

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

**Environmental Dynamics and
Global Climate Change**



Том
Volume

14

Выпуск
Issue

3

2023

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 14
Issue 3

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)
Sergey S. Bykhovets, PhD in Geogr. Sci. (Pushchino, Russia)
Vasilii A. Vavilin, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)
Aleksandra A. Gol'eva, Dr. habil. of Geogr. Sci. (Moscow, Russia)
Egor A. Dyukarev, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tomsk, Russia)
Nikolay B. Ermakov, Dr. habil. of Biol. Sci., senior researcher (Yalta, Russia)
Radomir B. Zaripov, PhD in Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)
Dmitriy V. Karelin, Dr. habil. of Biol. (Moscow, Russia)
Roman A. Kolesnikov, PhD in Geogr. Sci. (Salekhard, Russia)
Nadezhda A. Konstantinova, Dr. habil. of Biol. Sciences, Professor (Apatity, Russia)
Oleg P. Kotsyurbenko, Dr. habil. of Biol. Sci. (Khanty-Mansiysk, Russia)
Alexei V. Kouraev, PhD in Geogr. Sci., Assistant professor (Toulouse, France)
Irina N. Kurganova, Dr. habil. of Biol. Sci. (Pushchino, Russia)
Trofim K. Maksimov, Dr. habil. of Biol. Sci. (Yakutsk, Russia)
Shamil S. Maksyutov, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tsukuba, Japan)
Sergey V. Mamikhin, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)
Vasilii B. Martynenko, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Ufa, Russia)
Nsdezhdha V. Matveeva, Dr. habil. of Biol. Sci. (Sankt-Petersburg, Russia)

Evgeniy Y. Milanovskiy, Dr. habil. of Biol. Sci., Associate Professor (Pushchino, Russia)
Ol'ga V. Morozova, PhD in Geogr. Sci. (Moscow, Russia)
Valentina Y. Neshataeva, Dr. habil. of Biol. Sci., senior researcher (St. Petersburg, Russia)
Aleksandr V. Ol'chev, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Moscow, Russia)
Oleg S. Pokrovskiy, PhD in Geol.-Mineral. Sci. (Tomsk, Russia)
Alexander V. Puzanov, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Barnaul, Russia)
Irina A. Repina, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)
Irina M. Ryzhova, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Moscow, Russia)
Yuriy A. Semenishchenkov, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Bryansk, Russia)
Ol'ga N. Solomina, Dr. habil. of Geogr. Sci., corresp. member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Viktor M. Stepanenko, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)
Alexey L. Stepanov, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)
Pavel V. Frolov, PhD in Biol. Sci. (Pushchino, 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)
Mariusz Lamentowicz, Dr. habil., Full-Professor (Poznan, Poland)
Kári Fannar Lárusson, PhD, CAFF program manager (Akureyri, Iceland)
Ivan Mammarella, PhD, Assistant Professor (Helsinki, Finland)
Vincent F. Warwick, Dr., Full-Professor (Quebec Canada)

Editorial Office

O.A. Frolov, managing editor (Moscow, Russia)
D.D. Ochirova, technical editor (Moscow, Russia)
S.M. Turchinskaya, 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

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

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

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

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 14
Выпуск 3
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. Агбалян, д-р биол. наук (Салехард, Россия)
С.А. Благодатский, д-р биол. наук (Штутгарт, Германия)
С.С. Быховец, канд. геогр. наук (Пушино, Россия)
В.А. Вавилин, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
А.А. Гольева, д-р геогр. наук (Москва, Россия)
Е.А. Дюкарев, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)
Н.В. Ермаков, д-р биол. наук, старший научный сотрудник (Ялта, Россия)
Р.Б. Зарипов, канд. физ.-мат. наук (Москва, Россия)
Д.В. Карелин, д-р биол. наук (Москва, Россия)
Р.А. Колесников, канд. геогр. наук (Салехард, Россия)
Н.А. Константинова, д-р биол. наук, профессор (Апатиты, Россия)
О.Р. Коцюрбенко, д-р биол. наук (Ханты-Мансийск, Россия)
А.В. Кураев, канд. геогр. наук, доцент (Тулуза, Франция)
И.Н. Курганова, д-р биол. наук (Пушино, Россия)
Т.Х. Максимов, д-р биол. наук (Якутск, Россия)
Ш.Ш. Максюттов, канд. физ.-мат. наук (Цукуба, Япония)
С.В. Мамихин, д-р биол. наук (Москва, Россия)
В.Б. Мартыненко, д-р биол. наук, профессор (Уфа, Россия)
Н.В. Матвеева, д-р биол. наук (Санкт-Петербург, Россия)
Е.Ю. Милановский, д-р биол. наук, доцент (Пушино, Россия)

О.В. Морозова, канд. геогр. наук (Москва, Россия)
В.Ю. Нешатаева, д-р биол. наук, старший научный сотрудник (Санкт-Петербург, Россия)
А.В. Ольчев, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
О.С. Покровский, канд. геол.-минерал. наук (Томск, Россия)
А.В. Пузанов, д-р биол. наук, профессор (Барнаул, Россия)
И.А. Репина, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
И.М. Рыжова, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
Ю.А. Семенченко, д-р биол. наук, профессор (Брянск, Россия)
О.Н. Соломина, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
В.М. Степаненко, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
А.Л. Степанов, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
П.В. Фролов, канд. биол. наук (Пушино, Россия)
Е.В. Шеин, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
С.А. Шоба, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
М. Ламентович, д-р, профессор (Познань, Польша)
И. Маммарелла, д-р, доцент (Хельсинки, Финляндия)
В.Ф. Варвик, д-р, профессор (Квебек, Канада)

Редакция

О.А. Фролов, заведующий редакцией (Москва, Россия)
Д.Д. Очирова, редактор (Москва, Россия)
С.М. Турчинская, 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

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

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

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

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

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

ОБЗОРЫ И ЛЕКЦИИ / OVERVIEWS AND LECTURES

- Glagolev M.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Il'yasov D.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V.*
Mathematical models of methane consumption by soils: A review 145-166
- Runkov R.A., Ilyasov D.V.*
Spatial variability of methane emissions from soils of wet forests: a brief review..... 167-180

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS

- Martynova Y.V., Voropay N.N., Matyukhina A.A.*
Variability of temporal characteristics of snow cover in Siberia on ground-based data..... 181-197

ХРОНИКА / CHRONICLE

- Kuznetsov O.L.*
International Symposium "Mires of Northern Eurasia: biosphere functions, diversity and management"
(Russia, Petrozavodsk, September 25-28, 2023) 198-203



MATHEMATICAL MODELS OF METHANE CONSUMPTION BY SOILS: A REVIEW

Glagolev M.V.^{1,2,3}, Terentieva I.E.⁴, Sabrekov A.F.³, Il'yasov D.V.³, Zamolodchikov D.G.⁶, Karelin D.V.^{5,6}

¹)Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²)Институт лесоведения РАН, пос. Успенское (Московская область)

³)Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

⁴)University of Calgary, Calgary, Canada

⁵)Институт географии РАН, г. Москва

⁶)Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, г. Москва

m_glagolev@mail.ru

Цитирование: Glagolev M.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Il'yasov D.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V. 2023. Mathematical models of methane consumption by soils: A review. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(3): 145-166.

DOI: 10.18822/edgcc622937

Проведен подробный аналитический обзор наиболее известных математических моделей, оценивающих поглощение метана автоморфными почвами в наземных экосистемах. Рассмотрены простейшие варианты предлагаемых в научной литературе инвентаризаций окисления метана почвами, аналитические модели, численные модели, а также применение ансамблей моделей для решения проблемы математического описания поглощения (окисления) метана разными типами почв. Рассмотрены основные проблемы моделирования рассматриваемого природного процесса, перечислены преимущества, недостатки и ограничения конкретных моделей и подходов, а также критически оценена их практическая применимость. Для аналитических моделей приведены списки входных переменных. Рекомендован ансамблевый подход, который ранее не применялся для решения проблемы поглощения метана почвами.

Ключевые слова: окисление CH₄, модели земной системы, экологические факторы, метанотрофы

This review explores mathematical models that assess methane (CH₄) uptake in aerated soils within terrestrial ecosystems. Methane, a potent greenhouse gas, is produced under anaerobic conditions. While substantial research has been dedicated to methane emissions from water-saturated soils over the past four decades, the absorption of CH₄ by non-saturated soils, despite their expansive coverage, has received less focus. In tropical and subtropical soils, methane consumption constitutes less than 5% of the global uptake. However, there's limited data concerning methane consumption in temperate non-saturated soils, which are prevalent in forests, grasslands, steppes, and croplands. This data scarcity has resulted in estimate uncertainty: methane consumption ranges between 1% to 15% of the global methane sink attributed to photochemical degradation.

The mechanism of methane uptake by soils primarily stems from the dominance of methanotrophy over methanogenesis. In aerated soils, methane production by methanogens is absent (or minimal), with the primary source being the atmosphere. Methanotrophs, active in the upper soil layer, uptake this atmospheric methane. This absorption rate is influenced by both microbial oxidation and the diffusion of methane into the soil. The diffusion rate is notably determined by the atmospheric concentration of CH₄ and the porosity of the soil's aeration – the fewer the pores filled with water, the more rapid the diffusion. The rate of oxidation, on the other hand, is influenced by the soil's temperature and moisture levels. Just as neither extremely dry soil (where microbial activity is limited due to water scarcity) nor overly wet soil (where microorganisms are deprived of oxygen) offer optimal conditions; temperature extremes – whether too cold or too hot – can also negatively impact the methane oxidation process.

Nowadays, direct measurements of both methane consumption and emission processes are routinely conducted using high-precision field gas analyzers. However, while CH₄ emissions have garnered significant attention, data collection on methane consumption is still limited, particularly in remote locations. When in situ data are limited, mathematical models offer a reliable approach for extrapolating site-specific data to regional or global scales, enhancing our understanding of soil methane oxidation processes and how they respond to climatic shifts. In this study, we critically evaluate various mathematical models related to the topic, examining their strengths, limitations, and suitability for estimating large-scale methane consumption in aerated soils.

The field of CH₄ cycle modeling currently employed a diverse range of mathematical models. These can be broadly classified into two main categories: (1) empirical models, and (2) physics-based models. The choice between these models often depends on the research objectives. On the other hand, models of regional ecology can be grouped into interpolation-extrapolation, analytical, and numerical categories. The interpolation-extrapolation models relate specific ecosystem properties (e.g. emissions) with their spatial or temporal coordinates. Analytical models capture the

underlying physics, though achieving analytical solutions often requires simplifications to address the complexity of the equations. In contrast, numerical models are intricate and rely on numerical methods for their solutions.

The "simple inventory" is interpolation-extrapolation method that estimates methane uptake from soil-atmosphere interactions using basic formulations. Originally based on biome types, the accuracy of this method is relatively low but has been used in several global and regional methane studies. Recent approaches further classify soils into structural classes, linking methane absorption rates to these classifications. Dutaur and Verchot (2007) aimed to refine this method, investigating correlations with latitude, temperature, and precipitation. Their use of discrete categorization variables, like climate zones and ecosystem types, improved predictive accuracy of the model. However, extrapolating localized measurements to broader scales remains a challenge due to the limited data and ecosystem heterogeneity.

Analytical models leverage an understanding of the underlying physical processes to create equation-based representations. Early research indicated that the rate of soil methane absorption from the atmosphere was predominantly constrained by atmospheric diffusion (e.g. [Born et al., 1990; Potter et al., 1996]). This is because the ability of methanotrophs to consume methane often surpasses the diffusion transport mechanism's capacity. As a result, the peak rate of soil methane absorption from the atmosphere is capped by diffusion.

As research deepened into the factors affecting CH₄ absorption in non-saturated soils, models grew in complexity. It became evident that microbial oxidation, alongside methane diffusion, played a pivotal role in determining methane consumption rates. For optimal methane oxidation, conditions must be warm and the soil should be neither too dry nor too wet. The relationship between nitrogen and methane absorption remains a topic of debate. Nitrogen fertilizers suppress methane oxidation, but these fertilizers also promote plant growth, affecting soil moisture and potentially influencing methane dynamics.

The MeMo model [Murguía-Flores et al., 2018] stands out as one of the most comprehensive adaptations, building upon the models of Ridgwell et al. [1999] ("R99") and Curry [2007] ("C07"). The MeMo model incorporates factors, such as biome type, atmospheric methane concentration, soil temperature, nitrogen input, soil density, clay content, and soil moisture. Crucial enhancements were made to the original designs: a holistic analytical solution in a porous medium, refined nitrogen inhibition of methanotrophy, biome-specific influences on methane oxidation rate, and consideration of indigenous soil CH₄ sources on methane uptake from the atmosphere. These modifications have notably improved the model's alignment with observational data.

Regarding numerical models, few are specifically designed for assessing methane consumption, with more models being general ones that describe the methane dynamics in soil (incorporating oxidation, methane production, and transport). Intricate numerical models potentially offer more versatility than empirical or semi-empirical analytical ones: e.g. some analytical models often inherently assuming swamp methane oxidation as zero, not reflecting reality. However, numerical models usually require numerous site-specific parameters, such as soil usage, root zone depth, or even particular metabolic data. Because they're so tailored to specific sites, their use on a larger scale can be limited. Thus, using these models for regional methane uptake estimations doesn't guarantee high-quality results today.

A recent trend in modeling natural processes focus on the ensemble approach. This strategy involves averaging results from multiple independent models focused on a shared metric. Comparative analysis shows that the highest quality is usually demonstrated by the "ensemble average" model. This is due to the fact that systematic errors of different models do not depend on each other and can be mutually compensated when averaging over the ensemble. The success of this approach has been confirmed in regularly published IPCC reports. The use of ensembles of models is also used in the study of methane fluxes from soil, both in solving direct and inverse problems [Glagolev et al., 2014; Poulter et al., 2017; Bergamaschi et al., 2018], but this approach has apparently not yet been used directly to estimate methane uptake by soils.

Mathematical models don't always align with experimental data for specific research sites, as noted by authors such as Ridgwell et al. [1999] and Murguía-Flores et al. [2018]. These models can sometimes overestimate or underestimate certain metrics. This inconsistency is further evident when different researchers identify similar parameters in their models but, based on various datasets, arrive at different values. For instance, while R99 utilized a value based on 13 measurements from diverse locations, C07's value was derived from a five-year observation in Colorado. Meanwhile, the MeMo model introduced values for four distinct biome types. Nevertheless, when these models are applied on a global scale, they provide reasonably accurate estimates of the planet's total methane uptake by soils. These estimates are in line with both basic inventories, like those from [Born et al., 1990], and more advanced methods, such as the inverse modeling by Hein et al. [1997]. This suggests that for larger regions, the models can still yield sensible CH₄ absorption assessments, with overestimations in certain geographical areas being balanced out by underestimations in others.

Key words: CH₄ oxidation, Earth system models, environmental controls, methanotrophs.

Принятые сокращения

ОДУ – обыкновенные дифференциальные уравнения;
ППП – поверхностная плотность потока (удельный поток);
УЧП – уравнение (или уравнения) в частных производных;
C07 – модель Curry [2007];
P96 – модель Potter et al. [1996];
R99 – модель Ridgwell et al. [1999];
W96 – модель Walter et al. [1996].

«Все должно делаться настолько простым, насколько это возможно, но не проще».

А. Эйштейн¹

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки окисления метана почвами

Метан – важный парниковый газ, образующийся в бескислородных условиях. Такие условия возникают в обводненных почвах [Arah, Stephen, 1998]. Эмиссия метана из этих почв весьма интенсивно исследуется уже в течение, как минимум, четырех десятилетий [Cicerone et al., 1983; Le Mer, Roger, 2001; Davydov et al., 2021; Sabrekov et al., 2022]. Напротив, в не насыщенных водой почвах происходит поглощение CH_4 [Aroa et al., 2018]. Углеводороды, как и другие органические вещества, подвержены разрушению. Первые предположения о биологической природе этого разрушения содержатся в работах Миоши (Miyoschi, 1895 г.). Но прямые указания на потребление метана микроорганизмами появились только в 1906 г. в работах Казерера (Kaserer) и Зенгена (Söhngen) [Mavrina, 1966], причем благодаря Зенгену стало понятно, что метан может быть окислен в почве с образованием органических соединений и CO_2 . Кроме Зенгена и Казерера еще несколько исследователей в первой половине XX-го века (Stormer, 1907 г.; Muntz, 1915 г.; Aiyer, 1920 г.; Kapralek, 1954 г.) описали целый ряд видов бактерий, обладающих способностью окислять CH_4 [Pochon, de Barjac, 1958, p. 213, 227]. Благодаря этим и другим многочисленным исследованиям представление о микробиологической природе почвенного поглощения метана прочно утвердилось в науке.

Скорость окисления метана микроорганизмами зависит от температуры и влажности почвы. При этом оптимальные условия не обеспечит ни слишком сухая почва (в ней микробная активность мала из-за недостатка воды), ни слишком влажная (в которой микроорганизмы лишаются кислорода). Аналогичное можно сказать и о температуре: оптимальными для окисления CH_4 будут теплые условия, а не слишком холодные или жаркие (при возрастании температуры от 0 до 27.5 °C потребление метана возрастает примерно в 4 раза). Однако интенсивность поглощения определяется не только биологическим окислением, но и физическим процессом диффузии метана в почву. Последняя зависит, в частности, от концентрации CH_4 в атмосфере и от порозности аэрации (чем меньший объем пор занят водой и льдом, тем быстрее идет диффузия) [Aroa et al., 2018].

Суммарный сток метана в тропических и субтропических почвах составляет менее 5% от глобального стока, определяемого, главным образом, фотохимическим разрушением молекулы CH_4 при ее взаимодействии с радикалом OH . Измерений поверхностной плотности потока (ППП) метана, потребляемого различными типами почв умеренного пояса, выполнено относительно мало, в результате чего разброс оценок суммарного поглощения CH_4 почвами всего мира составляет 1÷15% (от фотохимического разрушения) [Born et al., 1990]. Дать обоснованные оценки регионального и глобального поглощения метана почвами способны математические модели [Murguia-Flores et al., 2018], разработанные для экстраполяции (результатов измерений ППП) от масштаба небольшого исследовательского полигона на региональный или даже глобальный уровень [Li, 2000]. Вообще в «метановой» тематике модели применяются уже около полувека (хотя конкретно для описания почвенной метанотрофии, вероятно, немного менее, но, в любом случае – несколько десятилетий) [Xu et al., 2016]. За это время они продемонстрировали свою высокую эффективность при работе с пространственно-временной неоднородностью. Кроме того, многие из них позволяют улучшить наше понимание физических и биологических процессов, определяющих интенсивность почвенной метанотрофии, вследствие чего оказывается возможным предсказать отклик поглощения CH_4 почвой на глобальные изменения климата [Murguia-Flores et al., 2018].

¹ Цитируется по [Bloch, 2003, p. 594].

Математические модели в экологии

Согласно известному определению Игоря Андреевича Полетаева, «модель² есть аккуратно собранная система гипотез, изложенная математически с целью построения *теории* объекта» [Titlyanova, 2011, p. 23]. Сила математики заключается в ее способности выражать идеи и особенно сложные связи с помощью символической логики, сохраняя в то же время простоту и рациональность выражения, из которого можно формальным способом получить некие предсказания [Jeffers, 1978, p. 29-30]. Наука всегда стремилась выйти за пределы описания и прорваться к объяснению. Классическая гносеология описывает движение научно-познавательного процесса как ход мышления от вопроса к проблеме, затем к гипотезе, которая после достаточного обоснования превращается в модель [Kokhanovskiy et al., 2007, p. 269, 277]. Очевидно, что в своем развитии экология также проходит этот путь, поэтому с течением времени в ней все шире и шире используется математическое моделирование.

В настоящее время в экологии применяются самые разные модели (см. например, [Jeffers, 1978; Leffelaar, 1993; Glagolev, 2008, 2021; Suhoveeva, Karelin, 2022]), в том числе и основанные на вероятностных распределениях (в частности, [Bailey, 1967, Chapter 8; Durinx et al., 2008; Glagolev, Kleptsova, 2009; Sabrekov et al., 2011]). Обычно модели потока CH_4 делят на две большие категории: (1) эмпирические модели и (2) физически обоснованные модели [Xu et al., 2016]. Иногда выделяют и третью – промежуточную – группу: в нее входят модели, в которых часть уравнений представляет собой чисто эмпирические формулы, а другая часть – физически обоснованные законы [Glagolev, 2010, p. 33, 36]. Но поскольку любая классификация условна и просто должна отвечать тем или иным целям (разным в разных исследованиях), то здесь мы будем использовать иную классификацию, учитывающую вычислительный аппарат, необходимый для реализации конкретной модели.

Таблица. Классификация математических моделей региональной экологии.

Группа	Описание	Комментарий
Интер-поляционно-экстра-поляционные	Какое-либо свойство экосистемы (для определенности будем подразумевать удельный поток метана) связывается лишь с координатами точки (в пространстве и/или времени), в которой это свойство измеряется.	Интерполяцию и экстраполяцию можно проводить при помощи различных математических функций. В экологии чаще всего, пожалуй, используется простейшая – кусочно-постоянная – аппроксимация. В этом случае некоторой окрестности географической точки (окрестность обычно охватывает ландшафт определенного типа) приписывается постоянное значение параметра. Иногда подобный подход называют «простейшей инвентаризацией» – см., например, [Glagolev, Filippov, 2011; Terent'eva et al., 2017].
Аналитические	Аналитические методы обычно дают решение в виде математических функций, которые могут быть вычислены для заданных значений аргументов [Gerald, Wheatley, 1994]. Аналитические методы основаны на точных решениях уравнений. Построение математических моделей позволяет учесть физику процессов, однако часто приводит к слишком сложным уравнениям, которые невозможно решить аналитически. Чтобы получить аналитические решения, необходимо вводить допущения, упрощающие исходную теоретическую модель. Следовательно, аналитические методы представляют собой точные решения упрощенных задач [Ertekin et al., 2001].	Например, формула (1) дает значение удельного потока в виде простейшей – линейной – функции коэффициента диффузии. Если бы поток был выражен через какие-то более сложные функции (так называемые элементарные, типа $\sin$, $\cos$ и др., или даже через специальные функции – Бесселя, Струве и др.), то это все равно была бы аналитическая формула.
Численные	Относительно сложные модели, решения которых не выражаются в аналитическом виде и могут быть найдены только численными методами.	Численные модели обычно представляют собой дифференциальные уравнения – обыкновенные (ОДУ) или в частных производных (УЧП).

² Следует думать, что речь идет о *математической* модели, иначе (для иных моделей) определение становится неправильным.

В настоящей работе будет дан краткий обзор математических моделей поглощения метана почвой³, причем основное внимание мы уделим описанию входных данных, необходимых для проведения региональных расчетов по этим моделям. Для удобства дальнейшего изложения эти модели будут разделены на три условные группы: интерполяционно-экстраполяционные, аналитические и численные (табл.).

ПРОСТЕЙШИЕ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТАНА ПОЧВАМИ

Основы метода «простейшей инвентаризации»

В методе «простейшей инвентаризации» поток метана на границе почва/атмосфера (E , мг/час) для некоторого региона вычисляется приближенно по весьма простой формуле [Zelenev, 1996]:

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

где A_{ij} – площадь (м^2), занимаемая i -м типом почв (или экосистем) в j -ой области, представляющей собой часть интересующего региона; f_i – поверхностная плотность потока газа ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), характерная для i -го типа почв (или экосистем) [Glagolev, Filippov, 2011]; T_j – характерная для j -ой области продолжительность периода (час) выделения или поглощения газа⁴.

Основные подходы к оценке метаноокисления в методе «простейшей инвентаризации»

Относительно подробно основные подходы к оценке поглощения метана почвами этим методом описаны ранее в [Glagolev, Filippov, 2011], поэтому здесь мы лишь перечислим их. По-видимому, одной из первых работ (если не самой первой), посвященных возможности глобальной инвентаризации окисления метана, была публикация [Born et al., 1990]. **Входной информацией в подходе этих авторов является только «тип биома».** Точность получаемой оценки – весьма низкая, но такую инвентаризацию, в частности, использовали Fung et al. [1991] в своем исследовании глобальных источников и стоков, а также Glagolev, Filippov [2011] для оценки регионального поглощения метана почвами России. Аналогичное исследование позднее провели Dutaur, Verchot [2007]. Они проанализировали более 120 публикаций, содержащих результаты полевых измерений поглощения CH_4 в экосистемах различных типов и дали свою типизацию поглощения метана, несколько отличающуюся от приведенной в [Born et al., 1990]. Входной информацией здесь также является только «тип биома».

Для региональной и глобальной оценки Dörr et al. [1993] разбили почвы на три основных структурных класса (“Coarse”, “Medium”, “Fine”), которым соответствовали определенные значения скорости поглощения CH_4 . При этом по структурным классам определялось как бы **потенциальное** поглощение метана, а для перехода от потенциального поглощения (Π) к актуальному (A) использовалось простое правило: $A = 0$ для пустынь и болот, а для всех остальных типов экосистем $A = \Pi$. Таким образом, **входной информацией в подходе этих авторов являются: класс структуры почвы** и тип ландшафта (причем возможны только 2 типа: «пустыни или болота», «иной»). Аналогичное исследование позднее провели Dutaur, Verchot [2007]. Полученные авторами значения скорости поглощения метана характеризовались весьма большими разбросами и (с учетом этого) статистически значимо не отличались от приведенных в [Dörr et al., 1993].

