узкую контактную полосу болота, наползающую вверх по склону террасы, с большим разнообразием растительных сообществ (тростниковых, тростниково-осоковых, березово-ивово-осоково-тростниковых, березово-гипновых);

II – зона напорно-грунтового питания притеррасной части расширенных сегментов поймы, характеризующаяся развитием открытых или слабозалесенных осоково-гипновых топей и веретьевых комплексов;

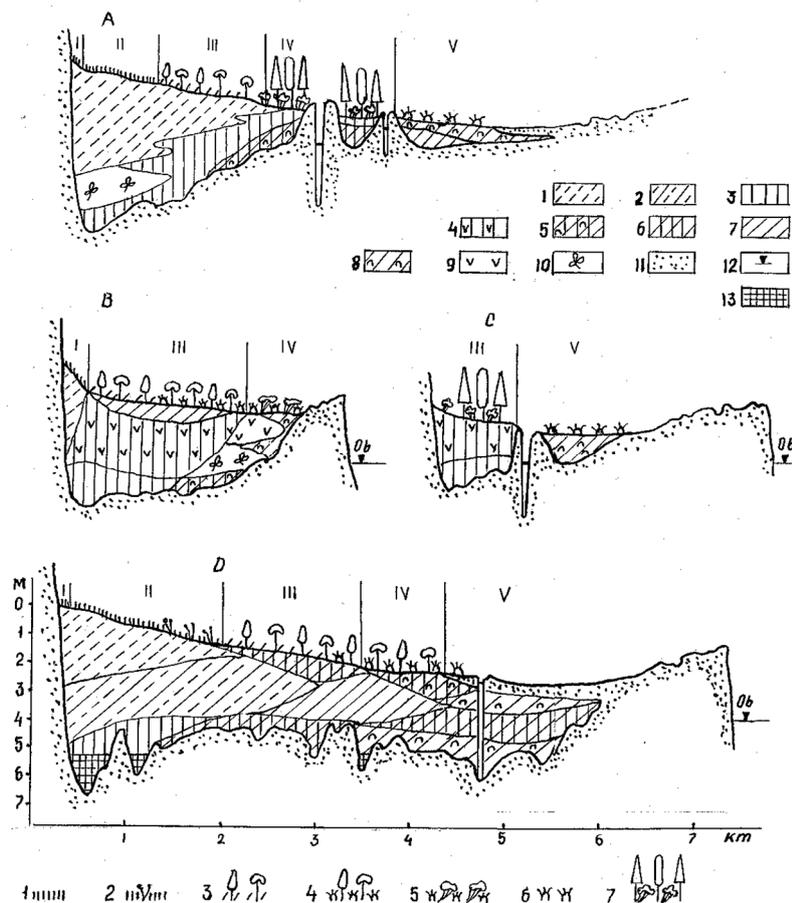
III – зона преимущественно грунтового питания центральной части торфяников, в которой широкое развитие получают древесно-болотнотравно-кочкарноосоковые сообщества;

IV – зона смешанного болотно-речного питания по периферии притеррасных болот, подвергающаяся более или менее регулярному воздействию полых вод при мощном влиянии влаги, стекающей с поверхности болотного массива, где развиты разнообразные древесно-кочкарноосоковые и ивово-березово-болотнотравные сообщества;

V – зона речного питания, в которой полностью располагаются отграниченные от террас протоками кочкарноосоковые и березово-ивово-кочкарноосоковые торфяники центральной поймы.

Первичные болотные массивы в пойме Оби возникли около 7.5(8) тыс. лет назад в конце маловодной эпохи первой половины атлантического периода, в наиболее удаленных от реки притеррасных понижениях расширенных сегментов поймы. Придонные пласты древесного, древесно-осокового или древесно-тростникового торфа лежат, как правило, непосредственно на озерных отложениях, содержащих остатки водных макрофитов (см. прил. 1; рис. 4, скв. 44, 14).

Это свидетельствует о том, что в условиях поймы болота возникают, как правило, не в ходе естественного зарастания или заполнения сплавиной старичных водоемов, как принято считать, а во время маловодных периодов, когда притеррасные понижения перестают заливаться полной водой и расположенные в них водоемы и их отложения пересыхают настолько, что на их месте непосредственно могут формироваться древесные сообщества. Лишь зарастание наиболее крупных пойменных озер, акватории которых сохранились на болотных массивах до настоящего времени, шло через тростниковую, вахтово-папоротниковую или гипновую стадии (см. прил. 1; рис. 4, скв.3).



**Рис. 4.** Стратиграфическое строение торфяных залежей пойменных болот р. Оби на юге лесной зоны Западной Сибири.

Сегменты поймы: А – Подобинский, В, С – Шегарский; D – Десятовский. Зоны водно-минерального питания: I – ключевого, II – напорно-грунтового, III – грунтового, IV – смешанного болотно-речного, V – речного питания. Виды торфа: 1 – гипновый, 2 – осоково-гипновый, 3 – древесный, 4 – древесно-травяной, 5 – древесно-дернистоосоковый, 6 – древесно-осоковый, 7 – осоковый, 8 – дернистоосоковый, 9 – травяной, 10 – вахтовый; 11 – грунт; 12 – уровень воды; 13 – сапрпель. Растительные сообщества: 1 – открытые и слабо залесенные гипновые топи и веретьевые комплексы; 2 – осоково-гипновые ерники из *Betula fruticosa*; 3–4 – древесно-болотнотравно-кочкарноосоковые согры (*Betulo fruticosae-Pinetum sylvestris*); 5 – ивово-болотнотравные сообщества; 6 – открытые и залесенные березой ивовые кочкарноосочники (*Carici juncellae-Salicetum rosmarinifoliae*); 7 – прирусловые согры (*Frangulo alni-Laricetum sibiricae, Betulo fruticosae-Pinetum sylvestris*).

К концу очередной маловодной эпохи на границе между атлантическим и суббореальным периодами (около 6–5.3 тыс. лет назад) болотные массивы на расширенных участках поймы составили примерно третью часть их современной площади. В этот период возникли болота на суженных участках поймы, где древесными или древесно-болотнотравными торфами были заполнены наиболее глубокие понижения (см. прил. 1, рис. 4, скв.14а). В условиях возрастающей влажности климата начала суббореального периода происходит дифференциация болотных массивов расширенных сегментов поймы на ландшафтные части в соответствии с зонами водно-минерального питания.

Около 4 тыс. лет назад отдельные притеррасные массивы пойменных сегментов достигают своих современных границ и сливаются в крупные болотные системы. В условиях уменьшения притока воды с террас и ограничением влияния полых вод реки широкое распространение получают древесные (согровые) и древесно-болотнотравно-кочкарноосоковые фации. Многочисленные очаги заболачивания возникают в понижениях центральной поймы. Однако в последующую, многоводную, эпоху (около 2–2.5 тыс. лет назад) все мелкозалежные торфяники того времени перекрываются речным аллювием. Лишь значительно позже, по мере повышения общего уровня поймы за счет роста торфяников притеррасной поймы и ежегодного отложения аллювиальных осадков в центральной и

прирусловой пойме, вновь создались условия, необходимые и достаточные для заболачивания центральных частей пойменных сегментов. Формирование современных торфяников здесь началось 1.9–1.5 тыс. лет назад в одну из очередных сухих эпох климатического ритма, о чем свидетельствуют и результаты радиоуглеродной датировки придонных слоев торфа (прил. 1, рис. 4, скв. 24).

В последнюю многоводную фазу обильное поступление почвенно-грунтовых вод с террас вызвало расширение площадей гипновых топей, а усиление аллювиального влияния со стороны реки способствовало продвижению далеко вглубь болотных массивов древесно-дернистоосоковых и дернистоосоковых фаций. В настоящее время наблюдается уменьшение водности болот, соответствующее очередной маловодной эпохе климатического ритма, что проявляется в заметном залесении некогда открытых осоково-гипновых топей и увеличении на их месте площадей ерников.

Таким образом, в процессе формирования аллювиальных отложений на локальных пониженных участках поймы регулярно создавались условия, благоприятные для развития болотного процесса и торфонакопления, но формированию торфяных болот препятствовал аллювиально-пойменный режим реки. Эти два процесса в известной мере являются антагонистичными. Торфонакопление реализуется только в тех частях поймы и только в те периоды ее развития, где и когда аллювиальный режим отсутствует или слабо выражен. Торфяные болота в пойме Оби возникли в один из маловодных периодов и в течение всего последующего времени нарастание торфяных отложений в притеррасье и накопление аллювиальных осадков в прирусловой и центральной частях протекали параллельно, составляя единый седиментационный процесс формирования поймы [Lapshina, 1995a, b].

### **Стратиграфия и история развития болот Южной тайги**

#### *Болота перигляциальных водораздельных равнин*

Стратиграфическое строение и основные этапы развития водораздельных болот южной тайги (перигляциальной зоны) Западной Сибири детально изучены нами на примере болота «Бакчарское», протянувшегося широкой полосой (10–25 км) почти 200 км по водоразделу рек Икса и Бакчар к северу от основной площади Большого Васюганского болота [Lapshina et al., 2000a, b].

Исходя из опубликованных данных абсолютного возраста наиболее древних органогенных отложений Западной Сибири, возраст водораздельного болота «Бакчарское» в его наиболее глубоких точках оценивался ранее в 8–9 тыс. лет [Neishtadt, 1977], на основании чего была рассчитана скорость латерального роста (площади) болота с момента его зарождения до настоящего времени.

Согласно нашим данным, абсолютный возраст водораздельных болот Восточного Васюганья фактически в два раза меньше, чем предполагалось ранее. Торфонакопление началось здесь в конце атлантического – начале суббореального периодов (5.2–4.8 тыс. лет назад). Возраст наиболее древних очагов заболачивания с мощностью торфяной залежи 3.6–3.8 (4) м оценивается нами в 5.5–6 тыс. лет, в то время как возраст отложений на большей части площади при мощности торфяного слоя 2.5–3 м не превышает 3.5–4 тыс. лет.

По данным спорово-пыльцевого анализа за весь период существования болот глобальных изменений в составе лесов не происходило, лишь несколько менялось соотношение темнохвойных и лиственных пород [Levina, 1980; Blyakharchuk, Klimanov, 1989; Blyakharchuk, 2000, 2012], отражающее восстановительную динамику лесов в ходе пирогенных (послепожарных) сукцессий. В то же время растительность болот и внешний облик болотных ландшафтов за этот период неоднократно изменялись коренным образом.

Значительные площади на плоских междуречных пространствах до начала болотообразования занимали осоково-разнотравные луга и редкостойные леса с влажно-луговой растительностью в условиях постоянного грунтового и периодически возникающего поверхностного увлажнения. В настоящее время такого рода ландшафты распространены вдоль границы лесной и лесостепной зон Западной Сибири [Dyukarev et al., 2000]. Первичными центрами заболачивания явились многочисленные мелкие депрессии, растительный покров которых был представлен папоротниковыми, осоково-папоротниковыми, осоково-тростниковыми открытыми и слабозалесенными березой и ивами, реже хвощевыми сообществами. Соответственно в нижней части торфяной залежи отлагались одноименные травяные виды торфа, в которых содержание древесных остатков, как правило, не превышает 5–15% (см. прил. 1, рис. 5, А, В).

После заполнения многочисленных первичных депрессий торфообразовательный процесс быстро охватил плоские водораздельные плато, где на полугидроморфных высокогумусированных луговых почвах начинают откладываться различные варианты осоково-травяных видов торфа (см.

прил. 1, рис. 5, С). Разрозненные первичные очаги заболачивания при этом сливаются в единый болотный массив. Процесс шел так быстро, что почвы не успевали претерпеть сколько-нибудь существенных изменений и уходили под торф в том виде и с тем запасом питательных веществ, который был накоплен в их профиле до начала заболачивания [Lyubimova, Simakova, 1977; Lvov, 1991]. В результате повсеместно под торфяной залежью вскрываются гумусированные пластичные глины. Богатство грунтов элементами минерального питания обеспечило развитие единообразных осоковых, болотнотравных, осоково-тростниковых сообществ на всей площади водораздельных болот.

Переломный момент в развитии водораздельных болот наступил при достижении болотными массивами краев водораздельного плато и выходе их на склоны междуречных пространств. К этому времени мощность низинной торфяной залежи составляла в среднем 1–1.2 м, а в генетических центрах первичных депрессий 1.5–1.8 м. Обеднение водно-минерального питания растений по мере накопления торфяной залежи и заметного увеличения роли атмосферных осадков в питании болот привело к резкой смене болотной растительности. В центральной части массива широкое распространение получили шейхцериево-осоковые, шейхцериево-осоково-сфагновые и осоково-пушицево-сфагновые сообщества (*Carex limosa*, *Scheuchzeria palustris*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum fallax*, *S. flexuosum*), отложившие пласт мезотрофных видов торфа мощностью 0,4–0,6 м (см. прил. 1, рис. 5, А 2.2–2.7 м; В 2.0–2.5 м).

С момента выхода болотного массива за пределы водораздельного плато значительно возрастает интенсивность заболачивания территории, и меняются его механизмы [Lvov, 1991]. Относительно свободный сток слабоминерализованных болотных вод по склону способствует развитию мезотрофного заболачивания темнохвойных и смешанных лесов. В результате по периферии широкое распространение получают мезотрофные древесно-кустарничково-осоковые и древесно-болотнотравно-сфагновые сообщества, отложившие придонные слои торфа в верхних частях склонов водоразделов (см. прил. 1, рис. 5, D 2.5–2.8 м).

На рубеже суббореального и субатлантического периодов, около 2.5–2.7 тыс. лет назад, водораздельные болота восточного Васюганья перешли в олиготрофную (омбротрофную) стадию развития. Начало этой стадии знаменуется распространением на большей части массивов обводненных сфагновых и пушицево-сфагновых топей (*Sphagnum magellanicum*, *S. papillosum*, *S. balticum*), в то время как на периферии широкое развитие получили олиготрофные сосново-сфагновые сообщества (*Pinus sylvestris*, *Sphagnum angustifolium*, *S. magellanicum*) (см. прил. 1, рис. 5, D 1.7–2.5 м). Соотношение площадей основных типов болотных ландшафтов на протяжении суббореального периода не оставалось постоянным. В сухие периоды лет, когда обводненность водораздельных болот уменьшалась, сосново-сфагновые сообщества с периферии далеко заходили к центру массивов, отлагая пушицево-сфагновый торф (см. прил. 1, рис. 5, В 1.2–2.0 м).

Около 1500–1000 лет назад в центральной части болотных массивов стали формироваться грядово-топяные, грядово-озерково-топяные, грядово-мочажинные комплексы современного облика. Гряды в них образованы фрагментами низкорослых сосново-кустарничково-сфагновых сообществ (*Pinus sylvestris* f. *litwinowii*, *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Sphagnum fuscum*), известных в Сибири под названием «рям». Растительный покров в обводненных топях образован мозаикой олиготрофных пушицево-сфагновых, осоково-шейхцериево-сфагновых и очеретниково-осоково-сфагновых растительных сообществ (*Carex limosa*, *Scheuchzeria palustris*, *Rhynchospora alba*, *Sphagnum balticum*, *S. majus*, *S. jensenii*, *S. papillosum*). Олиготрофные комплексы отлагают комплексный сфагновый торф. Общая мощность олиготрофных сфагновых торфов, перекрывающих пласт переходного торфа, достигает 1.5–2.0 м.

В последние 500–1000 лет рямы начинают играть более заметную роль в ландшафтной структуре болотных комплексов, развиваясь преимущественно на склонах и в виде отдельных островов по краю водораздельного плато. Они отлагают однородный слаборазложенный сфагновый торф из остатков *Sphagnum fuscum* (см. прил. 1, рис. 5, С 0–1.2 м).

В субатлантическом периоде окончательно формируется внутриболотная гидрографическая сеть путем развития обращенного рельефа поверхности заторфованных водоразделов, оформляется дренажная сеть склонов водораздельных пространств. Наиболее высокие минеральные гривы, дольше других сохранявшиеся среди болот островами леса, начинают испытывать подтопление. По мере роста торфяной залежи и поднятия уровня болотных вод происходит затопление грив. Здесь образуются застойные и транзитные мелкозалежные топи, известные в Сибири под названием «галья». По таким топям происходит сброс болотных вод с болотных массивов в речную сеть. Именно к ним примыкают истоки ручьев локальных водосборов. Растительный покров таких топей

представлен мезотрофными и мезоолиготрофными осоково-сфагновыми, реже хвощево-осоково-сфагновыми сообществами (*Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *C. limosa*, *Equisetum fluviatile*, *Sphagnum fallax*, *S. majus*, *S. obtusum*). Местами встречаются заросли рогоза (*Typha latifolia*), приуроченные к горизонтам воды внутри торфяной залежи. Торфяная залежь, как правило, не превышает 1–1.5 м и имеет простое стратиграфическое сложение (см. прил. 1, рис. 5, F). Здесь отлагаются сфагновые и осоково-сфагновые топяные виды торфа, сложенные остатками *Carex rostrata*, *C. limosa*, *Sphagnum fallax*, *S. obtusum*, реже *Equisetum fluviatile*, *Comarum palustre* и др.

Современное заболачивание протекает различным образом на разных участках краевой полосы в соответствии с рельефом поверхности склонов междуречных пространств, который предопределяет механизм заболачивания и в конечном итоге выражается в характере растительности и строении торфяной залежи. На контакте с низким минеральным берегом при растекании болотных вод по поверхности происходит эвтрофное заболачивание темнохвойных лесов и развитие лесных болот (согр), отлагающих низинный древесный торф высокой степени разложения.

Подтопление повышенных участков минерального берега происходит олиготрофными болотными водами, определяя развитие болотного процесса сразу по верховому типу. При этом на месте темнохвойных или смешанных лесов непосредственно развиваются олиготрофные сосново-кустарничково-сфагновые сообщества, отлагающие верховой пушицево-сфагновый торф (см. прил. 1, рис. 5, F). В результате периферийная полоса с мощностью торфа 1–2 м и зона современного заболачивания водораздельных болот отличается высокой пространственной неоднородностью типов торфяной залежи при их сравнительно простом стратиграфическом строении.

Таким образом, на юге лесной зоны Западной Сибири в области широкого распространения карбонатных покровных суглинков развитие болот шло путем эвтрофного суходольного заболачивания, предполагающего продолжительное развитие травянистых разнотравно-осоковых ландшафтов влажно-лугового типа. Возраст водораздельных болот, по данным радиоуглеродного датирования, оказался значительно меньше, чем предполагалось ранее. Первичные очаги торфонакопления, играющие заметную роль в ландшафте водоразделов, появились лишь в конце атлантического – начале суббореального периода 5200–4800 тыс. лет назад [Blyakharchuk, 2012]. До конца суббореала ландшафтная структура болотных массивов была слабо дифференцирована. С момента выхода водораздельных болот на склоны междуречных пространств происходит деление их на открытую центральную часть и залесенную периферию. В полосе заболачивания идет формирование разных типов торфяных залежей и болотных сообществ в соответствии с рельефом поверхности и различием условий водно-минерального питания. По мере роста торфяной залежи и увеличения площади болот наблюдается закономерное смещение границ ландшафтных выделов к окраинам.

#### *Строение и развития болот долин малых рек*

Характерные особенности стратиграфического строения торфяных болот долин малых рек в пределах Васюганской равнины изучены на примере болота «Семеновское», расположенного в 17 км к северу от с. Плотниково на левом берегу р. Иксы [Bleuten, Lapshina, 2001]. Стратиграфический профиль, проложенный поперек болотного массива от борта долины к реке, пересекает три плоских депрессии, ориентированных вдоль русла. Мощность торфяных отложений вдоль профиля варьирует от 1.3 до 5.5 м (рис. 5).

Процесс заболачивания начался в середине атлантического периода около 7.1–7.2 тыс. лет назад почти одновременно в двух наиболее глубоких ложбинах на месте обсыхающих мелководных водоемов. Однако всего через две тысячи лет (около 5 тыс. лет назад) болото заполнило поперечный профиль долины, достигнув своих современных размеров. Обширные открытые гипновые топи из *Meesia triquetra*, *Calliergon* spp., *Hamatocaulis vernicosus*, *Drepanocladus sendtneri* занимали всю центральную часть долины, начиная с самых первых этапов развития болотного массива. В условиях постоянства водно-минерального питания напорными грунтовыми водами они господствовали в течение длительного времени и отложили однородный пласт гипнового торфа мощностью 3–4 м.

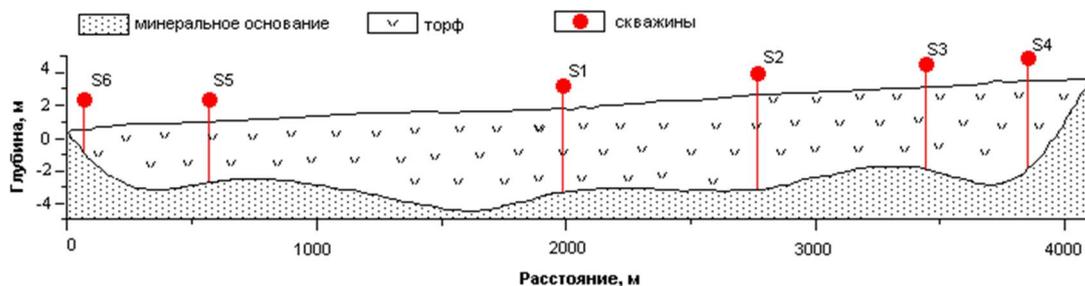


Рис. 5. Профиль торфяных отложений болота «Семеновское» в левобережной долине р. Иксы (МТ Бородинск, южная тайга).

В последние 1,5 –2 тыс. лет растительность открытых гипновых топей уступила место низинным осоково-сфагнуво-гипновым (*Carex lasiocarpa*, *C. diandra*, *Sphagnum warnstorffii*, *Tomentypnum nitens*, *Aulacomnium palustre*) сообществам, которые сменились в свою очередь кустарничково (*Betula nana*)-сфагнуво (*Sphagnum warnstorffii*)-осоковыми (*Carex lasiocarpa*), появившимися первоначально в наиболее удаленных от реки частях болотного массива (см. прил. 1, рис. 6, S1-S3). Позднее открытые осоково-гипновые топи начинают активно заселяться низкорослыми деревьями. В настоящее время более или менее залесенные березой и сосной кустарничково-осоково-сфагновые сообщества покрывают около половины площади распространения некогда открытых гипновых топей.

Стратиграфия торфяной залежи по краям болотного массива имеет сложное строение. Несмотря на сходный абсолютный возраст ( $5530 \pm 80$  и  $5640 \pm 50$ ), мощность торфяных отложений на разных концах профиля оказалась равной 1.3 и 5.1 м (см. прил. 1, рис. 7, S4, S6) вследствие резкой разницы в условиях торфонакопления. В условиях стабильного увлажнения грунтовыми водами в присклоновой части массива скорость накопления торфа была в 4 раза выше, чем на периферии болота, обращенной к реке, где вода, богатая кислородом, регулярно поступающая с тальми снеговыми и речными водами, способствовала активному разложению накапливающегося торфа. Кроме того, в сухие периоды лет обращенная к реке окраина болота могла обсыхать и подвергаться пожарам.

Нижняя часть торфяной залежи вблизи склона долины реки, формирование которой приходится на маловодный период климатического ритма, характеризуется чередованием древесного и травяного из остатков вахты и папоротника видами торфа, отражая неоднократные смены слабозалесенных болотнотравных и согровых сообществ лесного облика. Эти смены обусловлены изменением количества поступающих на болото грунтовых и поверхностно-сточных вод. В последующий многоводный период климатического ритма существенно расширяется площадь открытых и слабозалесенных топей и ерников, которые достигают борта долины реки, где удерживают свое господство до настоящего времени, отлагая осоково-гипновый и гипново-травяной виды торфа (см. прил. 1, рис. 6, S4).

Обращенная к реке периферийная часть болотного массива характеризуется преобладанием в торфяной залежи древесного согрового торфа в сочетании с многочисленными тонкими слоями травяных видов торфа из остатков хвоща, вахты и папоротника. Для выявления реальной стратиграфической структуры торфяной залежи и ее связи с палеоэкологическими (палеоклиматическими) условиями в этой части массива необходимо увеличение частоты отбора образцов торфа для его анализа до 2–5 см (см. прил. 1, рис. 6, S6).

### Стратиграфия и история развития болот средней тайги

Детальное изучение стратиграфии и истории развития торфяных отложений в подзоне средней тайги проводилось на крупном болотном массиве атмосферного питания, репрезентативном для подзоны средней тайги. Болотный массив, известный под названием «болото Савкино», находится в 5 км к юго-востоку от г. Нижневартовска и расположено на правобережных террасах р. Вах вблизи ее впадения в р. Обь. Болото возникло около 10 тыс. лет назад путем заторфовывания изолированных депрессий в ложбинах (тальвегах) стока древнеледниковых вод, но уже около 7 тыс. лет назад оно представляло собой единый массив атмосферного типа питания с цепочкой минеральных островов на месте наиболее высокой гривы (древнего берегового вала) [Lapshina, Pologiva, 2011].

В настоящее время около 75% площади болотного массива занимают крупные грядово-мочажинные и грядово-мочажинно-озерковые олиготрофные комплексы. Заметно меньшую площадь

(около 15–20%) на естественно дренированных выпуклых участках занимают сосново-кустарничково-сфагновые сообщества – рямы. Около 5–10% площади приходится на открытые осоково-сфагновые и кустарничково-осоково-сфагновые периферийные топи, развивающиеся в полосе современного заболачивания по окраине болота и вокруг минеральных островов.

Детальное радиоуглеродное датирование торфяной залежи обследованного болотного массива свидетельствует, что накопление торфа здесь началось между 10.3 и 9.2 тыс. лет назад. При этом было установлено, что спустя всего около двух тысяч лет после начала торфонакопления в генетических центрах болото почти достигло своих современных размеров. Только узкие краевые части болотного массива покрылись торфом в течение последних 1000–1500 лет (рис. 6; прил. 1, рис. 7).

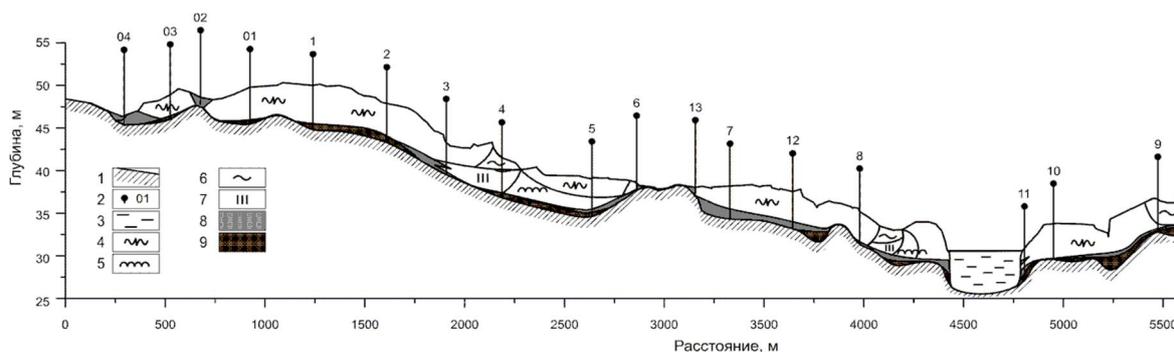


Рис. 6. Стратиграфический разрез болотного массива «Савкино» в правобережной части долины р. Вах в окрестностях г. Нижневартовск (подзона средней тайги).

Условные обозначения: 1 – минеральное ложе, 2 – точки отбора торфяных колонок и их номера, 3 – озеро; 4–9 – виды торфа: 4 – фускум-торф, 5 – верховой сфагновый, 6 – верховой мочажинный, 7 – верховой и переходный шейхцериевый, 8 – пушицевый, 9 – низинный травяной и древесно-травяной.

В пределах основной площади болотного массива глубина торфяной залежи варьирует в среднем от 3.5 до 4.5 м. Максимальной мощностью торфа, в основном глубиной 4.0–5 м, характеризуется торфяная залежь в генетических центрах. Глубина торфа на склоновых позициях, где накопление торфа началось в среднем на 1–1.5 тыс. лет позже, отличается незначительно, составляя 3,6–3,8 м. Минимальная глубина торфа отмечена на периферии, где она составляет 0,6–1,2 м.

Торфяная залежь в генетических центрах (см. прил. 1, рис. 7, NV2, 74(12)) практически на всю глубину сложена верховым сфагновым торфом слабой (0–5%) до умеренной (10–25%) степени разложения. В верхней части залежь сложена из остатков *Sphagnum fuscum*, в нижней – чередованием слоев сфагнового *Sphagnum fuscum*- и *S. angustifolium*-торфа при большей или меньшей примеси пушицы (*Eriophorum vaginatum*). Придонный горизонт толщиной 20–60 см сложен хорошо разложившимся древесно-травяным и травяным торфом из остатков ели, березы, хвоща и папоротника. Степень разложения этого слоя достигает 60–65%. Переходный горизонт между низинным и верховым (омбротрофным) слоями торфа в генетических центрах болота обычно не превышает 10–20 см, редко 50 см. Этот слой представлен, как правило, переходным пушицевым торфом. Отложения торфа в склоновых местоположениях (см. прил. 1, рис. 7, NV7, 8), примыкающих к генетическим центрам, имеют возраст 7.3–8 тыс. лет. Здесь торфонакопление началось непосредственно с отложения переходного, обычно пушицевого торфа, мощность которого достигает 50–60 см. Верхняя часть торфяной залежи сложена омбротрофным сфагновым торфом, как и в генетических центрах.

Периферийные части болота имеют возраст от 2300 до 1000 лет. Торфяная залежь периферийных топей, развитых вдоль границ болотного массива, целиком сложена переходными (пушицевым, пушицево-сфагновым, сфагновым) видами торфа (прил. 1, рис. 7, NV04). В транзитных топях, окружающих минеральные острова, – переходными и верховыми видами торфа (NV51(6), NV61(13)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор основных типов стратиграфического строения и истории развития торфяных отложений в разных подзонах и ландшафтно-геоморфологических позициях южной части Западно-Сибирской равнины позволяет сделать следующие выводы.

Начало заболачивания территории Западной Сибири, как отмечают многие авторы, относится к древнему голоцену [Tyuremnov, 1957; Neyshtadt, 1977; Khotinsky, 1977, etc.]. Принято считать, что формирование собственно торфяных отложений началось лишь в бореальный период. Торфяники более древнего возраста единичны, причем слои с абсолютным радиоуглеродным (некалиброванным) возрастом более 9 тыс. лет относятся большей частью не к торфяным, а к озерным (сапропелевидным) отложениям или древним почвенным образованиям гидроморфного ряда. Современные данные о возрасте торфяных отложений Западной Сибири, полученные при датировке небольших образцов с использованием ускорителей, нередко оказываются более древними 10.5-11(12) тыс. лет назад [Pitkänen et al., 2002]. Наиболее древние торфяные отложения на левобережье Енисея в окр. д. Зотино [Schulze et al., 2015] и на левобережных террасах Иртыша в его нижнем течении (болото Мухрино, неопубликованные данные) имеют возраст 11-12 тыс. лет по данным радиологической лаборатории Макс Планк Института в Йене, Германия.

Наиболее древние первичные очаги болотообразовательного процесса раннебореального возраста в пределах водораздельных пространств и долинах рек приурочены к остаткам древней гидрографической сети и наиболее глубоким тальвегам ложбин древнего стока.

Формирование первичных очагов торфонакопления в конце предбореального в первой половине бореального периодов началось практически одновременно в пределах таежной зоны и современного гипоарктического пояса Западной Сибири. Значительно позже торфообразование началось на крайнем севере и юге равнины. Возраст полигонально-валиковых болот арктической зоны, по-видимому, не превышает 3–3,5 тыс. лет [Novikov et al., 1999]. В лесостепи наиболее древние островные «рямы» датируются началом суббореала, а займища – началом субатлантического периода [Liss, Berezina, 1978].

В эволюции болот таежной зоны выделяются две основные модели хода развития торфяных болот в зависимости от центров их зарождения [Lapshina, 2004]. Первые, зарождаясь в разнообразных депрессиях внепойменных типов поверхностей (междуречных пространств, речных террас, ложбин древнего стока), рано или поздно выходят из-под влияния грунтовых и поверхностно-сточных вод и переходят в автономную стадию развития, становясь независимыми от сопредельных ландшафтов. Условия водно-минерального питания и динамика их развития на этой стадии связаны исключительно с динамикой поступления влаги и аэрозолей из атмосферы.

Вторая модель характерна для болот, занимающих на протяжении всей истории их развития геохимически подчиненные положения рельефа (поймы рек, днища логов, основания склонов). Отличительной чертой их развития является абсолютное преобладание смен, вызванных внешними по отношению к болотному массиву причинами. Влияние внешней среды на болота этой группы выражается, главным образом, в изменении притока поступающих на болото вод. Этот приток складывается из нескольких составляющих, но зависит в конечном итоге от количества выпадающих осадков, за счет которых формируется почвенно-грунтовый и речной сток.

История развития пойменных болот тесно связана с динамикой общей увлажненности климата целого региона и изменениями водности реки за весь период их существования. В процессе формирования аллювиальных отложений на локальных пониженных участках поймы регулярно создавались условия, благоприятные для развития болотного процесса и торфонакопления, но формированию торфяных болот препятствовал аллювиально-пойменный режим реки. Эти два процесса являются антагонистичными, и торфонакопление реализуется только в тех частях поймы и только в те периоды ее развития, где и когда аллювиальный режим отсутствует или слабо выражен. Торфяные болота в поймах крупных рек возникли в один из маловодных периодов на ранних стадиях их развития. В течение всего последующего времени нарастание торфяных отложений в притеррасье и накопление аллювиальных осадков в прирусловой и центральной частях поймы протекали параллельно, составляя единый седиментационный процесс ее формирования.

На большей части территории юга лесной зоны Западной Сибири в области широкого распространения карбонатных покровных суглинков развитие болот водораздельного залегания шло путем эвтрофного суходольного заболачивания. Массовые очаги торфонакопления появились здесь в конце атлантического – начале суббореального периода. До конца суббореала ландшафтная структура болотных массивов была слабо дифференцирована. Лишь с момента выхода

водораздельных болот на склоны междуречных пространств происходит их деление на открытую центральную часть и залесенную периферию.

На относительно бедных грунтах центральной части Западной Сибири в пределах средней тайги (болото Савкино, Салымо-Юганская система, Зотино, Мухрино) первые очаги заболачивания, приуроченные к тальвегам древней гидрографической сети, появились 10-11(12) тыс. лет назад [Pitkänen et al., 2002; Schulze et al., 2015]. Здесь уже в конце бореального периода большинство болот водораздельных пространств и речных террас перешло в олиготрофную стадию развития питания атмосферными водами.

Детальное изучение стратиграфии торфяных отложений Западной Сибири показывает, что климат на протяжении всего голоцена оказывал существенное влияние на развитие всех типов болот, но степень и форма связи не одинакова. Наблюдается определенная асинхронность возникновения и некоторых моментов развития пойменных болот и болот более высоких уровней поверхностей; если первые возникают во время маловодных эпох, то возникновение и развитие вторых связаны с максимумами климатической увлажненности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проводилось в рамках международных проектов INTAS под руководством профессора Владимира Блойтена (Утрехтский университет, Нидерланды) и российских грантов РФФИ. Обобщение и публикация материалов стали возможны в рамках реализации и при поддержке Важнейшего Инновационного Проекта Государственного Значения (ВИП ГЗ) (Registration number:: 123030300031-6). Мы очень благодарны Татьяне Бляхарчук за ее помощь в переводе текста на английский.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Arkhipov S.A., Astakhov V.I., Volkov I.A., Panychev V.A. 1980. *Paleogeography of the West Siberian Plain at the Maximum of the Late Zyryansk Glaciation*. Nauka, Novosibirsk, 110 pp. (in Russian). [Архипов С.А., Астахов В.И., Волков И.А., Панычев В.А. 1980. Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднезырянского оледенения. Новосибирск: Наука. 110 с.].

Bazanov V.A. 1980. Peatlands of the Ket' river basin. In: *New data about the nature of Siberia*. Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta, Tomsk, pp. 96-103 (in Russian). [Базанов В.А. 1980. Болота бассейна р. Кети // Новые данные о природе Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, С. 96-103].

Baryshnikov M.K. 1929. Sedge-brown moss fens of Western Vasyugan area. In: *Bulletin of the Institute of the meadow and peatland culture*, 2: 1-38 (in Russian). [Барышников М.К. 1929. Осоково-гипновые болота Западного Васюганья // Бюл. Ин-та лугов и болотной культуры. № 2. С. 1-38].

Berezina N.A., Liss O.L. 1983. On the evolution of mires and their development in the central part of the West Siberian Plain. In: *Natural conditions of Western Siberia*, pp. 137-147. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscow (In Russian). [Березина Н.А., Лисс О.Л. 1983. Об эволюции болот и их развитии в центральной части Западно-Сибирской равнины // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Мос. ун-та, С. 137-147].

Bleuten W., Lapshina E.D. (eds.). 2001. Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht University, 172 pp.

Blyakharchuk T.A., Klimanov V.A. 1989. Successions of mire vegetation and climate according to the study of two peat bogs in the south of Western Siberia. In: *Structure and development of wetland ecosystems and reconstruction of paleogeographic conditions*, Abstracts of the X<sup>th</sup> All-Union Seminar-Excursion, pp. 45-49, Tallinn (in Russian). [Бляхарчук Т.А., Климанов В.А. 1969. Сукцессии болотной растительности и климат по данным исследования двух торфяников на юге Западной Сибири // Структура и развитие болотных экосистем и реконструкций палеогеографических условий. Таллин. С. 45-49].

Blyakharchuk T.A. 2000. The history of vegetation in the southeast of Western Siberia in the Holocene according to botanical and spore-pollen analysis of peat. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 5: 659-668 (in Russian). [Бляхарчук Т.А. 2000. История растительности юго-востока Западной Сибири в голоцене по данным ботанического и спорово-пыльцевого анализа торфа // Сибирский экологический журнал. № 5. С. 659-668].

Blyakharchuk T.A., Amel'chenko V.P. 2012. Dynamics of the range of the genus *Artemisia* in the territory of Western Siberia and adjacent territories in the Holocene according to pollen analysis data in connection with climate change. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2: 185-196 (in Russian). [Бляхарчук Т.А., Амельченко В.П. 2012. Динамика ареала рода полыней на территории Западной Сибири и прилегающих территорий в голоцене по данным пыльцевого анализа в связи с изменением климата // Сибирский экологический журнал. № 2. С. 185-196].

Blyakharchuk T.A., Kur'ina I.V., Pologova N.N. 2019. Late Holocene dynamics of vegetation cover and climate humidity in the southeastern sector of the West Siberian Plain according to palynological and rhizopod studies of peat deposits. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 45:164-189 (in Russian). [Бляхарчук Т.А., Курьина И.В., Пологова Н.Н. 2019. Позднеголоценовая динамика растительного покрова и увлажненности климата юго-восточного сектора Западно-

- Сибирской равнины по данным палинологического и ризоподного исследования торфяных отложений // Вестник Том. гос. ун-та. Биология. № 45. С. 164-189].
- Blyakharchuk T.A., Chernova N.A. 2013. Vegetation and climate in the Western Sayan Mts according to pollen data from Lugovoe Mire as a background for prehistoric cultural change in southern Middle Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 75: 22-42.
- Bogdanovskaya-Guihéneuf I.D. 1945. Principles of genetic classification of peat. *Uchebnye zapiski Leningradskogo Universiteta. Seriya biologicheskie nauki*, 45(15): 5-16 (in Russian). [Богдановская-Гиенэф И.Д. 1945. Принципы генетической классификации торфов // Уч. зап. Ленингр. ун-та. Сер. биол. наук. № 45. Вып. 15. С. 5-16].
- Bronzov A.Ya. 1930. Raised bogs of the Narym Territory (basin of the Vasyugan River). *Trudy nauchno-issledovatel'skogo torfyanogo instituta*, 3: 1-100 (in Russian). [Бронзов А.Я. 1930. Верховые болота Нарымского края (бассейн р. Васюган) // Тр. науч.-иссл. торф. ин-та. Вып. 3. 100 с.].
- Bronzov A.Ya. 1936. Brown moss fens on the southern outskirts of the West Siberian lowland taiga. *Pochvovedenie*, 2: 224-245 (in Russian). [Бронзов А.Я. 1936. Гипновые болота на южной окраине Западно-Сибирской равнинной тайги // Почвоведение. № 2. С. 224-245].
- Glebov F.Z., Toleyko L.S., Starikov E.V., Zhidovlenko V.A. 1974. Palynological features and <sup>14</sup>C dating of a peat bog in the Aleksandrovsky district of the Tomsk Province (Middle taiga zone). In: *Mire types of the USSR and principles their classification*, (T.A. Abramova, M.S. Boch, E.A. Galkina, eds.), pp. 194-200, Nauka, Leningrad (in Russian). [Глебов Ф.З., Толейко Л.С., Стариков Э.В., Жидовленко В.А. 1974. Палинологическая характеристика и датирование по <sup>14</sup>C торфяника в Александровском районе Томской области (среднетаежная подзона) // Типы болот СССР и принципы их классификации / Под ред. Т.А. Абрамовой, М.С. Боч, Е.А. Галкиной. Л.: Наука, С. 194-200].
- Dyukarev A.G., Pologova N.N., Mul'diyarov E.Ya. 2000. Meadow soil formation in the Subtaiga of Western Siberia. *Pochvovedenie*, 9: 1064-1069 (in Russian). [Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Мульдьяров Е.Я. 2000. Луговое почвообразование в подтайге Западной Сибири // Почвоведение. № 9. С. 1064-1069].
- Dyukarev E.A. 2003. Software for plotting distribution of plant residues and peat types by depth. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Siberian Meeting on Climatic-Ecological Monitoring*, p. 171, TNC SB RAS, Tomsk (in Russian). [Дюкарев Е.А. 2003. Программа для построения диаграмм распределения растительных остатков и типов торфа по глубине // Пятое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Материалы совещания. Томск: Изд-во ТНЦ СО РАН. с.171].
- Erkova Yu.V. 1957. Peat types. In: *Peat deposits of Western Siberia*, Sovetskaya nauka, Moscow. pp. 45-70 (in Russian). [Еркова Ю.В. 1957. Виды торфа // Торфяные месторождения Западной Сибири. М.: Советская наука. С. 45-70].
- Il'ina I.S., Lapshina E.I., Lavrenko N.N. 1985. *Rastitelnyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny*. Nauka, Novosibirsk, 251 pp. (In Russian). [Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н. 1985. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука. 251 с.].
- Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Liss O.L., Novikov S.M., Inishev N.G. 2003. *Vasyugan Bog, nature conditions, structure and functioning*. TsNTI, Tomsk, 212 pp. (in Russian). [Инишева Л.И., Земцов А.А., Лисс О.Л., Новиков С.М., Инишев Н.Г. 2003. Васюганское болото: природные условия, структура и функционирование. Томск: ЦНТИ. 212 с.].
- Khotinskii N.A. 1977. *Holocene of Northern Eurasia*. Nauka, Moscow, 200 pp. (in Russian). [Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 198 с.].
- Khotinsky N.A., Devirts A.L., Markova N.I. 1970. The age and history of the bog formation in the eastern outskirts of Vasyugan region. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody*, 75(5): 82-91 (in Russian). [Хотинский Н.А., Девирц А.Л., Маркова Н.Г. 1970. Возраст и история формирования болот Восточной окраины Васюганья. Бюлл. Моск. о-ва исп. природы, отд. биол. Т. 75. Вып. 5. С. 82-91].
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Pyavchenko N.I. 1978. *Dynamics of organic matter in the process of peat accumulation process*. Nauka, Leningrad, 172 pp. (in Russian). [Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. 1978. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 172 с.].
- Kozlovskaya L.S. 1984. Features of decomposition of plant residues in peat. In: *Theoretical foundations of forestry on reclaimed lands of Karelia*, pp. 5-18, USSR Academy of Sciences Karelian branch, Petrozavodsk (in Russian). [Козловская Л.С. 1984. Особенности разложения растительных остатков в торфе // Теоретические основы ведения лесного хозяйства на мелиорированных землях Карелии. Петрозаводск: Карельский фил. ин-та леса АН СССР. С. 5-18].
- Kurkin K.A. 1976. *Systematic studies of grassland dynamics*. Nauka, Moscow, 284 pp. (in Russian). [Куркин К.А. 1976. Системные исследования динамики лугов. М.: Наука. 284 с.].
- Lapshina E.D. 1985. Types of peat and the structure of peat deposits of floodplain swamps of the Ob in the south of the Tomsk Province. In: *Geology and properties of peat and sapropel deposits*, Izdatel'stvo Kalininskogo Universiteta, Kalinin, 49-61 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1985. Виды торфа и строение торфяной залежи пойменных болот р. Оби на юге Томской области // Геология и свойства торфяных и сапропелевых месторождений. Калинин: Изд-во Калин. гос. ун-та. С. 49-61].
- Lapshina E.D. 1987. *The structure and dynamics of the floodplain mires of the Ob River (in the south of the Tomsk Province)*. Abstract dis. cand. biol. sciences. Tomsk, 18 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1987. Структура и динамика болот поймы реки Оби (на юге Томской области): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск. 18 с.].
- Lapshina E.D. 1995a. The main features of the structure and development of floodplain mires. In: *Memory reading of Yu.A. L'vov*, Tomsk. pp. 52-56 (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1995а. Основные черты строения и развития пойменных болот // Чтения памяти Ю.А. Львова. Томск: НИИББ при Том. ун-те. С. 52-56].
- Lapshina E.D. 1995b. On the ecological assessment of the current state and history of the development of river floodplain. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal*, 2(4): 297-304 (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1995b. К экологической оценке современного состояния и истории развития речных пойм // Сиб. экол. журн. Т. 2. № 4. С. 297-304].
- Lapshina E.D., Bleuten W. 2000. Plant communities of peatlands in the Ob River flood plain in the southern forest zone of Western Siberia. Sustaining our Peatlands. *Proceedings of the 11th International Peat Congress*, 1: 47-49.
- Lapshina E.D., Pologova N.N., Mul'diyarov E.Ya. 2000a. Mires of watershed plains in the south of the forest zone of Western Siberia. *Krylovia*, 2(1): 38-43 (in Russian). [Лапшина Е.Д., Пологова Н.Н., Мульдьяров Е.Я. 2000а. Болота водораздельных равнин юга лесной зоны Западной Сибири // Krylovia. Т. 2. № 1. С. 38-43].

Lapshina, E.D., Pologova, N.N., Mul'diyarov, E.Ya., Golyshev, S.A., Glagolev, M.V. 2000b. Watershed peatlands in south taiga zone of West Siberia. In: *Proceeding of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999*, pp. 121-128, Tsukuba.

Lapshina E.D., Mul'diyarov E.Ya. 2002. The main stages in the development of the Great Vasyugan mire. In: *Great Vasyugan Bog. Current status and evolution processes*, (V.N. Kabanov, ed.), pp. 36-44, Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk (in Russian). [Лапшина Е.Д., Мульдьяров Е.Я. 2002. Основные этапы развития Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН С. 36-44].

Lapshina E.D. 2004. *Peatlands of the southeast of Western Siberia (botanical diversity, history of development and dynamics of carbon accumulation in the Holocene)*: Diss. ... dr. biol. Sciences. Tomsk. 436 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 2004. Болота юго-востока Западной Сибири (ботаническое разнообразие, история развития и динамика накопления углерода в голоцене): Дисс. ... д-ра биол. наук. Томск. 436 с.].

Lapshina E.D. 2006. Die Vegetation der Moore in der Obaue im Süden der Waldzone Westsibiriens. *Phytocoenologia*, 36(3): 421-463.

Lapshina E.D., Pologova N.N. 2011. Spatial dynamics of peat growth and carbon accumulation in Sphagnum bogs (Boreal West Siberia). In: *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present*, (S.E.Vomperskiy, ed.), Proceedings of the Third International Field Symposium, pp. 96-98, Novosibirsk.

Levina T.P. 1980. Vegetation development in the lower reaches of the Yenisei and the middle Ob in the Holocene. In: *Palinology of Siberia*, pp. 128-141, Nauka, Moscow (in Russian). [Левина Т.П. 1980. Развитие растительности в низовьях Енисея и средней Оби в голоцене // Палинология в Сибири. М.: Наука, С. 128-141].

Liss O.L., Berezina N.A., Kulikova G.G. 1976. Peatlands' age in the central part of the West Siberian Plain. In: *Natural conditions of Western Siberia. Issue 6*, pp. 69-85. Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, Moscow (in Russian). [Лисс О.Л., Березина Н.А., Куликова Г.Г. 1976. Возраст болот центральной части Западно-Сибирской равнины // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. Вып. 6. С. 69-86].

Liss O.L., Berezina N.A. 1978. The age of bogs and the intensity of peat accumulation in the central part of the West Siberian Plain. In: *Genesis and dynamics of bogs. Issue 2*, pp. 12-19. Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, Moscow (in Russian). [Лисс О.Л., Березина Н.А. 1978. Возраст и интенсивность торфонакопления в центральной части Западно-Сибирской равнины // Генезис и динамика болот. М.: Изд-во Моск. ун-та. Вып. 2. С. 12-19].

Liss O.L., Polkoshnikova O.V. 1979. Origin and development of Surgut Poles'e bogs. *Doklady vysshey shkoly. Biologicheskie nauki*, 8: 86-91 (in Russian). [Лисс О.Л., Полкошникова О.В. 1979. Происхождение и развитие болот Сургутского Полесья // Докл. высш. школы. Биол. науки. № 8. С.86-91].

Liss O.L., Berezina N.A. 1981. *Mires of the West Siberian plain*. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscow, 204 pp. (in Russian). [Лисс О.Л., Березина Н.А. 1981. Болота Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. 204 с.].

Liss O.L., Trofimov V.T., Kashperuk V.I., Kudryashov V.G. 1988. The development trend of the paludification process. In: *Forecast of changes in the natural conditions of Western Siberia*, pp. 5-20, Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscow (in Russian). [Лисс О.Л., Трофимов В.Т., Кашперук П.И., Кудряшов В.Г. 1988. Тенденции развития болотообразовательного процесса // Прогноз изменений природных условий Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 5-20].

Liss O.L. 1992. Patterns of development of bog systems in Western Siberia. In: *Peatlands in the taiga ecosystem*, pp. 45-57, Institute of Geography of the SB of the USSR Academy of Sciences. Irkutsk (in Russian). [Лисс О.Л. 1992. Закономерности развития болотных систем Западной Сибири // Болота в экосистеме тайги. Иркутск: Институт географии СО АН СССР. С. 45-57].

Liss O.L. 1998. Spatial and temporal patterns of the development of mire systems in the Holocene (on the example of Western Siberia). In: *Ekologiya i pochvy, vol. 2*, pp. 21-34. Pushchino (in Russian). [Лисс О.Л. 1998. Пространственно-временные закономерности развития болотных систем в голоцене (на примере Западной Сибири) // Экология и почвы. Пушкино. Т. 2. С.21-34.].

Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. 2001. *Bog systems of Western Siberia and their nature conservation value*, (V.B. Kuvaev, ed.), Grif i K°, Tula, 584 pp. (in Russian). [Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. 2001. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К°. 584 с.].

Loginov P.E. 1957. On the work of the West Siberian peat exploration expedition. In: *Study of the peat fund. Issue 2*, pp. 15-31 (in Russian). [Логинов П.Е. 1957. О работах западносибирской торфоразведочной экспедиции // Изучение торфяного фонда. М. Вып. 2. С. 15-31].

Loginov P.E. 1958. Exploration of peat deposits in the areas of the West Siberian Lowland. In: *Study of the peat fund. Issue 3*, pp. 10-21 (in Russian). [Логинов П.Е. 1958. Разведка торфяных месторождений в районах Западно-Сибирской низменности // Изучение торфяного фонда. М., Вып. 3. С. 10-21].

Loginov N.E., Khoroshev P.I. 1972. *Peat resources of the West Siberian Plain*. Geol'tor'frazvedka, Leningrad, 147 pp. (in Russian). [Логинов П.Е., Хорошев П.И. 1972. Торфяные ресурсы Западно-Сибирской равнины. М.: Геолторфразведка, 147 с.].

Lvov Yu.A. 1974. Methodical materials for the typology and classification of the Tomsk Province mires. In: *Mire types of the USSR and principles their classification*, pp. 188-194, Nauka, Leningrad (in Russian). [Львов Ю.А. 1974. Методические материалы к типологии и классификации болот Томской области // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 188-194.].

Lvov Yu.A., Mul'diyarov E.Ya. 1974. The mire types in the Orlovka River basin. In: *Comprehensive assessment of mires and swampy forests in connection with their reclamation*, pp. 5-17, Nauka, Novosibirsk (in Russian). [Львов Ю.А., Мульдьяров Е.Я. 1974. Типы болот бассейна реки Орловки // Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией. Новосибирск: Наука, С. 5-17].

Lvov Yu.A. 1976. The feature and mechanisms of paludification of the Tomsk Province area In: *Theory and practice of forest mire science and hydroforestry*, pp. 36-44, Krasnoyarsk (in Russian). [Львов Ю.А. 1976. Характер и механизмы

- заболочивания территории Томской области // Теория и практика лесного болотоведения и гидроресомелиорации. Красноярск, С. 36-45].
- Lvov Yu.A. 1977. Peat bog as a system of bog facies. *Doklady vysshey shkoly. Biologicheskije nauki*, 9: 97-103 (in Russian). [Львов Ю.А. 1977. Торфяное болото как система болотных фаций // Докл. высш. школы. Биол. науки. № 9. С. 97-102.].
- Lvov Yu.A. 1991. Peatland resources In: *Natural resources of the Tomsk Province*, pp. 67-83, Nauka, Novosibirsk (in Russian). [Львов Ю.А. Болотные ресурсы // Природные ресурсы Томской области. Новосибирск: Наука, 1991. С. 67-83].
- Lvov Yu.A., Mul'diyarov E.Ya. 1984. Ecological features of peat types. In: *Materials of the VII All-Union Conference on mire science*, pp. 82-90, Izdatel'stvo Kalininskogo Universiteta, Kalinin (in Russian). [Львов Ю.А., Мульдьяров Е.Я. 1984. Экологическая характеристика видов торфа // Материалы VII Всесоюз. совещ. по болотоведению. Калинин: Калин. гос. ун-та. С. 82-90.].
- Lvov Yu.A. 1979. Paludification as a factor of human inhabitancy in Western Siberia. In: *Features of the natural-geographical environment and historical processes in Western Siberia*, pp. 12-18, Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta, Tomsk (in Russian). [Львов Ю.А. 1979. Болотный процесс как фактор среды обитания человека в Западной Сибири // Особенности естественно-географической среды и исторические процессы в Западной Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 12-18.].
- Lyubimova E.L., Simakova L.A. 1977. Modern forests paludification. In: *Scientific prerequisites for the mire development of Western Siberia*, pp. 137-148, Nauka, Moscow (in Russian). [Любимова Е.Л., Симакова Л.А. 1977. Современное заболочивание лесов // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. М.: Наука. С. 137-148].
- Mul'diyarov E.Ya. 1980. Floodplain mires of Chulym River and questions of their rational use. In: *Problems of nature conservation in Western Siberia*, pp. 38-50, Tomsk (in Russian). [Мульдьяров Е.Я. 1980. пойменные болота реки Чулым и вопросы их рационального использования // Проблемы охраны природы Западной Сибири. Томск. С. 38-50].
- Mul'diyarov E.Ya. 1989. *Mires of the southeast of the Tomsk Province*. Abstract dis. cand. biol. sciences, Tomsk, 17 pp. (in Russian). [Мульдьяров Е.Я. 1989. Болота юго-востока Томской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск. 17 с.].
- Neyshtadt M.I. 1957. *Forest History and paleogeography of the USSR in the Holocene*. Izdatel'stvo AN SSSR, Moscow, 403 pp. (in Russian). [Нейштадт М.И. 1957. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: Изд-во АН СССР. 403 с.].
- Neyshtadt M.I. 1977. The emergence and rate of development of the paludification process. In: *Scientific prerequisites for the development of the mires of Western Siberia*, pp. 39-47, Nauka, Moscow (in Russian). [Нейштадт М.И. 1977. Возникновение и скорость развития процесса заболочивания // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. М.: Наука. С.39-47].
- Novikov S.M., Usova L.I., Malyasova E.S. 1999. Age and dynamics of bogs in Western Siberia. In: *Bogs and swampy forests in the light of the challenges of sustainable nature management*, pp. 72-76, GEOS, Moscow (in Russian). [Новиков С.М., Усова Л.И., Малеясова Е.С. 1999. Возраст и динамика болот Западной Сибири // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М.: ГЕОС. С. 72-76].
- Pitkänen A., Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K. 2002. Holocene vegetation history from the Salym-Yugan Mire Area, West Siberia. *The Holocene*, 12(3): 353-362.
- Predtechenskiy A.V., Skobeeva E.I. 1974. Geomorphological confinement of various types of mires in the central part of Western Siberia and the use of aerial methods for their study In: *Mire types of the USSR and principles their classification*, pp. 181-188, Nauka, Leningrad (in Russian). [Предтеченский А.В., Скобеева Е.И. 1974. Геоморфологическая приуроченность различных типов болот центральной части Западной Сибири и применение аэрометодов для их изучения // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука, С. 181-188].
- P'yavchenko N.I. 1984. Environmental factors of peat formation. In: *Materials of the VII All-Union Conference on mire science*, pp. 3-11, Izdatel'stvo Kalininskogo Universiteta, Kalinin (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1984. Экологические факторы торфообразования // Материалы VII Всесоюз. совещ. по болотоведению. Калинин: Изд-во Калин. гос. ун-та. С. 3-11].
- P'yavchenko N.I. 1985a. *Peat bogs, their natural and economic importance*. Nauka, Moscow, 152 pp. (in Russian). [Пьявченко Н.И. Торфяные болота их природное и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.].
- P'yavchenko N.I. 1985b. On the age of peat bogs and vegetation changes in the south of Western Siberia in the Holocene. *Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary*, 52: 164-170 (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1985b. О возрасте торфяников и сменах растительности на юге Западной Сибири в голоцене // Бюл. Комис. по изуч. четвертич. периода. № 52. С. 164-170].
- Ramenskiy L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. 1956. *Ecological assessment of fodder land units by vegetation cover*, Selkhozgiz, Moscow, 472 pp. (in Russian). [Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. 1956. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Селихозгиз, 472 с.].
- Romanova E.A. 1964. Types of mire microlandscapes as indicators of peat types in the upper layers of peat deposits of minerotrophic fens. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*, 112: 54-81 (in Russian). [Романова Е.А. 1964. Типы болотных микроландшафтов как показатели видов торфа в верхних слоях торфяной залежи низинных болот // Тр. гос. гидрол. ин-та. Вып. 112. С. 54-81].
- Romanova E.A. 1967. Landscape-morphological characteristics of mires in the Konda River basin. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*, 145: 27-51 (in Russian). [Романова Е.А. Ландшафтно-морфологическая характеристика болот в бассейне р. Конды // Тр. гос. гидрол. ин-та. 1967. Вып. 145. С. 27-51].
- Romanova E.A., Usova L.I. 1969. Geobotanical and brief hydrological characteristics of bog's landscapes of the watershed of the Vakh and Vatikinskii Egan Rivers in Western Siberia. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*, 157: 98-122 (in Russian). [Романова Е.А., Усова Л.И. 1969. Геоботаническая и краткая гидрологическая характеристика болотных ландшафтов водораздела рек Вах и Ватинский Еган Западной Сибири // Тр. гос. гидрол. ин-та. Вып. 157. С. 98-122].
- Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen, M.J. 2007. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 193: 131-145. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9253-x>
- Stuiver M., Reimer P.J. 1993. Extended <sup>14</sup>C data base and revised CALIB 3.0 <sup>14</sup>C age calibration program. *Radiocarbon*, 35(1): 215-230. <https://doi.org/10.1017/S0033822200013904>
- Tsyganov A.N., Zarov E.A., Mazei Y.A., Kulkov M.G., Babeshko K.V., Yushkovets S.Y., Payne R.J., Ratcliffe J.L., Fatyugina Yu., Zazovskaya E.P., Lapshina E.D. 2021. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene. *Ambio*, 50: 1896-1909. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01545-7>

Tyuremnov S.N., Liss O.L., Kulikova G.G. 1971. Peat deposits of the left bank of the Ob region in the northern part of the Tomsk Province. In: *Natural conditions of Western Siberia*. Issue 1, pp. 65-76. Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, Moscow (in Russian). [Тюремнов С.Н., Лисс О.Л., Куликова Г.Г. 1971. Торфяные отложения левобережного Приобья северной части Томской области // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Мос. ун-та. Вып. 1. С. 65-76].

Tyuremnov S.N. 1976. *Peat deposits*. Nedra, Moscow, 488 pp. (in Russian). [Тюремнов С.Н. 1976. Торфяные месторождения. М.: Недра, 487 с.].

Shnitnikov A.V. 1957. Variability of the total humidity of the continents of the Northern Hemisphere. *Zapiski geograficheskogo obshchestva SSSR*. New series, Vol. 16, 337 pp. (in Russian). [Шнитников А.В. 1957. Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария // Зап. геогр. об-ва СССР. Нов. сер. Т. 16. 337 с.].

Shnitnikov A.V. 1973. Centuries-old rhythm of development of the landscape shell. In: *Chronology of the Pleistocene and climatic stratigraphy*, 7-33, Leningrad (in Russian). [Шнитников А.В. 1973. Многовековой ритм развития ландшафтной оболочки // Хронология плейстоцена и климатическая стратиграфия. Л. С. 7-33].

Vleeschouwer F. de, Chambers F.M., Swindles G.T. 2010. Coring and sub-sampling of peatlands for paleoenvironmental research // *Mires and peat*, 7.

Volkova V.S., Levina T.P. 1982. Vegetation of the Holocene of Western Siberia according to palynological data. In: *Development of the nature of the territory of the USSR in the Late Pleistocene and Holocene*, pp. 186-192, Nauka, Moscow (in Russian). [Волкова В.С., Левина Т.П. 1982. Растительность голоцена Западной Сибири по палинологическим данным // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука. С. 186-192].

Volkova V.S. 1999. West Siberia. Late Glacial and Holocene. In: *Climate and environment changes during the last 65 Million Years (Cenozoic: from Paleocene to Holocene)*, (A.A. Velichko, ed.), pp. 105-109, GELIOS, Moscow (in Russian). [Волкова В.С. 1999. Западная Сибирь. Позднеледниковье и голоцен // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет. М.: ГЕОС, С. 105-109].