Но Dutaur, Verchot [2007] не остановились на этом, а поставили себе целью найти более точный способ оценки поглощения CH_4 . Проведенный ими регрессионный анализ (по широте, температуре и количеству осадков) не выявил значимых взаимосвязей (соответственно, $R^2 = 0.01$, 0.02 и 0.03) со скоростью поглощения CH_4 почвой. Лучшее качество предсказаний ($R^2 = 0.29$, $P < 0.0001$) обеспечило разбиение данных на классы в соответствии со значениями дискретных переменных («климатическая зона», «тип экосистемы» и «структура почвы»). В результате авторами каждому

³ Поскольку **аэробное** окисление CH_4 , образуемого в почве или поступающего из атмосферы, играет существенно большую роль в почвенном поглощении метана, нежели окисление анаэробное, то пока не было разработано моделей, которые учитывали бы последнее в явном виде [Xu et al., 2016], за исключением, разве что, [Xu et al., 2015]. Таким образом, **наш обзор посвящен почти одним лишь моделям поглощения CH_4 в аэробных условиях.**

⁴ Однако региональные и глобальные оценки часто делаются в расчете на год. При этом удобно выражать f_i также в расчете на год (и, формально, как бы принимать $T_j = 1$ год).

такому классу было приписано некоторое характерное поглощение метана. **Входной информацией в данном подходе являются: класс структуры почвы, климатическая зона, облесенность.**

К сожалению, простая экстраполяция (на региональный масштаб) «точечных» измерений потоков плохо обоснована из-за того, что обычно количество измерений не слишком велико, а пытаются распространить их, напротив, на весьма обширные гетерогенные территории – покрытые существенно разными экосистемами [Watts et al., 2014]. С чисто логической точки зрения, математические модели, учитывающие связи потоков с факторами среды, могут дать лучший результат экстраполяции. На первый взгляд это может показаться странным, поскольку при том же количестве измерений потоков, казалось бы, количество информации остается прежним. Но если количество информации не увеличилось, то за счет чего же тогда может улучшиться качество экстраполяции? На самом деле использование указанных моделей увеличивает количество используемой информации. Действительно, в их структуре учтена связь потоков с факторами внешней среды, а для этих факторов относительно легко получить информацию, которая может включать в себя как результаты непосредственных измерений на метеостанциях, так и данные дистанционного зондирования не только в местах реальных измерений потоков, но, фактически, в любой географической точке. Вот эта-то информация – по факторам внешней среды и их связи с потоками – и будет дополнительной (по сравнению с обычными экстраполяционными моделями).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА ПОЧВАМИ

Эмпирическая связь поглощения CH_4 с коэффициентом диффузии в почве

Кроме сказанного выше, Born et al. [1990] высказали следующую идею: в природе потребление метана в аэрируемых почвах определяется главным образом диффузией (и это они попытались обосновать экспериментально). А, например, потенциальная скорость процессов разложения, вызываемых микробами, имеет второстепенное значение (не была обнаружена корреляция поглощения CH_4 с содержанием органического вещества в почве). Отсюда следует, что простейшей функциональной зависимостью, позволяющей рассчитать поглощение метана, является, вероятно, однопараметрическая связь ППП с коэффициентом диффузии газа в почве.

Теоретическое объяснение данному подходу дал Striegl [1993]. Согласно ему, транспорт газов из атмосферы в почву и из почвы в атмосферу определяется главным образом диффузией. Причиной поглощения метана поверхностью автоморфных почв является его потребление бактериями-метанотрофами в верхнем слое почвы, имеющем толщину в несколько сантиметров. При этом способность метанотрофов к потреблению метана обычно превышает пропускную способность диффузионного механизма транспорта. Таким образом, максимальная скорость поглощения почвой метана из атмосферы лимитируется именно диффузией. Позднее Potter et al. [1996] подтвердили, что главным фактором, ограничивающим окисление метана в большинстве почв, является именно диффузия атмосферного CH_4 в них (впрочем, эта точка зрения обоснованно критикуется, например, в [Ridgwell et al., 1999; Del Grosso et al. 2000; Curry, 2007; Murguía-Flores et al., 2018]).

Конкретную формулу для расчета предложили⁵ Dörr et al. [1993]. Эти исследователи обнаружили, что ППП метана линейно зависит от коэффициента диффузии в почве (D , $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). Немного позднее, анализируя суммарный массив, составленный из данных [Born et al., 1990; Dörr et al., 1993], Glagolev, Filippov [2011] показали, что в предложенной формуле один из коэффициентов имеет весьма низкий уровень значимости⁶, на основании чего они упростили⁷ ее до следующей:

$$f_i = a \cdot c \cdot D, \quad (1)$$

⁵ Ранее Born et al. [1990] говорили о нелинейной зависимости $f_i(D)$, хотя и не дали ее формулу. Однако в работе [Born et al., 1990] охвачен только интервал D от 0.001 до 0.031 $\text{см}^2/\text{с}$, тогда как в [Dörr et al., 1993] – от 0.013 до 0.053 $\text{см}^2/\text{с}$.

⁶ А если ограничиться только данными, которые использовали непосредственно Dörr et al. [1993], то этот коэффициент оказывается вообще статистически не значимым.

⁷ Как оказалось, обнуление незначимого коэффициента соответствовало и физическому смыслу. Речь идет о коэффициенте, равным удельному потоку газа при нулевой диффузии. Но если $D = 0$, то в почву вообще не будет поступать кислород и окисление метана прекратится. На первый взгляд, тут можно было бы возразить, что возможно анаэробное окисление CH_4 . Но при нулевой диффузии в почву не сможет поступать и метан, следовательно, измерения, выполняемые на поверхности почвы все равно дадут нулевой поток.

где пересчетный коэффициент $c = 0.36 \text{ с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, а наилучшее (в смысле наименьших квадратов) значение $a = -379 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-4}$ (при этом $R^2 = 0.8069$).

Таким образом, входные данные, необходимые для использования описанной формулы, представляют собой те, которые позволяют вычислить коэффициент диффузии верхнего слоя почвы. Для расчета коэффициента диффузии в литературе (см., например, [Millington, Shearer, 1971; Shein, 2005, p. 307-308; Curry, 2007; Moldrup et al., 2013] и ссылки там) предложено множество методик, требующих больше или меньше входных данных.

Как видим, зависимости $f(D)$ в [Dörr et al., 1993; Glagolev, Filippov, 2011] – чисто эмпирические. Striegl [1993] дал более сложную, но зато теоретически обоснованную зависимость. Впрочем, несмотря на утверждение этого автора о том, что потребление метана лимитируется только диффузией, его формула содержит константу окисления CH_4 метанотрофами и, таким образом, этот результат идейно весьма близок излагаемой далее работе [Ridgwell et al., 1999]. А физически обоснованную «чисто диффузионную» модель предложили Potter et al. [1996].

Модель Potter et al. [1996]

Модель Potter et al. [1996] (которую, следуя предложению Murguia-Flores et al. [2018], далее мы будем обозначать «P96») предполагает, что (i) поглощение метана не происходит в почвах пустынь и болот; (ii) окисление CH_4 пренебрежимо мало при температурах, меньших температуры замедления воды; (iii) при температурах выше этого порога окисление лимитируется только диффузией газа в почве, поэтому чем ниже влажность, тем больше должна быть скорость поглощения метана. Поскольку окисление лимитируется только диффузией, то вычисление интенсивности поглощения метана осуществляется (с месячным шагом) просто на основе определения того, что такое диффузионный поток, т.е. на основе 1-го закона Фика, записанного для переноса в пористой среде [Potter et al., 1996].

Входными параметрами данной модели являются:

- информация о заболачивании или опустынивании;
- среднемесячные температуры поверхности почвы;
- месячные суммы осадков;
- почвенная текстура (“coarse”, “coarse/medium”,⁸ “medium”, “medium/fine”, “fine”);
- информация о применении азотных удобрений.

Впрочем, почвенная текстура может быть определена по процентному соотношению глины, пыли и песка в почве [Potter et al., 1996]. Влажность почвы рассчитывается при помощи подмодели водного баланса, используемой в исходной версии известной модели CASA и описанной в [Potter et al., 1993].

Однако экспериментальные данные⁹ показывают, что, во-первых, существенное поглощение метана возможно и при температурах, меньших 0°C , и, во-вторых, зависимость скорости поглощения от влажности не монотонна – она имеет максимум при объемном содержании воды 7-20%, что противоречит предположениям (ii) и (iii), положенным в основу рассматриваемой модели [Del Grosso et al., 2000]. Поскольку на самом деле CH_4 потребляется в результате активности почвенных микроорганизмов, упрощенная (чисто диффузионная) модель может недооценивать интенсивность поглощения метана [Murguia-Flores et al., 2018]. Наконец, поскольку при расчетах градиент концентрации CH_4 в верхнем слое почвы принимается одним и тем же для всех почв, хотя он может отличаться, по крайней мере, на 75% [Potter et al., 1996], в отдельных случаях возможны большие погрешности. Поскольку P96 с формальной точки зрения представляет собой просто ур. (1), то интересно сравнить коэффициент пропорциональности (перед D ; $[D] = \text{см}^2/\text{с}$) с тем, который получили Glagolev, Filippov [2011]. В последнем случае, очевидно, имеем:¹⁰

⁸ К этому классу относят и все органогенные почвы (независимо от их реальной текстуры).

⁹ Конечно, Potter et al. [1996] обосновывают свою гипотезу ссылкой на опыт полевых исследований, но у них это данные, которые якобы показывают, что окисление лимитируется только диффузией. Как же так? Полную ясность в этот темный вопрос внесли российские философы Kokhanovskiy et al. [2007, p. 185], сформулировавшие своеобразный методологический принцип: «...если какой-либо факт не объясняется данной гипотезой, последнюю не следует сразу отбрасывать, а нужно более внимательно... искать новые – более лучшие... факты». Осталось только выяснить: чьи факты «более лучшие» – Potter’a et al. [1996] или Del Grosso et al. [2000].

¹⁰ Знак опускаем, поскольку Potter et al. [1996] считали положительным поток метана *в почву*, а Glagolev, Filippov [2011] – *из почвы*.

$$\alpha \cdot c = (379 \cdot 10^{-6} \text{ моль} \cdot \text{м}^{-4}) \cdot (0.36 \text{ с} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}) \cdot (16 \cdot 10^3 \text{ мг/моль}) \approx 2.18 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{мг},$$

а в Р96 коэффициент пропорциональности составляет

$$(0.04 \text{ ppmv/см}) \cdot (24 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{ppmv}^{-1} \text{с}) = 0.96 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{мг},$$

т.е. примерно в 2 раза меньше. Впрочем, Potter et al. [1996, p. 2225] намекают, что принятое ими значение градиента концентрации метана в верхнем слое почвы (0.04 ppmv/см) – «вилами по воде писано» и ясно указывают, что оно вполне может достигать величины 0.07 ppmv/см. Тогда коэффициент пропорциональности возрастает до $1.68 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{мг}$ и противоречие с [Glagolev, Filippov, 2011], фактически, снимается.

Модель Р96 использовали Ito and Inatomi [2012, p. 762] в своей биогеохимической модели VISIT, но они внесли небольшое изменение, которое требует **дополнительные входные параметры**:

- концентрацию метана;
- плотности почвы и ее твердой фазы (поскольку для расчета влажности почвы эти авторы использовали гидрологическую схему VISIT, а не CASA).

Модель Ridgwell et al. [1999]

Ridgwell et al. [1999] пытались построить модель (которую, следуя предложению Murguía-Flores et al. [2018], далее мы будем обозначать «R99»), исходя из закона Фика, дополненного членом, выражающим скорость окисления метана по кинетике 1-го порядка на некоторой глубине (т.е. их модель должна была представлять собой прямое развитие Р96). Поэтому принято считать эту модель физически обоснованной, а не эмпирической. Однако при выводе основного уравнения модели (выражающего удельный поток поглощения CH_4 через коэффициент диффузии, константу скорости окисления и глубину, на которой происходит это окисление), авторы допустили вопиющую ошибку¹¹, в результате которой модель лишилась физического смысла и ее следует рассматривать лишь как эмпирическую. Тем не менее, поскольку предсказываемые моделью величины потока оказываются разумными, использовать ее вполне возможно. В русскоязычной литературе данная модель описана, например, в [Glagolev et al., 2014] (но при этом использовалась подмодель влажности почвы, основанная на [Mezentsev, Karnatsevich, 1969, p. 20; Shein, 2005, p. 92]¹²). Поскольку в РФ модель была успешно реализована в такой модификации, то опишем **входные параметры** именно для нее:

- тип ландшафта («болото», «пустыня», «лед», «вода», «иное»);
- доля площади земель, вовлеченных в сельскохозяйственное использование;
- плотность почвы (г/см^3);
- порозность почвы;
- среднемесячные температуры¹³ ($^{\circ}\text{C}$);
- месячные суммы осадков (мм);
- наименьшая влагоемкость метрового почвенного слоя (мм).

Наименьшая влагоемкость зависит от текстуры почвы, но при отсутствии информации, в первом приближении она может быть принята равной 300 мм [Glagolev et al., 2014]. Свойства почвы могут быть вычислены при наличии информации о процентном содержании песка и глины [Ridgwell et al., 1999]. Однако проводя сравнение результатов расчетов по MeMo и R99, Murguía-Flores et al. [2018] смогли использовать для последней тот же набор входных данных, что и для MeMo (см. ниже), за одним исключением: для R99 не требовалась информация о поступлении азота, а

¹¹ Эта ошибка привела к тому, что в основном уравнении складываются величины разной размерности: коэффициент диффузии ($\text{см}^2/\text{с}$) и произведение константы 1-го порядка ($1/\text{с}$) скорости окисления на глубину (см). Таким образом, **при работе с данной моделью нельзя переходить к другим размерностям, а следует использовать только те, которые использовались авторами** (при этом удельный поток будет получен в $\text{мг} \cdot \text{сут.}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ и его, при необходимости, уже можно переводить в другие единицы). Некоторые элементы описываемой модели изложены еще и в [Ito and Inatomi, 2012, p. 762], но там основное уравнение (!!!) благоразумно вообще не упоминается.

¹² Ridgwell et al. [1999] использовали подмодель влажности из [Potter et al., 1993], слегка видоизменив ее.

¹³ К сожалению, ни Ridgwell et al. [1999], ни [Glagolev et al., 2014] не указывают в явном виде – это температура почвы или воздуха.

вместо нее нужна была информация о доле обрабатываемых почв в пространственной ячейке, для которой производился расчет.

Рассматриваемая модель предполагает возможность поступления метана только из атмосферы и, таким образом, может использоваться лишь для автоморфных почв, в которых нет источников CH_4 (и эти источники не возникают при изменении условий среды) [Ridgwell et al., 1999].

Модель Del Grosso et al. [2000]

Данная модель состоит из двух подмоделей: (i) для расчета поглощения почвами лугов, а также хвойных и тропических лесов; (ii) почвами лиственных лесов. Для вычисления потенциальной скорости окисления CH_4 в первой подмодели используются уравнения Potter et al. [1996], а во второй задается ее линейная зависимость от порозности минеральной почвы. **Входными параметрами являются:**

- плотность почвы (г/см^3);
- содержания песка и глины (%);
- температура почвы или воздуха ($^{\circ}\text{C}$);
- наличие/отсутствие сельскохозяйственной обработки почвы;
- объемная влажность почвы ($\text{см}^3\text{Воды/см}^3$);
- наименьшая полевая влагоемкость ($\text{см}^3\text{Воды/см}^3$).

Последний параметр не всегда измеряется в полевых условиях, поэтому он может задаваться на основании некоторых теоретических представлений [Del Grosso et al., 2000]. Данную модель использовали Ito and Inatomi [2012, р. 762] в биогеохимической модели наземных экосистем, но при этом они рассчитывали влажность почвы по гидрологической схеме VISIT, в связи с чем в списке **входных параметров** вместо влажности требовалось задавать плотность твердой фазы почвы.

В модели Del Grosso et al. [2000] предполагается, что максимальная скорость окисления метана определяется структурными свойствами почвы, а изменение реальной скорости во времени коррелирует с температурой и влажностью почвы. При высокой влажности поглощение CH_4 лимитируется, главным образом, диффузией газа в почве, а при низкой – снижением биологической активности. Это аналогично подходу, использованному в модели Ridgwell et al. [1999], однако последняя считается физически обоснованной (поскольку ее авторы пытались учитывать влияние факторов внешней среды на конкретные физические и биологические процессы), тогда как модель Del Grosso et al. [2000] – эмпирическая. С другой стороны, последняя валидирована на большом массиве данных, полученных в Central Plains Experimental Range (Colorado); High Plains Experimental Research Laboratory (Nebraska); Harvard Forest (Massachusetts); Scotland; New Hampshire. Кроме того, для построения и тестирования модели использовались данные, полученные в Бразилии, Германии (Höglwald, Solling, Darmstadt), Коста Рике, Нью-Йорке и Пуэрто Рико [Del Grosso et al., 2000].

Блок окисления CH_4 в модели CLASS-CTEM

«Canadian LAnd Surface Scheme and Canadian Terrestrial Ecosystem Modelling framework» (CLASS-CTEM) предназначена для моделирования как эмиссии метана из болот, так и его поглощения почвами [Arora et al., 2018]. Для решения последней задачи используется блок, детально описанный в [Curry, 2007; 2009] (который, следуя предложению Murguía-Flores et al. [2018], далее мы будем обозначать «C07»). Этот блок также применялся и в глобальных биогеохимических моделях, например, в Lund-Potsdam-Jena model [Murguía-Flores et al., 2018]. Интенсивность поглощения метана вычисляется на основе решения одномерного по пространству (пространственная координата – глубина) уравнения неразрывности, учитывающего диффузию метана и его потребление по кинетике 1-го порядка. Для коэффициента диффузии и константы окисления CH_4 вводятся зависимости от параметров среды.

Для расчета поглощения CH_4 требуются следующие входные параметры:

- C_0 (ppmv)¹⁴ – концентрация метана на границе почва/атмосфера (принимается равной его концентрации в атмосфере);
- f_{clay} и f_{sand} – доли, соответственно, глины и песка в почве;

¹⁴ Сначала Curry [2007, р. 2] дает размерность в виде см^{-3} , но из приводимой им формулы для расчета удельного потока метана становится очевидно, что правильная размерность потока получится, если концентрация, как это обычно и принято, выражена в единицах массы, деленных на единицы объема, например, мг/см^3 . В дальнейшем автор исправляет эту вопиющую ошибку, приводя для концентрации размерность ppmv и вводя коэффициент пересчета, позволяющий получить удельный поток в $\text{мг/м}^2\cdot\text{сут.}$.

- T_{soil} (°C) – температура почвы;
- θ_i (см³Льда/см³) – льдистость почвы;
- θ_w (см³Воды/см³) – влажность почвы;
- Φ (см³Пор/см³) – общая порозность.

Все вышеперечисленные параметры (кроме C_0) должны быть заданы в виде средних значений для слоя почвы 0-10 см [Curry, 2007; 2009]. Кроме них, поскольку два параметра модели зависят от того, *относятся ли почвы к «обрабатываемым» или к «болотам»*, необходима еще и такая информация. Но соответствующие карты есть в Дополнительных материалах к [Curry, 2007], следовательно, с формальной точки зрения, информацию об обработке почвы и ее заболоченности можно считать не входной, а внутренним параметром модели. Однако проводя сравнение результатов расчетов по MeMo и C07, Murguia-Flores et al. [2018] смогли использовать для C07 тот же набор входных данных, что и для MeMo (см. ниже), за одним исключением: для C07 не требовалась информация о поступлении азота, а вместо нее нужна была информация о доле обрабатываемых почв в пространственной ячейке, для которой производился расчет.

C07 использовалась для расчета глобального поглощения метана почвами (при этом необходимые входные параметры брались из базы данных, описанной в [Zobler, 1986]) [Curry, 2007]. В Global Carbon Project эта модель принималась в качестве «reference model» [Murguia-Flores et al., 2018].

Модель MeMo

Модель MeMo была разработана на основе описанных выше моделей C07 и R99. При этом были произведены следующие улучшения исходных моделей: (1) получено общее аналитическое решение одномерного стационарного уравнения «диффузия+кинетика» в пористой среде¹⁵; (2) улучшено описание ингибирования метанотрофии азотом; (3) введено влияние типа биома на скорость окисления метана, кроме того, модернизировано описание ее зависимости от температуры и влажности почвы; (4) предусмотрена возможность оценить влияние автохтонных почвенных источников CH_4 на поглощение метана из атмосферы. Произведенные усовершенствования позволили данной модели лучше описывать данные наблюдений [Murguia-Flores et al., 2018].

Входными параметрами модели являются:

- тип биома («леса умеренного пояса», «тропические леса», «степь», «другие экосистемы»);
- среднемесячная концентрация метана в атмосферном воздухе;
- среднемесячная температура почвы (°C);
- месячное поступление азота в почву ($\text{гN} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес.}^{-1}$) – как из атмосферы, так и с удобрениями;
- плотности почвы (г/см^3);¹⁶
- содержание глины в почве (%);
- среднемесячная объемная влажность почвы (см³Воды/см³).¹⁷

Подробная информация об источниках этих данных, включая карты, имеется в конце статьи [Murguia-Flores et al., 2018] и в Supplement к ней.

Модель Yu et al. [2017]

Данная модель стоит несколько особняком от приведенных выше (и поэтому мы упоминаем ее последней, нарушая историческую последовательность, в которой рассматривались остальные модели). Для предыдущих моделей понятие минимального временного шага либо вообще не существовало (т.е. можно было вычислить интенсивность поглощения метана почвой в произвольный момент времени), либо этот шаг был не более месяца. В последнем случае он определялся, фактически, не столько «метановым» блоком, сколько используемой гидрологической

¹⁵ Ridgwell et al. [1999] тоже приводили «решение» этого уравнения, но из-за вопиющих ошибок решением оно не является. Впрочем, Murguia-Flores et al. [2018] тоже не смогли обойтись без ошибки, хотя и легко исправляемой. Так, они заявляют, что ППП, вычисляемые по их формулам, должны получаться в $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес.}^{-1}$, но поскольку в формулы входят только концентрация атмосферного метана в ppb, коэффициент диффузии в $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и константа скорости окисления в с^{-1} (нет никакого пересчетного коэффициента), то заявленная размерность получиться никак не может.

¹⁶ Murguia-Flores et al. [2018, Tab. 1] указывают, что размерность плотности почвы должна быть $1/(\text{г} \cdot \text{см}^3)$. Но очевидно, что это – вопиющая ошибка.

¹⁷ Murguia-Flores et al. [2018, Tab. 1] считают, что объемную влажность следует выразить в %, но очевидно, что это – ошибка. Действительно, в их модель входит разность общей пористости и влажности, а первая выражена не в %, а в долях единицы.

моделью. Таким образом, при помощи вышеприведенных моделей можно было проследить более или менее подробную динамику ППП CH_4 в течение года. Yu et al. [2017] построили модель, которая рассчитывает поглощение за год, но не дает внутригодовую динамику, в связи с чем не представляет для нас какого-либо интереса.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА ПОЧВАМИ

Особенности численных моделей

К настоящему времени существует не так много численных моделей, предназначенных специально для оценки поглощения метана. Гораздо больше было разработано общих моделей (включающих как окисление, так образование и транспорт CH_4 – рис.) для описания динамики концентрации метана в почве, но поскольку многие из них содержат блок его окисления, то, теоретически, они могут быть применены для расчета поглощения CH_4 почвой. Казалось бы, если в почве не идет образование метана (а только окисление), то достаточно положить интенсивность продукции CH_4 равной нулю, и общая модель динамики концентрации метана предскажет интенсивность его поглощения. В частности, на возможность такого «чисто окислительного» использования (по крайней мере, их модели) указывали Zhuang et al. [2004].

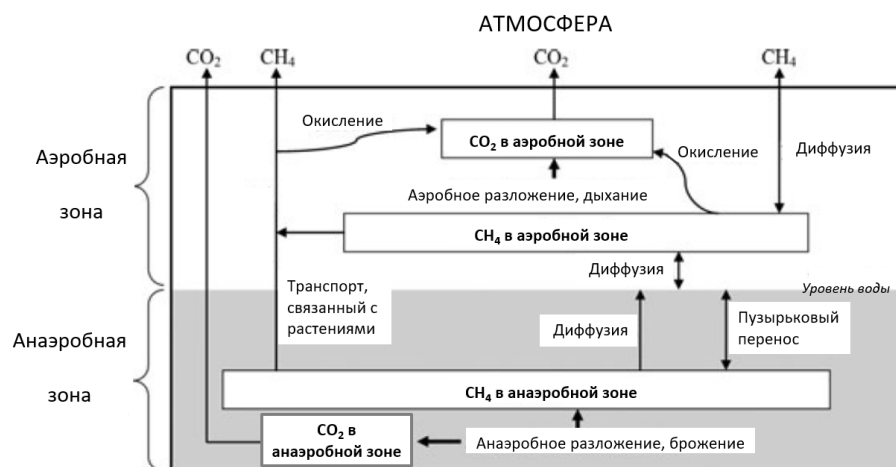


Рис. Резервуары и процессы, учитываемые в современных численных моделях цикла метана (по [Fan et al., 2013]).