Yasnopol'skaya G.G. 1964. Experience in the use of geobotanical methods in the exploration of peat bogs in Siberia. *Trudy Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody*, 8: 102-107 (in Russian). [Яснопольская Г.Г. 1964. Опыт использования геоботанических методов в разведке торфяных болот Сибири // Тр. МОИП. Т.8. С.102-107].

Yasnopol'skaya G.G. 1965. On the characteristics of vegetation and peat deposits of the Vasyugan Bog. *Uchenye zapiski Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 51: 49-63 (in Russian). [Яснопольская Г.Г. 1965. К характеристике растительности и торфяной залежи Васюганского болота // Учен. зап. Том. гос. ун-та. Сер. биол. и почвовед. Томск, № 51. С. 49-63].

*Поступила в редакцию: 15.05.23*  
*Переработанный вариант: 28.06.23*

LAYERED PEAT MACROFOSSIL IN THE STRATIGRAPHIC CORES OF THE PEATLANDS

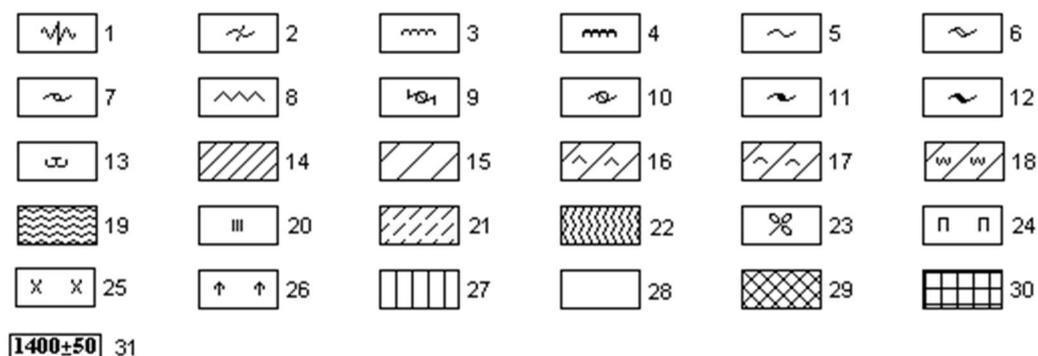


Figure 1. Legend of the plant remains in the peat:

*Sphagnum* mosses: 1 – *Sphagnum fuscum*, 2 – *S. angustifolium*, 3 – *S. magellanicum*, 4 – *S. papillosum*, 5 – *S. balticum*, 6 – *S. majus*, 7 – *S. jensenii*, 8 – *S. lindbergii*, 9 – *S. flexuosum*, 10 – *S. fallax*, 11 – *S. obtusum*, 12 – mesotrophic *sphagnum* mosses (*S. centrale*, *S. warnstorffii*), 13 – *S. teres*.

Sedges: 14 – low sedges (*Carex limosa*), 15 – high sedges (*Carex lasiocarpa*, *S. rostrata*), 16 – *Carex omskiana*, 17 – tussock sedges (*C. cespitosa*); 18 – *Carex juncella*; 19 – cotton-grass (*Eriophorum vaginatum*), 20 – *Scheuchzeria palustris*; 21 – brown mosses (*Drepanocladus*, *Homatocaulis*, *Warnstorfia*, *Calliargon*, *Meesia*).

Grasses: 22 – reed (*Phragmites australis*), 23 – bog bean (*Menyanthes trifoliata*), 24 – fern (*Thelypteris palustris*), 25 – horsetail (*Equisetum fluviatile*); 26 – shrubs (*Betula nana*, *Ledum*, *Chamaedaphne*), 27 – wood, 28 – undefined remains, 29 – gytija (*Typha*), 30 – lake sediments, 31 – calibrated carbon dates.

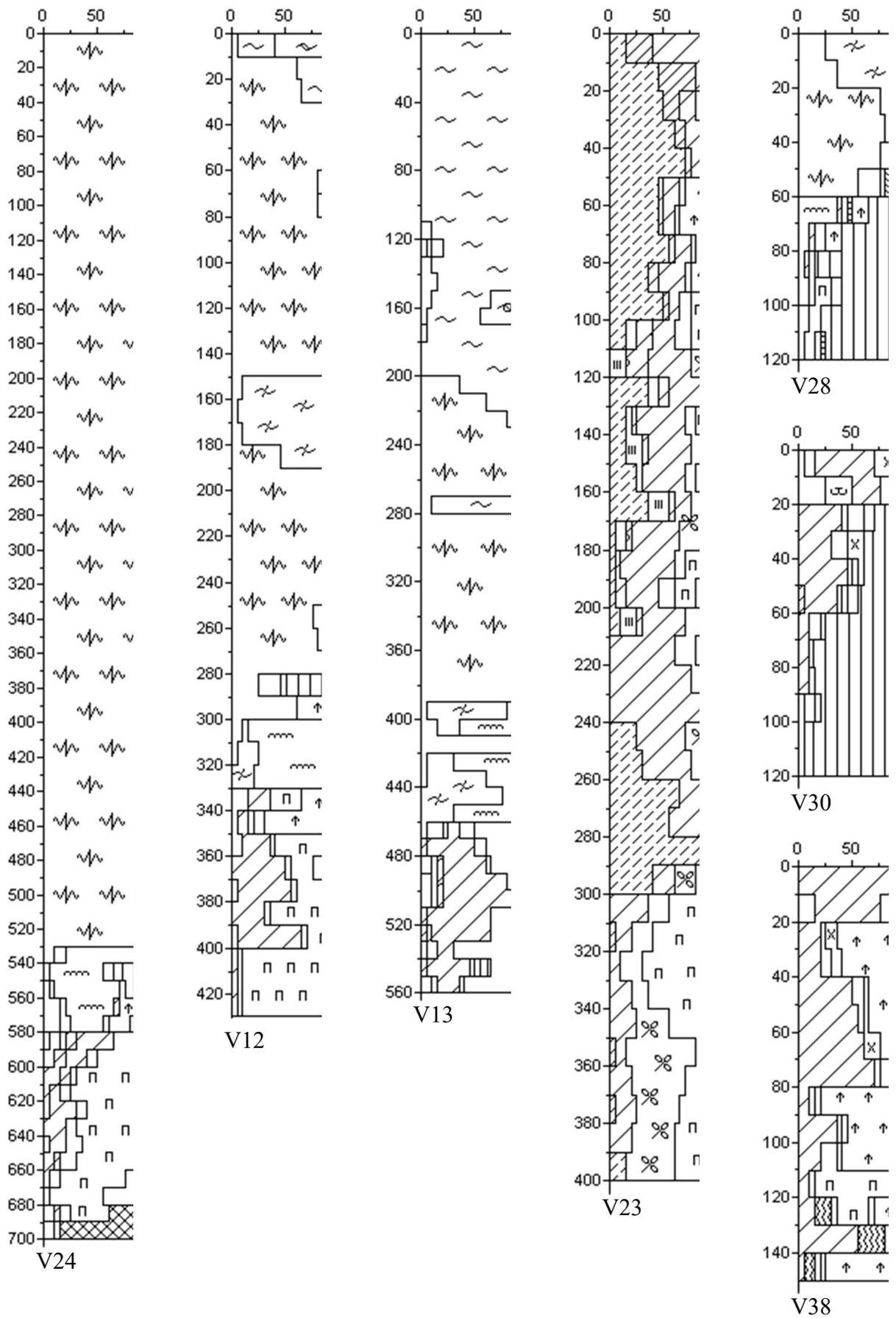


Figure 2. Peat core of the Great Vasyugan Mire ('Uzas', 'Malaya Icha', Subtaiga zone)

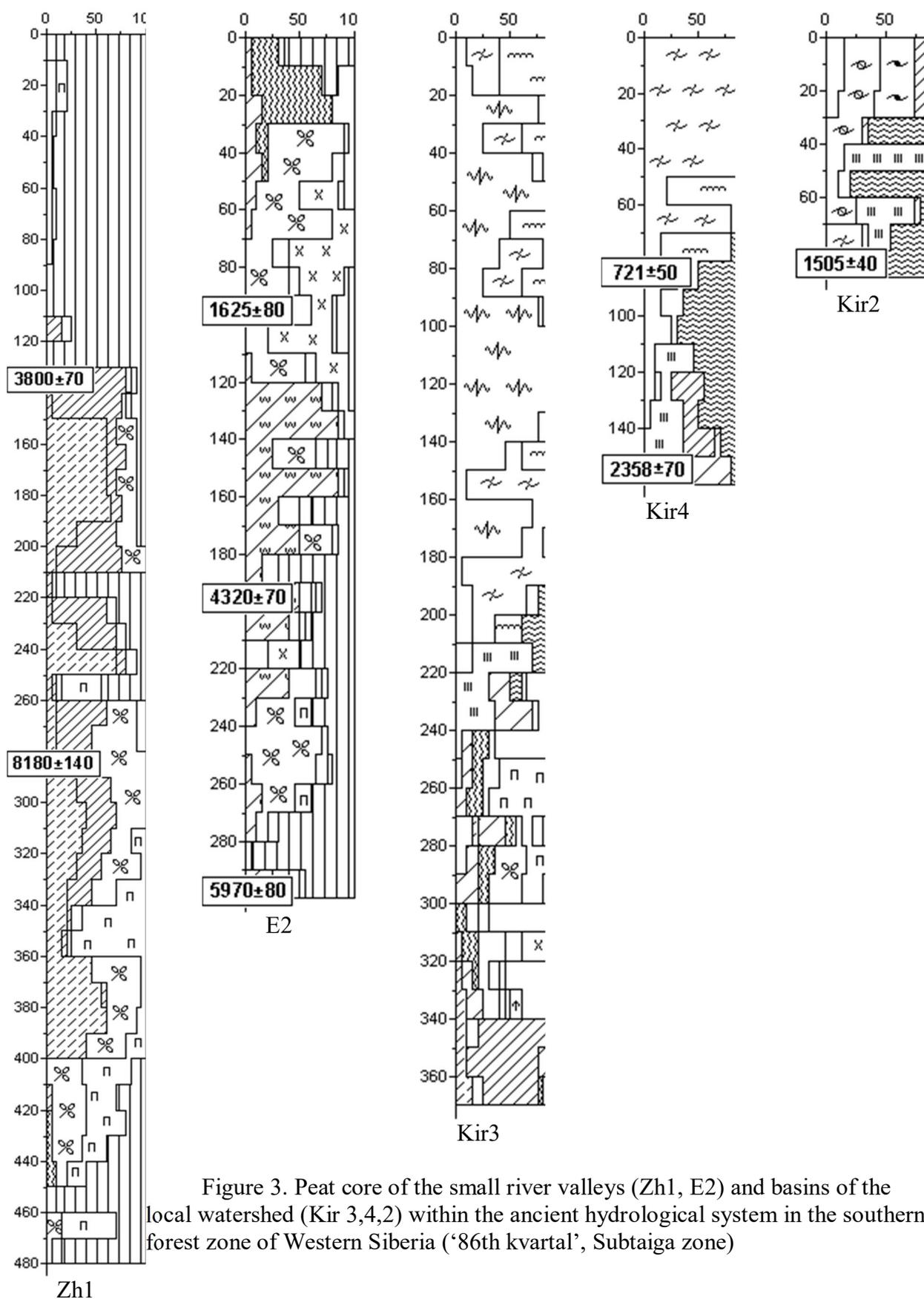


Figure 3. Peat core of the small river valleys (Zh1, E2) and basins of the local watershed (Kir 3,4,2) within the ancient hydrological system in the southern forest zone of Western Siberia ('86th kvartal', Subtaiga zone)

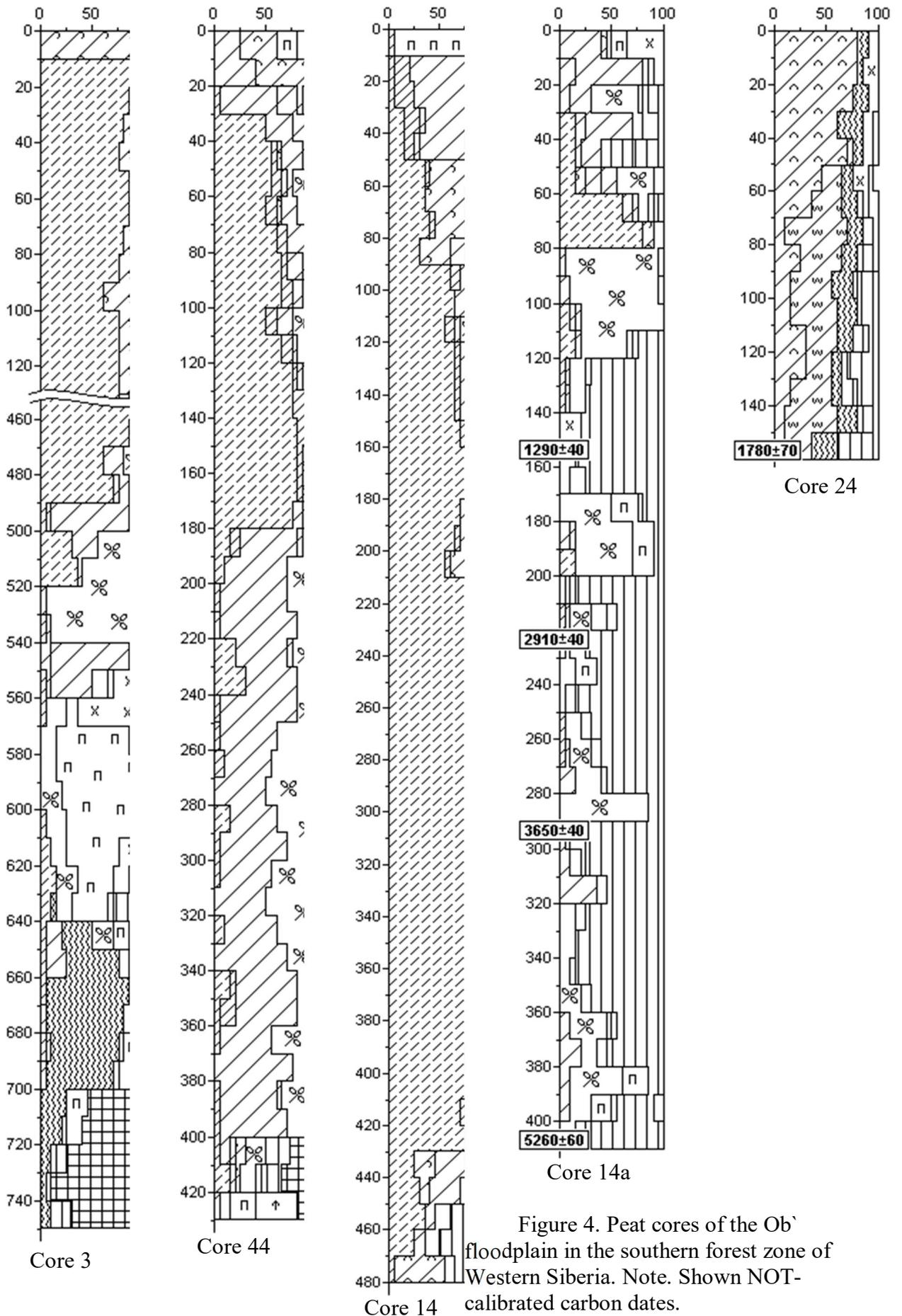


Figure 4. Peat cores of the Ob' floodplain in the southern forest zone of Western Siberia. Note. Shown NOT-calibrated carbon dates.

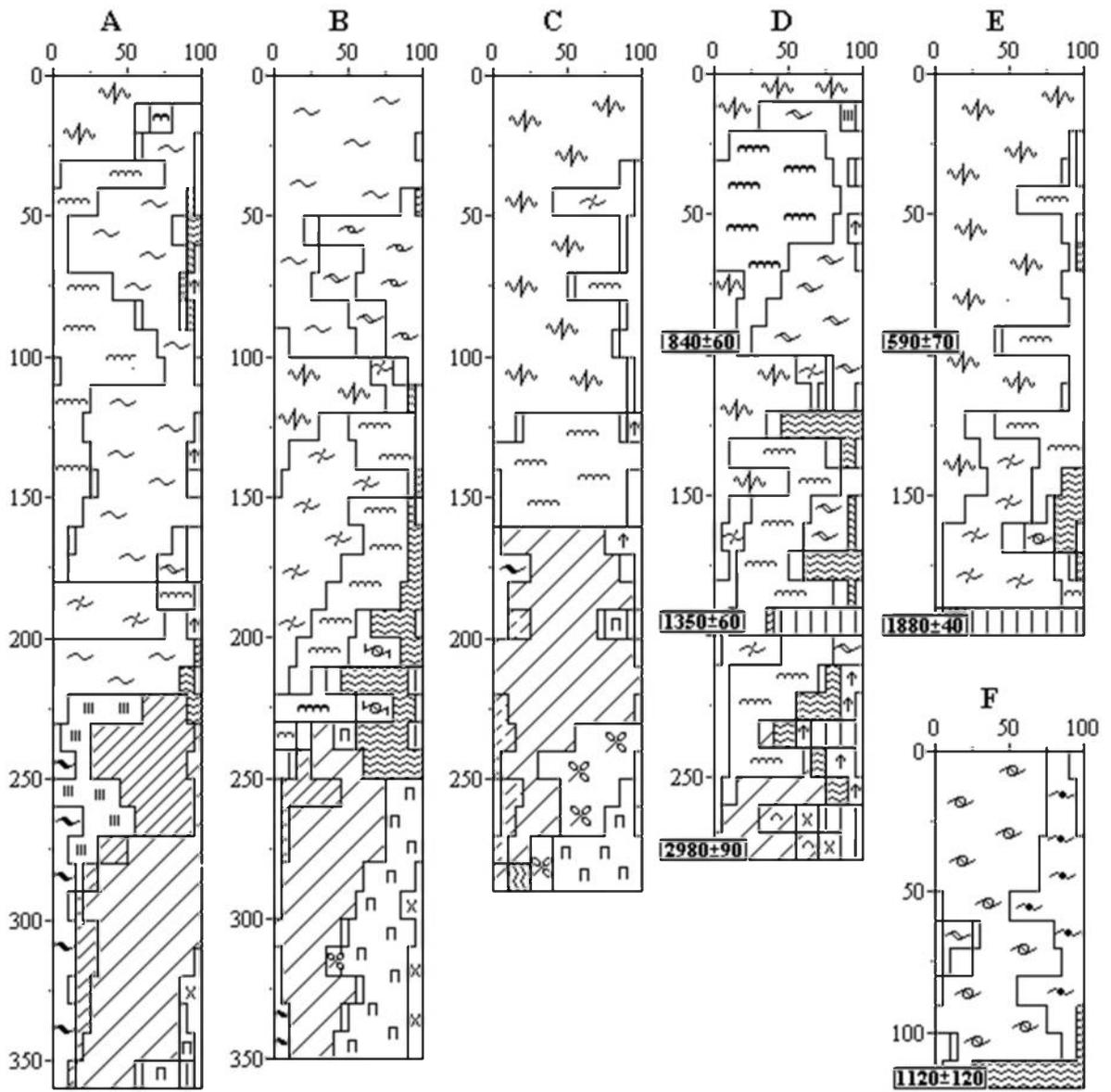


Figure 5. Peat cores of the watershed bog "Bakcharskoe" (Plotnikovo, Borodinsk, South taiga zone)

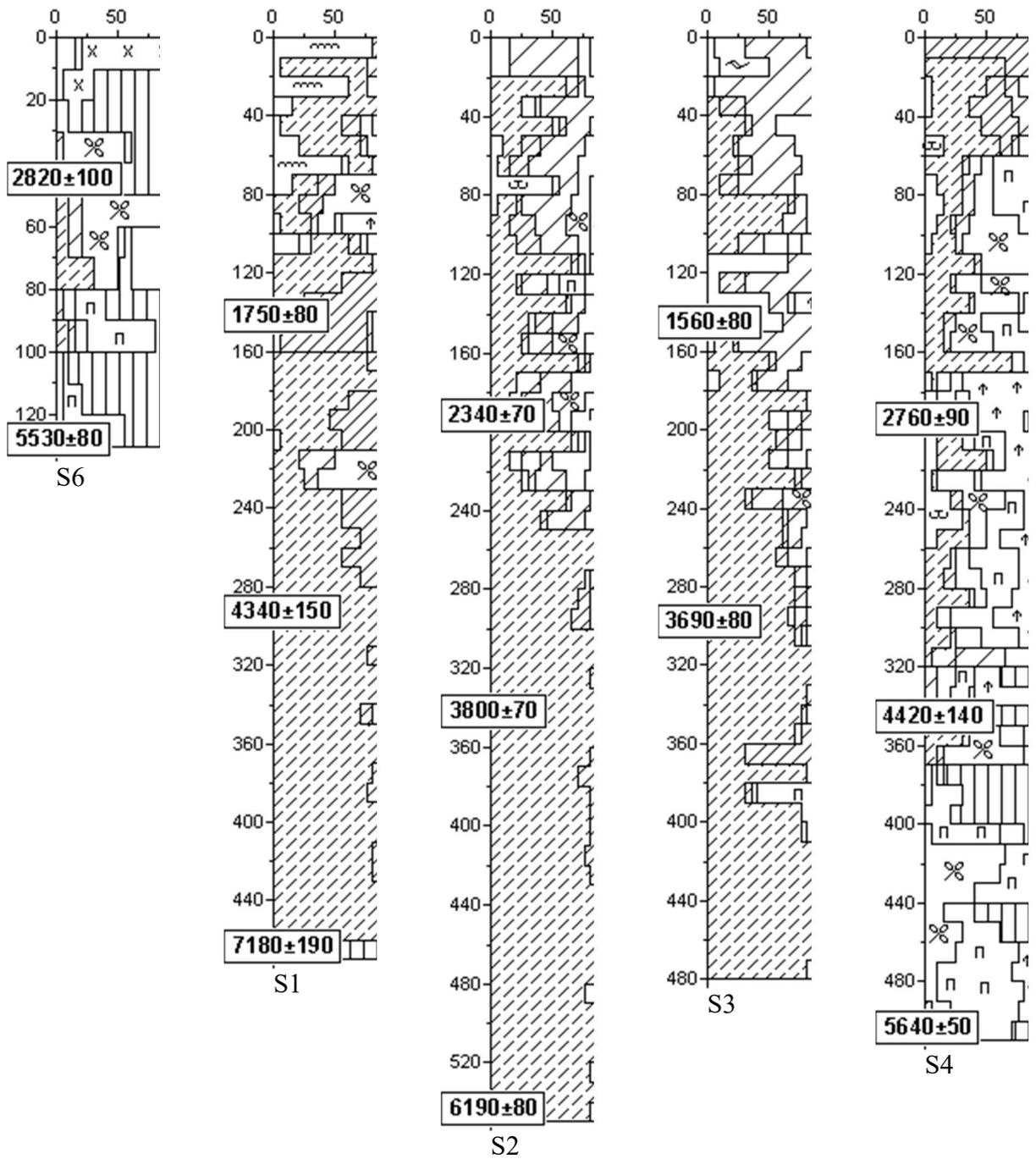


Figure 6. Peat cores of the “Semenovskoe” bog in the left-bank valley Ikksa river (Borodinsk, South taiga zone)

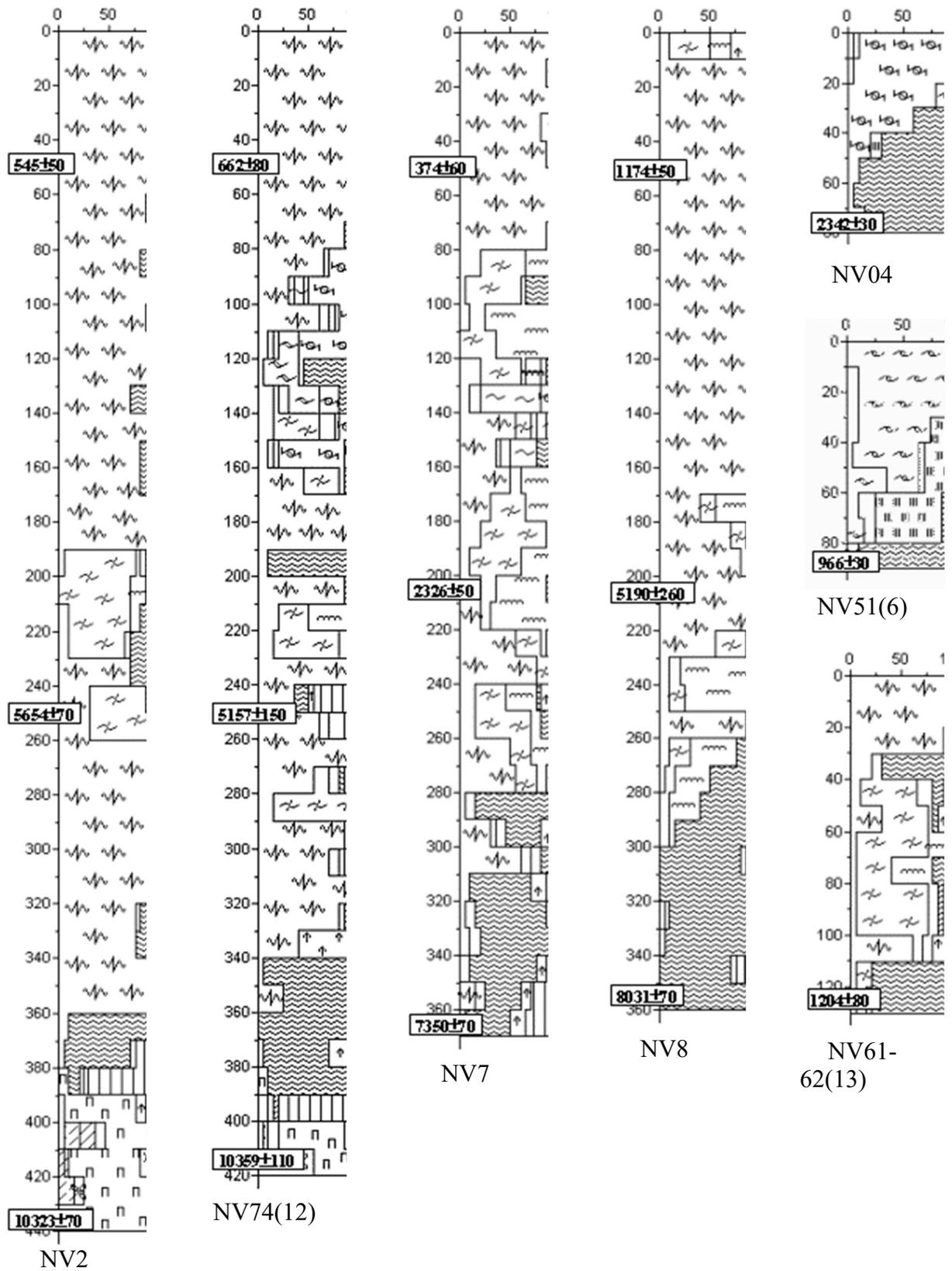
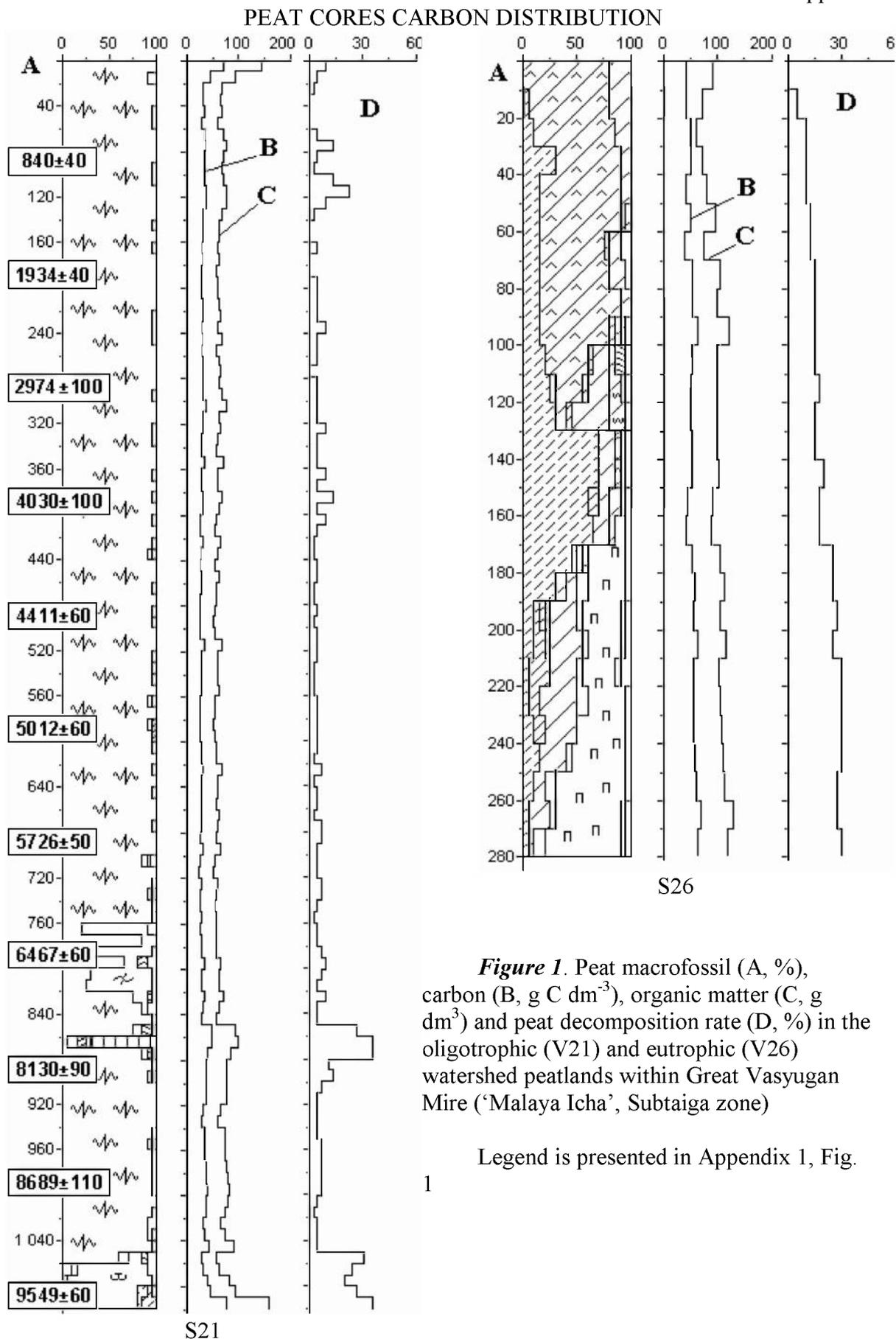
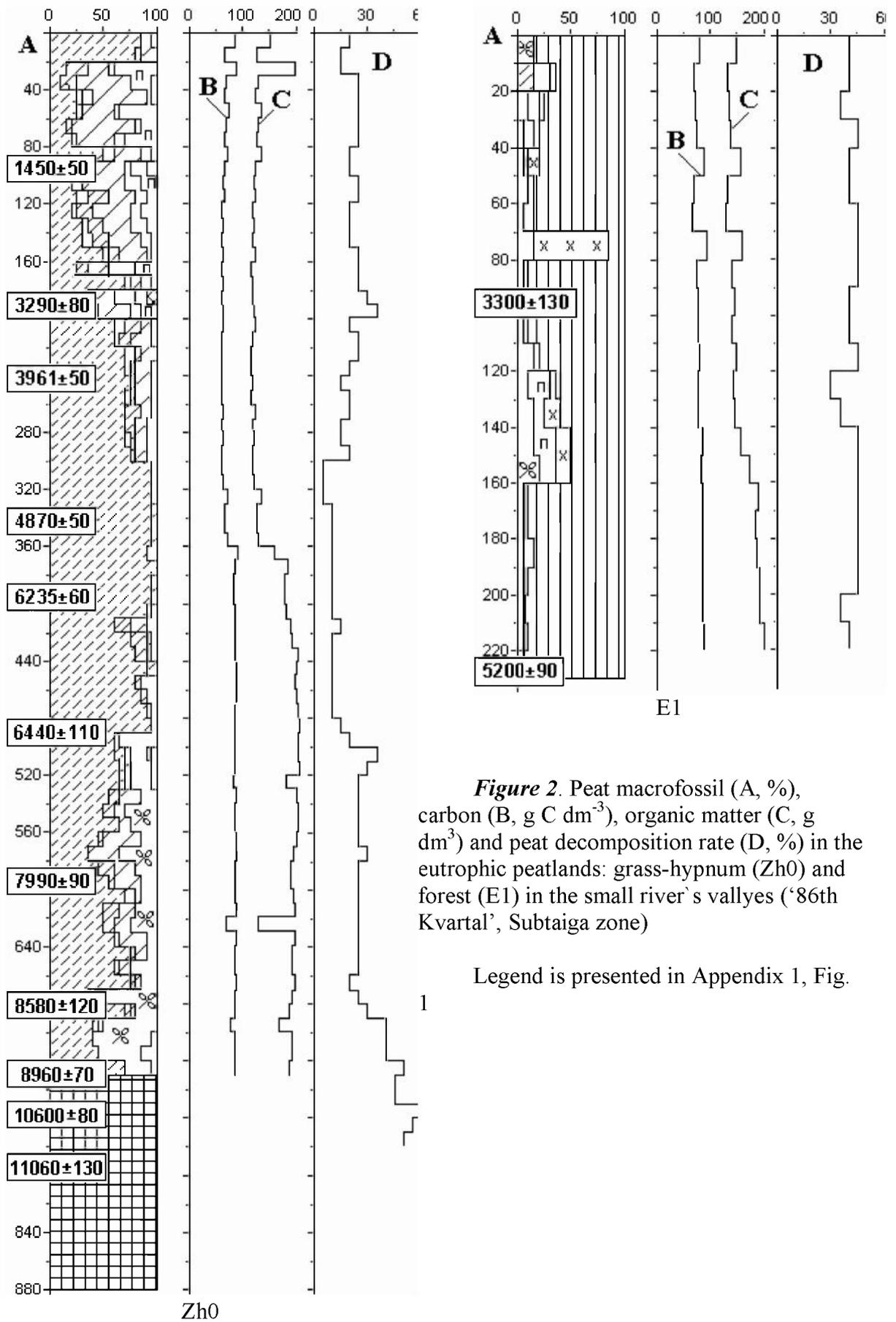