Однако здесь есть одна сложность. Модели, предусматривающие возможность образования метана, разрабатывались для специфических местообитаний, где такое образование возможно (болота, рисовники, полигоны захоронения отходов). В этих местообитаниях преобладают специфические метанотрофы, привыкшие жить в условиях весьма высоких концентраций CH_4 (на несколько порядков превышающих атмосферную концентрацию). И именно их кинетические характеристики заложены в указанные модели. Но если в почве нет образования метана, то там функционируют метанотрофы с совершенно иными кинетическими характеристиками – «болотно-рисово-свалочные» бактерии просто не выжили бы в лесу или в поле, где в почвах концентрация метана ниже атмосферной¹⁸ (подробнее о кинетических характеристиках тех и других групп метанокисляющих микроорганизмов и дальнейшие ссылки по этому вопросу см., например, в [Segers, 1998, p. 35; Riley et al., 2011, p. 1931-1932; Oh et al., 2020, p. 317; Glagolev et al., 2022, p. 131-135]).

С одной стороны, сложные численные модели потенциально обладают большей общностью, нежели эмпирические и полуэмпирические аналитические модели. Например, выше мы видели, что в аналитических моделях часто априори ставится ограничение: окисление метана в болотах равно нулю. Однако в реальности такие широко распространенные болотные ландшафты, как, например, гряды (в грядово-мочажинных комплексах) или рямы часть года могут быть источниками метана, а

¹⁸ Впрочем, Riley et al. [2011, p. 1931-1932] утверждают, что они провели расчеты для автоморфных почв как с типичными для них кинетическими коэффициентами (т.е. такими, которые обеспечивают высокое сродство метанотрофов к CH_4), так и с «болотными» (обеспечивающими низкое сродство). И результаты (глобально – суммарно для почв всего Земного шара) якобы отличались лишь на ~0.3%. Нам это представляется совершенно необъяснимым! К сожалению, авторы приводят значение коэффициентов только для болот, так что проверить их вычисления мы не можем.

при падении уровня воды – его стоком. Поскольку сложность численной модели не ограничена необходимостью получить простое – аналитическое – решение, то, как правило, такие модели учитывают все основные физические и биохимические процессы (в частности, и образование, и окисление метана, и его транспорт). Поэтому они автоматически дадут выделение CH_4 при высоком уровне стояния воды и его потребление – при низком, что позволит не просто приписать болоту нулевой (или какой-то иной) поток, а даст его динамику для заданного отрезка времени.

Однако эти модели, как правило, требуют задания большого числа параметров, причем значительная часть необходимой информации является «сайт-специфичной» (т.е. уникальной для данной географической точки). Например, может оказаться необходимым задать глубину корнеобитаемого слоя, характер использования почвы и даже специфические данные о метаболизме вплоть до концентраций некоторых ферментов [Murguía-Flores et al., 2018]. Эти уникальные параметры либо определяются авторами моделей в полевых и лабораторных экспериментах (но тогда модель может успешно применяться только для тех местообитаний, для которых были определены параметры, а говорить о региональном или глобальном ее применении не приходится), либо связываются с какими-то иными параметрами, для которых существуют региональные или глобальные базы данных. Но поскольку набор таких баз ограничен, то часто приходится задавать весьма опосредованную связь, обеспечивающую довольно низкую точность вычисления необходимых параметров.

По численным моделям существует прекрасный обзор Xu et al. [2016]¹⁹. Поэтому (и в связи с вышесказанным) мы лишь кратко перечислим некоторые из них, но не будем подробно описывать входные параметры, т.к. считаем, что на сегодняшний день ***применение этих моделей для региональных оценок поглощения метана не гарантирует высокого качества получаемого результата***.²⁰ Кроме того, мы не упоминаем частные модели (разработанные, например, только для моделирования рисовников или полигонов захоронения отходов) и модели, в которых задается ***доля*** окисляющегося метана (от количества метана, образующегося в почвах) – последние не дадут вообще никакого окисления в автоморфных почвах, покрывающих территорию во много раз большую, чем гидроморфные почвы, в которых метан образуется.

Основные численные модели

Модель Walter et al. [1996] (которую далее мы будем обозначать «W96») была одной из первых математических моделей динамики концентрации CH_4 . Она породила в дальнейшем целое семейство моделей «типа Walter», представлявших собой, с математической точки зрения, начально-краевую задачу для одномерных (по пространству) УЧП параболического типа с нелинейным источниковым членом. W96 учитывает как продукцию и транспорт CH_4 (диффузионный, пузырьковый и через растения), так и метанотрофию. В исходной версии модели скорость окисления метана зависела только от его концентрации (по типу кинетики Михаэлису-Ментен), а максимальная скорость окисления принималась постоянной. Но в [Walter, Heimann, 2000] была введена еще и зависимость от температуры (по закону Вант-Гоффа) и, кроме того, $V_{\max}$ для разных экосистем могла различаться в 15 раз. Улучшенная версия W96 была встроена в некоторые модели семейства LPJ²¹, а также в модель ORCHIDEE [Xu et al., 2016], PEATLAND-VU [Van Huissteden et al., 2006] и в модифицированную модель VIC [Bohn, 2013], поэтому на этих моделях мы отдельно останавливаться не будем.

¹⁹ Обратим внимание читателя на то, что в указанном обзоре перечислено 40 моделей, но не все из них содержат описание почвенного окисления метана. Более того, в некоторых из тех, которые это окисление учитывают, используются одни и те же модули расчета окисления.

²⁰ Сказанное не означает, конечно, что так будет всегда. Более того, такая наша оценка, верная в отношении положения дел в численном моделировании, скажем, 15-20-летней давности, сегодня уже может оказаться слишком пессимистичной. Было бы интересно провести конкретный анализ для современных моделей (и баз данных, поставляющих параметры для них) и выяснить: во-первых, насколько реалистичны даваемые ими региональные оценки почвенного поглощения CH_4 , и, во-вторых, даже если эти оценки не всегда хороши, то нельзя ли существенно улучшить их, применяя интенсивно развивающийся в последнее время «ансамблевый» подход – см. соответствующий разд. ниже.

²¹ Xu et al. [2016] называют в качестве таковых LPJ-Bern и LPJ-WHyMe. Но Spahni et al. [2011], использовавшие LPJ-WHyMe для моделирования глобальных потоков CH_4 в экосистемах, складывающихся на болотах, рисовниках и влажных минеральных почвах, однозначно заявляют, что для оценки окисления использовалась C07. Иначе говоря, модель LPJ-WHyMe может использоваться (и использовалась) с разными «метановыми» модулями, которые, таким образом, в состав самой этой модели не входят, а просто получают от нее необходимые для расчета входные данные.

Arah, Stephen [1998] построили модель, представляющую собой дальнейшее развитие W96. С математической точки зрения она представляет собой систему уже из двух – для концентраций CH_4 и O_2 – уравнений в частных производных (с двумя независимыми переменными: время, глубина). Скорость окисления метана принята по типу двусубстратной кинетики, причем зависимость и от концентрации O_2 , и от CH_4 – по Михаэлису-Ментен. Данная модель предназначалась для описания краткосрочной (не более 10 сут.) динамики концентрации и удельного потока метана. Glagolev [2006] на ее основе (внеся небольшие изменения и исправления), разработал модель *pde_CH4_1* и опубликовал не только полную систему всех уравнений и параметров модели, но и реализующую ее очень простую компьютерную программу с подробнейшими комментариями. В связи с этим более останавливаться здесь на этих моделях мы не будем.

Подмодель метанотрофии в модели, которую разработал R.F. Grant [1999], можно считать «биологически обоснованной», поскольку кинетика окисления метана в ней определяется не только температурой почвы и поступлением газов (CH_4 , O_2), но и количеством биомассы аэробных облигатных метанотрофов, а также их активностью (факультативными и анаэробными метанотрофами пренебрегают). С математической точки зрения описываемая подмодель представляет собой задачу Коши для системы нелинейных ОДУ. Эта подмодель входит составной частью в модель *ecosys*²² (см., например, [Grant, 1998; Grant, Roulet, 2002] и ссылки там), в которой она соединена с другими подмоделями, рассчитывающими процессы трансформации органического вещества, переноса газа в почве и роста различных групп микроорганизмов (облигатно-аэробных бактерий, факультативно-аэробных денитрификаторов, грибов, ацетогенных продуцентов H_2 , ацетотрофных и гидрогенотрофных метаногенов, а также бактерий, окисляющих NH_4^+ и NO_2^-). Для работы модели *ecosys* необходимо задать начальную биомассу метанотрофов [Grant, 1999] и, хотя автор об этом ничего не говорит, необходимо задать начальные условия для всех ОДУ, в частности, начальные биомассы всех групп микроорганизмов, перечисленных выше. Уже это делает данную модель практически неприменимой в произвольном местообитании. Кроме того, следует помнить, что модель включает в себя огромное число параметров (константа Михаэлиса по метану, Q_{10} для метанотрофии, энергии активации для всех групп микроорганизмов и многие, многие другие). Нет никакой гарантии, что заданные в модели значения подойдут для любых местообитаний (напротив, из их биологического смысла представляется, что они могут сильно варьировать от сайта к сайту).

Li [2000] усовершенствовал свою же модель DNDC²³, чтобы она могла рассчитывать удельные потоки нескольких парниковых газов (а не только N_2O и CO_2 , как это было реализовано в исходной версии). Скорость окисления метана (в каждом слое почвы) предполагается зависящей от Eh и концентрации CH_4 в почве. Но последняя, в свою очередь, определяется скоростью переноса метана, и, в частности, скорость диффузии зависит от градиента концентрации CH_4 , температуры и порозности почвы. Следовательно, эти три фактора также влияют на поглощение метана. В дальнейшем Saggat et al. [2007] адаптировали данную модель для описания пастбищ Новой Зеландии (версия модели: NZ-DNDC). В частности, было введено снижение интенсивности диффузии и окисления CH_4 при возрастании влажности почвы. Существует также версия DNDC для почв под лесами [Li et al., 2000]. И хотя она, к сожалению, не содержит расчета поглощения CH_4 , но на основании довольно подробного описания уравнений в Li [2000], это вполне возможно сделать.

Zhang et al. [2002] представили модель Wetland-DNDC, состоящую из четырех компонентов: “Hydrologic conditions”, “Plant growth”, “Soil thermal conditions” и “Soil carbon dynamics”. Последний содержит «метановый блок», описывающий образование, окисление, перенос CH_4 в почве. Скорость окисления (в каждом слое почвы) задается аналогично тому, как это сделано в [Zhu et al., 2014] (см. ниже) – с той же ошибкой при попытке записать уравнение Михаэлиса-Ментен.

Khvorostyanov et al. [2008] создали модель (для изучения чувствительности запасов углерода в вечной мерзлоте к потеплению климата), которая, среди прочего, содержала и расчет поглощения метана почвами. К сожалению, модель описана местами весьма невнятно, поэтому о конкретных зависимостях мы можем говорить только предположительно. Из утверждения авторов о том, что «использовали постоянную времени для метанотрофии, равную 5 сут.», по-видимому, следует, что процесс окисления метана описывался в модели кинетикой первого порядка. Кроме этого, авторы

²² Сам автор модели иногда пишет ее название так, а иногда – Ecosys.

²³ “DeNitrification-DeComposition model”.

определенно утверждают лишь только то, что указанная постоянная не зависела от температуры, но если температура была не более 0 °C, то скорость метанотрофии становилась нулевой.

Zhuang et al. [2004] дополнили широко известную модель TEM модулем MDM (Methane Dynamics Module), описывающим образование, окисление, перенос CH_4 в почве и на основании этого рассчитывающим профиль концентраций метана и его удельный поток. С математической точки зрения расчет представляет собой решение УЧП для концентрации CH_4 на равномерной сетке (шаг по времени – 1 час, а по глубине – 1 см). Скорость окисления (в каждом слое почвы) задается аналогично тому, как это сделано в [Zhu et al., 2014] (см. ниже), но, во-первых, зависит еще и от влажности почвы (причем параметры этой зависимости, как и параметры температурной зависимости, определяются типом экосистемы), и, во-вторых, не содержит ошибки при задании максимальной **скорости** окисления метана. В [Zhuang et al., 2004, Appendix A, B, C, D] дано достаточно полное описание MDM. Дальнейшие модификации формулы для интенсивности окисления в MDM описаны в [Zhuang et al., 2013]: во-первых, введена ее зависимость от поступления минерального азота в почву²⁴ и, во-вторых, изменена зависимость от влажности почвы²⁵. При этом решение ищется только для стационарного состояния, т.е., с математической точки зрения, решается краевая задача для ОДУ. Для адекватного описания осредненных за сутки ППП CH_4 (с погрешностью 1%) в разных экосистемах оказалось необходимым подбирать значения двух параметров (в законе Вант-Гоффа), и выбирать максимальную скорость окисления из двух возможных, а также константу Михаэлиса (также из двух возможных значений). Найденные параметры (см. [Zhuang et al., 2004, p. 653]) рекомендованы авторами для применения в тех или иных экосистемах при проведении региональных расчетов. Наконец, Oh et al. [2020] провели еще ряд модификаций, создав модели TEM-НАМ и ХРТЕМ-ХНАМ. Впрочем, если говорить только об интенсивности окисления, то в первой из них модификация выразилась лишь в том, что константа Михаэлиса была уменьшена с 5 до 0.11 мкМ (НАМ – это High-Affinity Methanotroph model; ХНАМ – eXplicit High-Affinity Methanotroph model). Но в ХРТЕМ-ХНАМ учтена еще и динамика биомассы микробов.

Tian et al. [2010] создали модель DLEM (Dynamic Land Ecosystem Model), состоящую из 5 компонентов: «биофизика», «физиология растений», «почвенная биогеохимия», «динамика растительности», «землепользование». В «почвенную биогеохимию» входят модули разложения, минерализации и иммобилизации питательных веществ, нитрификации и денитрификации, а также «метановый» модуль (образование, окисление и перенос CH_4 в почвенной толще). Скорость поглощения метана складывается из трех составляющих: (i) окисление метана, растворенного в почвенных водах; (ii) переносимого через растения из почвы в атмосферу и (iii) атмосферного метана, диффундирующего в почву. В последнем случае удельный поток зависит от концентрации CH_4 (по Михаэлису-Ментен), температуры почвы, ее влажности, pH и содержания органического вещества. Таким образом, **если метан поступает только из атмосферы, то, фактически, блок окисления**

²⁴ Описанная, к сожалению, не слишком понятно; приводящая к неоднозначности и, таким образом, вероятно содержащая фатальную ошибку.

²⁵ Авторы пояснили, что в изначальном варианте было учтено лишь влияние влажности на биологическую активность, а теперь – еще и на скорость диффузии метана. После такого нелепого нововведения модель, фактически, из физически обоснованной становится в значительной мере эмпирической. Действительно, с физической точки зрения, влияние влажности на скорость диффузии должно выражаться через изменение коэффициента диффузии, а он входит в совершенно иное слагаемое дифференциального уравнения, характеризующего закон сохранения массы (и не входит в слагаемое, описывающее убыль концентрации CH_4 из-за потребления микробами!). Более того, получается парадоксальная ситуация. Zhuang et al. [2013] решают уравнение $d(D \cdot dC/dz) = M \cdot f_N \cdot f_D$, где D – коэффициент диффузии, определяемый структурой почвы; C – концентрация CH_4 ; z – глубина; M – скорость окисления метана в том виде, как она задавалась в Zhuang et al. [2004]; f_N и f_D – безразмерные множители, введенные в новой версии модели (нас интересует только f_D – множитель для учета влияния влажности на скорость диффузии). Согласно [Zhuang et al., 2013, eq. 6], f_D зависит от влажности почвы (θ_w), а также от двух постоянных влажностей: минимально возможной и в состоянии насыщения. Предположим для простоты, что все эти три влажности постоянные по профилю почвы, тогда $f_D = \text{const}$, и мы можем переписать уравнение в виде: $d(D_1 \cdot dC/dz) = M \cdot f_N$, где $D_1 = D/f_D$ и представляет собой коэффициент диффузии при заданной влажности θ_w . Из [Zhuang et al., 2013, eq. 6] очевидно, что f_D уменьшается при увеличении θ_w , но тогда D_1 ... возрастает! Полный абсурд!!! Хорошо известно (см., например, [Potter et al., 1996; Shein, 2005, p. 307; Zhu et al., 2014; Murguia-Flores et al., 2018]), что с увеличением влажности D_1 должен уменьшаться, ибо коэффициент диффузии в воде на несколько порядков меньше, чем в воздухе.

становится совершенно независимым и, формально, ничем не отличается от рассмотренных выше аналитических моделей.²⁶

Riley et al. [2011] разработали и протестировали модель CLM4Me (входящую в наземный компонент – CLM4 – интегрированный в моделях CCSM4 и CESM1²⁷), которая, среди прочего, содержит и расчет интенсивности окисления CH_4 в почве. В данной модели ППП метана определяется весьма динамичными (характерные времена ~ 1 часа) нелинейными взаимодействиями между физико-химическими и биологическими процессами, включая окисление метана, его образование, перенос в жидкой и газовой фазах, а также через аэренхиму растений и др. С математической точки зрения CLM4Me представляет собой систему из двух – для концентраций CH_4 и O_2 – уравнений в частных производных (с двумя независимыми переменными: время, глубина). Скорость окисления метана принята по типу двусубстратной кинетики, причем зависимость и от концентрации O_2 , и от CH_4 – по Михаэлису-Ментен.

Fan et al. [2013, Supporting Information] описали (среди прочих) «peatland module» модели DOS-TEM, в котором, в частности, рассчитывается динамика концентрации и удельного потока метана: решается уравнение в частных производных (с двумя независимыми переменными: время, глубина) для концентрации CH_4 . Скорость окисления метана принята по типу кинетики Михаэлису-Ментен (при этом максимальная скорость зависит от температуры).

Watts et al. [2014] модифицировали модель TCF²⁸, предназначенную для использования спутниковых данных дистанционного зондирования при вычислении потоков CO_2 и CH_4 из болот Арктики. Они разработали новый алгоритм вычисления эмиссии метана, учитывающий как продукцию и транспорт CH_4 (диффузионный, пузырьковый и через растения), так и метанотрофию. К сожалению, по крайней мере, при описании последнего процесса авторы допустили ряд фатальных ошибок²⁹, что не позволяет всерьез говорить об их модели.

Zhu et al. [2014] дополнили модель TRIPLEX-GHG (в основу которой положен биосферный симулятор IBIS³⁰) модулем расчета уровня стояния воды для возможности моделирования болот, а также новым «метановым» биогеохимическим модулем, включающим описание продукции, транспорта и окисления CH_4 . Скорость окисления (в каждом слое почвы) задается по типу кинетики

²⁶ К сожалению, авторы допустили ошибку, весьма усложняющую воспроизведение их результатов. Формула удельного потока окисления метана атмосферного воздуха ($F_{\text{air, oxid}}$, $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$) у них представляет собой произведение максимальной скорости окисления CH_4 ($V_{\text{air, oxid, max}}$, $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$) на ряд безразмерных множителей, отражающих неоптимальность реальных условий среды. Но когда Tian et al. [2010, Tables 1, 4] решили привести численные значения, то размерность указали уже иную: $\text{гС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут.}^{-1}$ (правда, и обозначение дали слегка измененное: $V_{\text{CH4OxidairMax}}$). И вот тут возникает неоднозначность. $V_{\text{air, oxid, max}}$ и $V_{\text{CH4OxidairMax}}$ – это разные параметры (каким-то образом связанные друг с другом, например, через толщину метанпоглощающего слоя H : $V_{\text{CH4OxidairMax}}\cdot H = V_{\text{air, oxid, max}}$)? Или это – одно и то же (а в размерности просто допущена ошибка)? К сожалению, это – далеко не единственный пример небрежности данных авторов. И хотя у них «ошибка сидит на ошибке», чтобы не утомлять читателя укажем еще только одну небрежность (имеющую непосредственное отношение к расчету $F_{\text{air, oxid}}$). Константа полунасыщения по атмосферному метану (константа Михаэлиса) в формуле обозначена через Km_{air} , в описании к формуле – через km_{air} (с указанием размерности: $\text{гС}\cdot\text{м}^{-3}$), а в Tables 1, 4 – это уже $Km_{\text{CH4Oxidair}}$ (ppm).

²⁷ “Community Climate System Model” и “Community Earth System Model”.

²⁸ Terrestrial Carbon Flux model.

²⁹ Согласно [Watts et al., 2014, p. 1964-1965, Supplementary material], часть диффундирующего в почве метана потребляется в результате окисления, и соответствующий удельный поток предлагается вычислять по нелепой формуле

$$R_{\text{OX}} = \frac{V_m \cdot \phi_a \cdot P_{\text{diff}} \cdot f_T}{(K_m + \phi_a) \cdot P_{\text{diff}}},$$

где f_T – безразмерный параметр, отражающий влияние (по закону Вант-Гоффа) температуры на метаноокисление; K_m (мкмоль/л) – константа полунасыщения (Михаэлиса); P_{diff} ($\text{мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$) – удельный поток потенциально возможного диффузионного переноса CH_4 ; V_m ($\text{мкмоль}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут.}^{-1}$) – максимальная скорость реакции. Очевидно, что P_{diff} в числителе и знаменателе сокращается. Описание параметра ϕ_a в статье отсутствует, но, вероятно, это то же самое, что и введенная в статье ранее ϕ_a – пористость аэрации. Горе-авторы утверждают, что $[R_{\text{OX}}] = \text{мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$ (и это было бы правильным, ибо им потом приходится находить разность $P_{\text{diff}} - R_{\text{OX}}$), но очевидно, что это – не так. Прежде всего: а какова размерность ϕ_a ? В основной части статьи $[\phi_a] = \text{м}^3$, а в Supplementary material – $[\phi_a] = \text{м}^3\cdot\text{сут.}^{-1}$. Ни та, ни другая размерность не совпадает с $[K_m]$, а складывать величины с разными размерностями нельзя! Но даже если допустить, что ϕ_a – это вовсе не ϕ_a , и $[\phi_a] = [K_m] = \text{мкмоль/л}$, то все равно получаем ерунду: $[R_{\text{OX}}] = [V_m] = \text{мкмоль}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут.}^{-1}$, а вовсе не $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$.

³⁰ Integrated Biosphere Simulator.

Михаэлиса-Ментен³¹, причем максимальная скорость зависит от температуры почвы (по закону Вант-Гоффа) и от Eh (используется относительно простая кусочно-линейная аппроксимация).

Xu et al. [2015], основываясь на подпрограмме разложения органического вещества из CLM4.5 (Community Land Model 4.5), разработали модуль, описывающий деятельность различных групп микробов, участвующих в цикле метана. Авторы предположили, что критичным для успешного описания продукции и потребления CH_4 является учет механизмов соответствующих микробиологических процессов. Более того, по их мнению, для лучшего предсказания динамики малых газовых составляющих атмосферы и климатической системы Земли настоятельной необходимостью является включение этих микробных механизмов в глобальные биогеохимические модели. Разработанный ими модуль включает в себя четыре основных механизма (по два для метаногенеза и метаноокисления): метаногенез, осуществляемый как ацетокластическими, так и гидрогенотрофными метаногенами; и метаноокисление, осуществляемое как аэробными (за счет молекулярного кислорода), так и анаэробными метанотрофами (за счет других неорганических акцепторов электронов). Соответственно, в модель входят эти четыре группы микроорганизмов. С математической точки зрения модуль осуществляет решение задачи Коши для системы ОДУ. Скорость окисления метана принята по типу микробиологической двусубстратной кинетики, причем зависимость и от концентрации O_2 , и от CH_4 – по Моно, а метаболический коэффициент зависит от температуры (по закону Вант-Гоффа) и от pH (все уравнения достаточно подробно описаны в Xu et al. [2015, Appendix A]). Данная модель применялась для описания лабораторных инкубационных экспериментов (максимальной продолжительности 160 сут., временной шаг – 1 час).