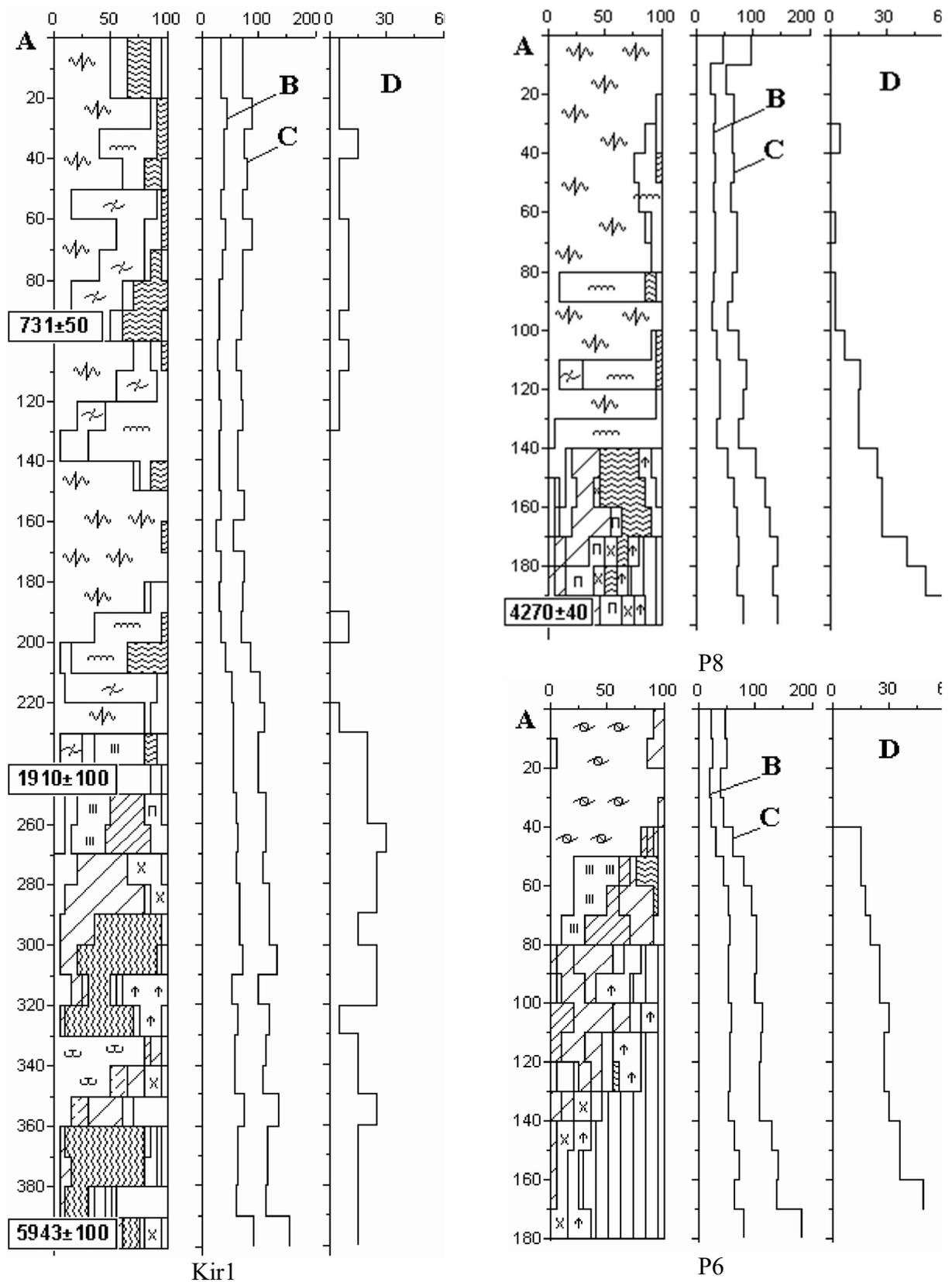
Figure 7. Peat core of the "Savkino" bog (Nizhnevartovsk, Middle taiga zone)





**Figure 2.** Peat macrofossil (A, %), carbon (B, g C dm<sup>-3</sup>), organic matter (C, g dm<sup>3</sup>) and peat decomposition rate (D, %) in the eutrophic peatlands: grass-hypnum (Zh0) and forest (E1) in the small river's valleys ('86th Kvartal', Subtaiga zone)

Legend is presented in Appendix 1, Fig. 1



**Figure 3.** Peat macrofossil (A, %), carbon (B, g C dm<sup>-3</sup>), organic matter (C, g dm<sup>-3</sup>) and peat decomposition rate (D, %) in the peatlands of the mixed composition ('86th Kvartal', Plotnikovo, Subtaiga zone)

Legend is presented in Appendix 1, Fig. 1

# PHOTOSYNTHETIC GAS EXCHANGE IN SEEDLINGS OF *Hopea odorata* Roxb. (SOUTH VIETNAM)

Zhirenko N.G.<sup>1\*</sup>, Vu M.<sup>2</sup>, Nguyen V.T.<sup>2</sup>, Kurbatova J.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва

<sup>2</sup> Joint Russian - Vietnamese Tropical Scientific Research and Technological Center, Southern Branch, Ho Chi Minh City, Vietnam

\*nzhirenko@mail.ru

**Citation:** Zhirenko N.G., Vu M., Nguyen V.T., Kurbatova J.A. 2023. Photosynthetic gas exchange in seedlings of *Hopea odorata* Roxb. (South Vietnam). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 102-115.

**DOI:** 10.18822/edgcc429889

В работе приводятся результаты исследований, связанных с изучением фотосинтетического газообмена на уровне листа *in situ* трехлетних саженцев *Hopea odorata* Roxb. во время сухого сезона (Южный Вьетнам). Представлена суточная динамика интенсивности фотосинтеза саженцев, произрастающих в различных условиях. При математическом описании зависимостей интенсивности фотосинтеза от фотосинтетически активной радиации (ФАР) использовалось уравнение Михаэлиса–Ментен. Выявлено, что основным фактором, влияющим на фотосинтез саженцев (за исключением ФАР), является содержание влаги в почве. Наибольшей нетто-продуктивностью фотосинтеза отличались саженцы, произрастающие в более освещенных условиях. Фотосинтез и состояние саженцев, растущих под кронами деревьев, отличались меньшей зависимостью от влажности почвы. Фотосинтез и состояние саженцев, произрастающих на границе леса, сильно зависели от конкурентных взаимоотношений с лесной растительностью.

Результаты исследования будут способствовать лучшему теоретическому пониманию роста и развития растений этого вида. Полученные количественные величины суточных потоков фотосинтетического газообмена, а также физиологические реакции растения на условия внешней среды, позволят на более качественном уровне подойти к оценке потоков углерода в соответствующих экосистемах. Приведены некоторые рекомендации практического характера, связанные с лесовосстановительными мероприятиями.

**Ключевые слова:** лист, интенсивность фотосинтеза, ФАР, влажность почвы, суточная динамика, световая кривая.

The paper presents the results of studies related to the study of photosynthetic gas exchange at the leaf level *in situ* of three-year-old seedlings of *Hopea odorata* Roxb. during the dry season (South Vietnam). The results obtained will contribute to a better theoretical understanding of the growth and development of plants of this species. The obtained quantitative values of the daily fluxes of photosynthetic gas exchange, as well as the physiological reactions of the plant to environmental conditions, will allow a more qualitative approach to the assessment of carbon fluxes in the corresponding ecosystems.

## OBJECTS AND METHODS OF RESEARCH

The research was conducted from January to April 2020 on the territory of the Cat Tien National Park (South Vietnam) (11.41530° s.w., 107.42460° v.d.) during the dry season. Three-year-old *H. odorata* seedlings planted in mid-January 2020 were selected as the object of the study. 25 seedlings were selected for observation. The average height of seedlings is 110.0±0.5 cm (SD = 14.4 cm), and their average diameter at a height of ~10 cm is 8.3±0.1 mm (SD = 0.6 mm). According to the illumination conditions of the site and the location of the seedlings, the site was divided into three experimental sites (SA1, SA2, SA3), Fig. 1. The SA1 site (seedlings № 1-16) was located in a relatively open space. The total value of photosynthetically active radiation (FAR) per seedling of this site was 25.7±1.2 mol·m<sup>-2</sup>. The SA2 site (seedlings № 17-20) was located under the crowns of adult trees. The total value of FAR is 10.8±0.5 mol·m<sup>-2</sup>. The SA3 site (seedlings № 21-25) was adjacent to an untouched part of the forest. The total value of FAR is 9.2±0.4 mol·m<sup>-2</sup>.

During planting, as well as on 12.02 and 19.03, the seedlings were watered. On 17.02 there was heavy rain at the site. To clarify the question of the effect of the moisture content in the soil on the condition of the studied plants, seedlings № 4-9 were watered from 26.03 to 5.04.

The processes of photosynthesis were considered from the standpoint of CO<sub>2</sub> gas exchange. Photosynthesis was measured *in situ* using the Portable Photosynthesis System LI-6800 (Li-Cor, USA). The formed intact leaves in the upper part of the crowns were used for the study.

The moisture content in the soil was determined in a 12 cm surface layer using the HydroSense II soil moisture meter (Campbell Scientific, Inc. USA). Soil moisture below 10% corresponded to withering humidity. To study the growth of seedlings in thickness, the stem diameters were measured at a height of 10 cm.

The Michaelis–Munten equation was used as a basis for the mathematical description of the dependence of photosynthesis on FAR. We used this equation in a modified form [Kaibeyainen, 2009]:

$$A = A_m \cdot Q / (Q + K_M) + A_d \quad (1)$$

To evaluate the efficiency of photosynthesis, we used the angular coefficient of the tangent ( $a$ ) to the curve of the function (1) at the point corresponding to  $K_M$ . From a physical point of view, this coefficient reflects the rate of change in photosynthesis when the headlights change by one unit.

## RESULTS

Figures 3, 4, 5 show graphs showing the daily dynamics of photosynthesis and FAR of seedlings growing on SA1, SA2, SA3. Figure 6 shows graphs showing the daily dynamics of photosynthesis and FAR of watered and non-watered seedlings. The soil moisture under the watered seedlings was ~25.1%, under the non-watered ones - ~8.0%. Photosynthesis of watered seedlings was well associated with FAR,  $r = 0.84$  (for non-watered seedlings,  $r = -0.34$ ).

Fig. 7 shows the values of photosynthesis depending on the FAR, the curves approximating these values obtained according to (1), and tangents to these curves at points corresponding to  $K_M$ . The indicators characterizing the photosynthetic features of the leaves of seedlings obtained according to (1) are summarized in Table.1.

Figure 8 (a) shows the dynamics of the growth of the studied plants by the diameter of the trunk, and Figure 8 (b) shows its derivative, showing the rate of growth per day.

## DISCUSSION

In the morning, the daily dynamics, Fig. 3-5, were characterized by a high degree of association of photosynthesis with FAR, as well as a rapid increase in the values of photosynthesis to maximum values. At the same time, saplings growing on SA1 had a high degree of association of photosynthesis with FAR and in the evening hours, with the decline of FAR. In the midday hours, except for SA2 seedlings, the values under consideration were not associated, and the midday depression of photosynthesis was clearly traced on the daily curves. At the same time, on SA3 seedlings, midday depression was traced until the end of the day. In SA2 seedlings, photosynthesis was well associated with FAR throughout the day. It should be noted that the maximum values of the FAR on SA2 were ~ 640 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, whereas on other sites - 1600 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and more.

The analysis of environmental factors showed that in our case, the main factors that could have inhibitory effects on the photosynthesis of seedlings are FAR and their water supply, determined by soil moisture. To find out which of these factors had the greatest inhibitory effect on photosynthesis, an experiment was conducted with additional watering of seedlings. As can be seen from Fig. 6, FAR did not have any noticeable inhibitory effect on the photosynthesis of the watered seedlings. However, as follows from the comparison of the dynamics of photosynthesis with the dynamics of soil moisture, with a decrease in soil moisture, there is an increasingly depression of photosynthesis.

The depression of photosynthesis caused by lack of water has a close effect on its net productivity. Net productivity can be estimated by the increase in plant biomass. Indirectly, the increase in plant biomass can be estimated by the growth of the plant in the thickness of the trunk. When comparing the dynamics of the growth of the studied seedlings in thickness with the dynamics of soil moisture, it can be seen that with a decrease in soil moisture, the increase also decreases, up to a negative value observed in plants at SA3, which we associate with a certain shrinkage of wood.

The maximum values of photosynthesis for saplings on SA1 and SA3, Table 1, were approximately the same and were limited by insufficient moisture content in the soil. Nevertheless, saplings on SA1, in comparison with SA3, were characterized by better parameters of leaf growth and development, and, accordingly, biomass growth, Fig. 8.

For SA2 seedlings, Table 1, the maximum values of photosynthesis intensity were 5.0 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and were mainly limited by a limited FAR. Photosynthesis indicators of these plants were better than those of others, which suggests that SA2 seedlings had a certain shade tolerance.

The watered seedlings were not subjected to any noticeable inhibitory effects from environmental factors. The maximum value of photosynthesis for them was 10.5 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, and the values of photosynthesis efficiency indicators showed that the leaves of these plants were still in the development stage.

Based on the analysis, we can make an assumption explaining the high degree of association of photosynthesis of seedlings with FAR, as well as the rapid growth of photosynthesis to the maximum values observed in the morning. This assumption is that during the dark time of the day, seedlings could restore their water balance. At the same time,

the restoration of the water balance was possible until the moisture content in the soil corresponding to the withering humidity was reached.

Thus, the depression of photosynthesis of *H. odorata* seedlings revealed during the study was a consequence of their insufficient water supply, which was regulated by the moisture content in the soil. The greatest net productivity of photosynthesis was distinguished by seedlings growing in more illuminated conditions. Seedlings growing in shaded conditions were less exposed to lack of moisture. Seedlings growing in competitive relationships were subjected to the greatest depression of photosynthesis.

**Keywords:** leaf, photosynthesis intensity, PAR, soil moisture, diurnal dynamics, light curve.

## ВВЕДЕНИЕ

Относительно недавно муссонные тропические леса занимали обширные территории Юго-Восточной Азии. К настоящему времени, в результате воздействия на эти леса антропогенных факторов, их площадь существенно сократилась. Данное обстоятельство отмечается, в частности, и во Вьетнаме. Так, например, только в период с 1943 по 1995 площадь лесов в этой стране сократилась с 14 до 8 млн га. При этом следует констатировать и тенденцию деградации сохранившихся древостоев [Lung, 2001; Luong, 2014.].

Естественное возобновление этих лесов требует очень больших временных периодов. По этой причине приобретает актуальность направление искусственного поддержания имеющихся лесных экосистем, а также реконструкция разрушенных. Наиболее значимым решением, реализующим эти направления, является выращивание в таких экосистемах саженцев древесных растений.

Для наиболее рациональной реализации обозначенного направления возникает необходимость в изучении физиологических особенностей используемых для этого видов растений. В этом ракурсе, наиболее значимыми являются исследования, связанные с фотосинтетическим газообменом. Этим исследованиям уделяется особое внимание. Однако по отношению к древесным породам, произрастающим в условиях тропического леса, обозначенный аспект исследований является малоизученным. В особенности это относится к лесным массивам Южного Вьетнама. По крайней мере, нами не было обнаружено каких-либо работ, затрагивающих обозначенное направление исследований в этом районе.

В данной работе представлены результаты исследований, связанные с изучением фотосинтетического газообмена CO<sub>2</sub> на уровне листа *in situ* саженцев Хопеи душистой (*Hopea odorata* Roxb.). *H. odorata* является одной из значимых лесообразующих пород тропического леса и широко используется в лесовосстановительных мероприятиях [Mahani et al., 2002; Hazandy et al., 2009; Dong et al., 2014].

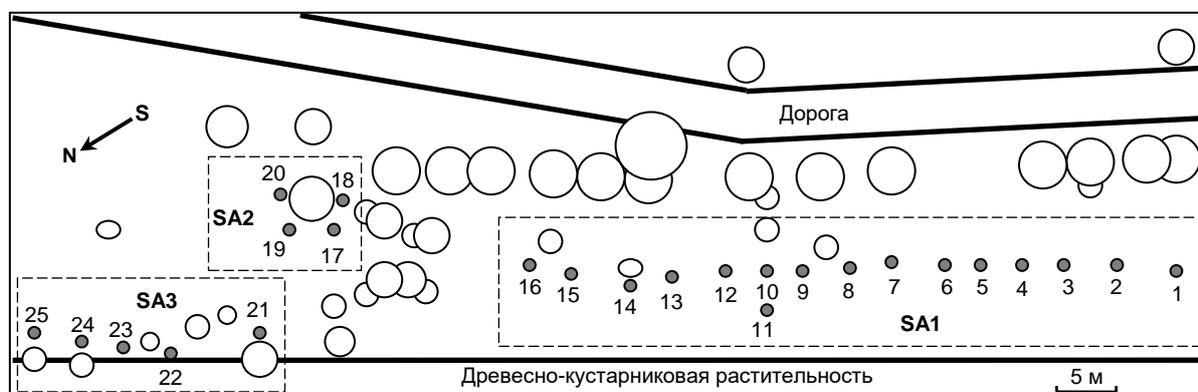
Полученные результаты будут способствовать лучшему теоретическому пониманию роста и развития растений этого вида, что будет содействовать более рациональному планированию лесовосстановительных мероприятий. Кроме этого, полученные количественные величины суточных потоков фотосинтетического газообмена на уровне листа, а также физиологические реакции растения на условия внешней среды, позволят на более качественном уровне подойти к оценке потоков углерода в соответствующих экосистемах.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Объект исследования и условия произрастания

Исследования проводились с января по апрель 2020 на территории национального парка Кат Тьен (Южный Вьетнам) [Nguen, Anichkin, 2011]. Парк находится в зоне субэкваториального тропического муссонного климата, характеризующегося двумя выраженными сезонами: сухим, продолжающимся с ноября по апрель, и влажным - с мая по октябрь. Сумма осадков в сухой сезон составляет до 15 мм·мес<sup>-1</sup>, во влажный - до 440 мм·мес<sup>-1</sup>. Среднемесячная температура изменяется от 24°C в январе до 28°C в апреле [Deshcherevskaya et al., 2013]. Почвы большей части территории парка красно-желтые ферраллитные, суглинистого гранулометрического состава [Okolelova et al., 2014].

Объектом исследования были выбраны трехлетние саженцы *H. odorata*. Саженцы были высажены в середине января 2020 в ходе лесовосстановительных мероприятий на расчищенном от кустарниковой растительности участке леса (11.41530° с.ш., 107.42460° в.д.). Для наблюдений были отобраны 25 саженцев. Средняя высота саженцев на момент посадки составляла  $110.0 \pm 0.5$  см (Стандартное отклонение  $SD = 14.4$  см), а их средний диаметр на высоте  $\sim 10$  см -  $8.3 \pm 0.1$  мм ( $SD = 0.6$  мм). По условиям освещенности участка и месторасположения саженцев относительно произрастающей здесь растительности, участок был разделен на три экспериментальные площадки (SA1, SA2, SA3), рис. 1.



**Рисунок 1.** План участка с расположенными на нем исследуемыми саженцами (саженцы обозначены закрашенными кружками), а также взрослыми деревьями (деревья обозначены кружками различного диаметра, отражающими их размер).

Площадка SA1 (саженцы № 1-16) располагалась на относительно открытом пространстве. Основное затенение площадки происходило при восходе солнца - из-за растущих с ее восточной стороны взрослых деревьев. Суммарное значение ФАР, приходящейся на саженец этой площадки, составляло  $25.7 \pm 1.2$  моль·м<sup>-2</sup> (значения ФАР получены по данным измерений 06.02.2020, в практически безоблачный день).

Площадка SA2 (саженцы № 17-20) располагалась под кронами взрослых деревьев. Освещение площадки прямыми солнечными лучами наблюдалось только в утренние часы около 9:30. Суммарное значение ФАР, приходящейся на саженец этой площадки, составляло  $10.8 \pm 0.5$  моль·м<sup>-2</sup>.

Площадка SA3 (саженцы № 21-25) располагалась непосредственно у западной границы участка, примыкающего к нетронутой части леса. Наблюдаемые на ней саженцы с западной стороны и частично сверху затенялись произрастающей рядом растительностью. Таким образом, участок характеризовался неравномерным освещением отдельных саженцев в течение суток. Прямые лучи солнца попадали на отдельные саженцы только в первой половине дня, до  $\sim 11$  ч. Суммарное значение ФАР, приходящейся на саженец, составляло  $9.2 \pm 0.4$  моль·м<sup>-2</sup>.

Во время посадки, а также 12.02 и 19.03 саженцы поливались. Расход воды при поливе составлял по 3-5 л на растение. 17.02 на участке прошел проливной дождь – выпало 7.9 мм. Для выяснения вопроса о влиянии содержания влаги в почве на состояние исследуемых растений, саженцы № 4-9 с 26.03 по 5.04 через каждые 2-3 дня поливались. Расход воды на полив составлял 5 л под каждое растение.

### Измерение фотосинтетического газообмена

Процессы фотосинтеза мы рассматривали с позиций газообмена CO<sub>2</sub>. Интенсивность фотосинтеза (фотосинтез) измерялась с помощью портативной газоанализирующей системы Portable Photosynthesis System LI-6800 (Li-Cor, США).

Для исследования использовались сформировавшиеся интактные листья, произрастающие в верхней части крон саженцев. Измерения выполнялись *in situ* на части листа, ограниченной рамкой измерительной камеры прибора с апертурой 3x3 см. Измерение на отдельном саженце производилось однократно, но в случае необходимости дублировалось.

Основные измерения были проведены 06.02.2020, 23.02.2020, 18.03.2020 и 06.04.2020, начиная с темного времени суток в предутренние часы, и заканчивая темным временем суток в вечерние часы. Измерения были организованы в виде циклов, в каждый из которых входили поочередные измерения на каждом из 25 саженцев. Время, затрачиваемое на прохождение одного цикла, составляло 10-50

мин и зависело от времени суток. Так, во время относительно быстро меняющейся освещенности, в утренние и в вечерние часы, это время составляло 10-20 мин. В полуденные часы и темное время суток это время увеличивалось.

При проведении измерений, в измерительной камере LI-6800 устанавливались следующие параметры микроклимата: концентрация  $\text{CO}_2$  400 мкмоль·моль<sup>-1</sup>, температура воздуха 33-35 °С, его относительная влажность – ~60%. ФАР измерялась с помощью датчика, расположенного в измерительной камере прибора.

### Измерение влажности почвы и прироста

Содержание влаги в почве определялось в 12 см поверхностном слое. Для этого использовался почвенный влагомер HydroSense II (Campbell Scientific, Inc. США). Влагомер позволяет определять в процентах объемное содержание воды в минеральных почвах (VWC). Для корректировки показаний влагомера была проведена его градуировка, по результатам которой была получена функциональная зависимость, позволяющая пересчитывать VWC в значения относительной влажности почвы:  $W = 1.722 \cdot \text{VWC}^{0.944}$  ( $R^2 = 0.96$ ).

Для изучения прироста саженцев в толщину, на высоте 10 см от земли в двух азимутальных направлениях - СЮ и ЗВ, измерялись диаметры стебля, которые усреднялись. Для определения прироста саженцев в высоту, замеры производились от реперных точек, отмеченных у оснований верхних мутовок растений. Измерения проводились с помощью цифрового штангенциркуля и рулетки.

### Суточная динамика и кривые зависимости фотосинтеза от ФАР

Измеренные величины фотосинтеза группировались по времени проведения очередного цикла замеров и усреднялись. По полученным данным строили суточную динамику.

Для математического описания зависимости фотосинтеза от ФАР было использовано уравнение Михаэлиса – Ментен [Michaelis, Menten, 1913; Briggs, Haldane, 1925]. Это уравнение мы использовали в модифицированной форме [Kaibeyainen, 2009]:

$$A = A_m \cdot Q / (Q + K_M) + A_d, \quad (1)$$

где  $A$  – интенсивность фотосинтеза, мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $A_m$  – максимальная интенсивность фотосинтеза, которая наблюдается у растения, произрастающего в данных условиях, мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> [Berezina, Afanas'eva, 2009, p. 13];  $Q$  – ФАР, мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $A_d$  – интенсивность дыхания при  $Q=0$ , мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> (показатель  $A_d$  характеризует интенсивность расхода запасенных питательных веществ на развитие и поддержание жизнедеятельности листа [Nieke et al., 2002]);  $K_M$  – константа Михаэлиса (константа численно равна ФАР, при которой интенсивность фотосинтеза составляет половину от максимальной). Значения  $K_M$  используются исследователями при сравнении физиологических особенностей растений [Nieke et al., 2002; Kaibeyainen, 2009]. Из уравнения (1) определялась точка компенсации света (ТКС), мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, которая показывает, при какой интенсивности ФАР фотосинтез становится равным нулю [Farah Shahananim et al., 2017]. Показатель ТКС связан с интенсивностью дыхания листа и характеризует процесс и стадию его развития.

Для оценки эффективности фотосинтеза мы использовали угловой коэффициент касательной ( $a$ ) к кривой функции (1) в точке, соответствующей  $K_M$ . С физической точки зрения, этот коэффициент отображает скорость изменения фотосинтеза при изменении ФАР на одну единицу.

### Статистический анализ

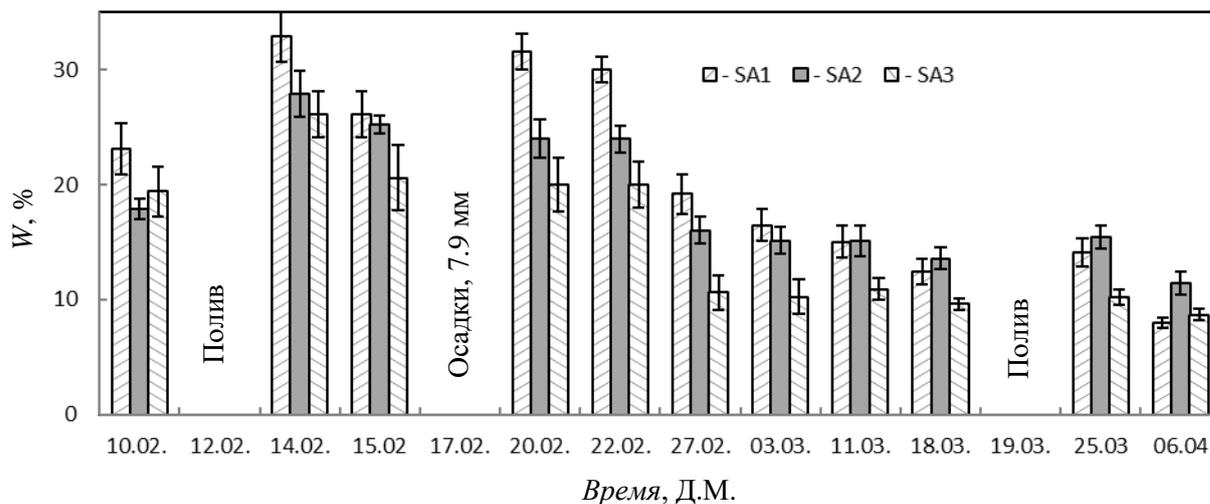
Анализ данных и построение графиков проводились с помощью математических методов статистики с использованием среды MS Excel. Обработка данных проводилась с помощью пакета "Описательная статистика" ( $p < 0.05$ ). Степени ассоциации исследуемых наборов данных определялись с помощью коэффициентов корреляции Пирсона ( $r$ ). Для оценки математического описания полученных наборов данных использовался коэффициент детерминации ( $R^2$ ).

Значения  $K_M$  в уравнении (1) подбирались с помощью пакета "Параметры поиска решения" (предельное число итераций 100, относительная погрешность 0.00001, допустимое отклонение 5%, сходимость 0.0001). Угловой коэффициент  $a$  касательной к кривой функции (1) в точке, соответствующей  $K_M$ , а также коэффициенты уравнения для этой касательной, определялись с помощью математических методов дифференцирования. Суммарные значения исследуемых величин определялись методом интегрирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Влажность почвы

Средние значения относительной влажности почвы  $W$  на каждой опытной площадке, а также планки  $SD$  отображены на гистограмме, рис. 2.

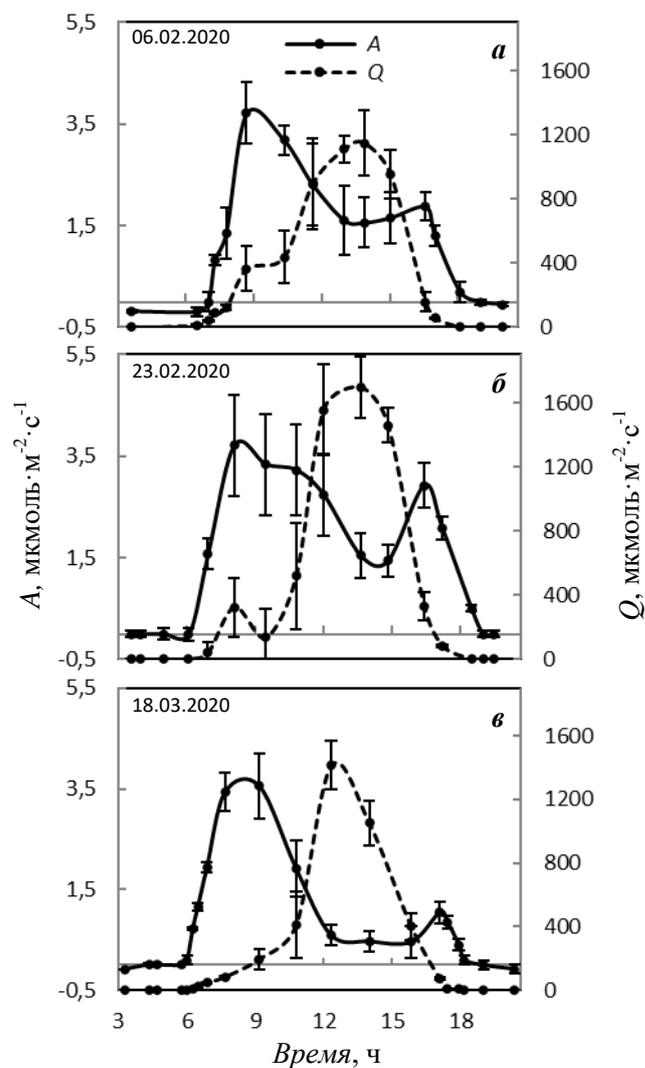


**Рисунок 2.** Средние значения относительной влажности почвы,  $W$ , на объектах исследования. Планки на гистограмме отображают величины  $SD$ .

Как видно из рис. 2, локализованный полив растений в период наблюдений достаточно быстро истощал свои ресурсы. При этом уменьшение влажности почвы можно охарактеризовать экспоненциальной зависимостью. Например, уравнение экспоненты, полученное за период с 20.02 по 18.03 для площадки SA1, выглядело следующим образом:  $W = 28.3 \exp(-0.029x)$  ( $R^2 = 0.89$ ), где  $x$  – порядковый номер дня. Согласно предложенной А.Н. Кузнецовым градации категорий влажности для красно-желтых ферраллитных почв [Kuznetsov, 2003, р. 33], влажность почвы ниже 10% соответствовала влажности завядания.

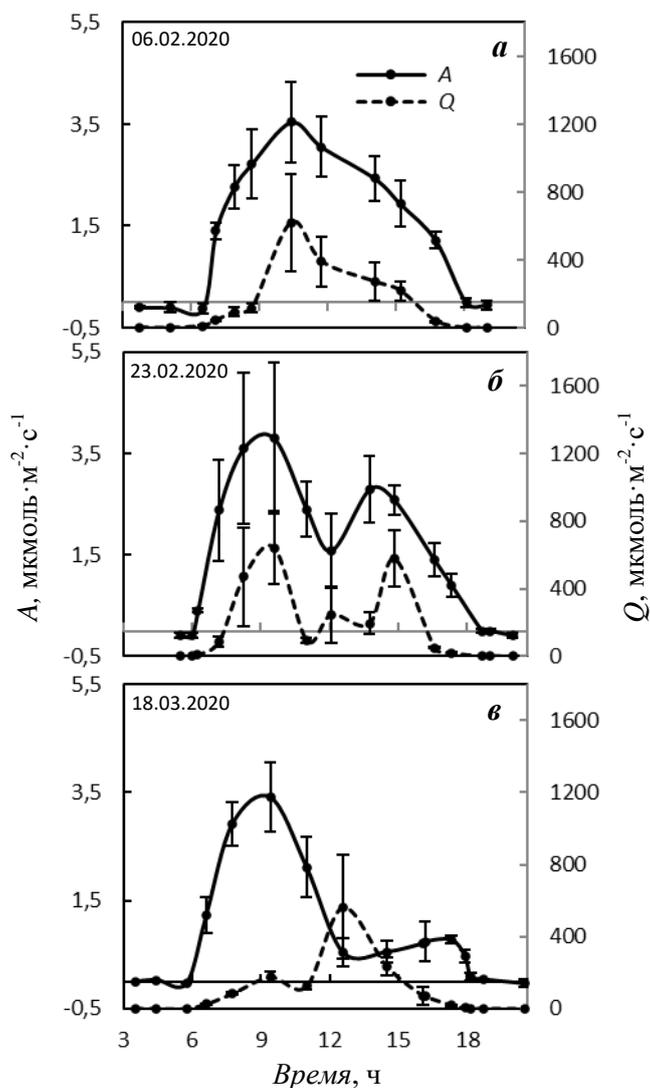
### Суточная динамика фотосинтеза и ФАР

На рис. 3 (а, б, в) представлены графики, отображающие суточную динамику фотосинтеза и ФАР саженцев, произрастающих на площадке SA1. В утренние часы фотосинтез этих саженцев был тесным образом связан с ФАР – полученные коэффициенты корреляции для рассматриваемых зависимостей составили 0.94, 0.90 и 1.00, соответственно. Аналогичная ситуация отмечалась и в вечерние часы, при спаде фотосинтеза. В полуденные часы рассматриваемые величины ассоциированы не были. К 18.03 апикальный прирост на побегах саженцев на площадке SA1 прекратился, а на многих из них усохли побеги, начавшиеся формироваться. Кроме этого, некоторые из саженцев приобрели признаки завядания: листья на них начали скручиваться в трубочку. При этом полив саженцев 19.03 не оказал существенного влияния на их состояние.



**Рисунок 3.** Суточная динамика интенсивности фотосинтеза,  $A$ , и ФАР,  $Q$ , саженцев, произрастающих на площадке SA1. Планки на графиках отображают величины  $SD$ .

На рис. 4 (а, б, в) представлены графики, отображающие суточные динамики фотосинтеза и ФАР саженцев на площадке SA2. В периоды измерений 06.02 и 23.02 (рис. 4 (а, б)) фотосинтез саженцев хорошо коррелировал с ФАР в продолжение суток: коэффициенты корреляции составили 0.80. Измерение 18.03 (рис. 4 (в)), наоборот, не выявило тесной корреляции:  $r = 0.22$ . Внешних морфологических признаков, указывающих на увядание саженцев, не отмечалось. Однако было отмечено повреждение листьев улитками, которое, по визуальной оценке, составило ~10%.



**Рисунок 4.** Суточная динамика интенсивности фотосинтеза,  $A$ , и ФАР,  $Q$ , саженцев, произрастающих на площадке SA2. Планки на графиках отображают величины  $SD$ .

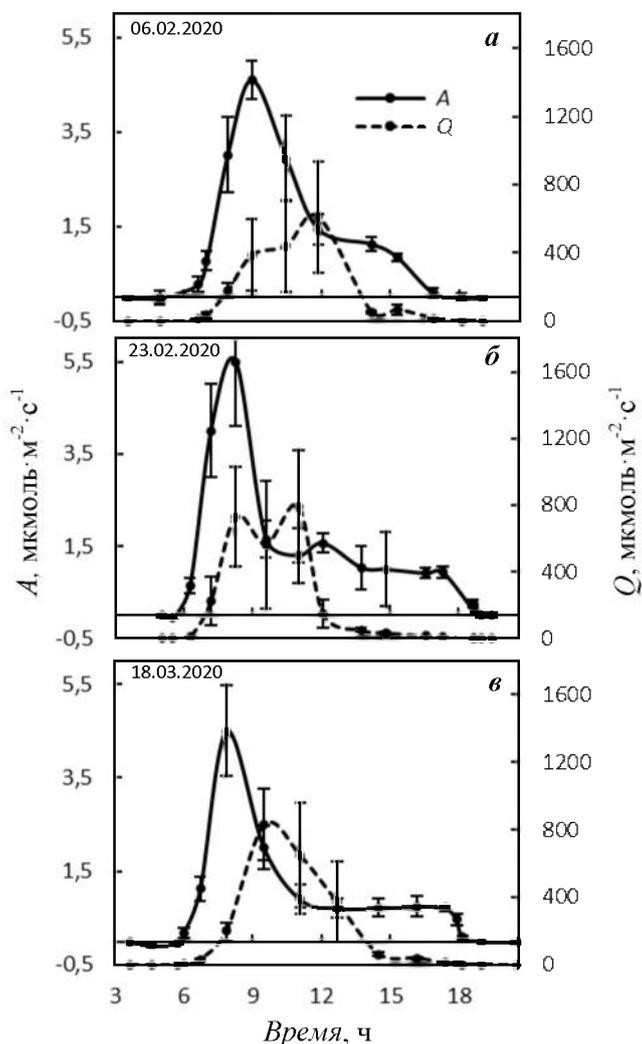
На рис. 5 (*а, б, в*) представлены графики, отображающие суточную динамику фотосинтеза и ФАР саженцев на площадке SA3. Фотосинтез этих саженцев в утренние часы был тесно связан с ФАР – коэффициенты корреляции для рассматриваемых зависимостей составили 0.98, 0.91 и 1.00, соответственно. В дальнейшем рассматриваемые величины не показали такой тесной зависимости. Попадание прямых солнечных лучей на отдельные саженцы в утренние часы вызывало у них депрессию фотосинтеза. С 03.03 саженцы начали проявлять признаки усыхания: листья на них поникли, а на некоторых начали сворачиваться в трубочку. К 18.03 содержание влаги в почве на этом участке соответствовало влажности завядания (рис. 2). В результате этого апикальный прирост на побегах саженцев прекратился, а побеги, начавшиеся формироваться, усохли. Некоторые из саженцев приобрели признаки устойчивого завядания - листья них начали скручиваться и усыхать.

На рис. 6 представлены графики, отображающие суточную динамику фотосинтеза и ФАР поливаемых и не поливаемых саженцев, полученную при измерениях 6.04. Влажность почвы под поливаемыми саженцами составляла ~25.1%, а под не поливаемыми - ~8.0%. Фотосинтез поливаемых саженцев хорошо коррелировал с ФАР,  $r = 0.84$  (для не поливаемых саженцев  $r = -0.34$ ).

#### Зависимость фотосинтеза от ФАР

На рис. 7 (*а, б, в, г*) отображены значения фотосинтеза в зависимости от ФАР, полученные для саженцев на площадках SA1, SA2, SA3 и поливаемых саженцев - на SA1, соответственно. На этих рисунках показаны также кривые, аппроксимирующие эти значения, полученные согласно уравнению (1), и касательные к этим кривым в точках, соответствующих значениям  $K_M$ . Кривые для

саженцев на площадках SA1 и SA3 (рис. 7 (а, б)) были построены по данным, полученным до начала проявления депрессии фотосинтеза, а для саженцев на SA2 и поливаемых саженцев на SA1 (рис. 7 (в, г)) - по данным, полученным в течение дня.



**Рисунок 5.** Суточная динамика интенсивности фотосинтеза,  $A$ , и ФАР,  $Q$ , саженцев, произрастающих на площадке SA3. Планки на графиках отображают величины  $SD$ .

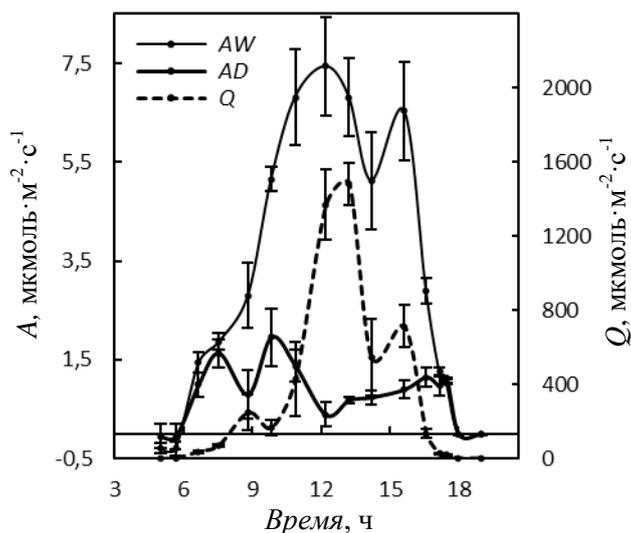
Показатели, характеризующие фотосинтетические особенности листьев саженцев, полученные согласно уравнению (1), а также значения  $R^2$  для полученных кривых и количество проведенных измерений  $n$ , сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Показатели, характеризующие фотосинтетические особенности саженцев

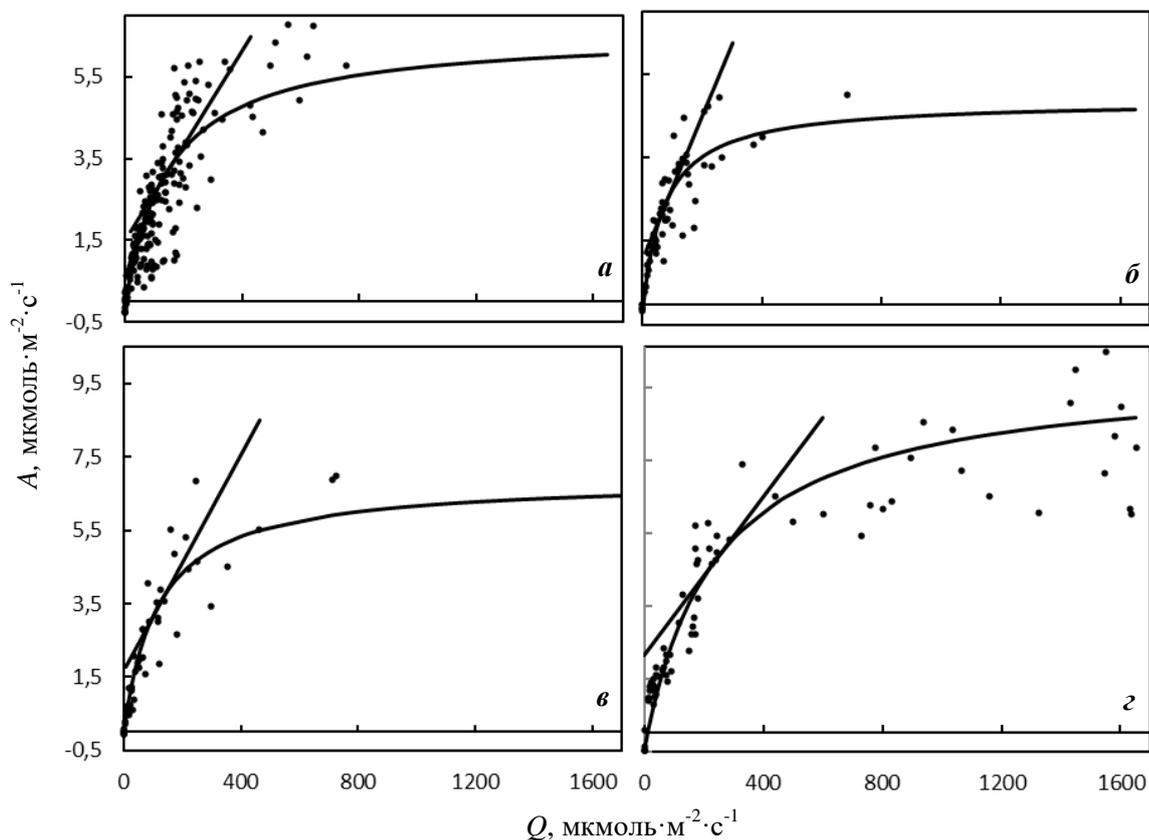
№ SA	$R^2$	$n$	$A_m$ , μкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$a$	$K_M$	$A_{\text{д}}$ , μкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$TKC$ , μкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
SA1	0.75	199	6.8	0.012	146.0	-0.22	5.0
SA2	0.81	61	5.0	0.017	72.9	-0.15	2.3
SA3	0.88	49	7.0	0.015	115.4	-0.10	1.7
SA1 (полив)	0.91	74	10.5	0.011	240.4	-0.50	12.0

#### Прирост саженцев

На рис. 8 (а) показана динамика прироста исследуемых растений по диаметру ствола, а на рис. 8 (б) - его производная, отображающая скорость прироста в сутки.



**Рисунок 6.** Суточная динамика интенсивности фотосинтеза,  $A$ , поливаемых ( $AW$ ) и не поливаемых ( $AD$ ) саженцев на площадке SA1 и их ФАР,  $Q$ . Планки на графиках отображают величины  $SD$ .



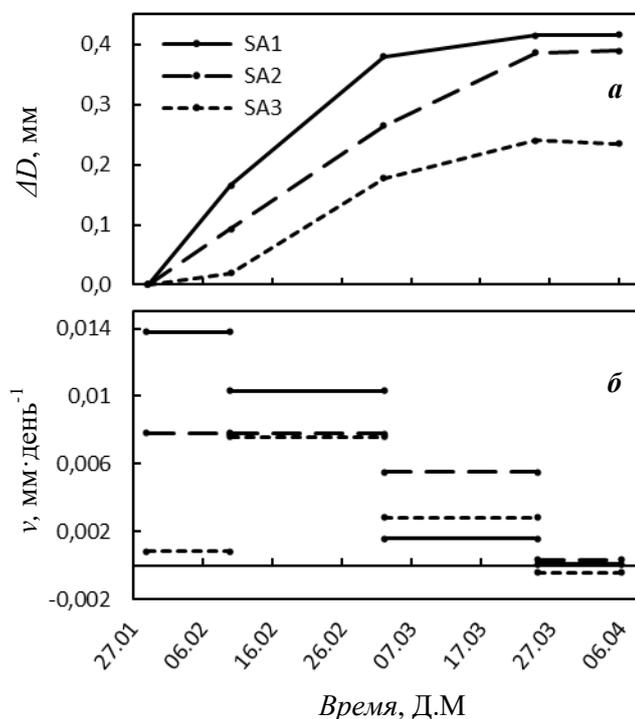
**Рисунок 7.** Значения интенсивности фотосинтеза,  $A$ , в зависимости от ФАР,  $Q$ , полученные на площадках SA1 ( $a$ ), SA2 ( $б$ ), SA3 ( $в$ ) и поливаемых саженцах ( $г$ ). Показаны аппроксимирующие эти значения кривые, полученные согласно уравнению (1), и касательные к этим кривым в точках, соответствующих значениям  $K_M$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Суточные динамики фотосинтеза саженцев на площадке SA1 (рис. 3 ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ )) характеризуются:

- 1) сравнительно быстрым утренним ростом фотосинтеза до максимальных значений,

продолжающимся до ~9 ч; 2) последующим плавным уменьшением фотосинтеза до значений, соответствующих полуденной депрессии; 3) полуденной депрессией, проявляющейся в той или иной степени и продолжающейся с ~13 по ~15 ч; 4) следующим за депрессией некоторым увеличением фотосинтеза; 5) дальнейшим спадом фотосинтеза до нулевых значений и 6) отрицательными значениями фотосинтеза листьев, их дыханием, закономерно фиксируемым в ночные часы.



**Рисунок 8.** Динамика прироста исследуемых растений в толщину,  $\Delta D$ , (а) и скорости прироста в толщину,  $v$ , (б).

Суточная динамика фотосинтеза саженцев на площадке SA2 (рис. 4 (а, б, в)) также характеризуется сравнительно быстрым утренним увеличением фотосинтеза до максимальных значений, но продолжающимся до ~9:30. Депрессия фотосинтеза отмечалась 18.03 с 12:30 по 14:30 (рис. 4 (в)).

Суточные динамики фотосинтеза саженцев на площадке SA3 (рис. 5 (а, б, в)) характеризуются быстрым утренним ростом фотосинтеза до максимальных значений, продолжающимся до ~8 ч, а в дальнейшем - быстрым спадом фотосинтеза до его минимальных значений (рис. 5 (в)). В дальнейшем, до конца дня какого-либо увеличения фотосинтеза не наблюдалось. Кроме того, попадание прямых солнечных лучей на отдельные саженцы в утренние часы вызывало у них депрессию фотосинтеза. Подобное поведение этой суточной динамики обуславливается тем, что на условия произрастания саженцев оказывали негативное влияние конкурентные отношения со стороны произрастающей рядом древесно-кустарниковой и травянистой растительности. В наибольшей степени это влияние проявлялось в более интенсивном иссушении поверхностных слоев почвы корневыми системами этих растений (рис. 2).

С учетом вышесказанного, а также принимая во внимание расчетные значения коэффициентов корреляции, мы можем резюмировать следующее. В утренние часы суточные динамики (рис. 3-5) характеризовались высокой степенью зависимости фотосинтеза от ФАР, а также быстрым ростом величин фотосинтеза до максимальных значений. При этом у саженцев, произрастающих на площадке SA1, высокая степень связанности фотосинтеза с ФАР прослеживалась и в вечерние часы, при спаде ФАР. В полуденные часы, за исключением саженцев на площадке SA2, рассматриваемые величины не были скоррелированы, а на суточных кривых четко прослеживалась полуденная депрессия фотосинтеза. При этом на саженцах с площадки SA3 полуденная депрессия прослеживалась до конца дня. Что же касается саженцев на SA2, то у них фотосинтез хорошо коррелировал с ФАР в течение всех суток, за исключением 18.03, когда отличительные признаки суточной динамики фотосинтеза соответствовали таковым, наблюдаемым на растениях с площадки

SA1. Здесь следует обратить внимание на то, что максимальные значения ФАР на площадке SA2 составляли  $\sim 640 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , тогда как на других площадках -  $1600 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и более.

На основании этих результатов, мы всё же не смогли однозначно ответить на следующий вопрос: какие факторы окружающей среды в наибольшей степени оказывали ингибирующее воздействие на фотосинтез исследуемых растений. Основными факторами, которые могут оказывать ингибирующий эффект на фотосинтез, являются: освещенность; водообеспечение; концентрация углекислого газа в атмосферном воздухе; температура - воздуха, органов растения и почвы; влажность воздуха.

При проведении исследований температура и влажность воздуха в измерительной камере LI-6800 поддерживались на уровне  $33\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$  и 60%. Соответственно, и температура листа поддерживалась в этих пределах. Это - хорошие для роста саженцев *H. odorata* условия. Температура верхних слоев почвы под саженцами в середине дня составляла  $36\text{-}37 \text{ }^\circ\text{C}$ , что также не являлось экстремальным условием. Концентрация углекислого газа в атмосферном воздухе составляла  $405\text{-}500 \text{ мкмоль} \cdot \text{моль}^{-1}$ , что существенным образом не сказывалось на измеряемых величинах фотосинтеза. Следовательно, в нашем случае, основными факторами, которые могли оказывать ингибирующие действия на фотосинтез изучаемых саженцев, остается ФАР и их водообеспечение, которое в первую очередь определяется влажностью почвы.

Для того, чтобы выяснить, какой из этих факторов в наибольшей степени оказывал ингибирующий эффект на фотосинтез, мы провели эксперимент с дополнительным поливом саженцев на площадке SA1. Возможность влияния переувлажнения почвы на фотосинтез саженцев, согласно исследованиям [Nazandy et al., 2009], была исключена.

Как видно из рис. 6, ФАР, по крайней мере, до ее максимально наблюдаемых значений, не оказывала какого-либо заметного ингибирующего воздействия на фотосинтез поливаемых саженцев. Об этом говорит и хорошая корреляция фотосинтеза с ФАР. О хорошей способности *H. odorata* акклиматизироваться к высокой освещенности говорится и в работе [Dong et al., 2016]. Следовательно, наблюдаемая депрессия фотосинтеза саженцев являлась следствием их недостаточной водообеспеченности. Это также видно из сопоставления динамики фотосинтеза (рис. 3-5 и рис. 6 (кривая AD)) с динамикой влажности почвы (рис. 2): при уменьшении влажности почвы во все большей степени прослеживается закономерно проявляющаяся депрессия фотосинтеза.

Депрессия фотосинтеза, вызываемая недостатком воды, тесно связана с уменьшением его нетто-продуктивности. Оценка нетто-продуктивности фотосинтеза производится по приросту биомассы растения. Косвенно прирост биомассы растения можно оценить, например, по приросту растения в высоту или по толщине ствола. В наших исследованиях эти два параметра хорошо коррелировали друг с другом,  $r = 0.78$ . Однако прирост саженцев в высоту, в отличие от такового в толщину, характеризовался определенной девиацией, связанной с попеременной активацией апикальных зон прироста при более благоприятных условиях произрастания, например, после полива, и его последующим усыханием при недостатке влаги. Таким образом, в нашем случае оценку нетто-продуктивности целесообразно рассматривать по отношению к приросту саженцев по толщине.

При сопоставлении динамики прироста исследуемых саженцев по толщине (рис. 8) с динамикой влажности почвы (рис. 2) видно, что с уменьшением влажности почвы прирост также уменьшается. Действительно, наибольшие приросты ствола наблюдались в первое время после посадки саженцев, до 10.02, за исключением саженцев на площадке SA3, прирост которых был незначительным. Далее, вплоть до 03.03 поддерживались относительно неплохие темпы прироста. В дальнейшем наблюдалась тенденция к уменьшению прироста, и в период с 25.03 по 06.04 прирост практически прекратился, вплоть до отрицательной величины, наблюдаемой у растений на площадке SA3, что было связано, по-видимому, с некоторой усушкой древесины. Саженцы на площадке SA2 с 03.03 характеризовались несколько лучшими показателями прироста (рис. 8 (б)) и, соответственно, биомассы.

Максимальные значения фотосинтеза для саженцев на площадках SA1 и SA3 (рис. 7 (а, в), табл.1) были примерно одинаковыми и лимитировались недостаточным для полноценного роста растений содержанием влаги в почве. Однако угол наклона касательной и, соответственно, скорость нарастания фотосинтеза, были несколько выше у саженцев на площадке SA3. Об этом говорят и величины  $K_M$ . Объясняется это более ранним попаданием прямого солнечного света на саженцы на площадке SA3 в сравнении с таковыми на SA1. С другой стороны, параметры  $A_d$  и  $TKC$ , были существенно лучше у саженцев на SA1. Таким образом, саженцы с площадки SA1 характеризовались

лучшими параметрами роста и развития листьев, и соответственно, прироста биомассы, по сравнению с саженцами на SA3 (рис. 8).

Для саженцев, произрастающих на площадке SA2 (рис. 7 (б), табл.1), максимальные значения интенсивности фотосинтеза составляли  $5.0 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , и, в основном, лимитировались ограниченной ФАР. Параметры  $a$  и  $K_M$  у этих растений были лучше, чем у других. Это говорит о том, что саженцы на площадке SA2 обладали определенной теневыносливостью [Tam, 2007; Hazandy, 2009]. О способности *H. odorata* развиваться в условиях умеренного затенения говорится и в работах [Arpanah, 1998; Dong et al., 2014]. Величины  $A_d$  и  $TKC$  для саженцев с SA2 занимают промежуточные значения между таковыми для саженцев на площадках SA1 и SA3. Достоверность значений этих параметров подкрепляется данными по приросту этих саженцев по отношению к таковым на SA1 и SA3 (рис. 8 (а)) – кривая прироста саженцев по толщине на площадке SA2 располагается между кривыми приростов саженцев с SA1 и SA3.

Поливаемые саженцы не подвергались какому-либо заметному ингибирующему воздействию со стороны факторов окружающей среды (рис. 7 (з), табл.1). Максимальное значение фотосинтеза для них составило  $10.5 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а значения показателей эффективности фотосинтеза говорят о том, что листья этих растений еще находились в стадии роста.

На основе проведенного анализа, мы можем выдвинуть предположение, объясняющее высокую степень корреляции фотосинтеза саженцев с ФАР, а также быстрый рост фотосинтеза до максимальных значений, наблюдаемые в утренние часы: в течение темного времени суток, саженцы могли восстанавливать свой водный баланс. При этом восстановление водного баланса было возможно до достижения содержания влаги в почве, соответствующего влажности завядания. Например, у не поливаемых саженцев (рис. б) динамика кривой  $AD$ , а также отрицательный коэффициент  $r$ , характеризующий степень зависимости фотосинтеза от ФАР, показывают полную депрессию фотосинтеза, которая связана с произрастанием этих саженцев в условиях содержания влаги в почве, соответствующего влажности завядания.

## ВЫВОДЫ

Очевидным, определяющим фактором, влияющим на фотосинтез исследуемых саженцев *H. odorata*, является ФАР. Этим определяется более высокая продуктивность саженцев, произрастающих на открытой местности.

Выявленная в ходе эксперимента депрессия фотосинтеза у саженцев *H. odorata* являлась следствием их недостаточной водообеспеченности, связанной в первую очередь с дефицитом влаги в почве. Саженцы, произрастающие в затененных условиях, в меньшей степени подвергались воздействию недостатка влаги. Наибольшей депрессии подвергались саженцы, произрастающие в условиях конкурентных взаимоотношений со взрослыми деревьями.

Разработанные нами математические модели согласно уравнению Михаэлиса–Ментен (1), описывающие зависимость фотосинтеза от ФАР для изучаемых саженцев, в перспективе позволят перейти к общей модели, описывающей зависимость фотосинтеза от факторов внешней среды.