Модель А.Ф. Сабрекова [Sabrekov et al., 2016] рассматривает потребление метана и кислорода в почвенном профиле от 0 до 1 м. Цель создания модели заключалась в проверке гипотезы о значимости ризосферной метанотрофии для общего потребления метана в автоморфных (непереувлажнённых) почвах, в которых продукцией метана можно пренебречь. Скорость потребления метана как ризосферными, так и свободноживущими метанотрофами зависела от концентрации метана и кислорода (в обоих случаях в соответствии с уравнением Михаэлиса-Ментен), а также от температуры и влажности в соответствии с варьирующими в интервале от 0 до 1 эмпирическими колоколообразными функциями, подобранными по литературным данным. Потребление метана ризосферными метанотрофами также линейно зависело от корневой биомассы, рассчитываемой по разности между измеренным суммарным дыханием экосистемы и рассчитанным гетеротрофным почвенным дыханием. Итоговая удельная скорость потребления метана обеими группами метанотрофов задавалась как произведение максимальной удельной скорости потребления (отдельно для каждой группы) на описанные выше зависимости от факторов и субстратов. Максимальная скорость потребления метана свободноживущими метанотрофами задавалась отдельно для подстилки и минеральной почвы на основе литературных данных. Потребление кислорода почвой зависело от концентрации кислорода по уравнению Михаэлиса-Ментен, а также от температуры в соответствии с уравнением Вант-Гоффа. Удельная скорость потребления кислорода корнями и микроорганизмами рассчитывалась как произведение максимальной удельной скорости (отдельно для каждой группы) на функции зависимости от температуры и концентрации кислорода и на корневую биомассу и плотность почвы соответственно. Максимальная скорость потребления кислорода микроорганизмами задавалась отдельно для подстилки и минеральной почвы на основе литературных данных, в минеральной почве она линейно зависела от содержания органики в почве. Единственным механизмом транспорта газов была молекулярная диффузия в поровом пространстве почвы, рассчитанная как функция влажности почвы, доли глинистой фракции и общего порового пространства. С математической точки зрения модель представляет собой краевую задачу для системы, содержащей два ОДУ 2-го порядка (одно для концентрации O_2 , другое – CH_4 ; независимая

³¹ Однако Zhu et al. [2014] используют довольно странную формулу, а именно: $\text{Oxi} = A_{\text{CH}_4} \cdot f_T \cdot f_{\text{Eh}} \cdot C / (K + C)$, где C (мкмоль/л) – концентрация CH_4 ; $K = 5$ мкмоль/л – константа полунасыщения; f_T и f_{Eh} – безразмерные параметры, отражающие влияние, соответственно, температуры и Eh на интенсивность метаноокисления. Как видим, если положить $A_{\text{CH}_4} \cdot f_T \cdot f_{\text{Eh}} = V_m$, то по форме, действительно имеем уравнение Михаэлиса-Ментен. Но авторы указывают, что A_{CH_4} ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{слой}^{-1}$) – количество метана, а не скорость его потребления и, следовательно, $[\text{Oxi}] = \text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{слой}^{-1}$. Относительно Oxi авторы говорят, что это – “change in CH_4 for each time step in each soil layer... determined by the CH_4 ... oxidation”. Но тогда “time step” (шаг по времени; мы обозначим его Δt) должен быть подобран так, чтобы $A_{\text{CH}_4} \cdot f_T \cdot f_{\text{Eh}} / \Delta t$ соответствовало максимальной скорости поглощения метана почвой. Учитывая, что в подобных моделях Δt обычно выбирается равным какой-либо простой единице времени (час, сутки или месяц), представляется совершенно невероятным такое совпадение, что (при $f_T = f_{\text{Eh}} = 1$ и $K \ll C$) весь метан, содержащийся в слое, будет потреблен ровно за час, например. Скорее всего, здесь имеет место вопиющая ошибка и вместо A_{CH_4} как **количества метана** в слое, следует подставить значение максимальной **скорости** потребления CH_4 (как это и делается в серьезных моделях – см., например, [Segers, 1998; Zhuang et al., 2004; Glagolev, 2006; Sabrekov et al., 2015]).

переменная: глубина). Входными данными были профили плотности почвы и ее твёрдой фазы, содержания органического вещества, влажности (по массе), температуры и доли глинистой фракции. Однако многочисленные микробиологические константы тоже можно отнести к входным данным, поскольку они были подобраны по литературным данным для соответствующих экосистем. Модель применялась для описания потребления метана в автоморфных почвах лесных и луговых экосистем по собственным и литературным данным, во всех случаях показав значимость ризосферной метанотрофии в автоморфных почвах.

Модуль почвенных газов и углерода, разработанный Morel et al. [2019] для использования в модели ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere)³², описывает динамику распределенных по глубине пулов углерода и концентраций CH₄, CO₂, O₂. Образование и потребление CH₄ в модели определяется непосредственно концентрацией кислорода, а не через уровень воды, как это делалось в ряде классических моделей (например, [Walter et al., 1996; Fan et al., 2013; Zhu et al. 2014]). Скорость окисления метана принята по типу двусубстратной кинетики, причем зависимость от концентрации O₂ – по Михаэлису-Ментен, а от CH₄ – по кинетике 1-го порядка, температурная зависимость – по закону Вант-Гоффа. С математической точки зрения модуль представляет собой систему уравнений в частных производных (с двумя независимыми переменными: время, глубина), которые решаются численно конечно-разностным методом с использованием схемы Кранка-Никольсон. Входными параметрами модели были 6 динамических (с часовым шагом) параметров: температура и влажность воздуха, осадки, скорость ветра, коротковолновая и длинноволновая солнечная радиация, а также распределение содержания органического вещества по глубине [Morel et al., 2019]. На первый взгляд кажется, что набор входных параметров не слишком велик и вполне может быть обеспечен для многих местообитаний. Однако не следует забывать, что модель включает в себя огромное число параметров (константа Михаэлиса по кислороду, Q_{10} для разложения органического вещества и для метанотрофии, два пороговых значения температуры для метаногенеза и многие, многие другие). В частности, авторы сообщают, что для своих сайтов они уменьшили удельную листовую поверхность с 14 м²/кг (как это было «зашиито» в модели) до 8 м²/кг, а также уменьшили минимальное значение LAI (с 0.3 до 0.1). Т.е. получается, что, по крайней, мере эти два параметра также необходимо задавать для конкретного местообитания.

АНСАМБЛИ МОДЕЛЕЙ

В современной литературе (см., например, [Hagedorn et al., 2005; Filippov et al., 2015; Exbrayat et al., 2018; Galmarini et al., 2018]) настойчиво обсуждается и разрабатывается идея о совместном использовании разнотипных моделей в коллективе – как средства наиболее полного учета априорной информации. Коллектив моделей, например, с позиций средневзвешенного преобразования либо оценивания областей их компетенции аккумулирует преимущества решающих правил, составляющих коллектив [Lapko, 2002]. Различные варианты работы с ансамблем моделей подробно описаны, например, в [Claeskens, Hjort, 2008].

Если результаты отдельно взятой модели не вызывают доверия, можно рассмотреть комплекс результатов, полученных с помощью всех моделей. Поскольку все они созданы на одних принципах, но независимо друг от друга, то эти результаты могут представлять собой статистический ансамбль, и, проведя их обработку по правилам математической статистики, мы получим наиболее вероятное значение, а также границы его вероятных изменений. Обычно каждая модель хорошо воспроизводит лишь часть искомых величин, в то время как остальные воспроизводятся значительно хуже. Сравнительный анализ показывает, что наиболее высокую успешность, как правило, демонстрирует «средняя» по ансамблю модель. Это связано с тем, что систематические ошибки разных моделей (а они присущи каждой) не зависят друг от друга и при осреднении по ансамблю могут взаимно компенсироваться. Успешность такого подхода уже нашла свое подтверждение: в регулярно издаваемых отчетах МГЭИК приводятся модельные оценки вероятных изменений основных климатических изменений в обозримом будущем, полученные с использованием вышеописанного подхода. При подготовке вышедшего в 2007 г. отчета, МГЭИК использовала около 20 моделей и на

³² ISBA встроена в платформу SURFEX и используется во всех мезо-масштабных, региональных и глобальных атмосферных моделях Meteo-France, а также в региональных системах гидрологического прогноза и в глобальных гидрологических моделях. В ISBA решаются уравнения энергетического и водного баланса для «почвы» (глубиной 12 м) и снега. При этом «почва» разбивается на 14 слоев, толщина которых возрастает сверху вниз [Morel et al., 2019].

их основе предсказала увеличение среднеглобальной температуры воздуха в 1990-2007 гг. на 0.2 °C. Именно такая величина и была реально зафиксирована в наблюдениях [Karol, Kiselev, 2013].

Использование коллективов (ансамблей) моделей находит применение и в «метановой» тематике, причем как при решении прямых, так и обратных задач [Glagolev et al., 2014; Poulter et al., 2017; Bergamaschi et al., 2018]. Но нам не известны публикации, в которых такой подход применялся бы для оценки **поглощения** метана почвой. Тем не менее, положительные результаты, достигнутые во многих других приложениях, позволяют надеяться на его успешное применение и здесь.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Keller et al. [1990] продемонстрировали, что поглощение метана почвами в центральной Панаме резко снижается при преобразовании леса в сельскохозяйственные земли (в них скорость окисления CH_4 падала в четыре раза по сравнению с исходным естественным лесом). При сельскохозяйственном использовании почвы подвергаются многочисленным антропогенным воздействиям, в частности, ирригации, мелиорации, вспашке, обработке гербицидами, инсектицидами и фунгицидами, а также внесению органических и минеральных удобрений [Li, 2000; Kumaraswamy et al., 1998; Kinney et al., 2004a, b]. Именно с применением азотных удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур и с поступлением азота в почву при выпасе скота принято связывать снижение метанообразования в сельскохозяйственных почвах.

Существуют экспериментальные исследования, в которых показано, что внесение азотных удобрений снижает поглощение CH_4 почвами лесов, лугов и болот на 33-41%, а почвами сельскохозяйственных полей – до 50% (теоретическое объяснение возможных механизмов этого см., например, в [Murguia-Flores et al., 2018, p. 2018]). Поэтому в моделях иногда вводят уменьшение поглощения (например, на 35%), если почва подвергается воздействию азотных удобрений. Но, с другой стороны, эти удобрения приводят к лучшему росту растений, в результате чего усиливается транспирация и, следовательно, влажность почвы уменьшается, а это ведет к увеличению коэффициента диффузии и, соответственно, поглощения метана. Кроме того, хотя в большинстве исследований (см., например, [King, Schnell, 1994; Klemetsson, Klemetsson, 1997; Le Mer, Roger, 2001; Kravchenko, 2002]) обнаружено азотное ингибирование метанотрофии, существует ряд работ, в которых показано, что увеличение внесения минерального азота в почву может и не уменьшать поглощение CH_4 [Potter et al., 1996]. Впрочем, положительный эффект от добавления азота наблюдался, главным образом, в экспериментальных условиях и коррелировал со структурой микробного сообщества [Murguia-Flores et al., 2018, p. 2018]. Поэтому в отношении использования в моделях информации о применении азотных удобрений существует значительная неопределенность.

Кроме того, Keller et al. [1990] показали, что при близкой влажности (50 и 60% от массы почвы) и практически одинаковой температуре (26.3 и 26.4 °C) потребление метана на оксисоли и альфисоли различалось более чем в два раза (0.78 и 0.35 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, соответственно). Насколько нам известно, в математических моделях **непосредственно тип почвы не учитывается**. Неявно такой учет есть – через физические и биокинетические свойства почвы. Но может ли таким образом быть объяснена вышеописанная двукратная разница ППП?

Из сказанного очевидно, что предсказания математических моделей далеко не всегда будут соответствовать экспериментальным данным для конкретного исследовательского полигона (иногда на это указывали и сами авторы – см., например, [Ridgwell et al., 1999; Murguia-Flores et al., 2018]: где-то и когда-то модели завышают поток, а где-то и когда-то – занижают). В любом случае, это напрямую следует и из того, что разные авторы в своих моделях идентифицировали одинаковые параметры по различным наборам данных и приходили к отличающимся значениям (например, в R99 используется значение 3.132 час^{-1} «базовой» константы скорости окисления метана, полученное по данным 13 измерений в различных географических точках, в C07 та же константа имеет значение 0.18 час^{-1} , и получена она по данным 5-летних наблюдений лишь на одном сайте в Колорадо, а в MeMo введено 4 константы – для 4 разных типов биомов – величины которых находятся в интервале от 0.06 до 0.18 час^{-1} [Murguia-Flores et al., 2018]). Однако применение моделей в глобальном масштабе (например, [Potter et al., 1996; Ridgwell et al., 1999; Curry, 2007; Murguia-Flores et al., 2018]) продемонстрировало разумные оценки суммарного потребления метана почвами планеты, вполне соответствующие как полученным при помощи простейших инвентаризаций (см. [Born et al., 1990; Dörr et al., 1993; Dutaur and Verhot, 2007]), так и с использованием принципиально другого подхода,

основанного на решении так называемой «обратной задачи» [Hein et al., 1997]. По-видимому, это позволяет надеяться на то, что и для регионов (хотя бы относительно крупных) мы будем получать достаточно разумные оценки поглощения CH_4 [Murguía-Flores et al., 2018]; при этом завышение потока в одних географических точках компенсируется его занижением в других.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках

- государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления»);
- гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта «Наука»;
- при финансовой поддержке и в рамках реализации Важнейшего Инновационного Проекта Государственного Значения (ВИПЗ, «Углерод в экосистемах: мониторинг»), направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2022 г. № 25-15р).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arah J.R.M., Stephen K.D. 1998. A model of the processes leading to methane emission from peatland. *Atmospheric Environment*, 32: 3257-3264. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00052-1)
- Arora V.K., Melton J.R., Plummer D. 2018. An assessment of natural methane fluxes simulated by the CLASS-CTEM model. *Biogeosciences*, 15: 4683-4709. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4683-2018>
- Bailey N.T.J. 1967. *The mathematical approach to biology and medicine*. John Wiley and Sons, London etc.
- Bergamaschi P., Karstens U., Manning A.J., Saunois M., Tsuruta A., Berchet A., Vermeulen A.T., Arnold T., Janssens-Maenhout G., Hammer S., Levin I., Schmidt M., Ramonet M., Lopez M., Lavric J., Aalto T., Chen H., Feist D.G., Gerbig C., Haszpra L., Hermansen O., Manca G., Moncrieff J., Meinhardt F., Necki J., Galkowski M., O'Doherty S., Paramonova N., Scheeren H.A., Steinbacher M., Dlugokencky E. 2018. Inverse modelling of European CH_4 emissions during 2006–2012 using different inverse models and reassessed atmospheric observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18: 901-920. <https://doi.org/10.5194/acp-18-901-2018>
- Bloch A. 2003. *Murphy's law*. Perigee, New York.
- Bohn T.J. 2013. The effect of small-scale heterogeneity on the large-scale dynamics of west siberian wetland carbon fluxes. University of Washington. PhD thesis.
- Born M., Dörr H., Levin I. 1990. Methane consumption in aerated soils of the temperate zone. *Tellus*, 42B: 2-8. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v42i1.15186>
- Cicerone R.J., Shetter J.D., Delwiche C.C. 1983. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, 88: 11022-11024.
- Claeskens G., Hjort N.L. 2008. *Model selection and model averaging*. Cambridge University Press, Cambridge etc. 312 pp.
- Curry C.L. 2007. Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 21: GB4012. <https://doi.org/10.1029/2006GB002818>
- Curry C.L. 2009. The consumption of atmospheric methane by soil in a simulated future climate. *Biogeosciences*, 6(11): 2355-2367. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2355-2009>
- 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_2 and CH_4 fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(1): 5-14.
- Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Ojima D.S., Potter C.S., Borken W., Brumme R., Butterbach-Bahl K., Crill P.M., Dobbie K., Smith K.A. 2000. General CH_4 oxidation model and comparisons of CH_4 oxidation in natural and managed systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(4): 999-1019.
- Dörr H., Katruff L., Levin I. 1993. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. *Chemosphere*, 26: 697-713. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90454-D](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90454-D)
- Durinx M., Metz J.A.J., Meszéna G. 2008. Adaptive dynamics for physiologically structured population models. *Journal of Mathematical Biology*, 56(5): 673-742. <https://doi.org/10.1007/s00285-007-0134-2>
- Dutaur L., Verchot L.V. 2007. A global inventory of the soil CH_4 sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 21: GB4013. <https://doi.org/10.1029/2006GB002734>
- Ertekin T., Abou-Kassem J.H., King G.R. 2001. *Basic applied reservoir simulation*. Society of Petroleum Engineers, Richardson.
- Exbrayat J.-F., Bloom A.A., Falloon P., Ito A., Smallman T.L., Williams M. 2018. Reliability ensemble averaging of 21st century projections of terrestrial net primary productivity reduces global and regional uncertainties. *Earth System Dynamics*, 9: 153-165. <https://doi.org/10.5194/esd-9-153-2018>

- Fan Z., McGuire A.D., Turetsky M.R., Harden J.W., Waddington J.M., Kane E.S. 2013. The response of soil organic carbon of a rich fen peatland in interior Alaska to projected climate change. *Global Change Biology*, 19: 604-620. <https://doi.org/10.1111/gcb.12041>
- Filippov I.V., Glagolev M.V., Sabrekov A.F. 2015. An attempt to use an ensemble of simple mathematical models in one problem of microbiological kinetics. In: *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii. Materialy Chetvertoi Natsional'noi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. IFKhIBPP RAN, Pushchino, pp. 187-188. (In Russian). [Филиппов И.В., Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. 2015. Попытка использования ансамбля простейших математических моделей в одной задаче микробиологической кинетики // Математическое моделирование в экологии. Материалы Четвертой Национальной научной конференции с международным участием, 18-22 мая 2015 г. Пушино: ИФХиБПП РАН. С. 187-188.]
- Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L.P., Fraser P.J. 1991. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *Journal of Geophysical Research*, 96(D7): 13033-13065. <https://doi.org/10.1029/91JD01247>
- Galmarini S., Kioutsioukis I., Solazzo E., Alyuz U., Balzarini A., Bellasio R., Benedictow A.M.K., Bianconi R., Bieser J., Brandt J., Christensen J.H., Colette A., Curci G., Davila Y., Dong X., Flemming J., Francis X., Fraser A., Fu J., Henze D.K., Hogrefe C., Im U., Vivanco M.G., Jiménez-Guerrero P., Jonson J.E., Kitwiroon N., Manders A., Mathur R., Palacios-Peña L., Pirovano G., Pozzoli L., Prank M., Schultz M., Sokhi R.S., Sudo K., Tuccella P., Takemura T., Sekiya T., Unal A. 2018. Two-scale multi-model ensemble: is a hybrid ensemble of opportunity telling us more? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18: 1-18. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1-2018>.
- Gerald C.F., Wheatley P.O. 1994. *Applied numerical analysis*. ADDISON-WESLEY PUBLISHING, Reading etc. P. 2.
- Glagolev M.V. 2006. Mathematical modelling of the methane-oxidation in soil. In: *Transactions of Vinogradsky Institute of Microbiology RAS*. Nauka, Moscow, pp. 315-341. (In Russian). [Глаголев М.В. 2006. Математическое моделирование метанокисления в почве // Труды института микробиологии им. С.Н. Виноградского. М.: Наука. С. 315-341].
- 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] <https://doi.org/10.17816/edgcc11S176-190>
- Glagolev M.V. 2010. CH₄ emission from bog soils in Western Siberia: from soil profile to region: dis. cand. biol. sciences. Moscow. 211 pp. (In Russian). [Глаголев М.В. 2010. Эмиссия CH₄ болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дисс. ... канд. биол. наук. Москва. 211 с.]
- Glagolev M.V. 2021. Mathematical modeling in soil biokinetics. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(2): 123-144. <https://doi.org/10.17816/edgcc90123> (In Russian).
- Glagolev M.V., Filippov I.V. 2011. Inventory of soil methane consumption. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2(2): 3-22. <https://doi.org/10.17816/edgcc221> (In Russian).
- Glagolev M.V., Filippov I.V., Krivenok L.A., Maksyutov S.S. 2014. CH₄ flux estimation from Russians soils based on a set of simple models. In: *Proceedings of the Fourth International Field Symposium*, (A.A. Titlyanova, M.I. Dergacheva, eds.) Publishing house of Tomsk University, Tomsk, pp. 163-165. (In Russian). [Глаголев М.В., Филиппов И.В., Кривенко Л.А., Максютлов Ш.Ш. 2014. Оценка потока CH₄ из почв России набором простейших моделей // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее Материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума / Под ред. А.А. Титляновой и М.И. Дергачевой. С. 163-165.]
- Glagolev M.V., Kleptsova I.E. 2009. Methane emission in the forest-tundra: towards the “standard model” (Aa2) for West Siberia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 3(81): 77-81. (In Russian). [Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Aa2) для Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 3(81). С. 77-81.]
- Glagolev M.V., Suvorov G.G., Il'yasov D.V., Sabrekov A.F., Terentieva I.E. 2022. What is the maximal possible soil methane uptake? *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(3): 123-141. <https://doi.org/10.18822/edgcc133609> (In Russian).
- Grant R.F. 1998. Simulation of methanogenesis in the mathematical model Ecosys. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 883-896. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00218-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00218-6)
- Grant R.F. 1999. Simulation of methanotrophy in the mathematical model Ecosys. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 287-297. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00119-9)
- Grant R.F., Roulet N.T. 2002. Methane efflux from boreal wetlands: Theory and testing of the ecosystem model Ecosys with chamber and tower flux measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1054. <https://doi.org/10.1029/2001GB001702>.
- Hagedorn R., Doblas-Reyes F.J., Palmer T.N. 2005. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – I. Basic concept. *Tellus*, 57A: 219-233. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14657>
- Hein R., Crutzen P.J., Heimann M. 1997. An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(1): 43-76.
- Ito A., Inatomi M. 2012. Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9: 759-773. <https://doi.org/10.5194/bg-9-759-2012>
- Jeffers J.N.R. 1978. *An introduction to systems analysis: with ecological applications*. Edward Arnold, London.
- Karol I.L., Kiselev A.A. 2013. *Climate paradoxes. Ice age or scorching heat?* AST-PRESS KNIGA, Moscow, 288 pp. (In Russian). [Кароль И.Л., Киселев А.А. 2013. Парадоксы климата. Ледниковый период или обжигающий зной? М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА. 288 с.]
- Keller M., Mitre M.E., Stallard R.F. 1990. Consumption of atmospheric methane in soils of Central Panama: Effects of agricultural development. *Global Biogeochemical Cycles*, 4: 21-27. <https://doi.org/10.1029/GB004i001p00021>
- Khvorostyanov D.V., Krinner G., Ciais P., Heimann M., Zimov S.A. 2008. Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part I: Model description and role of heat generated by organic matter decomposition. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 60(B2): 250-264. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00333.x>
- King G.M., Schnell S. 1994. Ammonium and nitrite inhibition of methane oxidation by *Methylobacter albus* BG8 and *Methylosinus trichosporium* OB3b at low methane concentrations. *Applied and Environmental Microbiology*, 60: 3508-3513. <https://doi.org/10.1128/aem.60.10.3508-3513.1994>