На основании проведенных исследований мы можем сформулировать и некоторые рекомендации практического характера, связанные с лесовосстановительными мероприятиями, а именно: с целью сокращения трудозатрат при выращивании саженцев, связанных с поливом, мы рекомендуем производить их посадку в начале влажного сезона, по возможности, на затеняемых участках, например, под пологом леса, с перспективой их выхода в первый ярус насаждения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству национального парка Кат Тьен за возможность проведения и поддержку проводимых исследовательских работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Appanah S. 1998. Introduction. In: A Review Of Dipterocarps: Taxonomy, *Ecology and Silviculture*, (S. Appanah, J.M. Turnbull eds), pp. 1-4, Center for International Forestry Research. Bogor.
- Berezina N.A., Afanas'eva N.B. 2009. *Plant ecology. Textbook aid for students higher textbook establishments*. Izdatel'skiy tsentr Akademiya, Moscow, 400 pp. (in Russian). [Березина Н.А., Афанасьева Н.Б. 2009. Экология растений. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр Академия. 400 с.].
- Briggs G.E., Haldane J.B.S. 1925. A note on the kinematics of enzyme action. *Biochemical Journal*, 19(2): 338-339.
- Deshcherevskaya O.A., Avilov V.K., Dinh Ba Duy, Tran Cong Huan, Kurbatova J.A. 2013. Modern climate of Cat Tien national park (Southern Vietnam): Climatological data for ecological studies. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 49(8): 819-838.
- Dong T., Beadle C., Eyles A., Forrester D.I., Doyle R., Worledge D., Churchill K., Khanh D.C. 2016. Growth and physiology of *Hopea odorata* planted within gaps in an acacia plantation acting as a nurse crop. *Journal Plant Ecology*, 9(5-6): 549-562. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1266526>
- Dong T.L., Beadle C.L., Doyle R., Worledge D. 2014. Site conditions for regeneration of *Hopea odorata* Roxb. in natural evergreen dipterocarp forest in southern Vietnam. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(4): 532-542.
- Farah Shahanim M.M., Raja Barizan R.S., Normaniza O., Nasrulhaq Boyce A. 2017. Growth and physiological assessment of chengal seedlings planted under different age groups and fertilizer treatments in logged-over forest. *Austrian Journal of Forest Science Heft*, 3: 225-244.
- Hazandy Abdul-Hamid, Nor Aini Ab. Shukor, Sapari Mat, Abdul Latib Senin. 2009. Effects of Waterlogging on Growth and Physiology of *Hopea odorata* Roxb. *International Journal of Biology*, 1(2):87-93.
- Hieke S., Menzel C.M., Ludders P. 2002. Effects of Light Availability on Leaf Gas Exchange and Expansion in Lychee (*Litchi chinensis*). *Tree Physiology*, 22: 1249-1256. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1266526>
- Kaibeyainen E.L. 2009. Parameters of the light curve of photosynthesis in *Salix dasyclados* and their change during the growing season. *Plant physiology*, 56(4): 490-499.
- Kuznetsov A.N. 2003. *Tropicheskiy dipterokarpovyy les*. GEOS, Moscow, 140 pp. (in Russian) [Кузнецов А.Н. 2003. Тропический диптерокарповый лес. Москва: ГЕОС. 140 с.].
- Lung N.N. 2001. The status of forest resources in Vietnam: matter of environment, economy, society and resolutions. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 12: 891-893.
- Luong T.H. 2014. Forest resources and forestry in Vietnam. *Journal of Vietnamese Environment*, 6(2):171-177.
- Mahani M.C., Jong K., Ping Y.C., Fatimah M., Wickneswari R. 2002. Triploidy in *Hopea odorata*. *Journal of tropical Forest Science*, 14(2): 264-267.
- Michaelis L., Menten M.L. 1913. Die kinetik der invertinwirkung. *Biochemische Zeitschrift*, 49: 333-369.
- Nguyen Van Thinh, Anichkin A.E. 2011. The Cat Tien National Park: general information. In: *Structure and functions of soil communities of a monsoon tropical forest (Cat Tien National Park, southern Vietnam)*, (A.V. Tiunov, ed.), pp. 11-15, КМК Scientific Press, Moscow (in Russian). [Нгуен Ван Тхинь, Аничкин А.Е. 2011. Национальный парк Кат Тьен – общие сведения // Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам). М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 11-15].
- Okolelova A.A., Nguyen Van Thinh, Avilov V.C. 2014. Properties of basic types of soils in the Dong Nai biosphere reserve (South Vietnam). *Scientific Bulletin. Natural sciences*, 10(27): 138-144 (in Russian). [Околелова А.А., Нгуен Ван Тхинь, Авиллов В.К. 2014. Свойства основных типов почв биосферного заповедника Донг Най (Южный Вьетнам) // Научные ведомости. Серия Естественные науки. № 10 (181). Выпуск 27. С. 138-144].
- Tam P.D. 2007. *Assessment of Watershed Protection Plantations of Mixed Acacia and Native Species in the Five Million Hectare Reforestation Program*. Forest Science Institute of Vietnam, Hanoi (In Vietnamese).

Поступила в редакцию: 22.05.2023  
Переработанный вариант: 18.08.2023

## MOSCOW REGION'S SWAMP FORESTS MAPPING FOR INVENTORY OF SOIL CH<sub>4</sub> AND CO<sub>2</sub> FLUXES

Ilyasov D. V.<sup>1\*</sup>, Mochenov S. Y.<sup>1</sup>, Rokova A. I.<sup>2</sup>, Glagolev M. V.<sup>1,2,3</sup>, Kupriianova I. V.<sup>1</sup>,  
Suvorov G. G.<sup>1</sup>, Sabrekov A. F.<sup>1</sup>, Terentieva I. E.<sup>4</sup>

<sup>1)</sup> Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

<sup>2)</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

<sup>3)</sup> Институт лесоведения РАН, г. Успенское (Московская область)

<sup>4)</sup> University of Calgary, Calgary

\*d\_ilyasov@ugrasu.ru

**Citation:** Ilyasov D.V., Mochenov S.Y., Rokova A.I., Glagolev M.V., Kupriianova I.V., Suvorov G.G., Sabrekov A.F., Terentieva I.E. 2023. Moscow region's swamp forests mapping for inventory of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 116-131.

**DOI:** 10.18822/edgcc568952

Учет непостоянных источников метана и диоксида углерода, характеризующихся большой изменчивостью потоков в пространстве и/или во времени необходим для полноценной инвентаризации бюджета углерода в наземных экосистемах России. В статье представлена простейшая инвентаризация годовой эмиссии метана и диоксида углерода почвами заболоченных лесов Московской области, основанная на трехлетнем мониторинге потоков CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> и карты их распространения в рассматриваемом регионе, построенной на основе спутниковых данных Landsat-8. Суммарная площадь заболоченных лесов различной степени увлажнения в Московской области составила 292 249 га. Общая точность классификации составила 76%. Эмиссия метана из экосистем заболоченных лесов составила 0.25 (1Q – 0.02; 3Q – 1.45) MmCO<sub>2</sub>-экв в год, диоксида углерода 5.40 (1Q – 2.16; 3Q – 9.92) MmCO<sub>2</sub> в год.

**Ключевые слова:** заболоченные леса, ГИС-картография, эмиссия метана, Landsat-8.

**Introduction.** Methane and carbon dioxide are the most important greenhouse gases, the increase in the concentration of which in the atmosphere is the main cause of climate change [Taylor and Penner, 1994; Drösler et al., 2014; Hoegh-Guldberg et al., 2019]. In addition to relatively constant sources of methane and carbon dioxide into the atmosphere (such as oligotrophic bogs of the boreal zone), there are sporadic sources (SS): intermittently flooded floodplains, boreal swamp forests, some intermittently swamp forests, etc. Despite the variability of SS as sources of methane, CH<sub>4</sub> fluxes in floodplains and in swamp forests can reach 0.1–12.5 [Whalen et al., 1991; Van Huissteden et al., 2005; Terentieva et al., 2019] and 0.7 – 17.1 mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> [Moore and Knowles, 1990; Ambus and Christensen, 1995; Aronson et al., 2012; Koskinen et al., 2016; Glagolev et al., 2018], respectively. These values are comparable, and exceed those observed in bogs under certain conditions (a combination of soil moisture and temperature, and other factors) [Gulledge and Schimel, 2000; Vasconcelos et al., 2004; Ullah and Moore, 2011; Shoemaker et al., 2014; Christiansen et al., 2017; Torga et al., 2017; Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018]. Unfortunately, in Russia, studies of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes from sporadic sources are extremely limited (one-time measurements were performed without reference to spatial, seasonal, and interannual variability of conditions) and were carried out mainly in Western Siberia [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentieva et al., 2019] and the European part of Russia [Kuznetsov and Bobkova, 2014; Ivanov et al., 2018; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022]. In general, medium-scale (at the Federal subject level) studies of bogs and forests in Russia have not been carried out in all regions, although they are of particular interest due to the possibility of maintaining a balance between the detailing of estimates and the magnitude of spatiotemporal coverage [Zatsarinnaya and Volkova, 2011; Grishutkin et al., 2013; Baisheva et al., 2015; Ilyasov et al., 2019; Suslova, 2019]. Besides, estimates made throughout the country require clarification at the regional level [Vompersky et al., 2005]. The aim of our work was the simplest inventory of swamp forests of the Moscow region as sources of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> using GIS mapping and field measurements.

**Objects and methods.** The basis for the map of swamp forests of the Moscow region (hereinafter, by this term we mean the total territory of Moscow and the Moscow region) was a mosaic of 6 Landsat-8 satellite images. The mapping was carried out using the Supervised Classification algorithm in the Multispec program (Purdue Research Foundation, USA). For each decryption class, at least 7 training polygons were set and the classification module was launched using the maximum likelihood estimation. After the classification, the decryption classes were combined into typological ones: “forest” (automorphic forests), “water surfaces” (rivers, lakes, other water bodies), “swamp forest” (excessively moist forests with a water table level (WTL), predominantly located on the soil surface or close to it) and “wet forest” (excessively moist forests with predominant WTL below the soil surface). We considered the classes of swamp forests and wet forests, regardless of the presence or absence of peat layer in them: the key criterion was WTL. To assess the accuracy of the classification, an error matrix was compiled. For that purpose, on the resulting map, the first operator identified 75 points evenly distributed in space within each typological class; the coordinates of these points without specifying the belonging to the class were randomly sorted and passed to the second operator. Further, the points were assigned to one of the mapped classes based on “blind” visual expert interpretation using ultra-high resolution satellite images. The overall classification accuracy was determined as the ratio of the sum of points, whose mapped and real classes coincide, to the total number of points (Table 1).

Measurements of carbon dioxide and methane fluxes were carried out from 2019 to 2022 in the Dorokhovo mixed black alder moist grass forest, located 66 km west of the border of Moscow, using the static chamber method [Hutchinson and Mosier, 1981; Terent'eva et al., 2017]. Opaque chambers were used in the measurements, so the term “CO<sub>2</sub> flux” used in the paper implies the sum of the respiration of the soil-grass-moss cover. The calculation of the annual flux of methane and carbon dioxide from the swamp forests of the Moscow region was performed seasonally using the simplest inventory method [Glagolev, 2010]:

$$E = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times f_i \times T_j)$$

where  $A_{ij}$  – is the area (m<sup>2</sup>) occupied by the  $i$ -th source type in the  $j$ -th region;  $f_i$  – is the surface flux density (mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), characteristic of the  $i$ -th source type;  $T_j$  – is the duration of the emission period (hour), characteristic of the  $j$ -th region. The duration of the methane emission period within individual seasons was taken on the basis of hydrothermal coefficients and the radiation index as follows: summer – 122 days (from June to September inclusive), autumn – 76 days (from October to mid-December), winter – 90 days (from mid-December to mid-March), spring – 77 days (from mid-March to the end of May). The surface flux density was calculated as the median (and also 1Q, 3Q) for the considered season based on all observations.

**Results.** The resulting map of swamp forests of the Moscow region is shown in Figure 1 and is characterized by the following areas of typological classes: “forest” - 2,157,716 ha, “water surfaces” 45,693 - ha, “swamp forest” - 58,384 ha, “wet forest” - 233,865 ha. Thus, the total share of forest ecosystems that are able to function as sources of methane - swamp forests and wet forests - is 1.2 and 5.0% of the region's area, respectively (in total 292,249 ha). According to the map, swamp forests are predominantly small ecosystems (from small ones with an area of 3-5 ha, which are extremely widespread, to larger ones, with an area of 30-50 ha, which are somewhat less common), which are exposed to excessive moisture as a result of their location on the outskirts of wetland massifs, near river floodplains, in small local relief depressions, as well as in elements of a ravine-gully planting (mainly in the southern part of the Moscow region). Wet forests are located in more drained areas, often associated with swamp forests in a single landscape structures, but they are much more widespread, and often occupy significantly larger areas: from 10–50 to 100–500 ha.

The error matrix of the resulting map is presented in Table. 1. The overall classification accuracy (the ratio of the sum of the elements of the main diagonal of the error matrix to the sum of checkpoints by class) is 76%. Water surfaces with the highest possible producer's accuracy (100%) are most accurately identified. The “other” class has the same user's accuracy as water surfaces (93%), but poorly less producer's accuracy (74%). In general, the classes of swamp and wet forests are the least accurately defined (36–46%): they have significant intersections with all classes except that for the open water surface, and, most importantly, with each other. In order to achieve a reasonable classification accuracy and to make further calculations of the regional flow, we combined the “swamp forest” and “wet forest” classes into one: in this case, the user's accuracy of the combined class was 65%, and the producer's accuracy was 74%, which allows us to fairly accurately predict the location of forests of varying degrees of waterlogging when they are considered together.

Generalized results of measurements of methane and carbon dioxide fluxes by seasons and their brief statistical characteristics are presented in Table. 2. The simplest inventory based on the proposed approach makes it possible to estimate the methane flux from the soils of swamp forests with different degrees of waterlogging at  $6666 \text{ tC yr}^{-1}$  (1Q – 407; 3Q – 38790); carbon dioxide at  $1.5 \text{ MtC yr}^{-1}$  (1Q – 0.6; 3Q – 2.7). Taking into account the 100-year global warming potential for methane equal to 28 [Drösler et al., 2014], the total emission of methane and carbon dioxide from the soils of swamp forests with different degrees of waterlogging was  $5.7 \text{ MtCO}_2\text{-eq yr}^{-1}$  (1Q – 2.2; 3Q – 11.4)<sup>1</sup>. More detailed information obtained on the basis of the simplest inventory presents in table 3.

**Discussion.** According to the data of the Great Russian Encyclopedia [Osipov et al., 2004], the area of automorphic forests in the Moscow region in 2015 amounted to 1,896,000 ha, which is in good agreement with the data obtained based on the current classification (the area of the “forest” class amounted to 2,157,716 ha). The distribution of swamp forests in the north of the Moscow region, observed on the resulting map, corresponds to swamp black alder, downy birch forests, as well as forests with gray alder on the map of G.N. Ogureeva et al. [1996]. In the southeastern part of the Moscow region, the areas occupied by swamp forests, according to the results of satellite data classification, are identical to the distribution of downy birch and pine-spruce-long-moss-sphagnum forests along the edges of wetlands. Wet forests are located to the south of the Ruza Reservoir correspond to spruce forests with gray alder, whereas those located to the northwest of the town of Klin are associated with black alder forests and pine-spruce forests with black alder (Ogureeva et al., 1996). The area occupied by swamp and wet forests identified in the current work is comparable to that of distribution of forests with black and gray alder (5.01 and 1.44% of the area of the region) provided in (Kotlov and Chernenkova, 2020), which indirectly confirms the assessment adequacy of the share of the territory occupied by wetland forest ecosystems identified in our work.

One of the main problems of GIS cartography based on remote sensing data is the poor availability of ground-based data or the inability to check map errors by field methods due to the wide coverage of the study area. However, the classification accuracy of 60-70% is the rule rather than the exception [Kotlov and Chernenkova, 2020] and is considered satisfactory. We anticipate that GIS mapping that combines multiple cartographic sources at its core (for example, by calculating a median estimate based on multiple maps) will improve the final result in the future.

**Conclusion.** The total area of swamp forests and wet forests in the Moscow Region is 292,249 ha. The emission of methane from these ecosystems is 0.25 (1Q – 0.02; 3Q – 1.45)  $\text{MtCO}_2\text{-eq}$  per year, whereas that of carbon dioxide is 5.40 (1Q – 2.16; 3Q – 9.92)  $\text{MtCO}_2$  per year. The highest total emission of methane and carbon dioxide from wetlands is observed in the summer-autumn period, gradually decreasing by the beginning of winter and increasing again (to the level of autumn values) in spring. The value of the total emission of the main carbon-containing gases from the soils of swamp forests of the European part of the Russian Federation should be taken into account when quantifying all significant sources and sinks.

**Key words:** swamp forests, GIS-cartography, methane emission, Landsat-8.

---

<sup>1</sup> The annual total methane flux was calculated as follows: the median of measurements for each of the season (0.14, 0.74, 0.02 and 0.25  $\text{mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , for summer, autumn, winter and spring, respectively) was multiplied by the number of hours in days, by the corresponding length of the season (122, 76, 90 and 77 days), then by the wetland forest area ( $2.922 \times 10^9 \text{ m}^2$ ), and finally by a correction factor ( $10^9$ ) to convert  $\text{mgC}$  to  $\text{tC}$ . The annual total carbon dioxide flux was calculated in a similar way (the difference was in the value of the correction factor, which was  $10^{-15}$  for converting  $\text{mgC}$  to  $\text{MtC}$ ). When converting the  $\text{CH}_4$  flux (expressed in  $\text{tC yr}^{-1}$ ) to  $\text{MtCO}_2\text{-eq yr}^{-1}$ , the original value was multiplied by 16/12 (the ratio of the molar mass of  $\text{CH}_4$  to the molar mass of C), then by 28 (100-year global warming potential) and, finally, by a correction factor ( $10^6$ ) to convert tons to megatons. To calculate the total flux consisting of emissions of  $\text{CH}_4$  ( $\text{MtCO}_2\text{-eq year}^{-1}$ ) and  $\text{CO}_2$  ( $\text{MtC year}^{-1}$ ), the latter was multiplied by 44/12 (the ratio of the molar mass of  $\text{CO}_2$  to the molar mass of C) and added.

## ВВЕДЕНИЕ

### Используемые сокращения

н.у.м. – над уровнем моря;  
СИ – спорадические источники;  
УПГВ – уровень почвенно-грунтовых вод;  
Q – квартал.

### Заболоченные леса как спорадические источники метана

Метан и диоксид углерода – важнейшие парниковые газы, рост концентрации которых в атмосфере является основной причиной климатических изменений [Taylor and Penner, 1994; Drösler et al., 2014; Hoegh-Guldberg et al., 2019]. Одним из основных естественных источников метана и важным элементом круговорота диоксида углерода между наземными экосистемами и атмосферой являются болота [Matthews and Fung, 1987; Moore, 2002; Drösler et al., 2014].

Некоторые болотные экосистемы, например, олиготрофные бореальные, характеризуются относительным постоянством факторов метаногенеза и обмена диоксида углерода [Kelly and Chynoweth, 1981; Megonigal et al., 2004; Mitsch et al., 2013; Davydov et al., 2021]. Другие – напротив, резко меняющимися условиями увлажнения, температурного режима почвы и других экологических параметров, что приводит к существенной пространственно-временной изменчивости потоков метана и диоксида углерода [Whalen et al., 1991; Gullledge and Schimel, 2000; Koskinen et al., 2016]. Такими экосистемами являются периодически затапливаемые поймы рек, заболоченные леса бореальной зоны, леса периодического избыточного увлажнения и др. (здесь и далее спорадические источники – СИ; под заболоченными лесами мы подразумеваем любые леса, характеризующиеся постоянным или периодическим избыточным увлажнением, т.е. УПГВ, приближающимся или оказывающимся выше поверхности почвы в течение всего года или отдельных сезонов) [Whalen et al., 1991; Gullledge and Schimel, 2000; Koskinen et al., 2016; Terentieva et al., 2019].

Несмотря на непостоянство СИ как источников метана, потоки в поймах рек могут достигать 0.1 – 12.5 [Whalen et al., 1991; Van Huissteden et al., 2005; Terentieva et al., 2019], а в заболоченных лесах -0.7 – 17.1 мгС м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> [Moore and Knowles, 1990; Ambus and Christensen, 1995; Aronson et al., 2012; Koskinen et al., 2016; Glagolev et al., 2018]. Эти величины сопоставимы, а при определенных условиях (сочетание влажности и температуры почвы) превышают наблюдаемые в болотах [Gullledge and Schimel, 2000; Vasconcelos et al., 2004; Ullah and Moore, 2011; Shoemaker et al., 2014; Christiansen et al., 2017; Torga et al., 2017; Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018].

Таким образом, даже несмотря на высокую пространственно-временную изменчивость потоков метана и диоксида углерода из СИ, их учет необходим для полноценной инвентаризации углеродного баланса наземных экосистем. Подобные исследования особенно актуальны в контексте современных климатических изменений [Гулев и др., 2008]. Ратификация Россией Парижского соглашения подразумевает не только выполнение обязательств по ограничению выбросов углеродсодержащих газов, но и необходимость формирования национальной отчетности по углеродному балансу. Для этого в 2022 году в России запущен важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», который подразумевает выполнение работ по Федеральной научно-технической программе в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений до 2030 года.

К сожалению, на территории России исследования потоков СН<sub>4</sub> и СО<sub>2</sub> из спорадических источников крайне ограничены (выполнялись разовые измерения без привязки к пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости условий), причем проводились они в основном на территории Западной Сибири [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentieva et al., 2019] и европейской части России [Кузнецов и Бобкова, 2014; Иванов и др., 2018; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022]. Вообще средномасштабные (на уровне субъектов РФ) исследования болотных и лесных экосистем на территории России представлены далеко не во всех регионах, хотя вызывают особый интерес в силу возможности сохранения баланса между детальностью оценок и пространственно-

временным охватом [Зацаринная и Волкова, 2011; Гришуткин и др., 2013; Баишева и др., 2015; Ильясов и др., 2019; Сулова, 2019], а инвентаризации, выполненные на территорию всей страны, требуют уточнения на региональном уровне [Вомперский и др., 2005].

Целью нашей работы стала инвентаризация избыточно увлажненных лесов Московской области (как источников  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  из почв) путем ГИС-картографирования и наземных измерений. Поскольку согласно одному из распространенных подходов к оценке региональных потоков парниковых газов («простейшая инвентаризация»), для расчетов необходимы (i) продолжительности периодов, в течение которых происходит выделение или потребление парниковых газов; (ii) величины удельных потоков из изучаемых экосистем; (iii) площади распространения данных экосистем, то определение этих величин составляло основные задачи работы.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Типологическая карта заболоченных лесов

Московская область располагается в центральной части Восточно-Европейской равнины в подзоне южной тайги. Здесь распространены хвойно-широколиственные и широколиственные леса. С севера-запада на юго-восток залесенность территории снижается, значительная часть области покрыта смешанными лесами. Основными породами являются ель обыкновенная (*Picea abies*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), клен остролистный (*Acer platanoides*), вяз гладкий (*Ulmus laevis*) и вяз шершавый (*Ulmus glabra*). В заболоченных местностях распространены ольха черная (*Alnus glutinosa*), черемуха (*Prunus padus*) и ива козья (*Salix caprea*) [Огурева и др., 1996].

Основой для карты заболоченных лесов Московского региона (здесь и далее под этим термином мы подразумеваем общую территорию г. Москвы и Московской области) стала мозаика из 6 снимков спутника Landsat-8, которые были получены в 2021 году: два снимка – 8 июля (координаты в системе навигации Global Visualization Viewer WRS-2 path/raw: 176/21, 176/22), два – 6 июля (178/21, 178/22) и по одному – 10 мая (179/21) и 18 июня (180/21). Мозаика из полученных снимков покрывает всю территорию Московской области. Конвертация исходных данных производилась в программе Grass 7.6 (GRASS Development Team, США) поканально. Для преобразования значений пикселей, представленных в условных относительных единицах (DN – Digital Numbers), в реальные значения приходящего на сенсор спутника излучения использовалась радиометрическая калибровка при помощи модуля `i.landsat.toar` программы Grass 7.6. Атмосферная коррекция снимков была выполнена на основе модели 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) обратного излучения солнечной радиации от объекта к съемочной аппаратуре [Vermote et al., 2006] при помощи модуля `i.atcorr`, программы Grass 7.6. После получения результатов атмосферной коррекции и объединения 7 каналов каждого снимка в программе QGIS 3.16.5 (QGIS Development Team, США) из 6 снимков была получена мозаика в программе Saga Gis 2.3.2 (SAGA Development Team, Германия).

Процесс дешифрирования был проведен по алгоритму классификации с обучением (Supervised Classification) в программе Multispec (Purdue Research Foundation, США). При задании эталонных полигонов соблюдены следующие условия [Terent'eva et al., 2017]:

- 1) максимальная гомогенность, спектральные неоднородности недопустимы;
- 2) площадь  $\geq 6$  пикселей;
- 3) определение типа ландшафтов на основе спектральных данных, использование снимков сверхвысокого разрешения и вспомогательных данных в качестве справочной информации (положение в рельефе, структура и текстура [Усова, 2009]).

После того, как не менее 7 эталонных полигонов были включены в каждый дешифровочный класс, запускали модуль автоматической классификации, который классифицировал всю территорию мозаики по методу максимального подобия. Далее дешифровочные классы были объединены в типологические: «лес» (автоморфные леса), «водные поверхности» (реки, озера, иные водные объекты), «заболоченный лес» (избыточно

увлажненные леса с УПГВ, близким или находящимся на поверхности почвы), «слабо заболоченный лес» (избыточно увлажненные леса с УПГВ ниже поверхности почвы). Кроме того, города и поселения, дороги, пашни и др. объекты, не представляющие интерес как объекты классификации в рамках текущей работы, были объединены в класс «другое». Заключительным этапом формирования карты заболоченных лесов стала генерализация и ликвидация шумов с помощью модуля «отсеивание» (QGIS 3.16.5; порог отсеивания 10 пикселей) и отсечение по «внешним» границам Московской области.

Оценка точности проведенной классификации была осуществлена при помощи матрицы ошибок [Stehman, 2004; Sagi et al., 2021]. Для этого на полученной карте первый оператор (далее – «пользователь») вручную отметил по 75 точек внутри границ каждого класса («расчетный класс»). Точки были созданы в виде векторного слоя в программе QGIS 3.16.5 и для них автоматически были получены координаты: долгота и широта. Таким образом, пользователь обладал следующим набором данных: географические координаты для 75 точек внутри каждого расчетного класса и их принадлежность к тому или иному расчетному классу, которая выражалась цифровым кодом. Затем графа принадлежности каждой точки к тому или иному классу была скрыта, координаты точек случайным образом отсортированы и переданы второму оператору («производитель»). Таким образом, производитель не знал, к какому расчетному классу на карте относится та или иная точка. Его задача состояла в том, чтобы «вслепую» (то есть, не просматривая созданную карту) присвоить каждой точке код одного из классов, основываясь на проверочном источнике данных («реальный класс»). Это было осуществлено путем просмотра метаположения, соответствующего каждой точке на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения (Google Earth). После того, как производитель «вслепую» отнес все точки к тому или иному классу на карте, он передавал их обратно пользователю, который теперь обладал: географическими координатами точек, кодом класса, который для этих точек был представлен на созданной карте, и кодом класса, который для этих точек был представлен на карте сверхвысокого разрешения (по мнению производителя). Далее проводился расчет общей точности классификации ( $A$ ):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^M E_i}{\sum_{i=1}^M R_i},$$

где  $E_i$  – число точек, чей расчетный и реальный классы совпадают (элементы главной диагонали матрицы ошибок);  $M$  – число классов;  $R_i$  – общее число проверочных точек (375; табл. 1). Общая точность классификации ( $A$ ) отражает вероятность того, что результат классификации совпадает с проверочной информацией. Для каждого расчетного класса ( $i$ ) также оценивалась точность производителя (producer's accuracy,  $PA_i$ ):

$$PA_i = E_i / C_i,$$

где  $C_i$  – суммарное число точек того или иного расчетного класса, попавших в реальный  $i$ -ый класс (сумма элементов строк матрицы). Например, в таблице 1 число точек расчетного класса «Лес» (45), к отнесенным производителем в реальный класс «Лес» (79) составляет  $45/79 = 0.57$ . Точность производителя показывает долю точек на расчетной карте, совпавших с проверочными данными. Аналогично оценивалась точность пользователя (user's accuracy,  $UA_i$ ):

$$UA_i = E_i / PR_i,$$

где  $PR_i$  – число проверочных точек для каждого расчетного класса (75; сумма элементов столбцов матрицы). Точность пользователя показывает долю точек проверочных данных, совпавших с картой.

### Измерения потоков $\text{CH}_4$ и $\text{CO}_2$ в заболоченных лесах

Измерения потоков диоксида углерода и метана были осуществлены с 2019 по 2022 годы в смешанном черноольховом (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) влажнотравном лесу «Дорохово» с *Picea abies* (L.) H. Karst., *Betula pubescens* Ehrh., в меньшей степени с *Populus tremula* L., *Tilia cordata* Mill. и *A. incana* (L.) Moench., расположенном в 66 км к западу от границы г. Москвы. Всего было проведено 12 полевых кампаний: 5–24 августа 2019 года (лето); 5–25 июля, 24–25 октября 2020 года (осень); 8–9 марта («зима» – температура воздуха достигала  $-16^\circ\text{C}$ ), 3–4 мая (весна), 10–11 и 29–30 августа (лето), 9–10 октября (осень), 6 ноября (осень) 2021 года; 9 января (зима), 26 февраля (зима) и 2 мая (весна) 2022 года. Растительный покров представлен *Picea abies* (L.) H. Karst., *Betula pubescens* Ehrh., в меньшей степени с *Populus tremula* L., *Tilia cordata* Mill. и *A. Incana* (L.) Moench. Заболоченный лес расположен на склоне с максимальной абсолютной высотой около 230 м н.у.м. и перепадом высот 5–10 м/100 м. Верхняя часть склона дренирована и занята смешанным лесом. Нижняя часть склона (абсолютная высота которой около 220 м н.у.м.) примыкает к выровненной заболоченной поверхности, которая практически лишена древесной растительности и характеризуется круглогодичным стоянием воды выше поверхности почвы. Весьма вероятно, что этому способствуют окружающие склоны, выполняющие роль дополнительного водосбора.

Потоки метана и диоксида углерода измерены при помощи статического камерного метода [Hutchinson and Mosier, 1981; Terent'eva et al., 2017]. Измерения проводили в 2–4 кратной временной повторности днем в период с 11 до 17 часов по местному времени. Время экспозиции камер при отборе проб метана составляло: 9 – 20 минут при уровне почвенно-грунтовых вод (УПГВ) выше поверхности почвы; 20 – 45 минут при УПГВ от поверхности почвы до 15 – 25 см ниже нее; 45 – 60 минут при УПГВ ниже 25 см под поверхностью почвы. Время экспозиции при отборе проб диоксида углерода варьировало в зависимости от сезона: 6 – 9 минут летом и весной 15 – 20 минут осенью, и 60 минут зимой. Пробы газа из камер отбирали в медицинские шприцы объемом 12 и 20 мл в случае метана и диоксида углерода соответственно и закупоривали резиновой пробкой. Концентрацию метана (с 2019 г. до октября 2020 г.) в пробах определяли при помощи модифицированного хроматографа ХПМ-4 («Хроматограф», СССР), оснащенного пламенно-ионизационным детектором. Диаметр колонки – 2.5 мм; длина – 1 м; температура –  $30^\circ\text{C}$ ; сорбент – «Совпол», 80–100 mesh; газ-носитель – водород, скорость потока – 5 мл/мин. С октября 2020 г. концентрацию  $\text{CH}_4$  определяли на модифицированном хроматографе Автохром («Манометр», Россия), с идентичными характеристиками колонки, газа-носителя и скорости потока. Используемый сорбент – «Полисорб» (80–100 mesh). Для калибровки в обоих случаях использовали смесь воздуха и метана с итоговой концентрацией  $\text{CH}_4$   $5.00 \pm 0.01$  ppm (National Institute for Environmental Studies, Япония) при допущении, что регрессионная прямая пересекала ось ординат калибровочного графика (в координатах мВ–ppm) на значении 13 мВ. Объем вводимой пробы – 1.5 мл. Концентрацию метана в каждом шприце оценивали в 3–4 повторностях.

Концентрацию диоксида углерода в отобранных из камер пробах определяли не позднее, чем через 10 часов. Для анализа использовался инфракрасный газоанализатор EGM-4 (PP Systems, США). Отобранные пробы из шприцев последовательно вводили в газоанализатор (суммарный объем кюветы EGM-4 и шлангов для ввода не превышал 7 мл) при выключенном насосе в единичной повторности: объем вводимой пробы составлял 20 мл, что обеспечивало многократную промывку кюветы. Заявленная производителем погрешность измерения составляет  $<1\%$  от диапазона измеряемых концентраций, что составляет менее 10 – 20 ppm для наших исследований (диапазоны концентраций 0 – 1000, 0 – 2000 ppm).