- Kinney C.A., Mosier A.R., Ferrer I., Furlong E.T., Mandernack K.W. 2004a. Effects of the fungicides mancozeb and chlorothalonil on fluxes of CO₂, N₂O, and CH₄ in a fertilized Colorado grassland soil. *Journal of Geophysical Research*, 109: D05303. <https://doi.org/10.1029/2003JD003655>
- Kinney C.A., Mosier A.R., Ferrer I., Furlong E.T., Mandernack K.W. 2004b. Effects of the herbicides prosulfuron and metolachlor on fluxes of CO₂, N₂O, and CH₄ in a fertilized Colorado grassland soil. *Journal of Geophysical Research*, 109: D05304. <https://doi.org/10.1029/2003JD003656>
- Klemetsson Å.K., Klemetsson L. 1997. Methane uptake in Swedish forest soil in relation to liming and extra N-deposition. *Biology and Fertility of Soils*, 25: 296-301. <https://doi.org/10.1007/s003740050318>
- Kokhanovskiy V.P., Leshkevich T.G., Matyash T.P., Fatkhi T.B. 2007. *Fundamentals of the philosophy of science*. Feniks, Rostov-on-Don, 608 pp. (In Russian). [Кохановский В.П., Лешкевич Т.Г., Матяш Т.П., Фатхи Т.Б. 2007. Основы философии науки. Ростов н/Д.: Феникс. 608 с.]
- Kravchenko I.K. 2002. Methane oxidation in boreal peat soils treated with various nitrogen compounds. *Plant and Soil*, 242: 157-162. <https://doi.org/10.1023/A:1019614613381>
- Kumaraswamy S., Rath A.K., Satpathy S.N., Ramakrishnan B., Adhya T.K., Sethunathan N. 1998. Influence of the insecticide carbofuran on the production and oxidation of methane in a flooded rice soil. *Biology and Fertility of Soils*, 26: 362-366. <https://doi.org/10.1007/s003740050389>
- Lapko V.A. 2002. Nonparametric collectives of resolving rules. Nauka, Novosibirsk, 168 pp. (In Russian). [Лапко В.А. 2002. Непараметрические коллективы решающих правил. Новосибирск: Наука. 168 с.]
- Leffelaar P.A. (ed.) 1993. *On systems analysis and simulation of ecological processes: with examples in CSMP and Fortran*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht etc.
- Le Mer J., Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37: 25-50. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)
- Li C. 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58: 259-276. <https://doi.org/10.1023/A:1009859006242>
- Li C., Aber J., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. 2000. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. *Journal of Geophysical Research*, 105(D4): 4369-4384. <https://doi.org/10.1029/1999JD900949>
- Mavrina L.A. 1966. The oxidation of hydrocarbons by microorganisms. In: *The Biology of the Autotrophic Microorganisms*, (E.N. Kondratjeva, M.M. Telitchenko, eds). Publishing house of the Moscow University, Moscow, pp. 192-202. (In Russian). [Маврина Л.А. 1966. Окисление углеводородов микроорганизмами // Биология автотрофных микроорганизмов / Под ред. Е.Н. Кондратьевой и М.М. Телитченко. М.: Изд-во МГУ. С. 192-202]
- Mezentsev V.S., Karnatsevich I.V. 1969. *Humidity of the West Siberian Plain*. Gidrometeoizdat, Leningrad. (In Russian). [Мезентцев В.С., Карнацевич И.В. 1969. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат.]
- Millington R.J., Shearer R.C. 1971. Diffusion in aggregated porous media. *Soil Science*, 111(6): 372-378. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(93\)90040-Y](https://doi.org/10.1016/0169-7722(93)90040-Y)
- Moldrup P., Chamindu Deepagoda T.K.K., Hamamoto S., Komatsu T., Kawamoto K., Rolston D.E., de Jonge L.W. 2013. Structure-dependent water-induced linear reduction model for predicting gas diffusivity and tortuosity in repacked and intact soil. *Vadose Zone Journal*, 12(3): 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0026>
- Morel X., Decharme B., Delire C., Krinner G., Lund M., Hansen B.U., Mastepanov M. 2019. A new process-based soil methane scheme for land surface modeling: Evaluation over arctic field sites with the ISBA land surface model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11: 293-326. <https://doi.org/10.1029/2018MS001329>
- Murguia-Flores F., Arndt S., Ganesan A.L., Murray-Tortarolo G.N., Hornibrook E.R.C. 2018. Soil methanotrophy model (MeMo v1.0): a process-based model to quantify global uptake of atmospheric methane by soil. *Geoscientific Model Development*, 11: 2009-2032. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2009-2018>
- Oh Y., Zhuang Q., Liu L., Welp L.R., Lau M.C.Y., Onstott T.C., Medvigy D., Bruhwiler L., Dlugokencky E.J., Hugelius G., D'Imperio L., Elberling B. 2020. Reduced net methane emissions due to microbial methane oxidation in a warmer Arctic. *Nature Climate Change*, 10: 317-321. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0734-z>
- Pochon J., de Barjac H. 1958. *Traité de Microbiologie des Soils*. Dunod, Paris.
- Potter C.S., Davidson E.A., Verchot L.V. 1996. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption. *Chemosphere*, 32: 2219-2246. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(96\)00119-1](https://doi.org/10.1016/0045-6535(96)00119-1)
- Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 811-841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>
- Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Ciais P., Peregon A., Saunois M., Arora V.K., Beerling D.J., Brovkin V., Jones C.D., Joos F., Gedney N., Ito A., Kleinen T., Koven C.D., McDonald K., Melton J.R., Peng C., Peng S., Prigent C., Schroeder R., Riley W.J., Saito M., Spahni R., Tian H., Taylor L., Viovy N., Wilton D., Wiltshire A., Xu X., Zhang B., Zhang Z., Zhu Q. 2017. Global wetland contribution to 2000–2012 atmospheric methane growth rate dynamics. *Environmental Research Letters*, 12: 094013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8391>
- Ridgwell A.J., Marshall S.J., Gregson K. 1999. Consumption of atmospheric methane by soils: A process-based model. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1): 59-70. <https://doi.org/10.1029/1998GB900004>
- Riley W.J., Subin Z.M., Lawrence D.M., Swenson S.C., Torn M.S., Meng L., Mahowald N.M., Hess P. 2011. Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences*, 8: 1925-1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
- Sabrekov A.F., Filippov I.V., Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kaverin A.A., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Lapshina E.D. 2022. Hot spots of methane emission in West Siberian middle taiga wetlands disturbed by petroleum extraction activities // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(3): 142-155.
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Alekseychik P.K., Smolentsev B.A., Terentieva I.E., Krivenok L.A., Maksyutov S.S. 2016. A process-based model of methane consumption by upland soils. *Environmental Research Letters*, 11: 075001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/075001>

- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Il'yasov D.V., Maksyutov Sh.Sh. 2015. Relationship of methane consumption with the respiration of soil and grass-moss layers in forest ecosystems of the southern taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 48(8): 841-851. <https://doi.org/10.1134/S1064229315080062>
- Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Maksyutov Sh.Sh., Machida T. 2011. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 5(107): 135-143.
- Saggar S., Hedley C.B., Giltrap D.L., Lambie S.M. 2007. Measured and modelled estimates of nitrous oxide emission and methane consumption from a sheepgrazed pasture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122: 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.02.006>
- Segers R. 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 41: 23-51. <https://doi.org/10.1023/a:1005929032764>
- Shein E.V. 2005. *Soil Physics Course*. Publishing house of Moscow State University, Moscow, 432 pp. (In Russian). [Шейн Е.В. 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 432 с.]
- Spahni R., Wania R., Neef L., van Weele M., Pison I., Bousquet P., Frankenberg C., Foster P.N., Joos F., Prentice I. C., van Velthoven P. 2011. Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems. *Biogeosciences*, 8: 1643-1665. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1643-2011>
- Striegl R.G. 1993. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. *Chemosphere*, 26: 715-720.
- Suhoveeva O.E., Karelin D.V. 2022. Estimation of carbon fluxes in agrolandscapes of Central Chernozem zone by simulation modelling. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(3): 156-170.
- Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov Sh.Sh. 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. doi: 10.1134/S0097807817020154
- Tian H., Xu X., Liu M., Ren W., Zhang C., Chen G., Lu C. 2010. Spatial and temporal patterns of CH₄ and N₂O fluxes in terrestrial ecosystems of North America during 1979-2008: application of a global biogeochemistry model. *Biogeosciences*, 7(9): 2673-2694. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2673-2010>
- Titlyanova A.A. 2011. *The first school of mathematical biology in 1973*. IFKhIBPP RAN, Pushchino. 32 pp. (In Russian). [Титлянова А.А. 2011. Первая школа по математической биологии в 1973 г. Пушино: ИФХиБПП РАН. 32 с.]
- Van Huissteden J., van den Bos R., Alvarez I.M. 2006. Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄ fluxes from peat soils. *Netherlands Journal of Geosciences*, 85(1), 3-18. <https://doi.org/10.1017/S0016774600021399>
- Walter B.P., Heimann M. 2000. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): 745-765. <https://doi.org/10.1029/1999GB001204>
- Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D., White J.R. 1996. A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands. *Geophysical Research Letters*, 23(25): 3731-3734. <https://doi.org/10.1029/96GL03577>
- Watts J.D., Kimball J.S., Parmentier F.J.W., Sachs T., Rinne J., Zona D., Oechel W., Tagesson T., Jackowicz-Korczyński M., Aurela M. 2014. A satellite data driven biophysical modeling approach for estimating northern peatland and tundra CO₂ and CH₄ fluxes. *Biogeosciences*, 11: 1961-1980. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1961-2014>
- Xu X., Elias D.A., Graham D.E., Phelps T.J., Carrol S.L., Wullschlegel S.D., Thornton P.E. 2015. A microbial functional group based module for simulating methane production and consumption: application to an incubation permafrost soil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120: 1315-1333. <https://doi.org/10.1002/2015JG002935>
- Xu X., Yuan F., Hanson P.J., Wullschlegel S.D., Thornton P.E., Riley W.J., Song X., Graham D.E., Song C., Tian H. 2016. Reviews and syntheses: Four decades of modeling methane cycling in terrestrial ecosystems. *Biogeosciences*, 13: 3735-3755. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3735-2016>
- Yu L., Huang Y., Zhang W., Li T., Sun W. 2017. Methane uptake in global forest and grassland soils from 1981 to 2010. *Science of the Total Environment*, 607-608: 1163-1172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.082>
- Zelenev V.V. 1996. *Assessment of the Average Annual Methane Flux from the Soils of Russia*. WP-96-51. International Institute for Applied Systems Analysis: Laxenburg, Austria.
- Zhang Y., Li C., Tretin C.C., Li H., Sun G. 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1061. <https://doi.org/10.1029/2001GB001838>
- Zhuang Q., Chen M., Xu K., Tang J., Saikawa E., Lu Y., Melillo J. M., Prinn R.G., McGuire A.D. 2013. Response of global soil consumption of atmospheric methane to changes in atmospheric climate and nitrogen deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 27: 650-663. <https://doi.org/10.1002/gbc.20057>
- Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Prinn R.G., McGuire A.D., Steudler P.A., Felzer B.S., Hu S. 2004. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB3010. <https://doi.org/10.1029/2004GB002239>
- Zhu Q., Liu J., Peng C., Chen H., Fang X., Jiang H., Yang G., Zhu D., Wang W., Zhou X. 2014. Modelling methane emissions from natural wetlands by development and application of the TRIPLEX-GHG model. *Geoscientific Model Development*, 7: 981-999. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-981-2014>
- Zobler L. 1986. *A world soil file for global climate modeling*. NASA TM-87802. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. Данные доступны по URL: <http://data.giss.nasa.gov/landuse/soilunit.html> (дата обращения: 19.05.2011).

Поступила в редакцию: 19.08.2023
Переработанный вариант: 02.11.2023

SPATIAL VARIABILITY OF METHANE EMISSIONS FROM SOILS OF WET FORESTS: A BRIEF REVIEW

Runkov R.A. ^{1*}, Ilyasov D.V. ²

¹⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²⁾ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

*rus_runkov@mail.ru

Citation: Runkov R.A., Ilyasov D.V. 2023. Spatial variability of methane emissions from soils of wet forests: a brief review. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 14(3): 167-180.

DOI: 10.18822/edgcc375293

Из-за отсутствия данных о пространственной изменчивости удельных потоков CH_4 в почвах под избыточно увлажненными лесами, их роль в глобальной эмиссии метана до сих пор не выяснена. В национальных отчетах стран эти леса относят к "zero-emited ecosystems" (то есть им приписывается нулевая эмиссия CH_4), что неверно отражает их фактические выбросы. В работе дан обзор литературы, содержащей результаты конкретных измерений, а также суммированы методы измерения эмиссии метана из почв лесов. Независимо от географического местоположения переувлажненного леса, удельные потоки метана могут достигать $10 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. И хотя отдельные измерения в тропиках дали десятки $\text{мгCH}_4 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, но совокупность проанализированных экспериментальных результатов показывает, что величина потока определяется не столько температурой, сколько условиями увлажнения. В статье представлен обзор накопленных в настоящее время исследований, посвященных эмиссии метана из избыточно увлажненных лесов.

Ключевые слова: потоки метана, изменение климата, избыточно увлажненные леса, заболоченные леса, переувлажненные леса.

Methane is one of the most important greenhouse gases that cause climate change [Karol and Kiselev, 2003]. An increase in the atmospheric concentration of methane contributes to an increase in the temperature on the Earth, because this gas absorbs outgoing thermal radiation from the Earth's surface [Berdin, 2004]. Methane has a much shorter atmospheric lifetime than carbon dioxide (CO_2), but CH_4 absorbs certain wavelengths of energy more efficiently than CO_2 . The global warming potential of CH_4 is 28 times greater than that of CO_2 over a 100-year period [IPCC, 2013]. Its contribution to the formation of the greenhouse effect is 30% of the value assumed for carbon dioxide (Bazhin, 2006). Methane is removed from the atmosphere by photochemical oxidation in the troposphere and, to a lesser extent, by microbial oxidation in soils (Kirschke et al., 2013).

Methane sources can be both natural and anthropogenic. The latter includes, firstly, industrial processes:

- fuel use [Omara et al., 2018; Johnson et al., 2023] (if the fuel is not completely burned, then methane gas is emitted into the air, besides it can also be released during the extraction and transportation of natural gas [Hawken et al., 2017]);

- food production (eg CH_4 can be generated from the fermentation of food residues that were not used in the production process [Stephan et al., 2006]);

- as a result of microbial activity during the processing of waste in landfills and compost heaps (for example, in the process of biological waste treatment, methane can be produced in large quantities if the process is not properly controlled [Singh et al., 2017]).

Secondly, two types of agricultural production are anthropogenic sources:

- rice cultivation [Seiler et al., 1984; Dannenberg and Conrad, 1999; Wang et al. 1997; Wang et al., 1999];

- cattle breeding [Gerber et al., 2013; Johnson et al., 2023; Ellis et al., 2007].

CH_4 is formed as a result of the biological decomposition of organic matter in the absence of oxygen [Dlugokencky and Houweling, 2003]. The most significant natural sources of methane are wetlands. Besides, methane can be emitted from aquatic ecosystems such as lakes and rivers. The decomposition of organic wastes in the soil, such as plant residues and animal manure, is also a natural source of methane (Smith et al., 2014) if this decomposition occurs under anaerobic conditions.

Of great interest is the study of wet forests [Glukhova et al., 2021], since their contribution to methane emission can be quite significant. It is generally recognized that forests are CH_4 sinks [Lemer and Roger, 2001; Megonigal and Guenther, 2008; Smith et al., 2000]. Nevertheless, very high CH_4 fluxes were detected during spot measurements in some wet forests [Lohila et al., 2016; Tathy et al., 1992], that were comparable to the fluxes observed in wetlands [Harriss et al., 1982; Sabrekov et al., 2011; Glagolev et al., 2012; Davydov et al., 2021] (Fig. 1). However, single measurements of fluxes at individual spatial sites are clearly not enough to assess the role of wet forests in the overall

methane balance. This role can be assessed only by knowing the dynamics of emission in time and its distribution in space.

A comprehensive study of the variability of methane emission (from soils in general) began at the end of the 20th century in countries with significant areas of waterlogged soils: Brazil, Canada, the USA, and Russia [Bartlett et al., 1988; Moore et al., 1990; Disse, 1993; Glagolev et al., 1999]. At present, the emission spatial variability is studied in almost all regions of the world, including Finland, Mexico, and China [Zhang et al., 2020; Gonzalez-Valencia et al., 2021; Que et al., 2023]. However, there is very little data on the spatial variability of methane emissions in wet forests. Therefore, it is evident that current research should be focused on assessing the spatial variability of emissions in different types of wet forests.

Emission of methane in wet forests. The main works devoted to measurements of the specific flux of methane in wet forests are summarized in Table 1. 1-3. It can be seen from the tables (and Fig. 2) that there is no clear relationship between the specific flux and the geographic location of the wet forest: in the "north" (in the boreal zone - about 57-67°N), values of $\sim 4\div 9 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ can be measured [Lohila et al., 2016; Mochenov et al., 2018], that are similar to those typical for the tropics ($\sim 3\div 8 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ [Devol et al., 1990; Tathy et al., 1992]). On the contrary, in the south, values < 1 or even $< 0.1 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ can be measured that are more typical for northern territories.

There is no doubt, everything is determined by environmental factors. The results of [Ulah and Moor, 2011] show that changes in soil temperature and moisture can have a significant impact on CH_4 fluxes from forest soils. This often leads to so-called "hotspots" such as peak emissions from poorly drained soils when the pore space is filled with water and to a lower $\text{CO}_2\text{:CH}_4$ emission ratio. However, these factors are likely to be unequal.

In fact, the flow rate is determined rather by the degree of anaerobiosis, depending on the conditions of humidity, than the temperature (the formation of CH_4 should be very active at both 40° and 20°C assuming that temperatures around 20°C are quite common for the summer period in the boreal zone). It is certain, under the same humidity conditions, based on the well-known van't Hoff law, one can expect that the rate of methane production in the tropics at 40°C should be approximately 4-9 times higher than that at 20°C under boreal conditions. Yet, if there is a very deep anaerobiosis in the boreal zone (due to the complete watering of the soil) but wet soil in the tropics, then the above mentioned ratio can be reversed.

The extremely strong dependence of methane production on the degree of anaerobiosis (and, hence, on humidity conditions) provides a very wide spatial variability of the emission. It can be seen from the data in Table 1 that, for example, in three seasonally flooded forests in Western Siberia, located at a distance of only about 5-10 km from each other, the entire spectrum of possible specific CH_4 fluxes was observed at the same time, from absorption at a level of $\sim 0.1 \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ to a very active emission of $\sim 10 \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ [Mochenov et al., 2018]. An even more contrasting picture is observed, for example, in the mountain forest in Brazil and in the tropical forest of the Congo: within the same forest, the specific flux varies from 0 to $54 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ [Bartlett et al., 1988] and from -0.31 to $150 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively (see Table 3). However, it is not always possible to find out the dependence of the flow on certain factors. For example, the measurements reported in Tang et al. [2018] showed that CH_4 flux from tropical peat forest was similar to that from other managed and natural wetland ecosystems, including those located in different climate zones. However, meteorological variability in the rainforest does not correlate well with CH_4 flux. Such apparent lack of correlation can be explained by the small range of micrometeorological variables in the tropical peat ecosystem.

Ambus and Christensen [1995] studied several ecosystems where temporary waterlogging was possible. They made the following important assumption: the calculation of the total flux for periodically waterlogged ecosystems should be performed taking into account the topography of the landscape. Indeed, a more accurate estimate of methane consumption and emission can be obtained in this way, but the correct estimations of the gas flow by the chamber method requires taking into account the relative water levels during flooding. Knowing the topography and hydrology of each site in the area makes it possible to determine how long and how often this site remains relatively wet or dry [Glagolev et al., 2018].

From the above data, it is clear that there is a need to improve the quantitative assessment of the global methane emission from the soils of wet forests. Despite the establishment of a complex infrastructure for monitoring greenhouse gases on a global scale (eg ICOS, GMB, etc.), ground-based observations in wet forests on various continents are still underrepresented. Therefore, the contribution of forests to the global atmospheric exchange of CH_4 remains uncertain.

Key words: methane flux, climate change, flooded forests, extensive moisture forests, waterlogged forests, forest ecosystems, carbon sinks, greenhouse effect, soil gases, biogeochemical processes, global methane budget.

СОКРАЩЕНИЯ

ИзУЛ - избыточно увлажненные леса;
КРС - крупный рогатый скот;
ПЛ - прибрежные леса;
УГВ - уровень грунтовых вод;
УП – удельный поток.

ВВЕДЕНИЕ

Метан является одним из наиболее важных парниковых газов, которые вызывают изменения климата [Кароль и Киселев, 2003]: его вклад в формирование парникового эффекта составляет 30% от величины, принятой для двуокиси углерода [Бажин, 2006]. Долгое время, до середины XVII века, концентрация метана в атмосфере была практически постоянной, однако после промышленной революции она начала постепенно расти. К середине XX века скорость роста концентрации метана в атмосфере достигла около 1% в год, и в настоящий момент она продолжает увеличиваться. Рост концентрации метана в атмосфере способствует увеличению среднегодовой температуры, так как этот газ поглощает исходящее тепловое излучение от поверхности Земли [Бердин, 2004]. Срок жизни метана в атмосфере намного короче, чем у двуокиси углерода (CO_2), но CH_4 поглощает определенные длины волн энергии более эффективно, чем углекислый газ. Потенциал глобального потепления у CH_4 в 28 раз больше, чем CO_2 за 100-летний период [IPCC, 2013]. Метан удаляется из атмосферы путем фотохимического окисления в тропосфере и в меньшей степени за счет микробного окисления в почвах [Kirschke et al., 2013]. Таким образом, контроль содержания метана в атмосфере является одной из актуальных задач современной науки в процессе поиска путей приспособления к глобальному потеплению.

Источники метана могут быть антропогенными и естественными. Основные антропогенные источники метана формируются в результате деятельности человека в следующих областях: сельское хозяйство (рисовые плантации и разведение КРС), добыча и переработка полезных ископаемых (залповые выбросы при нефтедобыче), сточные воды, свалки не переработанных бытовых отходов.¹

Наиболее значимыми естественными источниками метана являются болота. Метан образуется в результате биологического разложения органических веществ в условиях отсутствия кислорода [Dlugokencky and Houweling, 2003]. Также метан может выделяться из водных экосистем, таких как озера и реки, где он образуется в результате биологического разложения органических веществ. Разложение органических отходов в почве, таких как растительные остатки и навоз, также является естественным источником метана [Smith et al., 2014], если это разложение происходит в анаэробных условиях.

Долгое время считалось, что почвенный покров способствует поглощению метана и последующему его окислению. Однако многие исследования подтверждают, что в зависимости от конкретных экологических условий почвенный покров может так поглощать метан, так и напротив, является его источником.

Большой интерес представляет изучение избыточно увлажненных лесов (ИзУЛ) [Glukhova et al., 2021], поскольку их вклад в эмиссию метана может оказаться весьма значительным (в данной работе под избыточно увлажненными лесами мы будем понимать такой тип лесных экосистем, где уровень почвенно-грунтовых вод большую часть года находится близко к поверхности почвы (от 30-40 см ниже поверхности почвы и выше)). Леса, как правило, рассматриваются в качестве только поглотителей CH_4 [Lemer and Roger, 2001; Megonigal and Guenther, 2008; Smith et al., 2000], но точечные измерения в отдельных ИзУЛ обнаружили весьма высокие значения удельных потоков CH_4 [Lohila et al., 2016; Tathy et al., 1992], сравнимые с теми, что наблюдаются в болотах [Harriss et al., 1982; Sabrekov et al., 2011; Glagolev et al., 2012; Davydov et al., 2021] (Рис.1). Однако разовых измерений потоков в отдельных экосистемах недостаточно для оценки роли избыточно увлажненных

¹ Обзор мировых выбросов парниковых газов от крупного рогатого скота (КРС) и других животных, а также различные методы снижения таких выбросов метана можно найти в отчете FAO [Gerber et al., 2013]. Johnson et al. [2023] обсуждают методы измерения выбросов CH_4 от КРС, используя технику трассировки гексафторидом серы. Они также предоставляют оценки выбросов метана для разных видов скота и различных условий кормления. Ellis et al. [2007] провели эксперименты с использованием множества животных, включая коров и быков, и измерили их выбросы CH_4 в течение определенного периода времени. Они также собрали данные о различных факторах, таких как возраст животных, вес, тип кормления и другие параметры, которые могут влиять на выбросы метана.

лесов в общем балансе метана. Эту роль можно будет оценить, только зная динамику эмиссии во времени и распределение ее в пространстве.

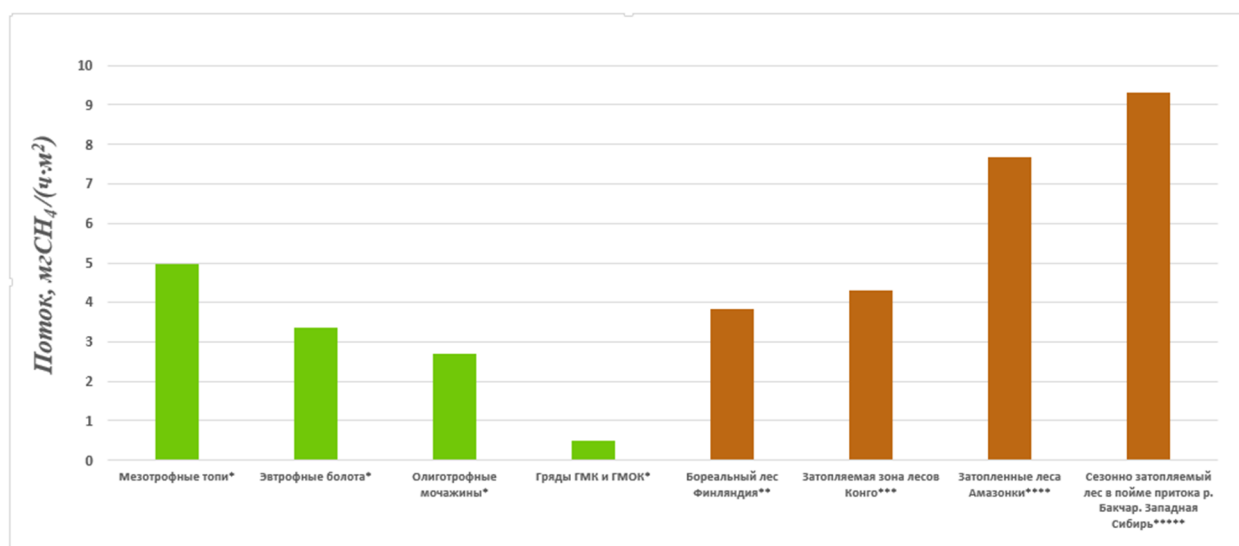


Рисунок 1. Усредненные значения удельных потоков метана из болот и заболоченных лесов.

Примечание:*[Glagolev et al., 2012]; **[Lohila et al., 2016]; ***[Tathy et al., 1992]; ****[Devol et al., 1990]; *****[Mochenov et al., 2018].

Полноценное изучение изменчивости эмиссии метана (из почв вообще) началось в конце XX века в странах, обладающих значительными площадями переувлажненных почв: Бразилии, Канаде, США и России [Bartlett et al., 1988; Moore et al., 1990; Dise, 1993; Глаголев и др., 1999]. В настоящее время пространственная изменчивость эмиссии изучается практически во всех регионах мира, в том числе в Финляндии, Мексике, Китае [Zhang et al., 2020; Gonzalez-Valencia et al., 2021; Que et al., 2023]. Но данных о пространственной вариабельности эмиссии метана в ИзУЛ очень мало. Поэтому очевидно, что в настоящее время исследования должны быть сосредоточены на оценке пространственной вариабельности эмиссии в разных типах ИзУЛ.

Таким образом, целью настоящего исследования является рассмотрение избыточно увлажненных лесов, как потенциальных источников метана с учетом пространственной изменчивости величины наблюдаемых потоков. Предполагается, что избыточно увлажненные леса не могут считаться экосистемами с нулевой эмиссией, что подтверждает анализ рассмотренных ниже результатов исследований.

МЕТОДЫ, ПРИМЕНЯВШИЕСЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В ЛЕСАХ

Существует множество методов для измерения суммарной эмиссии метана из почв [Burba, 2005; Глаголев, 2010; Foken, 2008; Kim and Kim, 2013]. Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения. Выбор того или иного метода зависит от конкретных условий и целей исследования, в частности он определяется исследуемым газом, необходимой точностью измерения, доступностью оборудования и т.д. При измерениях в лесных экосистемах применялся, главным образом, статический камерный метод (как в варианте ручных, так и автоматических камер) и изредка метод микровихревых пульсаций (eddy covariance) [Devol et al., 1990; Евграфова и др., 2010; Ullah and Moore, 2011; Lohila et al., 2016].

Метод статических камер

Данный метод предельно прост:

- 1) Основание (обычно из нержавеющей стали) заранее устанавливается на изучаемый участок; различные авторы делают это предварительно (от 15 мин до 24 часов до начала измерений). Такая предварительная установка необходима, чтобы нивелировать возмущения, созданные при врезании основания в почву [Sabrekov et al., 2015; 2022].
- 2) На основание устанавливается камера, чаще всего имеющая форму параллелепипеда или цилиндра [Kim and Kim, 2013] без нижней грани. Объемы варьируют от 3.5 л [Jacinthe, 2015]

до 36 л [Sabrekov et al., 2015]. Камеры могут быть изготовлены из разных газонепроницаемых материалов таких, как ПВХ, оргстекло [Mochenov et al., 2018] алюминий и др. Для того, чтобы свести к минимуму перепады внутренней температуры, камеру обклеивают солнцезащитной пленкой, либо накрывают майларовым одеялом с высокой отражающей способностью [Crill et al., 1988].

- 3) Отбор проб газа осуществляется через равные интервалы времени (от 20 мин [Devol et al., 1990] до 120 мин [Christiansen et al., 2011]). Поскольку газ выделяется (поглощается) почвой, то в камере его концентрация будет изменяться. По скорости этого изменения можно рассчитать удельный поток газа на границе почва/атмосфера [Smagin et al., 2003; Сирин и др., 2012; Glukhova et al., 2021; Davydov et al., 2021].

Несмотря на доступность этого метода, он имеет ряд недостатков, связанных с ограниченной точностью, нарушением естественного потока газа при врезании основания в почву, нарушением температурного и светового режимов, что приводит к негативному влиянию на растения, которые в некоторых случаях могут способствовать выделению или поглощению метана.

С другой стороны, используемое оборудование постоянно совершенствуется, разрабатываются новые газоанализаторы, многие из них лишены части перечисленных выше недостатков (к примеру, портативный газоанализатор типа LiCor 7810), что говорит в пользу того, что метод статических камер имеет перспективы в дальнейшем использовании для определения эмиссии метана из экосистем.

Метод микровихревых пульсаций

Метод микровихревых пульсаций, известный в англоязычной литературе как “eddy covariance”, представляет собой микрометеорологический метод, используемый для измерения и расчета вертикальных турбулентных потоков в приземном слое атмосферы (в частности, над водно-болотными экосистемами). Он позволяет измерить потоки газов, таких как CO_2 , H_2O , CH_4 , NO_x , SO_x и других, а также потоки энергии (приходящей и уходящей радиации). Для этого используется специальное высокочастотное оборудование, включающее в себя закрепляемые на метеорологических мачтах датчики для измерения скорости ветра, температуры, влажности и других параметров окружающей среды, а также газоанализаторы для измерения концентрации газов. Конечно, этот метод имеет некоторые ограничения, связанные с качеством данных и непредсказуемой природой турбулентных потоков, но его ключевым преимуществом является возможность измерения потока в режиме реального времени [Бурба и др., 2013] сразу с относительно большой территории ($\sim 10^3 \div 10^4 \text{ м}^2$ - ср. с $\sim 0.1 \div 1 \text{ м}^2$ для камерного метода) без нарушения характеристик почвенно-растительного покрова.

Измерение профиля концентрации газа в почве

Megonigal and Guenther [2008] отмечали, что те почвы, которые рассматриваются главным образом в качестве поглотителей метана, могут также и продуцировать его тогда, когда их влажность существенно возрастает. Но поскольку необходимое для образования метана возрастание влажности обычно достигается лишь локально в пространстве (например, в понижениях рельефа) и/или времени, то возникает вопрос: какая часть леса в оптимальных (для эмиссии) гидрометеорологических условиях станет источником CH_4 . На этот вопрос невозможно ответить, если использовать только измерения потока в какой-то произвольный момент времени. Действительно, в это время условия для эмиссии могли быть неподходящими (например, измерениям предшествовала длительная засуха). Тогда вместо выделения CH_4 исследователь обнаружит его поглощение [Mochenov et al., 2018]. Как же установить, что данный заболоченный лес, который в настоящий момент (в неоптимальных условиях) является поглотителем метана, через некоторое время может оказаться его источником?

Измерения концентрационного профиля в почве как раз и позволяют ответить на этот вопрос. В простейшем случае возможны три варианта профиля концентрации метана в почве: возрастающий, падающий и не меняющийся с глубиной (а также их комбинации в зависимости от глубины рассмотрения в почве). Возрастающий профиль концентрации метана (положительный концентрационный градиент) свидетельствует о наличии метаногенных организмов и отсутствии (или слабой активности) метанотрофных. В этом случае почва просто является источником метана. Падающий или нулевой профиль концентрации метана (отрицательный или нулевой градиент) говорит об отсутствии (либо крайне низкой активности) метаногенных организмов и высокой активности метанотрофных. В этом случае поток метана будет отсутствовать, или же, при крайне

высокой активности метанотрофных организмов может быть отрицательным (то есть будет наблюдаться поглощение метана почвой из атмосферы).

Таким образом, если в верхней части профиля отмечен нулевой или отрицательный градиент концентрации метана, а ниже – положительный, это говорит о том, что при отключении «метанотрофного фильтра» (в случае формирования определенных гидротермических условий и достаточной диффузионной проницаемости) почва может стать источником метана [Mochenov et al., 2018].

Метод измерения пузырькового потока

На настоящий момент для болотных экосистем принято выделять следующие механизмы транспорта газов: диффузия газа через воду или воздух, заполняющие поры в грунте, пузырьковый перенос и транспорт посредством растений [Walter et al., 1996]. Следует ожидать, что в заболоченных лесах будут функционировать те же механизмы. Поскольку в различных условиях на передний план может выходить то один из них, то другой, представляет интерес измерить вклад каждого механизма в общий поток.

Для измерения “пузырьковой” составляющей общего потока метана Weyhenmeyer [1999] использовал следующий метод: большие воронки (диаметром 30 см) устанавливались широким концом вниз, а узкий их конец закупоривался резиновой пробкой, через которую была пропущена стеклянная трубка, также закрытая пробкой. Через эту трубку можно было отбирать пробы газа, накапливавшегося в воронке у верхнего ее края.

Воронки размещают в радиусе 10 см от основной измерительной камеры (при помощи которой определяют суммарный поток). Каждую воронку полностью погружают под воду и доверху заполняют водой. Воронки устанавливают на весь период измерений, но в начале того дня, когда проводятся измерения, весь накопившийся в них газ извлекают, учитывают его объем и анализируют химический состав [Weyhenmeyer, 1999]. Может показаться, что в воронке будет измеряться сумма “диффузионного” и “пузырькового” метана. Но диффузия идет по градиенту концентрации, и как только в воронку поступит хотя бы 1 пузырек, этот градиент “перевернется” относительно того, который имеет место в естественных условиях. Поскольку обычно пузырьки содержат метан в высокой концентрации, то получится, что в воронке над поверхностью воды концентрация метана (принесенного пузырьком) будет весьма большой, следовательно, по закону Генри, высокой она станет и в поверхностном слое воды (тогда как в свободной атмосфере она мала и, соответственно, невелика в воде, граничащей с этой атмосферой). Очевидно, что теперь в воронке диффузия метана будет направлена не снизу вверх – из почвы в атмосферу (как в естественных условиях), а в противоположном направлении. Кстати, точные измерения должны это учитывать – следует вычислить обратный диффузионный поток в воронке и прибавить его к измеренному пузырьковому (впрочем, диффузионный поток обычно так мал, что им часто можно пренебречь).

Независимо от Е. Weyhenmeyer, аналогичный метод предложили Glagolev et al. [1999] (для краткости эти методы далее будут обозначаться как “W-метод” и “G-метод”, соответственно). Хотя методы отличаются друг от друга очень незначительно, но эти различия представляются весьма важными.

- 1) Очевидно, что “W-метод” может применяться лишь при наличии довольно высокого слоя воды над почвой - ведь воронка должна быть полностью погружена в воду (в [Weyhenmeyer, 1999] этот метод использовался только при измерениях в прудах, устроенных в лесу бобрами). В “G-методе” воронка может устанавливаться в любом месте, где есть хотя бы небольшой слой открытой воды (если нижний край воронки погружен в воду, то вода все равно не будет выливаться из воронки, пока накапливающийся газ не выдавит ее).
- 2) В “G-методе” используются воронки примерно в 2 раза меньшего диаметра, а это увеличивает вероятность установки их в такие места на почве, где практически нет растений (если растения попадают в воронку, то газ в нее будет поступать не только за счет пузырьков, но и за счет механизма транспорта, связанного с растениями).
- 3) Наконец, в “G-методе” воронки покрываются светоотражающим материалом. Было замечено, что без этого в них могут активно развиваться водоросли (и цианобактерии). Выделяемый ими кислород используется метанотрофами для окисления метана, а т.к. отбор газа из воронки осуществляется 1 раз за десятки часов, то существенная доля метана может быть за это время поглощена метанотрофами, в связи с чем получится сильно заниженное значение пузырькового потока.

Метод измерения диффузионного потока

Диффузионный поток на границе вода/атмосфера рассчитывают с использованием модели массообмена, учитывающей концентрацию растворенного метана в поверхностном слое, температуру воды и скорость ветра. Для измерения концентрации метана в шприц, объем которого 60 мл, отбирают около 30 мл воды и добавляют 30 мл атмосферного воздуха, после чего шприц энергично встряхивают около 2 мин. Из газовой фазы каждого шприца берут две пробы по 10 мл и определяют в них концентрацию метана [Weyhenmeyer, 1999], по которой затем вычисляют концентрацию в воде, используя закон Генри.

Принципиально другой метод, для оценки эмиссии из почв, предложили Glagolev et al. [2001]. Опираясь на определение диффузионного потока, они предложили вычислять его непосредственно по закону Фика ($F = -D \cdot dC/dz$, где D - эффективный коэффициент диффузии, C - концентрация CH_4 , z - глубина). Для возможности отбора проб по глубине с небольшим шагом (1-2 см) авторы использовали систему тонких (1-2 мм) трубок, что позволило им определять диффузионные потоки на разных глубинах в профиле почвы. Но если нас интересует диффузионный поток только на границе почва/атмосфера, то достаточно отобрать пробы лишь на 2 глубинах вблизи поверхности почвы, после чего (приблизительно аппроксимировав производную конечными разностями) диффузионный поток можно вычислить по формуле:

$$F \approx -D \cdot (C_2 - C_1) / (z_2 - z_1) \quad (1)$$

где C_2 и C_1 - концентрации метана, соответственно, на глубинах z_2 и z_1 .

Метод инкубирования образцов

Amaral and Knowles [1994] и Keller et al. [1999] изучали способность почв поглощать метан методом инкубирования почвенных образцов. Метод инкубации почвенных образцов – это лабораторный метод, основанный на измерении концентрации какого-либо газа в герметичных емкостях при определенной температуре в течение определенного времени. В процессе отбора образцы почвы разделяются по интервалам различной глубины, а при дальнейшей пробоподготовке просеиваются для удаления камней и фрагментов корней.

Затем образцы почвы помещают в герметичные емкости и инкубируют при определенной (что достигается посредством термостатирования) температуре в течение некоторого времени (обычно порядка часов или суток). Во время инкубации концентрации метана измеряются через регулярные промежутки времени с помощью газовой хроматографии. Затем скорость потребления метана рассчитывается путем подгонки данных о зависимости концентрации от времени к уравнению экспоненциального затухания².

Этот метод основан на принципе, согласно которому микроорганизмы, окисляющие метан в почве, потребляют метан в качестве источника энергии и производят углекислый газ в качестве побочного продукта. Измеряя скорость потребления метана, исследователи могут оценить активность этих микроорганизмов и их потенциальное влияние на концентрацию метана в атмосфере.

ЭМИССИЯ МЕТАНА В ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЛЕСАХ

Основные работы, посвященные измерениям удельных потоков метана в избыточно увлажненных лесах, суммированы в табл. 1–3.

Таблица 1. Измерения УП CH_4 * в заболоченных лесах бореального пояса.

Регион	Экосистема	Удельный поток, $мг \cdot ч^{-1} \cdot м^{-2}$	Комментарий	Источник
Россия. Дельта р. Лена	Гомогенный лиственничник	0.4 ÷ 1.4	Измерения камерным методом. Величина удельного потока CH_4	[Евграфова и др., 2010]

² Здесь необходимо отметить некоторые особенности расчета скорости потребления метана (что, безусловно, может быть применимо и к другим субстратам). Очевидно, что так как концентрация метана снижается экспоненциально, скорость его потребления бактериями непостоянна и, более того, описывается некоторой убывающей функцией. Найти ее можно как производную от функции концентрации метана по времени. Также очевидно, что важнейшим критерием скорости убывания производной (которая косвенно отражает биомассу жизнеспособных микроорганизмов в момент времени t) будет сама концентрация метана, который в каждый последующий момент времени t доступен как субстрат для бактерий во все меньшем и меньшем количестве.

(72°N, 126°E)			зависела от количества осадков	
Северная Финляндия. Kenttäröva (67°59.237'N, 24°14.579'E)	Бореальные почвы высокогорных лесов	от -0.01±0.03 до 3.83±1.13	Измерения проводились камерным методом. Обильные осадки создают условия, при которых лесная почва превращается из поглотителя, в мощный источник метана	[Lohila et al., 2016]
Россия. Южная Тайга Западной Сибири (160 км к западу города Томск) (56°55'N, 82°42'E)	Сезонно затопляемый лес в пойме притока р. Бакчар (56.96189 82.51528)	от -0.08±0.07 до 20±0.8	Измерения камерным методом. Величина эмиссии зависела от уровня грунтовых вод	[Mochenov et al., 2018]
	Сезонно затопляемый лес на границе Бакчарского болота (56.83169 82.85122)	от 0.05±0.04 до 0.14±0.13		
	Сезонно затопляемый лес в пределах осушенного болота (56.87217 82.84978)	от -0.03±0.02 до 5.5±0.2		
Россия. Южная Тайга Западной Сибири (56°54.6'N, 82°41.8'E)	Затопленный сгоревший березовый лес Погибшие и отдельно живые деревья <i>Betula péndula</i>	1.6 ÷ 10.9	Измерения проводились камерным методом. УСВ = -20 см	[Glagolev et al., 2018]
Дания. Вестсковен (55°57'25"N, 12°16'12"E)	Дубовый лес	0.065 ÷ 1.6	Измерения проводились камерным методом. Выбросы наблюдались только при содержании воды в почве выше 45%.	[Christiansen et al., 2012]
Канада. Манитоба (55°40'N, 97°52'W)	Бореальный лес. Доминантный вид – <i>Picea mariana</i> , <i>Betula papyrife</i> , <i>Populus tremuloide</i> , <i>Pinus banksian</i> .	0.8 ÷ 2.5	Измерения потоков проводились камерным методом. Также измерялись pH почвенного раствора, температура (атмосферы и почвы на глубине 20 см)	[Savage et al., 1997]
Дания. Копенгаген (55°33'N, 12°32'E).	Еловые и буковые леса на супесчаной почве.	-0.01 ÷ 2.9	Измерения камерным методом. Представлена годовая динамика, участки измерений были затоплены с декабря по апрель	[Ambus and Christensen, 1995]

*Примечание: положительные значения УП указывают на эмиссию, а отрицательные - на потребление метана.

Таблица 2. Измерения УП CH₄ * в заболоченных лесах умеренного пояса.

Регион	Экосистема	Поток, мг·ч ⁻¹ ·м ⁻²	Комментарий	Источник
Швейцария. Эрматинген (47°40'N, 9°4'E)	В лесах преобладали <i>Fagus sylvatica</i> и <i>Picea abies</i> , почвы среднесуглинистые, но в Эрматингене –глинистые. (550 м над уровнем моря)	0.08	Измерения потоков камерным методом. Также были измерены: температура атмосферы и на глубине 3 см, а также атмосферное давление и влажность почвы	[Frey et al., 2011]
Франция. Хайтерен (47°58'N, 7°32.5'E)		0.04		
Восточная Канада. Южный Квебек (45°28.7'N, 73°2.4'W)	Старовозрастный лес. Участки с выделением метана - плохо дренированные илистые суглинки. Доминантный вид - <i>Fagus grandifolia</i>	0.07±0.02	Измерения проводились камерным методом. **Примечание: в сезон весенних оттепелей - март и апрель - в 2007 и 2008 годах максимальное значение составило 0.125	[Ullah and Moore, 2011]
	То же самое, но доминантный вид - <i>Tsuga Canadensis</i>	0.18±0.11		
	Полууправляемый лес. Участки с выделением метана - плохо дренированный илистый суглинок. Доминантные виды - <i>Acer saccharum</i>	0.90±0.28		
	То же самое, но доминантный вид <i>Fraxinus Americana</i> , <i>Carya cordiformis</i>	0.15±0.05		
США. Нью Джерси (39°55'N, 74°35'W)	Сосновый лес на песчаной почве Доминантные виды: <i>Pinus echinata</i> , <i>P.rigida</i> , <i>Quercus ilicifolia</i> , <i>Q. prinus</i> , <i>Q.velutina</i>	-0.06 ÷ 0.04	Измерения проводились камерным методом. Основной переменной, коррелирующей с потоком CH ₄ , была влажность почвы	[Aronson et al.,2012]
США. Индиана Уайт-Ривер в Юго-Центральной части штата (39°46'N, 86°11'W)	Прибрежные леса (ПЛ), защищенные от наводнений	-0.13	Измерения камерным методом	[Jacinthe, 2015]
	Периодически затопляемые ПЛ	-0.07		
	ПЛ (часто затопленные)	0.03 max = 1.88		
Южная Корея. Кванджу, гора Тэва (37°17.49'N, 127°17.31'E)	Естественный лес из сосен и лиственно-каштановых деревьев	-0.12 ÷ 0.12	Измерения проводились камерным методом. Отмечалось влияние влажности на эмиссию метана. Другие параметры почвы, такие как pH почвы и химический состав, также обсуждались в отношении выбросов парниковых газов	[Kim and Kim, 2013]

*Примечание: положительные значения УП указывают на эмиссию, а отрицательные - на потребление метана.

Таблица 3. Измерения УП CH_4 * в заболоченных лесах тропического пояса.

Регион	Экосистема	Поток, $\text{мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$	Комментарий	Источник
Флорида. Эверглейдс (25°51'N, 81°23'W)	Лиственный лес	1.17 ÷ 13.6	Измерялся диффузионный поток (по концентрации CH_4 в поверхностном слое воды). Наличие растительного покрова уменьшало диффузионный поток. Средний УСВ 31 см	[Barber et al., 1988]
Малазия. Бетонг (1°27'N, 111°80'E)	Заболоченный лес на торфяной почве	0.75 ÷ 1.73	Измерения методом микровихревых пульсаций в течение декабря - ноября	[Tang et al., 2018]
Центральная Африка. Конго (1°0'N, 31°27'E)	Тропические леса на супесчаной почве. Доминантные виды: <i>Hevea brasiliensis</i> , <i>Ouratea arnoldiana</i> , <i>Pentaclethra eetveldeana</i> , <i>Strombosia tetandra</i> и <i>Daniella pynaertii</i> .	-0.31 ÷ 150	Использовался камерный метод. Увлажнённые леса могут компенсировать преобладающий на территории Конго сток CH_4 , несмотря на то, что они покрывают лишь 7% всей поверхности лесов, а затопленные районы занимают лишь 10% от общей площади бассейна	[Barthel et al., 2022]
Центральная Африка. Конго. (1°38'N, 18°4'E)	Постоянно затопляемая зона лесов, расположенная вдоль бассейна рек Убанги и Конго. Глубина воды составляла от 10 до 40 см	4.33	Измерения камерным методом. Величина эмиссии зависела от уровня стояния воды. Несмотря на довольно хорошую однородность среды в региональном масштабе, местные потоки характеризуются высокой изменчивостью	[Tathy et al., 1992]
	То же самое, но УСВ находился примерно на 10-20 см ниже поверхности влажных почв	0.20		
Бразилия. Манауса. (3°15'S, 60°34'W)	Амазонский горный лес <i>Paspalum repen</i> , <i>Echinochloa polystachy</i> , <i>Salvinia auriculat</i> , <i>Eichornia crassipe</i>	0 ÷ 54 avg = 4.5	Использовался камерный метод. Измерения были проведены в течение одной части гидрографического цикла, когда уровни воды были относительно высокими	[Bartlett et al., 1988]
Бразилия. между г. Обидуш (55°29'W) и г. Сибекто (67°13'W)	Затопленные леса в бассейне р. Амазонка при маловодье. (основные виды <i>Echinochloa polystachya</i> , <i>Paspalum fasciculatum</i> и <i>Paspalum repens</i>)	2.8±0.8	Измерения проводились камерным методом. Динамика выбросов метана связана с колебаниями уровня воды, температурой и разложением органического вещества	[Devol et al., 1990]
	То же самое, но при полноводье	7.67±1.7		

*Примечание: положительные значения УП указывают на эмиссию, а отрицательные - на потребление метана.

Из таблиц (и рис. 2) видно, что какой-либо четкой связи величины удельных потоков CH_4 с географическим местоположением переувлажненных лесов не имеется. Например, в бореальном поясе (около 57-67° с.ш.) могут наблюдаться величины удельных потоков до $\sim 4\div 9 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [Lohila et al., 2016; Mochenov et al., 2018], аналогичные тем, что характерны для тропического пояса ($\sim 3\div 8 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [Devol et al., 1990; Tathy et al., 1992]); напротив, в тропических широтах вполне можно встретить величины <1 или даже $<0.1 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, которые, казалось бы, должны быть более характерны для северных территорий.

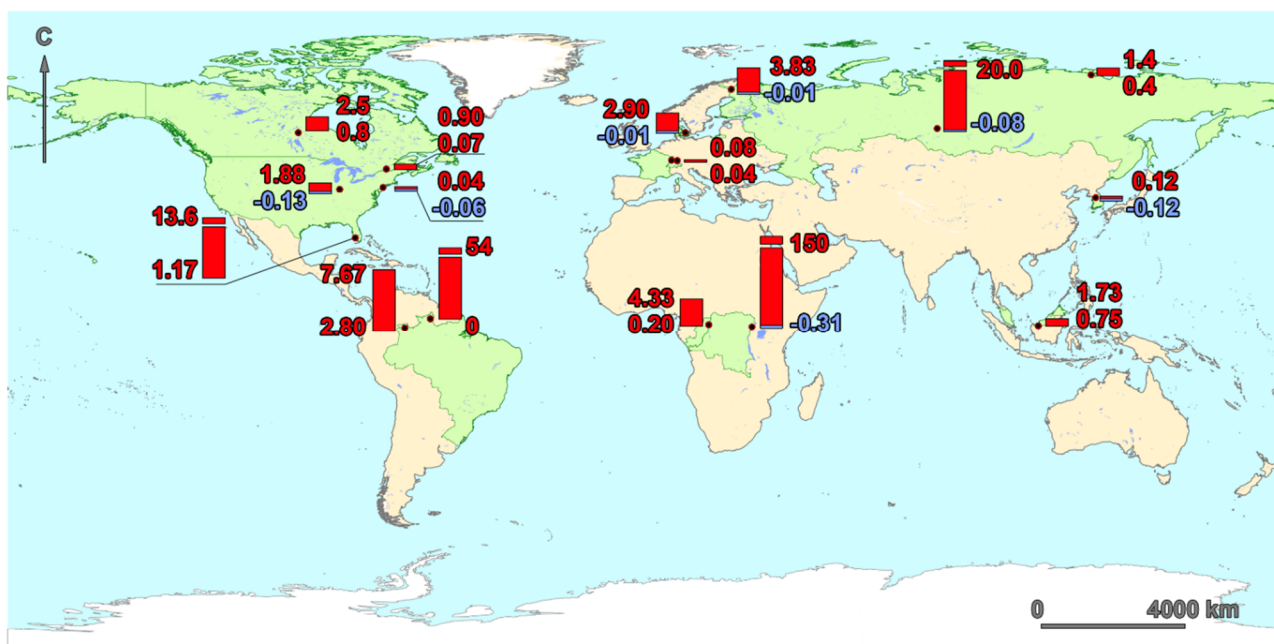


Рисунок 2. География исследований эмиссии метана* в избыточно увлажненных лесах, представленных в обзоре.