Удельные потоки метана и диоксида углерода были рассчитаны при помощи линейной регрессии в случае эмиссии и нелинейной (экспоненциальной) регрессии при потреблении, в координатах концентрация газа (в объеме камеры) – время [Kahaner et al., 1989; Sabrekov et al., 2016; Глаголев и др., 2017]. Поскольку при измерениях использовались непрозрачные камеры, то везде в данной статье «поток  $\text{CO}_2$ » отражает суммарное дыхание почвенно-травяно-мохового покрова.

### Инвентаризация потоков $\text{CH}_4$ и $\text{CO}_2$ в заболоченных лесах

Расчет годового потока метана и диоксида углерода из заболоченных лесов Московского региона был выполнен посезонно методом простейшей инвентаризации (ранее использовался термин «метод стандартной модели») [Глаголев, 2008; 2010] на основе уравнения:

$$E = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times f_i \times T_j)$$

где  $A_{ij}$  – площадь ( $\text{м}^2$ ), занимаемая  $i$ -м типом почв в  $j$ -ой области;  $f_i$  – поверхностная плотность потока ( $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ), характерная для  $i$ -го типа почв;  $T_j$  – продолжительность периода эмиссии (час), характерная для  $j$ -ой области. Продолжительность периода эмиссии метана в рамках отдельных сезонов была принята на основе гидротермических коэффициентов и радиационного индекса следующим образом: лето – 122 дня (с июня по сентябрь включительно), осень – 76 дней (с октября до середины декабря), зима – 90 дней (с середины декабря до середины марта), весна – 77 дней (с середины марта до конца мая). Поверхностная плотность потока была рассчитана как медиана (а также 1Q, 3Q) за рассматриваемый сезон на основе всех наблюдений. При расчете годового потока мы пренебрегли суточной динамикой.

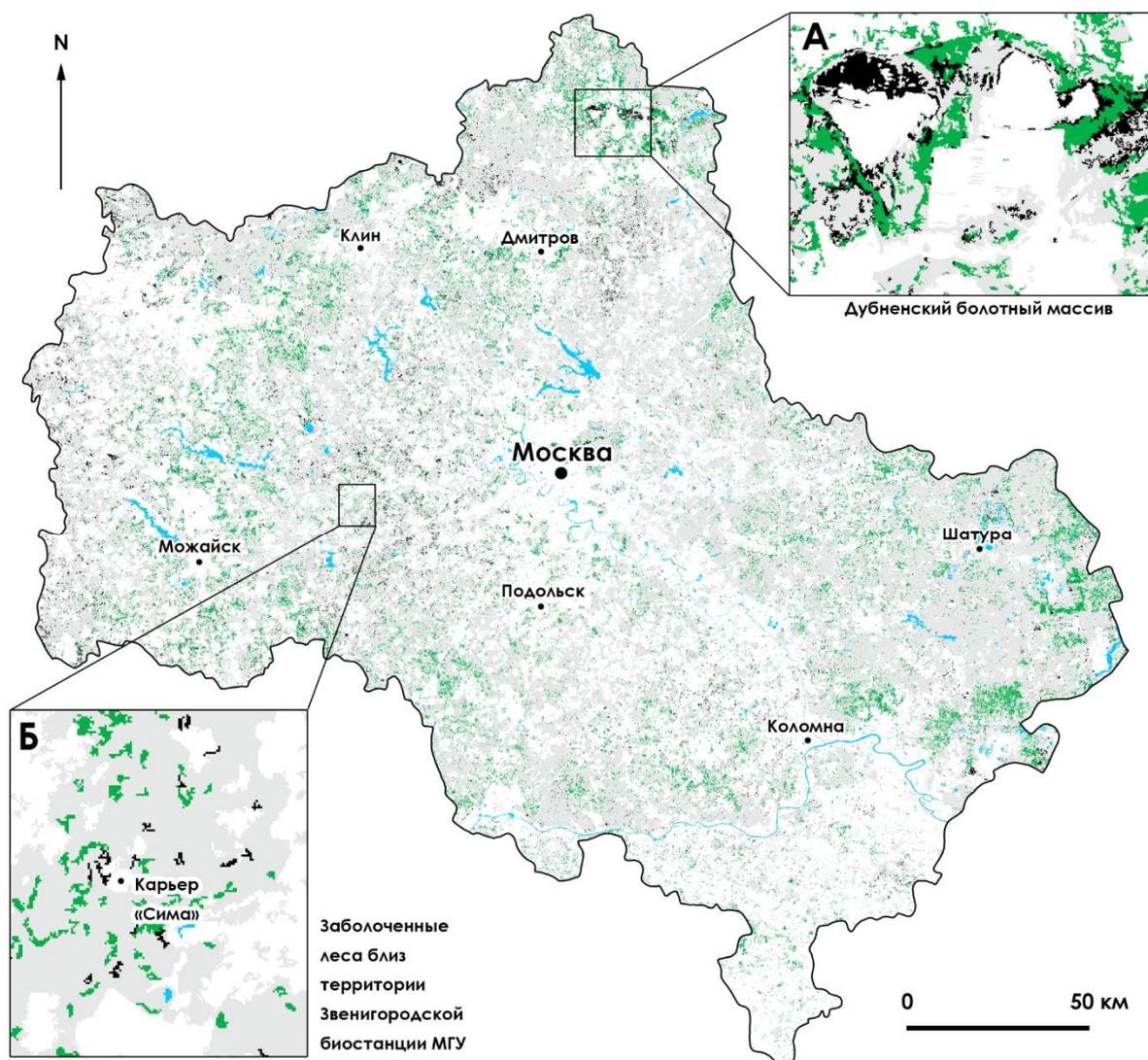
## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Карта заболоченных лесов Московского региона

Полученная карта заболоченных лесов Московского региона представлена на рисунке 1 и характеризуется следующими площадями типологических классов: «лес» – 2 157 716 га, «водные поверхности» 45 693 – га, «заболоченный лес» – 58 384 га, «слабо заболоченный лес» – 233 865 га.

Таким образом, суммарная доля лесных экосистем, которые способны функционировать как источники метана – заболоченные леса и слабо заболоченные леса – составляет 1.2 и 5.0% площади региона соответственно или 292 249 га. Согласно карте, заболоченные леса – это преимущественно небольшие экосистемы (от мелких – площадью 3 – 5 га, которые распространены крайне широко, до более крупных – площадью 30 – 50 га, встречающихся несколько реже), которые испытывают избыточное увлажнение в результате расположения по окраинам болотных массивов, поблизости от речных пойм, в мелких локальных понижениях рельефа, а также в элементах овражно-балочной сети (преимущественно в южной части Московской области). Слабо заболоченные леса расположены на более дренированных участках, они часто связаны с заболоченными лесами в единые ландшафтные структуры, однако распространены значительно шире, и занимают существенно большие площади: от 10 – 50 до 100 – 500 га.

Заболоченные и слабо заболоченные леса, согласно полученной карте, являются «спутниками» распространения болотных экосистем и расположены в Московской области неравномерно: крупные площади обнаружены в северной (Дмитровский район) и восточной частях (Шатурский район) региона (рисунок 1а). Кроме того, заболоченные и слабо заболоченные леса часто представлены как избыточно увлажненные участки близ автоморфных лесов: площадь таких экосистем незначительна и редко превышает 10 га (рисунок 1б). Предположительно, основной причиной такого локального заболачивания являются особенности микрорельефа (как и в случае заболоченного леса «Дорохово», где были проведены измерения потоков парниковых газов), и подтопление в местах формирования ручьев и более мелких водотоков.



**Рисунок 1.** Карта заболоченных (черный) и слабо заболоченных (зеленый) лесов Московского региона. Серым показаны лесные массивы, голубым – водные поверхности, белым – города и поселения, дороги, пашни и др. объекты.

**Таблица 1.** Матрица ошибок и точность классов для результатов классификации

		Расчетные классы					$C_i$	Точность производителя ( $PA_i$ )	
		Лес	Водные поверхности	Заболоченный лес	Слабо заболоченный лес	Прочее			
Реальные классы	Лес	45	1	16	16	1	79	0.57	
	Водные поверхности	0	70	0	0	0	70	1.00	
	Заболоченный лес	10	0	27	19	3	59	0.46	0.74
	Слабо заболоченный лес	20	0	22	30	1	73	0.41	
	Прочее	0	4	10	10	70	94	0.74	
$PR_i$	75	75	75	75	75	375			
Точность пользователя ( $UA_i$ )		0.60	0.93	0.36	0.40	0.93			
				0.65					

Матрица ошибок полученной карты представлена в табл. 1. Общая точность классификации (отношение суммы элементов главной диагонали матрицы ошибок к сумме

проверочных точек по классам) составляет 76 %. Ранжирование классов по показателям точности производителя и точности пользователя убывает в ряду: «водные поверхности», «прочее», «лес», «слабо заболоченный лес», «заболоченный лес». Наиболее точно классифицируются водные поверхности с максимально возможной точностью производителя (100%). Класс «прочее» имеет такую же точность пользователя, как и водные поверхности (93%), но несколько меньшую точность производителя (74%). В целом наименее точно определены классы заболоченных и слабо-заболоченных лесов (36 – 46%): они имеют значительные пересечения со всеми классами кроме открытой водной поверхности, и, что наиболее важно, наибольшие – между собой.

Основываясь на полученных результатах оценки точности карты, можно заключить, что заболоченные и слабо заболоченные леса – это экосистемы, которые достаточно трудно различить между собой, основываясь на дистанционных данных единичных (во времени) спутниковых снимков и использовании классификации с обучением. Для достижения разумной точности классификации и при дальнейших расчетах регионального потока мы объединили два класса: «заболоченный лес» и «слабо заболоченный лес» в один: при этом точность пользователя объединенного класса составила 65%, а точность производителя – 74%, что позволяет достаточно точно предсказывать местоположение лесов разной степени заболоченности при их совместном рассмотрении.

### Потоки $\text{CH}_4$ и $\text{CO}_2$ и их инвентаризация

Обобщенные результаты измерений потоков метана и диоксида углерода по сезонам и их краткие статистические характеристики представлены в табл. 2. Медианы потоков метана возрастали в ряду: зима – лето – весна – осень, потоков диоксида углерода – в ряду зима – осень – весна – лето. Единственным сезоном года, когда эмиссия метана вероятнее всего не прекращалась, является весна – первый квартиль величины потоков  $\text{CH}_4$  в это время был больше нуля. Летом и осенью эмиссия метана из почв заболоченных лесов достигала 2.0 – 2.6  $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ , что сопоставимо с болотными экосистемами. Потоки диоксида углерода в заболоченных лесах в целом слабо отличаются от величин, характерных для почв лесных экосистем, а относительная величина сезонной амплитуды сопоставима с таковой для метана в течение года. В целом полученные результаты оценки потоков в заболоченных лесах близки в сравнении с имеющимися литературными данными [Sabrekov et al., 2013; Mochenov et al., 2018; Glagolev et al., 2018; Terentjeva et al., 2019; Glukhova et al., 2021; Glukhova et al., 2022].

Инвентаризация<sup>2</sup>, выполненная на основе предложенного подхода, позволяет оценить поток метана из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения в 6 666  $\text{тС год}^{-1}$  (1Q – 407; 3Q – 38 790); диоксида углерода в 1.5  $\text{МтС год}^{-1}$  (1Q – 0.6; 3Q – 2.7). С учетом столетнего потенциала глобального потепления для метана, равного 28 [Drösler et al., 2014], суммарная эмиссия метана и диоксида углерода из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения составит 5.7  $\text{МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$  (1Q – 2.2; 3Q – 11.4). В табл. 3 представлена более подробная информация, полученная на основе простейшей инвентаризации.

---

<sup>2</sup> В качестве примера расчетов потока метана за сезон рассмотрим летний период: медиана потока метана летом ( $0.14 \text{ мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ ) была умножена на произведение количества часов в сутках и продолжительность сезона ( $24 \times 122 = 2928 \text{ ч}$ ;  $2928 \times 0.14 = 415.8 \text{ мгС м}^{-2} \text{год}^{-1}$ ), затем на площадь заболоченных лесов ( $415.8 \times 2.922 \times 10^9 \text{ м}^2 = 1.215 \times 10^9 \text{ мгС год}^{-1}$ ), и, наконец, на поправочный коэффициент ( $10^{-9}$ ) для перевода  $\text{мгС}$  в  $\text{тС}$ . Расчеты для других сезонов были выполнены также и результаты суммированы. Суммарный за год поток диоксида углерода рассчитывали аналогичным образом (отличие заключалось в величине поправочного коэффициента, который составил  $10^{-15}$  для перевода  $\text{мгС}$  в  $\text{МтС}$ ). При пересчете потока  $\text{CH}_4$  (выраженного в  $\text{тС год}^{-1}$ ) в  $\text{МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$ , исходную величину умножали на 16/12 (отношение молярной массы  $\text{CH}_4$  к молярной массе  $\text{C}$ ), затем на 28 (100-летний потенциал глобального потепления) и, наконец, на поправочный коэффициент ( $10^{-6}$ ) для перевода тонн в мегатонны. Для расчета суммарного потока, состоящего из эмиссии  $\text{CH}_4$  ( $\text{МтCO}_2\text{-экв год}^{-1}$ ) и  $\text{CO}_2$  ( $\text{МтС год}^{-1}$ ), последнюю умножали на 44/12 (отношение молярной массы  $\text{CO}_2$  к молярной массе  $\text{C}$ ) и складывали.

**Таблица 2.** Статистические характеристики потоков метана и диоксида углерода по сезонам

	CH <sub>4</sub> , мгС м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup>				CO <sub>2</sub> , мгС м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup>			
	Медиана	1 квартиль (1Q)	3 квартиль (3Q)	n	Медиана	1 квартиль (1Q)	3 квартиль (3Q)	n
Лето	0.14	0.00	2.61	251	132	51	237	189
Осень	0.74	0.00	2.03	84	26	9	72	22
Зима	0.02	0.00	0.13	64	5	2	6	5
Весна	0.25	0.07	0.89	64	32	17	49	56

Подавляющую роль в общей величине выбросов (МтСО<sub>2</sub>-экв год<sup>-1</sup>) диоксида углерода и метана в течение года играет летний период (74% годовой эмиссии); осенний и весенний вносят сопоставимый вклад, составляющий в сумме около 24% годовой эмиссии; наконец, зимой эмиссия СО<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub> из почв заболоченных лесов разной степени увлажнения не превышает 2% от годовой. Несмотря на то, что эмиссия метана вносит относительно небольшой вклад в суммарные за год выбросы парниковых газов, в отдельные сезоны учет СН<sub>4</sub> играет более ощутимую роль: например, осенью доля СН<sub>4</sub> составляет почти треть выбросов от суммы СН<sub>4</sub> и СО<sub>2</sub>, зимой и весной около 10%. С учетом того, что почвы рассмотренных нами заболоченных лесов выбрасывают сопоставимое с автоморфными лесами количество диоксида углерода, недооцененным источником можно считать лишь эмиссию метана. Как было отмечено выше, верхняя граница оценки эмиссии метана составила до 38.8 тыс. тС в год соответственно, что может быть весьма ощутимо в масштабах Московского региона.

**Таблица 3.** Инвентаризация потока метана и диоксида углерода по сезонам на территории Московского региона из заболоченных и слабо заболоченных лесов

	CH <sub>4</sub> , тС год <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> , МтСО <sub>2</sub> -экв год <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> , МтСО <sub>2</sub> год <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub> МтСО <sub>2</sub> -экв год <sup>-1</sup>
	Медиана / 1Q / 3Q			
Лето	1 215 / 1 / 22 347	0.05 / 0.00 / 0.83	4.15 / 1.59 / 7.43	4.19 / 1.59 / 8.26
Осень	3 945 / 19 / 10 834	0.15 / 0.00 / 0.40	0.51 / 0.18 / 1.40	0.66 / 0.18 / 1.80
Зима	147 / 17 / 808	0.01 / 0.00 / 0.03	0.12 / 0.04 / 0.13	0.13 / 0.05 / 0.16
Весна	1 359 / 370 / 4 802	0.05 / 0.01 / 0.18	0.63 / 0.35 / 0.97	0.68 / 0.36 / 1.15
Сумма	6 666 / 407 / 38 790	0.25 / 0.02 / 1.45	5.40 / 2.16 / 9.92	5.65 / 2.17 / 11.37

## ОБСУЖДЕНИЕ

### Распространение заболоченных лесов различной степени увлажнения

В наибольшей степени лесные экосистемы всех типов увлажнения (от автоморфных до переходных и гидроморфных), распространены к северо-западу и юго-востоку от Москвы, в области Ламско-Дубненской и Мещерской низменностей, соответственно. Также, большая облесенность земель наблюдается к югу от Москвы, в границах Московской равнины в области рек Лопасня и Ока. Такое расположение лесных массивов определяется особым гидрофизическим режимом и местом в ландшафте (в понижениях происходит накопление влаги и формируются особые температурные условия). Спутниками автоморфных лесных массивов, вероятно, являются многочисленные мелкие заболоченные и слабо заболоченные участки: весьма вероятно, что с учетом среднего пространственного разрешения полученной карты (30 м) некоторые из них (находящиеся на границе генерализации в 10 пикселей) могут быть артефактом классификации и формировать значительную долю погрешности, полученную при расчете матрицы ошибок. Мы предполагаем, что такие экосистемы, скорее всего, являются непостоянными источниками метана, зависящими от количества выпадающих осадков. Более крупные по площади заболоченные леса постоянного избыточного увлажнения приурочены к понижениям рельефа, а также к участкам, расположенным близ болотных экосистем. Кроме того, достаточно большие по площади, заболоченные и слабо заболоченные леса распространены «пятнами» в массивах автоморфных лесов на юго-западе Московской области. Там, где, согласно карте, находятся большие площади, занятые заболоченными лесами, рядом расположены и слабо заболоченные леса. При увеличении степени увлажнения

от более высоких участков рельефа к более низким, наблюдается ряд: лес, слабо заболоченный лес, заболоченный лес, болото (рис. 1а).

Согласно данным Большой Российской энциклопедии [Осипов и др., 2004] площадь автоморфных лесов на территории Московской области в 2015 году составила 1 896 000 га, и с этой оценкой достаточно хорошо согласуются данные, полученные на основе текущей классификации (2 157 716 га). На юго-востоке Московской области высокая залесенность территорий отмечается только к северу от реки Оки, далее, в окрестностях г. Зарайск и реки Осётр начинается Заокское эрозионное плато, представляющее собой пологоволнистую равнину с развитой овражно-балочной сетью. Леса здесь занимают не более 5 – 7% площади, а сама территория подвержена эрозионным процессам [Барталев, 2006]. Вероятно, лишь незначительная доля этих лесов переувлажнены (в частности, те из них, что согласно созданной карте расположены в наиболее глубоких балках и оврагах) и являются источниками  $\text{CH}_4$ .

В целом, вне зависимости от занимаемой площади, заболоченные и слабо заболоченные леса приурочены к тем или иным понижениям рельефа разного размера и происхождения. Интересно, что в области Мещерской низменности крупных рек нет, но отмечается наличие большого количества озер: Карасово, Святое, Великое, Дубовое. Понижение в рельефе здесь также играет роль фактора скопления влаги, в том числе способствующего распространению заболоченных и слабо заболоченных лесов по окраинам водных объектов.

Результаты ГИС-картографирования в значительной степени совпадают с другими оценками по характеру распространения лесных массивов различной степени увлажнения. Например, аналогично карте растительности СССР [Карта растительности СССР] на севере от г. Москвы в районе г. Александров расположены небольшие по площади территории заболоченных лесов, тогда как на востоке в районе Мещерской низменности на обоих картах выделяются большие массивы лесов и территорий, подвергнутых периодическому переувлажнению. На карте растительности СССР места заболачивания приурочены к сосновым и дубовым лесам (дуб черешчатый, без граба), в то время в рамках текущей работы при наземных обследованиях чаще в переувлажненных местообитаниях встречались заболоченные широколиственные и смешанные леса с преобладанием ольхи, ели и березы. Такой тип леса на карте СССР выделяется на западе Московской области (на юге доходит до р. Ока, на севере плавно сменяется хвойным типом в районе р. Волга), однако, обозначения степени заболачиваемости земель отсутствуют. Также существуют сходства в расположении заболоченных местностей при сравнении с картой GLWD [Global...]: например, на востоке Московской области здесь распространены пресноводные болота в области пойменных равнин, в то время как на созданной карте – слабо заболоченные и заболоченные леса. К сожалению, подобных сходств между картами не наблюдается в других районах области, кроме расположения рек и озер, а также водных резервуаров. Весьма вероятно, что это связано с достаточно низким пространственным разрешением карты GLWD и относительно небольшой площадью, занимаемой отдельными заболоченными лесами.

Крайне важно сравнение полученных результатов с широко известной картой растительности Московской области [Огуреева и др., 1996]. Заболоченные и слабо заболоченные леса на севере региона (особенно в районе Дубненского болотного массива), соответствуют заболоченным черноольховым, пушистоберезовым лесам и лесам с серой ольхой; в южной они идентичны распространению пушистоберезовых и сосново-еловых-долгомошно-сфагновых лесов по крайкам болот; наконец, слабо заболоченные леса южнее Рузского водохранилища соответствуют еловым лесам с ольхой серой, а к северо-западу от г. Клин – черноольховым и сосново-еловым с черной ольхой на карте Г.Н. Огуреевой и др., [1996].

Также представляет большой интерес карта распространения различных типов лесных экосистем Московской области, выполненная путем анализа данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений [Kotlov and Chernenkova, 2020]. Площадь, занимаемая заболоченными и слабо заболоченными лесами, полученная в нашей работе, сопоставима с распространением лесов с черной и серой ольхой: 5.01 и 1.44% от площади региона [Kotlov and Chernenkova, 2020], что косвенно подтверждает адекватность полученной нами оценки степени заболоченности региона.

К сожалению, количество детальных работ по картографированию заболоченных лесных экосистем крайне ограничено, и будущее направление наших исследований будет состоять в улучшении точности карты заболоченных лесов с учетом результатов предшественников.

### **Точность классификации карты**

Одной из основных проблем ГИС-картографии на основе данных дистанционного зондирования является слабая обеспеченность наземными данными или отсутствие возможности проверки точности классификации полевыми методами из-за широкого охвата изучаемой территории. Тем не менее, точность классификации, достигающая 60-70%, полученная на основе методов, описанных выше, является скорее правилом, чем исключением [Kotlov and Chernenkova, 2020]. Мы предполагаем, что ГИС-картографирование, объединяющее в своей основе несколько картографических источников (например, в качестве медианной оценки с объединением данных текущей работы, а также более ранних карт [Огуреева и др., 1996; Kotlov and Chernenkova, 2020]) позволит улучшить итоговый результат. Кроме того, перспективным направлением является классификация разновременных космических снимков с целью выявления паттерна изменчивости спектральной информации исследуемых объектов во времени как признака дешифрирования; использование нейросетей позволяет оценить не только спектральную информацию данных дистанционного зондирования, но также форму и текстуру объектов, как дополнительных иных дешифровочных признаков [Терентьева и др., 2021].

Отметим также, что основной проблемой увеличения точности полученной карты являются затруднения, возникающие при разделении классов заболоченных и слабо заболоченных лесов. При наземных и экспертных оценках (на основе ДЗЗ сверхвысокого разрешения) явные различия между растительным покровом этих экосистем отсутствовали, хотя эмиссия метана между участками с различной степенью увлажнения может отличаться на порядок. Четкое разграничение данных двух классов может быть достигнуто в будущем при более детальном рассмотрении спектральных признаков и временной изменчивости характеристик их почвенного и растительного покрова.

### **Инвентаризация потоков $\text{CH}_4$ и $\text{CO}_2$ в заболоченных лесах**

Оценка потока метана и диоксида углерода, основанная на измерениях, осуществленных в модельном заболоченном лесу, безусловно, носит предварительный характер. Однако, в условиях практического отсутствия сведений о потоках  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в таких экосистемах Московского региона, данный подход представляется закономерным, но подразумевает расширение географии проводимых исследований в будущем. Отметим, что изменчивость потоков метана в пределах модельного заболоченного леса за 3 года была столь велика, что оказалась сопоставима с таковой в заболоченных лесах в принципе [Runkov, in press]. За все время проведения измерений минимальный достоверно определённый поток метана составил  $-0.7 \pm 0.5 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , максимальный –  $166 \pm 20 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ; диоксида углерода –  $5 \pm 20$  и  $736 \pm 254 \text{ мгС м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  соответственно. Мы предполагаем, что потоки метана и диоксида углерода в других типах леса на территории Московского региона могут отличаться по характеру временной и пространственной изменчивости, однако весьма маловероятно, что в будущем будут получены принципиально (более, чем на порядок) отличающиеся по величине оценки выбросов. В дальнейшем мы продолжим работу и проверим гипотезу о пространственной изменчивости потоков парниковых газов в иных типах заболоченных лесов. Отметим, что для этого, кроме полевых работ, потребуется создание более подробной карты заболоченных лесов Московского региона, что является задачей еще одного самостоятельного исследования.

## **ВЫВОДЫ**

Методом классификации с обучением на основе данных спутниковых снимков Landsat-8 создана карта заболоченных лесов, покрывающих территорию Московского региона (суммарно г. Москвы и Московской области). Суммарная заболоченность составила 6.2% площади региона или 292 249 га соответственно, при общей точности карты 76%. На основе

карты и наземных измерений выполнена простейшая инвентаризация потоков метана и диоксида углерода из почв заболоченных лесов с оценкой их сезонной изменчивости. Подавляющую роль в общей величине выбросов диоксида углерода и метана в течение года (медиана – 5.65 МтСО<sub>2</sub>-экв год<sup>-1</sup>; 1Q – 2.17; 3Q – 11.37) играет летний период (74% годовой эмиссии); осенний и весенний вносят равный вклад, составляющий в сумме около 24% годовой эмиссии; наконец, доля зимней эмиссии СО<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub> не превышает 2%. С учетом того, что почвы рассмотренных нами заболоченных лесов выбрасывают сопоставимое с автоморфными лесами количество диоксида углерода, недооцененным источником можно считать лишь эмиссию метана, оцениваемую по верхней границе до 38.8 тыс. тС в год, что может быть весьма ощутимо в масштабах Московского региона. В будущем необходимо продолжить уточнение полученных оценок с учетом: пространственной изменчивости потоков парниковых газов (расширение сети проводимых измерений), временной изменчивости потоков (суточная динамика), осуществить поиск зависимости величины потоков с ключевыми экологическими факторами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2022-169) на организацию новой молодежной лаборатории "Лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири" в Югорском государственном университете в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты». Авторы выражают благодарность студенту факультета почвоведения МГУ Р.А. Рунькову за помощь в проведении полевых и лабораторных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baisheva E.Z., Martynenko V.B., Mirkin B.M., Muldashev A.A., Shirokih P.S., Bikbaev I.G. 2015. Bolota Respubliki Bashkortostan kak ob'ekt pervostепенной ohrany. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*. 20(3(79)): 5-13 (in Russian). [Баишева Э.З., Мартыненко В.Б., Миркин Б.М., Мулдашев А.А., Широких П.С., Бикбаев И.Г. 2015. Болота Республики Башкортостан как объект первостепенной охраны // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. Т. 20. № 3 (79). С. 5-13.].
- Bartalev S.S. 2006. Evaluation of indicators of the state of forests in the Moscow region according to satellite research // *Issledovano v Rossii*, 948 (in Russian). [Барталев С.С. 2006. Оценка индикаторов состояния лесов Московской области по данным спутниковых наблюдений // Исследовано в России. Т. 948].
- Bykov D.L. 2011. *ZhD. PROZAIK*, Moscow, 673 pp. (in Russian). [Быков Д.Л. 2011. ЖД. М.: ПРОЗАИК. с. 673]
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. 2005. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izvesfiya Rossiyskoj Akademii Nauk, Seriya geograficheskaya*, 5: 39-50 (in Russian). [Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. Т. 5. С. 39-50].
- Glagolev M.V. 2008. The emission of methane: ideology and methodology of «standard model» for Western Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, S1: 176-190 (in Russian). [Глаголев М.В. 2008. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. № S1. С. 176-190].
- Glagolev M.V. 2010. *CH<sub>4</sub> emission from bog soils of Western Siberia: from soil profile to region*: dis. cand. biol. sciences. Moscow, 212 pp. (in Russian). [Глаголев М.В. 2010. Эмиссия СН<sub>4</sub> болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дисс. ... канд. биол. наук., М. 212 с.].
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentyeva I.E., Sabrekov A.F., Krasnov O.A., Maksyutov S.S. 2017. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of Western Siberian southern and middle taiga subzones. *Optika Atmosfery i Okeana*, 30(4): 301-309 (in Russian). [Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максютлов Ш.Ш. 2017. Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 30. № 4. С. 301-309].
- Grishutkin O.G., Vargot E.V., Silaeva T.B., Khapugin A.A., Chugunov G.G. 2013. Plant covering of marshes in Mordovia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 8: 28-34 (in Russian). [Гришуткин О.Г., Варгот Е.В., Силаева Т.Б., Хапугин А.А., Чугунов Г. Г. 2013. Растительный покров болот Мордовии // Вестник Томского государственного педагогического университета. Т. 8. С. 28-34.].