*Примечание: Значения УП метана указано в $\text{мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, положительные значения (красный цвет) указывают на эмиссию, а отрицательные (синий цвет) - на потребление.

Безусловно, величины потоков определяются в первую очередь экологическими условиями конкретных местообитаний. Например, результаты [Ulah and Moor, 2011] показывают, что изменения температуры и влажности почвы могут оказывать столь существенное влияние на потоки CH_4 из лесных почв, что это приводит к формированию так называемых “хотспотов” эмиссии метана. Примером таких источников являются плохо дренированные почвы, в которых поровое пространство заполнено водой, что приводит к формированию устойчивых восстановительных условий и снижению отношения выбросов CO_2 к CH_4 .

В то же время, в различных природных зонах определяющие высокую эмиссию экологические факторы могут быть разными: при одинаковых условиях влажности, исходя из известного правила Вант-Гоффа, можно ожидать, что, все-таки, скорость продукции метана в тропиках при 40°C будет примерно в 4–9 раз больше, чем при 20°C в бореальных условиях. Но если в последнем случае мы будем иметь очень глубокий анаэробизис (за счет полного обводнения почвы), а в тропиках – просто влажноватый грунт, то указанное соотношение вполне может перевернуться в обратную сторону.

Чрезвычайно сильная зависимость продукции метана от степени анаэробиза (как следствие условий увлажнения) определяет очень широкую пространственную вариабельность эмиссии. Из данных табл. 1 видим, что, например, в трех сезонно затопляемых лесах в Западной Сибири, расположенных друг от друга на расстоянии всего около 5–10 км, в одно и то же время наблюдался весь спектр возможных удельных потоков CH_4 от поглощения на уровне $\sim 0.1 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ до весьма активной эмиссии $\sim 10 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [Mochenov et al., 2018]. Еще более контрастную картину видим на примере горного леса в Бразилии: в пределах одного и того же леса удельный поток меняется от 0 до $54 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [Bartlett et al., 1988], а в тропическом лесу Конго – от -0.31 до $150 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (см. таблицу 3).

Однако зависимость потока от тех или иных факторов в полевых условиях удастся выяснить не всегда. Например, измерения Tang et al. [2018] показали, что поток CH_4 из тропического торфяного леса был сходен с величиной выбросов в других управляемых и естественных экосистемах водно-болотных угодий, в том числе при их рассмотрении в различных климатических зонах. При этом изменчивость метеорологических условий в тропическом лесу плохо коррелировала с потоком CH_4 : впрочем, кажущееся отсутствие корреляции в данном случае может быть объяснено небольшим диапазоном изменения микрометеорологических переменных.

Ambus and Christensen [1995] изучили несколько экосистем, где было отмечено временное заболачивание. Они выдвинули следующее важное предположение: расчет общего потока для периодически переувлажненных экосистем следует выполнять с учетом топографии ландшафта. Таким образом можно получить более точную оценку потребления и эмиссии метана, но в этом

случае, для правильной оценки потока CH_4 камерным методом, необходимо точно оценивать относительные уровни воды в почве во время измерений. Зная топографию и гидрологический режим каждой точки местности, можно определить, как долго и как часто эта точка является относительно влажной или сухой, что может существенно улучшить прогнозирование изменчивости величины потоков метана здесь [Glagolev et al., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеприведенных данных видна необходимость улучшения количественной оценки глобальной эмиссии метана из почв переувлажненных лесов с использованием комплекса различных методов. Несмотря на создание плотной инфраструктуры наблюдения за парниковыми газами в глобальном масштабе (например, ICOS, GMB и др.), наземные наблюдения в ИзУЛ на различных континентах все еще недостаточно представлены. УП CH_4 может значительно варьироваться в зависимости от климатических условий и других факторов. Например, в тропических лесах УП CH_4 меняются от -0.31 до $150 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл.3), а в некоторых лесных экосистемах умеренного пояса лишь около нуля (табл.2). Измерения УП CH_4 в заболоченных лесах бореального пояса на примере Южной Тайги Западной Сибири (табл.1) демонстрируют вариабельность в диапазоне от -0.08 до $20 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

Для более точной оценки глобальной эмиссии метана из почв переувлажненных лесов необходимо проводить дополнительные исследования, сосредоточенные на оценке пространственной вариабельности эмиссии в разных типах избыточно увлажненных лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bazhin N.M. 2006. The role of methane in the process of global warming of the Earth's atmosphere. *Elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii "Ekologicheskie sistemy"*, 1: 49 (in Russian). [Бажин Н. М. 2006. Роль метана в процессе глобального потепления атмосферы Земли // Экологические системы. № 1. С. 49.] (date of the application 4.03.2023)
URL: http://downloads.igce.ru/publications/Semenov_S_M_etc_2018/Methane_and_climate_Sep_24_2018.pdf.
- Berdin V.Kh. 2004. *Reference Guide. Greenhouse gases are a global environmental resource*. WWF Russia, Moscow, 12 pp. (in Russian). [Бердин В. Х. 2004. Парниковые газы—глобальный экологический ресурс: Справочное пособие. Москва. 12 с.]
- Burba G.G., Kurbatova Yu.A., Kuricheva O.A., Avilov V.K., Mamkin V.V. 2016. *Turbulent pulsation method. A quick how-to guide*. LI-COR Biosciences. A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, (in Russian). [Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. 2016. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство // LI-COR Biosciences. М.: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН.]
- Glagolev M.V. 2010. Inverse modelling method for the determination of the gas flux from the soil. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 1(1): 17-36 (in Russian). [Глаголев М.В. 2010. К методу "обратной задачи" для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 1. С. 17-36.]
- Glagolev M.V., Golyshev S.A., Firsov S.Yu. 1999. Assessment of methane transfer from soil to atmosphere by wetland plants. *Bolota i zabolochennyye lesa v svete zadach ustoichivogo prirodopol'zovaniya. Meeting materials*, 177-180 pp. (in Russian). [Глаголев М.В., Голышев С.А., Фирсов С.Ю. 1999. Оценка переноса метана из почвы в атмосферу болотными растениями // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Материалы совещания. С. 177-180.]
- Evgrafova S.Yu., Grodnitskaya I.D., Krinitsyn Yu.O., Syrtsov S.N., Masyagina O.V. 2010. Emission of methane from the soil surface in tundra and forest ecosystems of Siberia. *The Bulletin of KrasGAU*. 12: 80-86 (in Russian). [Евграфова С.Ю., Гродницкая И.Д., Криницын Ю.О., Сырцов С.Н., Масыгина О.В. 2010. Эмиссия метана с поверхности почвы в тундровых и лесных экосистемах Сибири // Вестник КрасГАУ. № 12. С. 80-86.]
- Karol' I.L., Kiselev A.A. 2003. Assessment of damage to the "health" of the atmosphere. *Priroda*, 6: 25-30 (in Russian). [Кароль И.Л., Киселев А.А. 2003. Оценка ущерба "здоровью" атмосферы // Природа. № 6. С. 25-30.]
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. 2012. Values of methane emission from drainage ditches. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 3(2): 1-10. (in Russian). [Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. 2012. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 3. №2. С. 1-10.]
- Amaral J. A., Knowles R. 1994. Methane Metabolism in a Temperate Swamp. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(11): 3945-3951.
- Ambus P., Christensen S. 1995. Spatial and Seasonal Nitrous Oxide and Methane Fluxes in Danish Forest-, Grassland-, and Agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 24: 993-1001.
- Barber T.R., Burke Jr.R.A., Sackerr W.M. 1988. Diffusive flux of methane from warm wetlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2(4): 411-425.
- Barthel M., Bauters M., Baumgartner S., Drake T.W., Bey N.M., Bush G., Boeckx P., Botefa C.I., Dériaz N., Ekamba G.L., Gallarotti N., Mbayu F.M., Mugula J.K., Makelele I.A., Mbongo C.E., Mohn J., Manda J.Z., Mpambi D.M., Ntaboba L.C., Rukeza

- M.B., Spencer R.G.M., Summerauer L., Vanlauwe B., Oost K.V., Wolf B., Six J. 2022. Low N₂O and variable CH₄ fluxes from tropical forest soils of the Congo Basin. *Nat Commun.*, 13: Article 330.
- Bartlett K.B., Crill P.M., Seebacher D.I., Harriss R.C., Wilson J.O., Melack J.M. 1988. Methane flux from the Central Amazonian floodplain. *J. Geophys Res: Atmospheres*, 93: 1571-1582.
- Burba G. 2005. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications*. Lincoln: LI-COR® Biosciences.
- Crill P.M., Bartlett K.B., Harriss R.C., Gorham E., Verry E.S., Sebacher D.I., Madzar L., Sanner W. 1988. Methane flux from Minnesota peatlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2(4): 371-384.
- Christiansen J.R., Vesterdal L. Gundersen P. 2012. Nitrous oxide and methane exchange in two small temperate forest catchments—effects of hydrological gradients and implications for global warming potentials of forest soils. *Biogeochemistry*, 107: 437-454
- Dannenbergs S., Conrad R. 1999. Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil. *Biogeochemistry*, 45: 53-71.
- Davydov D.K., Dyachkova A.V., Krasnov O.A., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksyutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for longterm measurements CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(1): 5-14.
- Devol A.H., Richey J.E., Forsberg B.R., Martinelli L.A. 1990. Seasonal Dynamics in Methane Emissions from the Amazon River Floodplain to the Troposphere. *J Geophys Res.*, 95: 16417-16426.
- Dise N. 1993. Methane emission from Minnesota peatlands: Spatial and seasonal variability. *Global Biogeochem Cy.*, 7: 123-142.
- Dlugokencky E., Houweling S. 2003. Methane. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, pp. 1286-1294.
- Ellis J.L., Kebeab E., Odongo N.E., McBride B.W., Okine E.K., France J. 2007. Prediction of Methane Production from Dairy and Beef Cattle. *Am Dairy Science Association*, 90: 3456-3467.
- Foken T. 2008. *Micrometeorology*. Springer, 320 pp.
- Frey B., Niklaus P.A., Kremer J., Lüscher P., Zimmermann S. 2011. Heavy machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 77: 6060-6068.
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.
- Glagolev M.V., Belova S.E., Smagin A.V., Golyshov S.A., Tarasov A.L. 1999. Bubble's mechanism of gas transfer in the wetland soil. (M. Shibuya, K. Takahashi, G. Inoue, eds.) *Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998*, pp. 132-142.
- 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: Article 012005.
- Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Filippov I.V., Lapshina E.D., Machida T., Maksyutov S.S. 2012. Methane Emission from Bogs in the Subtaiga of Western Siberia: The Development of Standard Model. *Eurasian Soil Science*, 45(10): 947-957.
- Glagolev M.V., Smagin A.V., Lebedev V.S., Shnyrev N.A. 2001. Generation, mass-transfer and transformation of methane in peatland (on example of Bakcharskoe wetland). (S.V. Vasiliev, A.A. Titlyanova, A.A. Velichko, eds.) *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Proceedings of the International Field Symposium*, pp. 79-81.
- Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E., Golovchenko A.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L. 2021. Soil Respiration in Alder Swamp (*Alnus glutinosa*) in Southern Taiga of European Russia Depending on Microrelief. *Forests*, 12(4): Article 496.
- Gonzalez-Valencia R., Magana-Rodriguez F., Martinez-Cruz K., Fochesatto G.J., Thalasso F. 2021. Spatial and temporal distribution of methane emissions from a covered landfill equipped with a gas recollection system. *Waste Management*, 121: 373-382.
- Harriss R.C., Sebacher D.I., Day F.P. 1982. Methane flux in the great dismal swamp. *Nature*, 297: 673-674.
- Hawken P., Frischmann C., Bayuk K., Mehra M., Gouveia J.P., Zame K., Mukkavilli S.K. 2017. Drawdown: The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Jacinthe P.A. 2015. Carbon dioxide and methane fluxes in variably-flooded riparian forests. *Geoderma*, 241: 41-50.
- Johnson M.R., Tyner D.R., Conrad B.M. 2023. Origins of Oil and Gas Sector Methane Emissions: On-Site Investigations of Aerial Measured Sources. *Environ. Sci. Technol.*, 57(6): 2484-2494.
- Keller M., Mitre M.E., Stallard R.F. 1990. Consumption of Atmospheric Methane in Soils of Central Panama: Effects of Agricultural Development. *Global Biogeochemical Cycles*, 4: 21-27.
- Kim D., Kim S. 2013. N₂O and CH₄ Emission from Upland Forest Soils using Chamber Methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6): 789-800.
- Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunio M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Quéré C.L., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahn R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. 2013. Three decades of global methane sources and sinks. *Nat. Geosci.*, 6: 813-823.
- Lemer J., Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *Eur. J. Soil Biol.*, 37: 25-50.
- Lohila A., Aalto T., Aurela M., Hatakka J., Tuovinen J.P., Kilkki J., Laurila T. 2016. Large contribution of boreal upland forest soils to a catchment-scale CH₄ balance in a wet year. *Geophys. Res.*, 43: 2946-2953.

- Megonigal J.P., Guenther A.B. 2008. Methane emissions from upland forest soils and vegetation. *Tree Physiology*, 28: 491-498.
- Mochenov S.Yu., Churkina A.I., Sabrekov S.F., Glagolev M.V., Il'yasov D.V., Terentieva 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: Article 012012.
- Moore T. R., Roulet N., Knowles R. 1990. Spatial and temporal variations of methane flux from subarctic/northern boreal fens. *Global Biogeochemical Cycles*, 4: 29-46.
- Omara M., Zimmerman N., Sullivan M.R., Li X., Ellis A., Cesa R., Subramanian R. Presto A.A., Robinson A. L. 2018. Methane Emissions from Natural Gas Production Sites in the United States: Data Synthesis and National Estimate. *Environ. Sci. Technol.*, 52(21): 12915–12925.
- Que Z., Wang X., Liu T., Wu S., He Y., Zhou T., Yu L., Qing Z., Chen H., Yuan X. 2023. Watershed land use change indirectly dominated the spatial variations of CH₄ and N₂O emissions from two small suburban rivers. *Journal of Hydrology*, 619: Art. 129357.
- Sabrekov A.F., Filippov I.V., Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kaverin A.A., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Lapshina E.D. 2022. Hot spots of methane emission in West Siberian middle taiga wetlands disturbed by petroleum extraction activities. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(3): 142-155.
- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Il'yasov D.V., Maksyutov Sh.Sh. 2015. Relationship of Methane Consumption with the Respiration of Soil and Grass-Moss Layers in Forest Ecosystems of the Southern Taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 48(8): 841–851.
- Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Maksyutov Sh.Sh., Machida T. 2011. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of western Siberia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 5(107): 135-143.
- Savage K., Moore T.R., Crill P.M. 1997. Methane and carbon dioxide exchanges between the atmosphere and northern boreal forest soils. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24): 29279-29288.
- Seiler W., Holzappel-Pschorn A., Conrad R., Scharffe D. 1984. Methane emission from rice paddies. *J. Atmos. Chem.*, 1: 241–268.
- Singh C., Kumar A., Roy S. 2017. Estimating Potential Methane Emission from Municipal Solid Waste and a Site Suitability Analysis of Existing Landfills in Delhi, India. *Technologies*, 5(4): 62. <https://doi.org/10.3390/technologies5040062>
- Smagin A.V., Glagolev M.V., Suvorov G.G., Shnyrev N.A. 2003. Methods for studying gas fluxes and the composition of soil air in field conditions using a portable PGA-7 gas analyzer. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 58(3): 26-35.
- Smith P., Clark H., Dong H., Elsiddig E.A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., et al. 2014. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. IPCC Working Group III Contribution to Ar5*. University Press, Cambridge, 11: 811-922.
- Smith K.A., Dobbie K.E., Ball B.C., Bakken L.R., Sitaula B.K., Hansen S., Brumme R., Borken W., Christensen S., Prieme A., Fowler D., Macdonald J.A., Skiba U., Klemetsson L., Kasimir-Klemetsson A., Degorska A. and Orlanski P. 2000. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties of global terrestrial sink. *Global Change Biol.*, 8: 885-894.
- Stephan, I., Askew, P., Gorbushina, A., Grinda, M., Hertel, H., Krumbein, W., Schwibbert, K. 2006. Biogenic Impact on Materials. *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, pp. 711–787.
- Tang A.C.I., Stoy P.C., Hirata R., Musin K.K., Aeries E.B., Wenceslaus J., Melling L. 2018. Eddy Covariance Measurements of Methane Flux at a Tropical Peat Forest in Sarawak, Malaysian Borneo. *Geophysical Research Letters*, 45: 4390–4399.
- Tathy J. P., B. Cros B., Delmas R.A., Marengo A., Servant J., Labat M. 1992. Methane emission from flooded forest in central Africa. *J. Geophys. Res: Atmospheres.*, 97(D6): 6159-6168.
- 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.
- Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D., White J.R. 1996. A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands. *Geophysical Research Letters*, 23: 3731-3734.
- Wang B., Neue H.U., Samonte H.P. 1997. Effects of cultivars difference (IR72, IR65598 and Dular) on methane emission. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 62: 31–40.
- Wang B., Neue H.U., Samonte H.P. 1999. Factors controlling diel patterns of methane emission pattern via rice plants. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 53: 229–235.
- Weyhenmeyer E. 1999. Methane emissions from beaver ponds: Rates, patterns, and transport mechanisms. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(4): 1079-1090.
- Zhang H., Tuittila E., Korrensalo A., Räsänen A., Virtanen T., Aurela M., Penttilä T., Laurila T., Gerin S., Lindholm V., Lohila A. 2020. Water flow controls the spatial variability of methane emissions in a northern valley fen ecosystem. *Biogeosciences*, 17(23): 6247-6270.

Поступила в редакцию: 02.05.23
Переработанный вариант: 20.12.2023

VARIABILITY OF TEMPORAL CHARACTERISTICS OF SNOW COVER IN SIBERIA ON GROUND-BASED DATA

Martynova Yu.V.¹, Voropay N.N.^{2,3*}, Matyukhina A.A.^{2,4}

¹ Томский политехнический университет, Томск

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

³ Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

⁴ Томский государственный университет, Томск

voropay_nn@mail.ru

Citation: Yu. V. Martynova, N. N. Voropay, A. A. Matyukhina. 2023. Variability of temporal characteristics of snow cover in Siberia on ground-based data. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 14(3): 181-197.

DOI: 10.18822/edgcc625771

На основе архива данных наземных наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за состоянием снежного покрова для периода с 1970 по 2019 г. для Западной и Восточной Сибири получены оценки изменчивости сроков начала формирования и окончания схода снежного покрова, формирования и разрушения устойчивого снежного покрова, продолжительности этих периодов, количества интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне, а также продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова. Проанализированы различия в поведении характеристик в зависимости от географических особенностей территории. Наряду с общим периодом, 1970–2019 гг., рассмотрено поведение указанных характеристик для двух подпериодов 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг., соответствующих зональной и меридиональной циркуляционным эпохам, выделенных Н. К. Кононовой с соавторами. Получен отклик снежного покрова на смену общего характера атмосферной циркуляции в регионе. При преобладающей меридиональной циркуляции, в сравнении с зональной, начало формирования снежного покрова происходит позже и в большей степени синхронно на большей части станций каждой из выделенных географических групп, а сход снежного покрова происходит раньше, но при этом существенно в большей степени неоднородно по времени (неодновременно). Показано также меньшее количество интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне при меридиональной циркуляции, что означает более стабильное в течение холодного сезона его залегание. Получено увеличение продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных, при переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе. Таким образом, для всех выделенных географических групп станций, кроме низко расположенных, в меридиональную циркуляционную эпоху происходит не только компенсация изменений, произошедших в зональную эпоху, но и внесение новых изменений в сроки формирования и схода снежного покрова в Сибири.

Ключевые слова: снежный покров, устойчивый снежный покров, формирование, сход, установление, разрушение, метеостанции, циркуляционные эпохи, Западная Сибирь, Восточная Сибирь

Summary. Estimates of the variability in the dates of the beginning snow cover formation and end of its descent, the establishing and destruction of stable snow cover, the duration these periods, the number of intervals with stable snow cover in the cold season, as well as the duration of the periods of formation and descent of snow cover were obtained in this paper. Differences in the behavior of these characteristics depending on the geographical features of the territory were analyzed. Four groups of stations were considered: low-lying (up to 50 m) stations, high-lying (from 700 m), stations in Western Siberia (60-90°E) and in Eastern Siberia (90-120°E). The snow cover ground-based observations data (RIHMI-WDC) for Western and Eastern Siberia over the time period from 1970 to 2019 was used. Along with the general period (1970–2019) the behavior of these characteristics for two subperiods of 1977–2005 and 2006–2019 corresponding to the zonal and meridional circulation epochs was considered. The response of the snow cover to the change in the atmospheric circulation has been obtained. With the prevailing meridional circulation, in comparison with the zonal circulation, the beginning of the snow cover formation occurs later and synchronously at most of the stations of each of the specified geographical groups, and the snow cover descends earlier, but at the same time is much more non-uniform in time (non-simultaneous) within a geographic group. A smaller number of intervals with a stable snow cover in cold season is also shown, which means more stable snow cover during the cold season in meridional circulation epoch then in zonal. An increase in the duration of the snow cover formation and descent time periods was obtained for all the considered geographical groups of stations. The exception is for low-lying station

group only. Thus, the conditions of the meridional circulation epoch not only compensate for the changes that occurred in the zonal epoch, but also bring new changes in the temporal characteristics of the Siberian snow cover.

Keywords: snow cover, stable snow cover, formation, descent, establishment, destruction, meteorological stations, circulation epochs, Western Siberia, Eastern Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров (СП) за счёт своих теплоизолирующих свойств и высокой отражающей способности оказывает существенное влияние на баланс энергии на поверхности [Groisman et al., 1994; Vavrus, 2007]. Появление или разрушение СП влечёт за собой изменение потоков тепла с поверхности почвы в атмосферу, оказывает прямое влияние на альбедо территории, приводящее к локальному изменению температуры воздуха [Henderson et al., 2013; Ye et al., 2015]. Вариации этих характеристик могут приводить к локальным возмущениям высоты геопотенциала, что в свою очередь вносит вклад в изменение величины бароклинности на границе СП и, как следствие, в вихревую активность синоптического масштаба [Walsh, Ross, 1988; Walland, Simmonds, 1996]. Последнее может оказывать влияние на метеоусловия как локально, так и в масштабах региона или даже всего Северного полушария [Martynova, Krupchatnikov, 2010; Peng et al., 2013].

Анализ современных климатических изменений показал для Северного полушария в целом наличие тенденции к более позднему формированию СП и к более раннему его сходу [Chen et al., 2016]. Для Западной и Восточной Сибири, в частности, также выявлено сокращение периода залегания СП, связываемое для Западной Сибири в большей степени с уменьшением количества снега (нежели с более ранним наступлением весны), а для Восточной Сибири – с весенним потеплением [Titkova, Vinogradova, 2017a; Titkova et al., 2017b; Voropay, Vlasov, 2017; Matyukhina, Voropay, 2020]. В течение периода 1966–2012 гг. на территории Российской Федерации наблюдается увеличение высоты СП [Bulygina et al., 2009; Bulygina et al., 2011; Kononova, 2012; Zhong et al., 2018]. При этом для первых двух десятилетий рассмотренного периода отмечается сокращение протяжённости СП, формирующегося за холодный сезон в целом¹ [Derksen, Brown, 2012]. Проявляется также сокращение протяжённости СП для отдельных месяцев конца весны, начала лета. Для осенних месяцев отмечается некоторая несогласованность в данных о протяжённости СП, полученных из разных источников (спутниковые и наземные наблюдения, данные реанализов) [Brown, Derksen, 2013]. В связи с чем необходимо с осторожностью относиться к получаемым для этого сезона результатам.

Рассматривается также скорость формирования СП. Для Западной и Восточной Сибири продемонстрирована существенная вариация скорости закрытия территории снегом в рамках осеннего сезона при переходе от года к году [Martynova, 2020; Martynova et al., 2021]. В отдельные годы рассматриваемая территория может быть почти полностью закрыта снегом всего за неделю, тогда как в другие годы этот процесс может быть равномерным в течение всего сезона.

В различных работах затрагивается вопрос связи вариации характеристик СП с аномалиями циркуляции атмосферы. В частности, выявлена устойчивая связь сроков формирования СП с индексами Северо-Атлантического колебания (NAO – North Atlantic Oscillation), Западно-Тихоокеанским (WP – West Pacific), Скандинавским (SCAND – Scandinavian index) и индексом Восточная Атлантика–Западная Россия (EA–WR – East Atlantic Russia) [Popova et al., 2014; Popova et al., 2015]. Связь же с индексом Арктического колебания (AO – Arctic Oscillation) носит неустойчивый характер: из всего рассмотренного периода (1950–2008 гг.) она статистически значима только для подпериода 1973–1994 гг. [Popova et al., 2014; Popova et al., 2015]. На основе широкого спектра данных показана общая нестационарность связи между протяжённостью осеннего СП и Арктическим колебанием [Peings, et al., 2013; Martynova, 2019]. Приводятся также доводы в пользу того, что осенние аномалии протяжённости СП являются в большей степени следствием, а не причиной аномалий глобальных циркуляционных процессов² [Peings et al., 2017; Yeo et al., 2017; Martynova et

¹ Chen X., Liang S., Cao Y. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013 // Environ. Res. Lett. 2016. V. 11. 084002. – Цит. по [Chen et al., 2016].