- Gulev S.K., Kattsov V.M., Solomina O.N. 2008. Global warming continues. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 78(1): 20-27 (in Russian). [Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. 2008. Глобальное потепление продолжается // Вестник Российской Академии наук Т. 78. № 1. С. 20-27.].
- Zatsarinna D.V., Volkova E.M. 2011. The ecological features of plant communities of float karst mires in Tula region. *Izvestiya Tula State University Natural Sciences*, 1: 227-236 (in Russian). [Зацаринная Д.В., Волкова Е.М. 2011. Экологические особенности растительных сообществ славинных карстовых болот Тульской области // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. № 1. С. 227-236.].
- Ivanov D.G., Tatarinov F.A., Kurbatova Yu.A. 2018. *Soil respiration in swampy forests of the European part of Russia*. Pochvy v biosphere, 246-250 pp. (in Russian). [Иванов Д.Г., Татарин Ф.А., Курбатова Ю. А. 2018. Почвенное дыхание в заболоченных лесах европейской части России // Почвы в биосфере. С. 246-250.].
- Ilyasov D.V., Sirin A.A., Makarova L.Y., Bukin A.V., Korablina, N. E. 2019. GIS Mapping of Natural and Human-disturbed Peatlands in the Ryazan Oblast. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotekhnologicheskogo Universiteta im. PA Kosycheva*, 1(41) (in Russian). [Ильясов Д.В., Сирин А.А., Макарова Л.Ю., Букин А.В., Кораблина Н.Е. 2019. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно измененных торфяников Рязанской области // Вестник РГАТУ. № 1(41).].
- Vegetation map of the Union of Soviet Socialist Republics. *Acad. sciences of the USSR. Botanical Institute, dep. Geobotany*. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/234418> (in Russian). [Карта растительности Союза Советских Социалистических Республик / Акад. наук СССР. Ботанический ин-т, отд. Геоботаники URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/234418> (In Russian) (Last accessed 24.05.2023)].
- Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. 2014. Organic carbon fluxes in the system soil-phytocenosis of bilberry-sphagnum spruce forest in the middle taiga zone of the Komi republic. *Russian Journal of Ecology*, 45: 338-344 (in Russian). [Кузнецов М.А., Бобкова К.С. 2014. Поток органического углерода в системе почва-фитоценоз ельника черничного сфагнового средней тайги Республики Коми // Экология. № 5. С. 338-345.].
- Ogureeva G.N., Miklyaeva I.M., Suslova E.L., Shvergunova L.V. 1996. *Medium-scale (1:200,000) vegetation map of the Moscow region*. Moscow State University M.V. Lomonosov, Moscow (in Russian). [Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Суслова Е.Л., Швергунова Л.В. 1996. Среднемасштабная (1:200 000) карта растительности Московской области. М.: МГУ.].
- Osipov Yu.G., Kravets S.L. 2004. Great Russian Encyclopedia. Moscow, (22) (in Russian). [Осипов Ю.Г., Кравец С.Л. 2004. Большая Российская Энциклопедия. М.: Москва. Т. 22.].
- Suslova E.G. 2019. Forests of Moscow region. *Ecosystems: ecology and dynamics*, 3(1), 119-190 (in Russian). [Суслова Е.Г. 2019. Леса Московской области // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. №1. С. 119-190].
- Terentieva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V. 2021. Mapping waterlogged ecosystems of West Siberia using convolutional neural networks. In *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present*. Publishing house of Tomsk University, Tomsk, pp. 92-94 (in Russian). [Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. 2021. Использование сверточных нейронных сетей для картографирования переувлажненных экосистем западной Сибири // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. С. 92-94.].
- Usova L.E. 2009. *A practical guide to landscape interpretation of aerial photographs of various types of wetlands in Western Siberia*. Nestor-Istoriya, Saint-Petersburg (in Russian). [Усова Л.И. 2009. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. Спб.: Нестор-История.].
- Ambus P., Christensen S. 1995. Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-, grassland-, and agroecosystems. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*, 24(5): 993-1001.
- Aronson E.L., Vann D.R., Helliker B.R. 2012. Methane flux response to nitrogen amendment in an upland pine forest soil and riparian zone. *J. Geophys. Res.* 117(G3).
- Christiansen J.R., Levy-Booth D., Prescott C.E., Grayston S.J. 2017. Different soil moisture control of net methane oxidation and production in organic upland and wet forest soils of the Pacific coastal rainforest in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(5): 628-635.
- Davydov D.K., Dyachkova A.V., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for longterm measurements CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(1): 5-14.
- Drösler M., Verchot L.V., Freibauer A., Pan G., Evans C.D., Borbonniere R.A., Alm J.P., Page S., Agus F., Hergoualc'h K., Couwenberg J., Jauhainen J., Sabilam S., Wang C. 2014. Drained inland organic soils (Chapter 2). In *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*, (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M.Fukuda, T.G.Troxler, eds.).
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Mochenov S.Yu, Maksutov S.S. 2018. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of south and middle taiga of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (138): 012005.
- Global lakes and wetlands database URL: <https://www.worldwildlife.org/pages/global-lakes-and-wetlands-database> (Last accessed 24.05.2023).
- Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E., Golovchenko A.V. 2021. Soil respiration in alder swamp in southern taiga of European Russia depending on microrelief. *Forests*. 12(4): 496. <https://doi.org/10.3390/f12040496>
- Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E., Suvorov G.G., Golovchenko A.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L. 2022. Spatio-Temporal Variability of Methane Fluxes in Boreo-Nemoral Alder Swamp (European Russia). *Forests*, 13(8): 1178.
- Gulledge J., Schimel J.P. 2000. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems*, 3(3): 269-282.

Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Guillén Bolaños T., Bindi M., Brown S., Camilloni I. A., Diedhiou A., Djalante R., Ebi K., Engelbrecht F., Guiot J., Hijioka Y., Mehrotra S., Hope C.W., Payne A. J., Pörtner H.-O., Seneviratne S.I., Thomas A., Warren R., Zhou G. 2019. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5 C. *Science*, 365(6459).

Hutchinson G.L., Mosier A.R. 1981. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2): 311-316.

Kahaner D., Moler C., Nash S. 1989. *Numerical methods and software*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ., 495 pp.

Kelly C.A., Chynoweth D.P. 1981. The contributions of temperature and of the input of organic matter in controlling rates of sediment methanogenesis. *Limnology and Oceanography*, 26(5): 891-897.

Koskinen M., Maanavilja L.M., Nieminen M., Minkkinen K., Tuittila E.S. 2016. High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. *Mires and Peat*, 17(02).

Kotlov I., Chernenkova T. 2020. Modeling of Forest Communities' Spatial Structure at the Regional Level through Remote Sensing and Field Sampling: Constraints and Solutions. *Forests*, 11(10): 1088.

Matthews E., Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global biogeochemical cycles*, 1: 61-86.

Megonigal J.P., Hines M.E., Visscher P.T. 2004. Anaerobic metabolism: Linkages to trace gases and aerobic processes. *Biogeochemistry*, 8(10): 317-424.

Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M., Mander Ü., Zhang L., Anderso C.J., Jørgensen S.E., Brix H. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28: 583-597.

Mochenov S.Yu., Churkina A.I., Sabrekov S.F., Glagolev M.V., Il'yasov D.V., Terentjeva I.E., Maksyutov S.S. 2018. Soils in seasonally flooded forests as methane sources: A case study of West Siberian South taiga. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138: 012012.

Moore T.R., Knowles R. 1990. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry*, 11(1): 45-61.

Moore P.D. 2002. The future of cool temperate bogs. *Environmental conservation*, 29(1): 3-20.

Runkov R.A. Spatial variability of methane emissions from soils of wet forests: a brief review. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, (in press).

Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Alekseychik P.K., Smolentsev B.A., Terentjeva I.E., Krivenok L.A., Maksyutov S.S. 2016. A process-based model of methane consumption by upland soils. *Environmental Research Letters*, 11(7): 075001.

Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. 2013. Methane Emission from Mires of the West Siberian Taiga. *Eurasian Soil Science*, 46(12): 1182-1193.

Sari I.L., Weston C.J., Newnham G.J., Volkova L. 2021. Estimating land cover map accuracy and area uncertainty using a confusion matrix: A case study in Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 914(1): 012025.

Shoemaker J.K., Keenan T.F., Hollinger D.Y., Richardson A.D. 2014. Forest ecosystem changes from annual methane source to sink depending on late summer water balance. *Geophysical Research Letters*, 41(2): 673-679.

Stehman, S.V. 2004. A critical evaluation of the normalized error matrix in map accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6): 743-751.

Taylor K.E., Penner J.E. 1994. Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases. *Nature*, 369(6483): 734-737.

Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S. 2017. A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide. *Water resources*, 44(2): 297-307.

Terentjeva I.E., Sabrekov A.F., Ilyasov D.V., Ebrahimi A., Glagolev M.V., Maksyutov S.S. 2019. Highly dynamic methane emission from the West Siberian boreal floodplains. *Wetlands*, 39(2): 217-226.

Torga R., Mander U., Soosaar K., Kupper P., Tullus A., Rosenvald K., Ostonen I., Kutti S., Jaagus J., Sober J., Maddison M., Kaasik A., Lohmus K. 2017. Weather extremes and tree species shape soil greenhouse gas fluxes in an experimental fast-growing deciduous forest of air humidity manipulation. *Ecological Engineering*, 106: 369-377.

Ullah S., Moore T.R. 2011. Biogeochemical controls on methane, nitrous oxide, and carbon dioxide fluxes from deciduous forest soils in eastern Canada. *J. Geophys. Res.*, 116: G03010.

Van Huissteden J., Maximov T.C., Dolman A.J. 2005. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 110(G2): 06956.

Vasconcelos S.S., Zarin D.J., Capanu M., Littell R., Davidson E.A., Ishida F.Y., Santos E.B., Araújo M.M., Aragão D.V., Rangel-Vasconcelos L.G.T., de Assis Oliveira F., McDowell W.H., de Carvalho C.J.R. 2004. Moisture and substrate availability constrain soil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB2009. <https://doi.org/10.1029/2003GB002210>

Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J. J., Kotchenova S.Y. 2006. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV). *6S User Guide Version*, 3(2): 1-55.

Whalen S.C., Reeburgh W.S., Kizer K.S. 1991. Methane consumption and emission by taiga. *Global Biogeochemical Cycles*. 5(3): 261-273.

Поступила в редакцию: 07.04.2023  
Переработанный вариант: 24.05.2023

## THE FIFTH ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE “SAFE NORTH – CLEAN ARCTIC”

*Kukurichkin G.M.*

*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

\*lesnik72@mail.ru

**Citation:** Kukurichkin G.M. 2023. The Fifth All-Russian Scientific and Practical Conference “Safe North – clean Arctic”. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 132-139.

**DOI:** 10.18822/edgcc623119

*Пятая Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Безопасный Север – чистая Арктика» состоялась 13-14 апреля 2023 г. на базе Сургутского государственного университета. Этот традиционный форум объединил 280 участников из различных регионов России, а также коллег из Казахстана. Тематика выступлений (всего более 80 докладов) охватывала широкий круг вопросов: изучение и сохранение биоразнообразия, создание биоресурсных коллекций, экологический мониторинг, экология человека, рациональное природопользование, формирование комфортной и безопасной среды для жизнедеятельности человека в условиях северных регионов. К 85-летию со дня рождения основателя кафедры экологии Сургутского госуниверситета был организован круглый стол «Научное наследие профессора Ю.В. Титова (1938-2001)». Участники круглого стола обсудили роль Ю.В. Титова как организатора науки и образования в Югре.*

**Ключевые слова:** Арктика, Субарктика, северные регионы, безопасность, биоразнообразие, биоресурсные коллекции, экологический мониторинг, зеленая химия, экологическое образование

*The Fifth All-Russian Research-to-Practice Conference (with international participation) “Safe North - Clean Arctic” was held on April 13-14, 2023 at the Surgut State University. This traditional forum brought together 280 participants from various regions of Russia, as well as colleagues from Kazakhstan. The topics of the presentations (more than 80 reports in total) covered a wide range of issues: the study and conservation of biodiversity, the creation of bioresource collections, environmental monitoring, human ecology, rational use of natural resources, the formation of a comfortable and safe environment for human life in the northern regions. To the 85th anniversary of the birth of the founder of the Department of Ecology of Surgut State University, a round table “The scientific heritage of Professor Yu. V. Titov (1938-2001)” was organized. The round table participants discussed the role of Yu. V. Titov as an organizer of science and education in Ugra.*

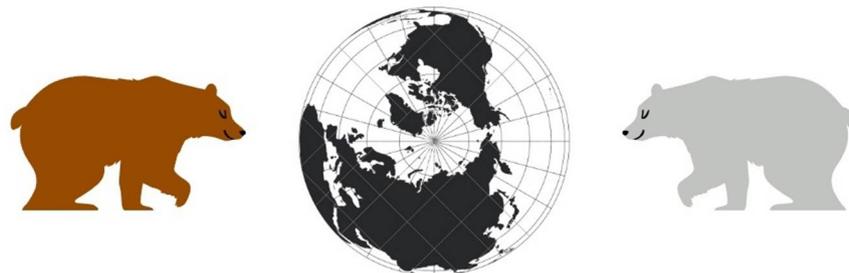
**Key words:** Arctic, Subarctic, northern regions, safety, biodiversity, bioresource collections, environmental monitoring, green chemistry, environmental education

13-14 апреля 2023 г. в г. Сургуте на базе Сургутского государственного университета (СурГУ) прошла Пятая Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Безопасный Север – чистая Арктика».

Конференция стала традиционной, проводится с 2018 г. Она посвящена разнообразным проблемам: изучение экосистем и ресурсов Севера, инновационные направления природопользования, благоустройство северных городов, сохранение природного и культурного разнообразия, взаимоотношения индустриального и традиционного общества, экологическое образование, международное сотрудничество в Арктике и Субарктике. На ранее проводившихся конференциях значительную роль играли специализированные мероприятия – круглые столы, мастер-классы – естественнонаучного («Химико-аналитический контроль объектов окружающей среды», «Оцифровка и мобилизация данных о биоразнообразии на севере Западной Сибири» и др.) и гуманитарного («Россия в Арктическом диалоге», «Расселение и адаптация человека на Севере и в Арктике» и др.) профилей, в иные годы в работе конференции принимали участие ученые из Финляндии, США, Канады. Особенностью конференции традиционно является активное участие представителей региональных учреждений Федеральной противопожарной службы МЧС, а также

специалистов по охране труда и промышленной безопасности нефтегазовых предприятий автономного округа.

Эмблема конференции весьма символична (рис. 1).



**Рисунок 1.** Эмблема конференции «Безопасный Север – чистая Арктика»

Конференция 2023 года была приурочена к 30-летию крупнейшего университета Югры и к 85-летию со дня рождения профессора Ю.В. Титова. Она проходила в смешанном формате (очные и дистанционные доклады), при поддержке русскоязычного отделения международного «Общества экотоксикологии и химии окружающей среды» и стратегического проекта «Цифра нефти» программы академического лидерства «Приоритет-2030» СурГУ.

В работе конференции приняли участие 280 человек. Было заслушано 72 очных и 29 дистанционных докладов. Участниками конференции были ученые, преподаватели, аспиранты и студенты из различных научных и учебных центров России (Архангельск, Бийск, Горно-Алтайск, Екатеринбург, Иркутск, Кострома, Красноярск, Москва, Нижневартовск, Новосибирск, Пущино, Салехард, Санкт-Петербург, Сургут, Томск, Тюмень, Ханты-Мансийск, Якутск, Ярославль) и Казахстана; а также руководители, ведущие специалисты предприятий и организаций Югры (ПАО «Сургутнефтегаз», ООО «Газпром трансгаз Сургут», «РН-Юганскнефтегаз», ООО «Газпром переработка», Завод стабилизации конденсата, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии ХМАО – Югры»), региональные органы МЧС России и др.).

Обсуждавшиеся на пленарных и секционных заседаниях вопросы по большей части нашли свое отражение в сборнике материалов конференции, который вышел в электронной форме и доступен по ссылке: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54205619&selid=54205675>.

На пленарных заседаниях были заслушаны несколько докладов:

- Е.А. Карамы «Обеспечение комплексной безопасности населения и территорий Севера России и Арктики»;
- Д.Л. Пинский с соавт. «Загрязнение почв тяжелыми металлами и органическими поллютантами: проблемы и пути их решения»;
- В.А. Терехова «Эффективность ремедиации техногенно нарушенных почв Севера по экотоксикологическим параметрам»;
- В.Я. Кузеванов с соавт. «Ботанические сады как адаптационно-реабилитационные ресурсы для экстремальных условий»;
- С.С. Макаров «Перспективы выращивания ягодных культур в условиях российского Севера»;
- Д.А. Бараненко «Биоаккумуляция ксенобиотиков и их обнаружение с помощью терагерцовых, масс- и гиперспектров в пищевом сырье и продукции»;
- Н.С. Кудряшева «Низкодозовое воздействие радионуклидов на бактериальные клетки и ферментативные реакции»;
- Г.М. Кукуричкин «Путь ученого: к 85-летию со дня рождения Ю.В. Титова»;
- А.А. Пак «Разработки НИ ТПУ в области энергетики и экологии».

К сожалению, опубликованы были материалы только двух пленарных докладов.

Коллектив авторов под руководством Д.Л. Пинского (Пущино) представил результаты многолетних исследований почв в условиях техногенеза. Рассмотрены возможности инновационных технологий ремедиации загрязненных нефтью почв Западной Сибири и рекультивации техногенно нарушенных тундровых почв в ходе освоения нефтегазоносных территорий, а также новые подходы к нормированию содержания тяжелых металлов в почвах.

В статье В.Я. Кузеванова (Иркутск), Г.М. Кукуричкина и Д.В. Богдановой (Сургут) описано становление ботанического сада в Сургуте как потенциального ресурсного центра при СурГУ. Ботсад, через поиск и мобилизацию ценных фиторесурсов, через развитие адаптированных

агротехнологий, фактически способствует адаптации и реабилитации людей в суровых условиях западносибирского Севера. Перспективным направлением одного из самых северных ботсадов мира является создание реабилитационных ландшафтов для психологической абилитации людей в экстремальных психологических и климатических условиях (включая подготовку космических программ).

В рамках конференции работали секции:

- «Природные, техногенные и урбанизированные экосистемы Севера»;
- «Сохранение и восстановление биоразнообразия, адаптационные процессы экосистем Севера и Арктики»;
- «Современные агробιοтехнологии в условиях Севера и Арктики»;
- «Зеленая химия для устойчивого развития северных территорий»;
- «Комплексная безопасность Севера России и Арктики».

Доклады, посвященные изучению и сохранению биологического разнообразия, в этот раз были связаны преимущественно с зоолого-экологическими исследованиями. Материалы по населению мелких млекопитающих были представлены в докладах А.Ю. Левых – по району оз. Хадатаёганлор (Полярный Урал) и В.П. Старикова с соавт. – по территории Сургутского заказника; биологическим особенностям алтайского крота было посвящено сообщение Е.А. Вагановой с соавт. В докладах А.Н. Муравьева, П.П. Шилова, П.А. и А.П. Савченко обсуждались вопросы популяционной экологии дикого северного оленя на территории Эвенкии и современные методы учета численности этих копытных. Орнитологические работы касались исследований кобчика в Югре (А.А. Емцев) и уток в бассейне оз. Пясино (В.Л. Темирова с соавт.). Е.С. Бабушкин в своем докладе о малакофауне минорных водных объектов поставил вопрос о возможности использования пресноводных брюхоногих моллюсков для классификации водоемов и водотоков.

В сообщении Е.Л. Веревкиной и Е.Д. Лапшиной были подведены промежуточные итоги инвентаризации редких растительных сообществ природного парка «Нумто». Почвенная микобиота обсуждалась в докладах И.И. Джалолова с соавт. (психрофильные грибы торфяных бугров пучения) и М.В. Мантровой (сапротрофные микроскопические грибы крупнейшего сургутского лесопарка).

Ещё два доклада были посвящены организационным проблемам особо охраняемых природных территорий (ООПТ): корректировке границ и функционального зонирования природного парка «Кондинские озера» (Т.Л. Беспалова) и общей оценке эффективности ООПТ автономного округа (Д.М. Бибикова).

Значительное число представленных на конференции исследований касалось проблем интродукции растений, в том числе, их микроклонального размножения и гидропоники, а также озеленения северных городов, развития Сургутского ботанического сада и других ботанических коллекций. С актуальной темой о создании биоресурсных коллекций родовых комплексов декоративных травянистых растений выступили О.Е. Ханбабаева с соавт. А.А. Егоров и Г.М. Кукуричкин доложили о разработке на основе эколого-географического моделирования перспективного ассортимента хвойных для зеленых насаждений Сургута. Частным вопросам интродукции растений в условиях Севера были посвящены сообщения Н.Р. Сунгуровой с соавт. (ель колючая), О.С. Зальвской с соавт. (декоративные кустарники), Е.А. Бердышевой и Т.А. Макаровой (кровохлебка лекарственная), А.Л. Зайцева и П.Н. Макарова (монарда), И.А. Казанцева с соавт. (шлемник байкальский и эстрагон), И.Р. Казанцевой с соавт. (лук победный), А.Ю. Казиевой и Т.А. Макаровой (курильский чай), В.В. Крайник с соавт. (зверобой продырявленный), С.С. Макарова с соавт. (княженика арктическая), М.В. Мельник и З.А. Самойленко (душица обыкновенная), В.Ю. Ступко с соавт. (картофель). В ряде докладов обсуждались концептуальные вопросы урбоэкологии: общие проблемы озеленения арктических городов России (В.Д. Голова, А.М. Воротников), основные тренды формирования зеленой инфраструктуры городов на севере Западной Сибири (Е.М. Копцева), природоохранная составляющая градостроительной деятельности (Е.А. Чайка).

Обзор некоторых крупных аварий, связанных с разливом нефтепродуктов, и их последствий для окружающей среды был представлен в сообщении Р.И. Калестро и Е.В. Майстренко.

На конференции были широко представлены результаты мониторинговых исследований и работ по оценке состояния компонентов окружающей среды в условиях техногенного пресса. Так, качество атмосферного воздуха в условиях урбанизации оценили А.К. Абдурахманова, М.В. Король, Л.М. Бикмухаметова. Оценка качества воды водных объектов Среднего Приобья была представлена в докладах Е.А. Шорниковой, М.К. Величко, Ю.В. Чернига. По материалам мониторинга подземных вод С.Н. Лебедева оценила эффективность использования при рекультивации оригинального грунта

«Фитонокс». Методические аспекты биотестирования с использованием культуры *Daphnia magna* были рассмотрены К.А. Алиниседовой и О.В. Проворовой.

Вопросам экологии почв были посвящены работы Д.Д. Бельковой и А.А. Каверина (запасы углерода в фоновых и нарушенных почвах), В.Н. Тюрина с соавт. (зольность торфяных почв Сургутской низины), Ф.В. Тюшкевича с соавт. (распределение железа в почвенных профилях Приполярного Урала), В.А. Андроса и А.Г. Калиновской (оценка рекреационной дигрессии и трансформации почв Сургутского ботанического сада).

Д.В. Московченко и А.А. Губарьков проанализировали температурный режим торфяников природного парка «Нумто». С.Е. Коркин с В.А. Исыповым представили анализ эрозионных процессов на урбанизированных территориях Среднего Приобья.

В сообщении П.Р. Сташкина и В.Н. Тюрина был представлен ретроспективный анализ масштабов лесозаготовок в Ханты-Мансийском автономном округе на начало 1960-х гг. по результатам анализа картографических материалов. Г.А. Кочергин с соавт. выступили с докладом по картографированию вырубок с использованием космоснимков и нейросети. Дистанционным методам были также посвящены работы О.В. Мезенцевой с соавт. (оценка влагозапаса в растительном покрове) и М.А. Муратова с Л.Л. Сайфуллиной (определение площадей термокарстовых озер).

М.А. Мулюкин с соавт. Исследовали процесс накопления тяжелых металлов в фитомассе донника лекарственного. Ю.Ю. Шевелева и З.А. Самойленко рассказали о восстановительных процессах в растительном покрове после нефтяного загрязнения.

Часть докладов была посвящена проблемам экологии человека. М.М. Марусенко и Р.Э. Яворский сделали расчет барического индекса комфортности метеоусловий Тюмени. М.А. Филатов с соавт. изучили влияние трансиротных перемещений на параметры сенсомоторных реакций школьников Югры. Е.М. Рыжикова с соавт. выявили биофизические маркеры адаптации лиц юношеского возраста в северных условиях. Л.С. Чемпалова с соавт. изучили параметры нейровегетативной системы спортсменов на Севере. Оживленное обсуждение вызвал незапланированный доклад А.С. Песиковой «Принципы взаимоотношений юганских ханты с природой».

В докладе Т.В. Сторчак с соавт. шла речь о современных тенденциях развития экологического образования в вузе.

Е.В. Долгов рассказал о набирающей популярность среди кредитных организаций системе «зеленого» банкинга («ESG-банкинг»).

Сообщение А.С. Рожкова было посвящено сравнению показателей при опробовании и испытании нефтяных скважин традиционными и инновационными методами. С.А. Лепихин и И.А. Чиглинцев обсудили варианты утилизации углекислого газа через гидратообразование, в том числе, с подземной гидратной консервацией через скважину.

Особый блок составили доклады, связанные с нефтехимией, что весьма актуально как для экономики, так и для экологии западносибирского Севера. Плазменная обработка асфальтенов в целях их рациональной утилизации рассматривалась в нескольких сообщениях (П.В. Повалев и др., В.А. Рябова и др., В.В. Аркаченкова и др.). В.П. Нехорошев с соавт. на примере проблемы атактического полипропилена обосновали необходимость развития «нефтехимического крыла» нефтяных компаний РФ и создания современных нефтехимических комплексов.

Актуальнейшую в нефтегазовом комплексе проблему коррозии оборудования обсудили Л.Р. Сайфутдинова с соавт., сравнив различные ингибиторы коррозии.

Вопросам химического синтеза были посвящены доклады И.А. Свиридова и А.В. Подшивалова (карбоксиметилхитозан) и А.А. Гумовской и соавт. (высокоэнтропийный карбид).

Опасные для жизни и здоровья факторы нефтегазового комплекса, а также специфика трудовой деятельности в условиях Крайнего Севера, предложения по улучшению условий труда и необходимость формирования комплексной системы безопасности рассматривалась в нескольких докладах (В.В. Долгих и Е.В. Майстренко, И.Е. Карпенко и Ю.В. Кузнецова, М.Г. Орлова и Е.Р. Фомина, Л.Р. Назарова и Т.С. Андреева). В работе А.О. Баженовой и Е.Р. Фоминой определены критерии оценки качества спецодежды, а Д.А. Болонин и Е.В. Майстренко представили решение проблемы профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата путем внедрения вспомогательного экзоскелета.

В работе С.Ф. Сагидова и Ю.В. Кузнецовой рассматриваются вопросы по предупреждению возникновения взрывопожароопасной ситуации на предприятиях нефтегазового комплекса, дан сравнительный анализ различных газоанализаторов.

К 85-летию со дня рождения Юрия Владимировича Титова был организован круглый стол «Научное наследие профессора Ю.В. Титова». Участники круглого стола обсудили значение научного наследия Ю.В. Титова (1938-2001) и его роль как организатора для развития науки и образования в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. Особое внимание было уделено сохранению и развитию научной школы Ю.В. Титова в Нижневартовске и Сургуте.

Общее количество печатных работ Ю.В. Титова составляет около 80 публикаций; среди них несколько монографий («Эффект группы у растений» (1978), «Реакция суходольного луга на минеральные удобрения» (1987), «Динамика травяной растительности поймы реки Хопер» (1990), «Растительность поймы реки Вах» (2000), «Растительность поймы реки Таз» (2001)), программные статьи, научно-методические разработки, несколько оригинальных учебно-методических пособий.

Недавно в архивах удалось обнаружить незавершенные, а потому и неопубликованные рукописи Ю.В. Титова, посвященные методическим аспектам комплексной оценки экосистем и оценки экологической ёмкости территорий.

Пройдя большой научно-педагогический путь в Лесотехнической академии (Ленинград, Санкт-Петербург), в Карельском научном центре РАН, в Ботаническом институте РАН, в заповедниках, на научных стационарах и в экспедициях, в монгольских степях и сибирских болотах, в 1995 г. Ю.В. Титов переезжает в Западную Сибирь. Здесь он создает две экологические кафедры – сначала в Нижневартовске, затем в Сургуте, осуществляет научно-методическое руководство программой непрерывного экологического образования в Югре, становится инициатором и редактором серии сборников научных трудов «Биологические ресурсы и природопользование» – об экологических проблемах Югры и северных регионов в целом (всего вышло 11 выпусков этого сборника, редактором первых четырех был Ю.В.). Он разворачивает сеть полевых исследований в Югре: это и классические исследования биоразнообразия и продуктивности природных экосистем, и изучение проблем техногенной трансформации почвенно-растительного покрова, эффективности рекультивационных мероприятий, охраны природы. По программе, составленной Ю.В., обследован бассейн р. Сабун; в результате этих работ в верховьях р. Сабун был организован природный парк «Сибирские Увалы». Как педагог-организатор Ю.В. заложил принципы практического обучения экологов, в том числе, регулярных полевых практик в природных и трансформированных экосистемах.

Последний год жизни Ю. В. посвятил организации ботанического сада в г. Сургуте. Под руководством Ю.В. Титова творческий коллектив подготовил проект, предполагающий организацию крупного научно-исследовательского центра с лабораториями, оранжереями, интродукционными питомниками. И, невзирая на значительные организационные и финансовые трудности, Ботанический сад, задуманный Ю.В. Титовым, постепенно обретает реальные черты.

Ю.В. был необычайно увлеченным человеком. Его творческий путь – это путь истинного ученого: огромная любознательность, постоянный поиск, широта научных взглядов и интересов. Начав с физиолого-биохимических исследований отдельных видов растений, Ю.В. перешел к изучению организмов и популяций, потом сообществ, экосистем, ландшафтов, а в последние годы он руководил комплексными экологическими исследованиями и занимался вопросами экологического образования и просвещения.

Участники круглого стола, лично знавшие Ю.В. Титова, работавшие с ним (Г.М. Кукуричкин, В.Н. Тюрин, Е.А. Шорникова, А.А. Зубайдуллин, С.Е. Коркин), делились своими воспоминаниями об этом замечательном ученом и человеке.

Специально на период работы конференции в научной библиотеке СурГУ была подготовлена и оформлена выставка основных научных трудов профессора Ю.В. Титова. Кроме научных публикаций, на выставке были представлены стихи и рассказы, написанные Юрием Владимировичем в разные годы и по разным поводам, – и о природе, и о любви...



**Рисунок 2.** Аспирант Ю. Титов. 1960-е гг.



**Рисунок 3.** Профессор Ю.В. Титов. 1990-е гг.

В рамках конференции был реализован курс повышения квалификации «Современные тренды комплексной безопасности северных территорий в условиях высокой техногенной нагрузки и глобального изменения климата» (16 ч), в котором приняли участие 188 человек.

В целом следует признать, что Пятая Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Безопасный Север – чистая Арктика» прошла успешно. Как традиционное мероприятие этот форум уверенно занял свою нишу в научно-информационном пространстве.

Ниже представлены некоторые фотографии участников конференции (рис. 4-13).



**Рисунок 4.** Профессор Д.Л. Пинский (Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино)



**Рисунок 5.** Директор Института естественных и технических наук СурГУ Ю.Ю. Петрова



**Рисунок 6.** Доцент кафедры экологии и биофизики СурГУ Г.М. Кукуричкин



**Рисунок 7.** Доцент кафедры экологии и биофизики СурГУ В.Н. Тюрин



**Рисунок 8.** Е.А. Карам (Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург) с сотрудниками кафедры безопасности жизнедеятельности СурГУ



**Рисунок 9.** А.С. Песикова (Сопочина) – филолог, исследователь культуры малых коренных народов Севера



**Рисунок 10.** Докладывает В.А. Терехова, профессор факультета почвоведения Московского государственного университета



**Рисунок 11.** Участники и слушатели на пленарном заседании



**Рисунок 12.** С.Е. Коркин – главный научный сотрудник лаборатории геоэкологических исследований Нижневарттовского государственного университета



**Рисунок 13.** Научные сотрудники, аспиранты и студенты СурГУ

Поступила в редакцию: 25.10.2023  
Переработанный вариант: 28.10.2023

*Научное издание*

# ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

*Том 14, выпуск 2/2023*

*Цена свободная*

*16+*

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-82594 от 18.01.2022 г.*

*Дата выхода в свет 29.10.2023*

*Адрес учредителей, редакции:  
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».  
Адрес: 628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра,  
г. Ханты-Мансийск ул. Чехова, 16.  
Тел./факс: +7(3467)37-70-00 (доб. 101); WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)*

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».  
Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
Тел.: +7(3822)58-98-52, факс: +7(3822)52-95-85; WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)*

*ФГБУН "Институт водных и экологических проблем  
Сибирского отделения Российской Академии наук".  
Адрес: 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.  
Тел.: +7(3852)66-64-60, факс: +7(3852)24-03-96; WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)*

*ГКУ Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики».  
Адрес: 629008, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 73.  
Тел./факс: +7(34922)441-32; WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)*

*Главные редакторы:*

*Лапина Елена Дмитриевна  
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 313)  
E-mail: [e\\_lapshina@ugrasu.ru](mailto:e_lapshina@ugrasu.ru)*

*Глаголев Михаил Владимирович  
тел. +7-495-939-48-46  
E-mail: [m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)*