² Martynova Yu.V., Matyukhina A.A., Voropay N.N., Krupchatnikov V.N. 2021. Osobennosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Sibiri i ikh svyaz' s anomaliami dinamiki atmosfery Severnogo polushariya. Ekologiya.

al., 2022]. Для последних 10-15 лет в середине осени проявляется связь между сокращением протяжённости устойчивого снежного покрова (УСП) и запаздыванием сроков его установления, с одной стороны, и ростом температуры воздуха у поверхности на севере Евразии в этот же сезон, с другой стороны³ [Popova et al., 2018]. Для весеннего сезона также выявлено изменение сроков разрушения УСП. В частности, при исследовании для периода 1936–2008 гг. для севера Западной Сибири наблюдается смещение дат в сторону более поздних [Popova, Polyakova, 2013]. Важно отметить, что все отмеченные изменения характеристик СП распределены по исследуемым территориям неравномерно. Обнаружено существенное влияние Арктики на вариацию протяжённости, глубины и длительности залегания СП в Евразии в осенний, зимний и весенний сезоны [Wegmann et al., 2015; Kitaev, Titkova, 2018; Zhang et al., 2021].

Внимание исследователей, как правило, сосредоточено на особенностях УСП. Однако, не менее важно иметь информацию о периодах между первым появлением снега и окончательным установлением УСП (формирование СП), а также между началом его разрушения и последним появлением снега (сход СП). Данные о длительности этих периодов, о равномерности формирования и схода СП в течение осеннего и весеннего сезонов, соответственно, могут быть полезны для понимания переходных процессов, происходящих осенью и весной при сезонной смене метеорологических режимов, для оценки интенсивности этих перестроек, и как следствие, оценке вероятностей возникновения на их фоне экстремальных явлений погоды.

В настоящей работе мы сосредоточили внимание на территории Сибири, как на регионе с наибольшей в рамках Евразии протяжённостью СП, обладающего высокой изменчивостью характеристик во времени [Song, Wu, 2019]. Целью данной работы является получение оценки современных колебаний сроков и длительности периодов залегания, формирования и схода СП и УСП в Западной и Восточной Сибири. В отличие от большинства работ, посвященных анализу изменений характеристик СП, впервые тенденции рассматриваются не только за весь доступный инструментальный период измерений, но и в пределах отдельных циркуляционных эпох, что в свою очередь позволило корректно учесть один из факторов формирования СП. Кроме того, в работе впервые проанализирована длительность периодов формирования и схода СП.

Информация об особенностях поведения СП имеет научную и прикладную значимость. Во-первых, разработка климатических моделей постепенно выходит на уровень воспроизведения сложных процессов и взаимодействий, одним из которых является процесс формирования и разрушения СП. К настоящему моменту показано улучшение воспроизведения характеристик СП в моделях CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), по сравнению с моделями CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [Brutel-Vuilmet et al., 2013; Mudryk et al., 2017; Gastineau et al., 2017; Mudryk et al., 2020; Zhu et al., 2021; Zhong et al., 2022]. Достоверная информация о поведении СП, полученная на основе данных наблюдений, необходима для оценки и, при необходимости, дальнейшего улучшения качества воспроизведения связанных с СП процессов. Во-вторых, информация о характере и аномалиях поведения СП важна с точки зрения экономики, поскольку напрямую затрагивает сельское хозяйство, лесную промышленность, коммунальные службы населённых пунктов и т. п. В частности, показано существенное влияние максимальной высоты и времени схода СП на развитие лесной растительности в Центральной Якутии [Nikolaev, Skachkov, 2011], на термические условия многолетней мерзлоты [Jan, Painter, 2020] и на весеннее восстановление растительности в тундре [Heim et al., 2022].

Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system, 6: 118–123 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Матюхина А.А. Воропай Н.Н., Крупчатников В.Н. 2021. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Том 6. С. 118–123]. – Цит. по [Martynova et al., 2021].

³ Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2014. Sroki ustanovleniya snezhnogo pokrova na severe Evrazii: pryamye i obratnye svyazi s krupnomasshtabnoy atmosfernoй tsirkulyatsiey. *Led i sneg*, 3: 39-49 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2014. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и снег. № 3. С. 39-49]. – Цит. по [Popova et al., 2014].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования была рассмотрена территория Западной и Восточной Сибири: 50-70° с. ш. 60-120° в. д. Граница между указанными регионами была проложена по 90° в. д.

В работе были использованы данные о состоянии СП со 160 метеорологических станций за период 1970–2019 гг., располагающихся в пределах указанной территории (Рис. 1 а), предоставляемых Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Bulygina et al., 2017]. Обязательными критериями при выборе станций для анализа были непрерывность их работы и отсутствие переносов на протяжении исследуемого периода времени.

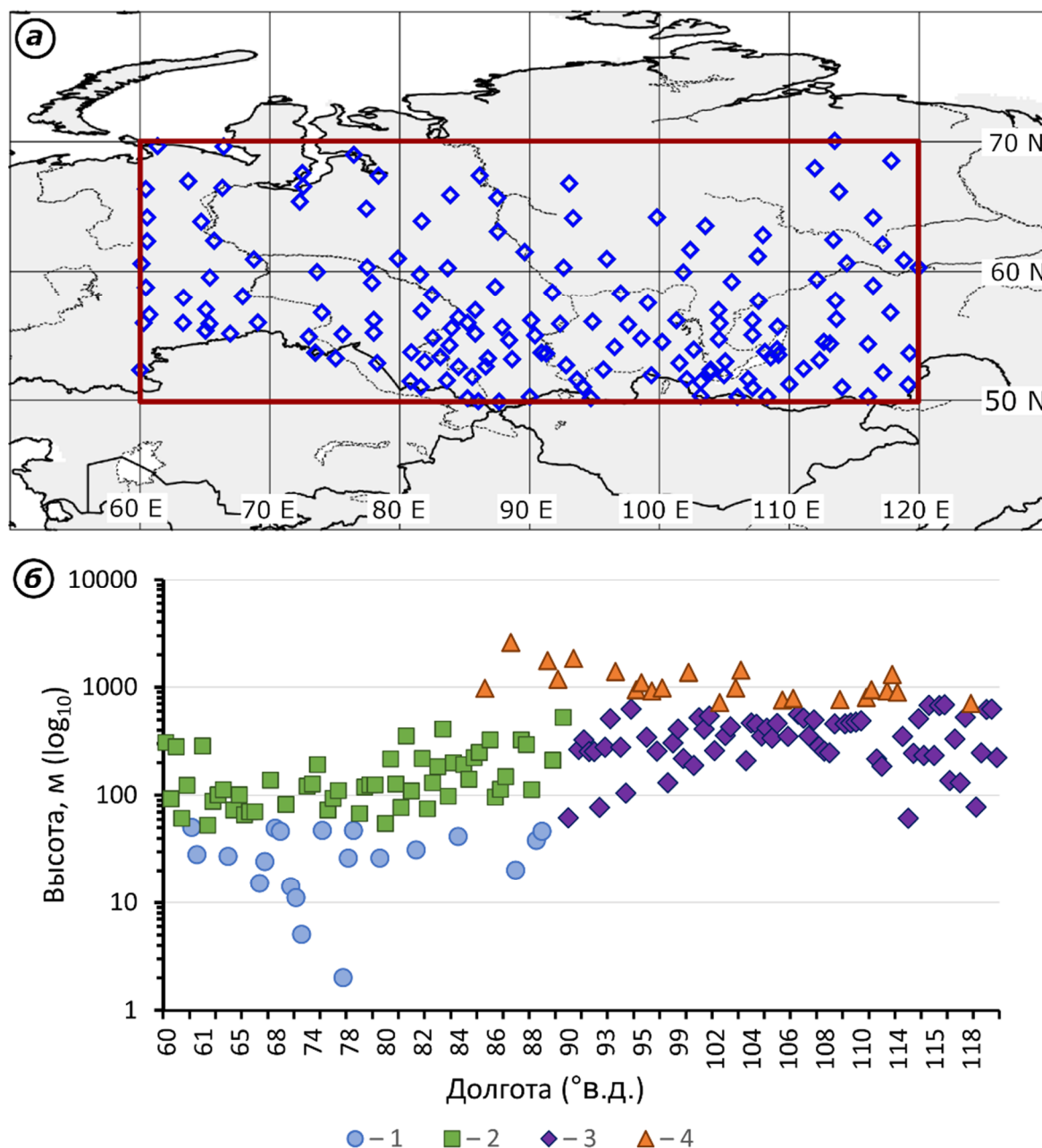


Рисунок 1. Расположение наземных метеостанций в Сибири (а), разбиение их на географические группы (б).

На а: прямоугольник – исследуемая территория Сибири 60-120° в. д. 50-70° с. ш. На б: 1 – низко расположенные (до 50 м) северные станции, 2 – станции Западной Сибири, 3 – станции Восточной Сибири, 4 – высоко расположенные (от 700 м) станции.

Рассмотрены ежедневные данные о степени покрытия окрестности станции снегом, выраженной в баллах от 0 до 10 (L). Здесь 0 означает абсолютное отсутствие снега на территории станции, один балл соответствует покрытию снегом одной десятой части видимой окрестности (эквивалентно 10 %), а 10 баллов – полному покрытию территории снегом. Если наблюдаются отдельные пятна снега, покрывающие менее 10 % видимой окрестности станции, то степень покрытия принимается равной 0 баллов [Bespalov, 1985].

Для анализа станции были разбиты на 4 непересекающиеся группы по признаку географического расположения. Выделены в отдельные группы станции с низким (на высоте равной и ниже 50 м над уровнем моря) и высоким (на высоте равной и выше 700 м над уровнем моря) расположением; остальные станции разбиты на две группы по принципу принадлежности к Западной (до 90° в. д.) и Восточной (после 90° в. д.) Сибири (Рис. 1 б). Таким образом, в группу низко расположенных станций вошло 20 станций, высоко расположенных – 23 станции, группа со станциями среднего высотного расположения в Западной Сибири включила в себя 53 станции, в Восточной Сибири – 64 станции. Все низко расположенные станции находятся на севере Западной Сибири; высоко расположенные станции локализуются преимущественно на юге Восточной Сибири и отдельные – на юге Западной Сибири.

Для каждой метеорологической станции для каждого холодного сезона были определены следующие характеристики СП (см. схему на рис. 2):

- даты установления и разрушения УСП ($D_{уст}^{УСП}$ и $D_{разр}^{УСП}$ на рис. 2, соответственно);
- продолжительность периода с УСП ($P^{УСП}$ на рис. 2);
- количество интервалов с УСП в сезоне ($N^{УСП}$ на рис. 2);
- даты начала формирования и окончания схода СП ($D_{форм}^{СП}$ и $D_{сход}^{СП}$ на рис. 2, соответственно);
- продолжительность периода с СП ($P^{СП}$ на рис. 2);
- продолжительность периодов формирования и схода СП ($P_{форм}^{СП}$ и $P_{сход}^{СП}$ на рис. 2, соответственно).

Рассматриваемый период с СП перекрывает период с УСП, начинаясь раньше и заканчиваясь позже него.

Даты, ограничивающие период залегания УСП ($D_{уст}^{УСП}$ и $D_{разр}^{УСП}$), а также количество таких периодов в сезоне ($N^{УСП}$) определялось в соответствии с Наставлениями Росгидромета [Bespalov, 1985]. Период с УСП располагается между датами, когда значение L превысило 5 баллов (дата установления $D_{уст}^{УСП}$) и когда значение L стало меньше 6 баллов (дата разрушения $D_{разр}^{УСП}$), при этом имеет продолжительность не менее 30 дней подряд с возможными случаями со значениями $L < 6$ баллов, но с их числом не превышающим 3 дней (подряд или по отдельности). Дополнительно, в начале зимы игнорируется перерыв в один день (один случай с $L < 6$ баллов), если ему предшествовали не менее 5 дней с СП ($L > 5$ баллов), и перерыв в 2–3 дня подряд, если ему предшествовали не менее 10 дней с СП ($L > 5$ баллов). В конце зимы игнорируются перерывы в один день или 2–3 дня подряд, если за ними наблюдался СП ($L > 5$ баллов) непрерывно не менее 5 или 10 дней, соответственно. Общая продолжительность периода с УСП ($P^{УСП}$) определялась как разница между датами его ограничивающими (т.е. $P^{УСП} = D_{разр}^{УСП} - D_{уст}^{УСП}$).

Даты начала формирования и окончания схода СП ($D_{форм}^{СП}$ и $D_{сход}^{СП}$, соответственно) определялись как даты с первым и последним за холодный сезон появлением значения $L > 5$ баллов без наложения дополнительных условий и ограничений в отличие от определения дат установления и разрушения УСП. Продолжительность периода с СП ($P^{СП}$) является разницей между этими датами (т.е. $P^{СП} = D_{сход}^{СП} - D_{форм}^{СП} + 1$).

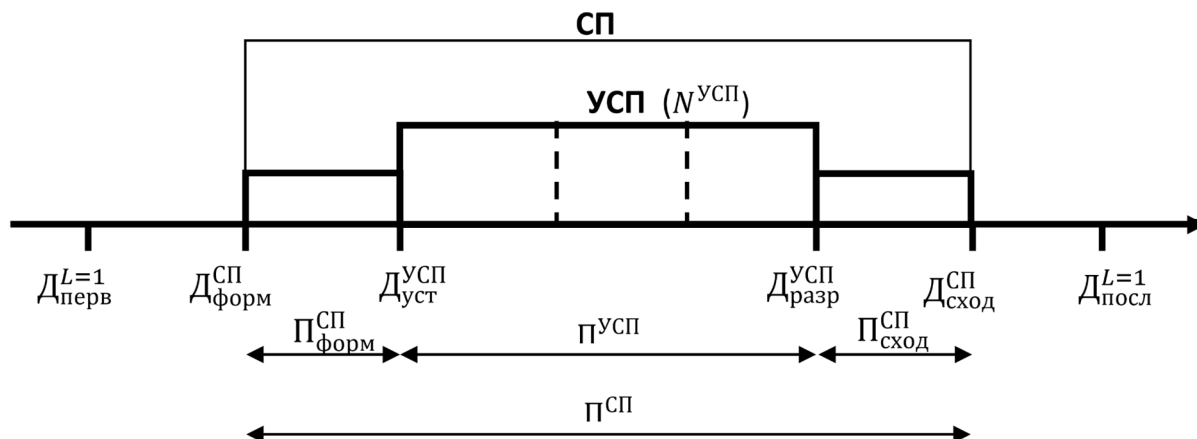


Рисунок 2. Схема расположения на временной оси дат (Д) и периодов (П), характеризующих снежный покров и устойчивый снежный покров. Вертикальные пунктирные линии означают, что периодов с устойчивым снежным покровом может быть несколько за сезон

В данной работе мы не анализировали периоды со значениями $L \leq 5$ баллов. В расчетах при определении периода с СП мы отталкивались исключительно от значений бальности СП (L) без дополнительной принудительной фиксации временных рамок холодного сезона. В ходе работы мы пробовали использовать $L \geq 1$ в качестве критерия границ периода с СП (попытка определить дату первого и последнего появления $L = 1$, $D_{\text{перв}}^{L=1}$ и $D_{\text{посл}}^{L=1}$ на схеме на рис. 2), однако столкнулись с высокой вероятностью неединичных проявлений значений $L \leq 5$ баллов в течение летнего сезона на северных (низко расположенных) станциях, что вносит значительные ошибки в определение периода с залеганием СП без дополнительной принудительной фиксации временных границ тёплого и холодного сезонов. Фиксация временных границ сезонов также оказалась неудачным решением вследствие высокой вариативности длительности и начала / окончания холодного сезона при переходе от станции к станции как между выделенными географическими группами, так и внутри групп. В результате, было решено использовать в качестве критического значения 5 баллов без принудительной фиксации границ холодного сезона. Как следствие, в терминах нашей работы начало формирования и окончание схода СП не совпадает с визуально наблюдаемым первым и последним появлением снега, а фиксируется, соответственно, позже и раньше по первому и последнему значению $L > 5$ баллов.

Продолжительность периода формирования $P_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ (схода $P_{\text{сход}}^{\text{СП}}$) СП была вычислена как разница между датой установления УСП и датой начала формирования СП, т.е. $P_{\text{форм}}^{\text{СП}} = D_{\text{уст}}^{\text{УСП}} - D_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ (датой окончания схода СП и датой разрушения УСП, т.е. $P_{\text{сход}}^{\text{СП}} = D_{\text{сход}}^{\text{СП}} - D_{\text{разр}}^{\text{УСП}} + 1$).

Для удобства расчётов даты были использованы в формате юлианских дней, а именно даты рассматривались не в привычном формате (например, ДД.ММ.ГГГГ), а в виде номера дня, отсчитываемого от начала года, на который приходится начало холодного сезона. Например, 1 сентября любого не високосного года имеет номер 244, а 15 февраля из этого же холодного сезона, т. е. из следующего календарного года, будет иметь номер 411.

Для каждого холодного сезона для каждой из четырёх выделенных групп станций были определены средние значения рассматриваемых характеристик СП и УСП, и среднеквадратические отклонения этих значений от средних в рамках группы. Также для каждой характеристики для каждой из групп были вычислены коэффициенты линейного тренда, характеризующие тенденции изменения этих величин во времени, и проведена оценка их статистической значимости с помощью t -критерия Стьюдента для уровня значимости $\alpha=0.05$. Вследствие высокого разброса значений относительно среднего для каждой выделенной группы станций, оценка межгодовой изменчивости и трендов проводилась по предварительно сглаженным с помощью скользящего среднего с 10-летним окном значениям.

Анализ проводился не только для всего выбранного периода 1970–2019 гг., в целом, но и для двух подпериодов: 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг. Согласно работе Н. К. Кононовой с соавторами в 1977 г. и 2006 г. в Сибирском секторе происходит смена циркуляционных эпох с меридиональной на зональную и с зональной на меридиональную, соответственно [Kononova, 2015]. Разумеется, смена

эпохи не является мгновенной, но указанные годы были выделены, как пограничные. Таким образом, для периода 1977–2005 гг. характерно преобладание зональной циркуляции, а для 2006–2019 гг. – меридиональной. Формирование и сход СП напрямую связаны с осадками, характер которых, в свою очередь, определяется в том числе и глобальными циркуляционными особенностями. Это даёт основания полагать, что сроки формирования и схода СП в Сибири могут иметь существенные различия для разных циркуляционных эпох.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Период со снежным покровом

Анализ характеристик СП для всего периода 1970–2019 гг. в целом, показал явную зависимость сроков начала формирования и окончания схода СП ($D_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ и $D_{\text{сход}}^{\text{СП}}$, соответственно) от географического расположения метеостанций. В среднем по территории самое раннее за холодный сезон начало формирования СП происходит на низко и высоко расположенных станциях, и на территории Восточной Сибири. В Западной Сибири СП начинает формироваться спустя 7–10 дней (табл. 1, рис. 3 а). Весной окончание схода СП происходит сначала на станциях Западной Сибири, через 6 и 9 дней в Восточной Сибири и на высоко расположенных станциях, соответственно, и только спустя ещё 15 дней на низко расположенных северных станциях. Таким образом, наиболее продолжительный период с СП ($P^{\text{СП}}$) получен для низко расположенных станций (север Западной Сибири), далее меньший на 13 и 19 дней – для высоко расположенных станций (юг Сибири) и станций Восточной Сибири средней высоты, соответственно, и самый короткий период, меньше ещё на 13 дней, получен для станций средней высоты, располагающихся в Западной Сибири.

Таблица 1. Даты начала формирования и окончания схода снежного покрова, и даты установления и разрушения устойчивого снежного покрова, выраженные в юлианских днях, и продолжительность этих периодов, выраженная в днях, в виде среднего по группе плюс/минус стандартное отклонение от среднего по группе

	СП			УСП		
	1970-2019	1977-2005	2006-2019	1970-2019	1977-2005	2006-2019
	<i>Даты начала формирования СП</i>			<i>Даты установления УСП</i>		
Низ. ст.	278 ± 9	277 ± 9	282 ± 9	285 ± 11	284 ± 11	290 ± 10
Выс. ст.	276 ± 20	276 ± 20	275 ± 20	298 ± 21	296 ± 22	301 ± 18
ЗС	286 ± 11	286 ± 11	289 ± 9	301 ± 13	299 ± 13	305 ± 11
ВС	279 ± 12	278 ± 12	279 ± 12	293 ± 16	291 ± 17	297 ± 15
	<i>Даты окончания схода СП</i>			<i>Даты разрушения УСП</i>		
Низ. ст.	508 ± 13	509 ± 13	505 ± 14	500 ± 17	500 ± 16	497 ± 17
Выс. ст.	493 ± 21	494 ± 20	493 ± 24	464 ± 28	466 ± 29	459 ± 26
ЗС	484 ± 17	485 ± 17	482 ± 17	470 ± 15	471 ± 16	467 ± 14
ВС	490 ± 16	491 ± 15	488 ± 16	473 ± 22	475 ± 22	469 ± 20
	<i>Продолжительность периода с СП</i>			<i>Продолжительность периода с УСП</i>		
Низ. ст.	230 ± 18	232 ± 18	223 ± 18	214 ± 24	216 ± 24	207 ± 23
Выс. ст.	217 ± 37	218 ± 35	218 ± 38	166 ± 45	169 ± 47	158 ± 42
ЗС	198 ± 23	200 ± 23	193 ± 23	169 ± 25	172 ± 25	162 ± 23
ВС	211 ± 24	213 ± 23	209 ± 24	180 ± 35	184 ± 36	172 ± 33

*Обозначения для групп станций в таблице: *Низ. ст.* – низко расположенные станции; *Выс. ст.* – высоко расположенные станции; *ЗС* – станции Западной Сибири средней высоты; *ВС* – станции Восточной Сибири средней высоты

Для каждой рассмотренной географической группы станций стоит отметить наличие существенного разброса дат начала формирования и окончания схода СП относительно среднего значения, и, как следствие, проявление ещё большего разброса, полученного для величины продолжительности периода с СП (см. табл. 1). Наименьшую вариативность показывают низко расположенные северные станции, что, скорее всего, обусловлено географической и климатической однородностью занимаемой ими территории. Полной противоположностью им являются высоко

расположенные станции. Демонстрируемый существенный разброс значений для них, вероятно, является следствием значительной неоднородности расположения станций по высоте (см. рис. 1 в). В данном исследовании внимание сосредоточено на общеклиматическом поведении рассматриваемых характеристик, а не на их экстремальном проявлении. Следовательно, несмотря на высокий разброс значений анализ поведения группы в целом, является правомочным. Станции средней высоты в Западной и Восточной Сибири демонстрируют схожий между собой разброс значений внутри группы с разницей в один день.

При сравнении циркуляционных эпох для меридиональной циркуляционной эпохи (2006–2019 гг.) относительно зональной (1977–2005 гг.) получено более позднее (на 1-5 дней позже) начало формирования СП и более раннее (на 3-4 дня раньше) окончание его схода (см. табл. 1 и рис. 3 б, в). Исключением является группа высоко расположенных станций, для которой начало формирования СП при меридиональной циркуляционной эпохе происходит на 1 день раньше, чем при зональной. При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе разброс значений в рамках каждой группы для дат начала формирования СП остаётся прежним или уменьшается, а для дат окончания схода – остаётся прежним или увеличивается.

Межгодовой ход дат начала формирования СП для всех рассматриваемых групп станций, кроме высоко расположенных, проявляет резкую смену характера на границе циркуляционных эпох: происходит резкое смещение дат в сторону более поздних (см. рис. 4 а). Высоко расположенные станции демонстрируют схожий характер поведения для дат окончания схода СП (см. рис. 4 в). Для остальных групп получено плавное смещение дат окончания схода в сторону более ранних сроков. Межгодовой ход продолжительности периода с СП также демонстрирует изменение характера на границе циркуляционных эпох (см. рис. 4 д).

Анализ трендов изменения дат начала формирования и окончания схода СП для всего рассматриваемого периода (1970–2019 гг.) показал для низко расположенных северных станций и станций Западной Сибири средней высоты наличие тенденции к смещению дат начала формирования в сторону более поздних (см. рис. 4 б), а дат окончания схода – в сторону более ранних (см. рис. 4 г). Таким образом, получено сокращение продолжительности периода с СП на 3 и 2 дня каждые 10 лет, соответственно (см. рис. 4 е). Восточная Сибирь демонстрирует тенденцию только к более раннему окончанию схода СП (на 1 день за 10 лет), а группа высоко расположенных станций – только к более раннему началу формирования СП (на 1 день за 10 лет) (см. рис. 4 б, г). Тем самым продолжительность периода с СП для станций Восточной Сибири средней высоты имеет тенденцию к снижению (на 1 день за 10 лет), а для группы высоко расположенных станций – к увеличению (также на 1 день за 10 лет) (см. рис. 4 е).

Между периодами циркуляционных эпох наблюдаются существенные различия тенденций изменений сроков формирования и залегания СП. Почти во всех случаях получены существенные различия не только в значениях, но и в знаке трендов. Для дат начала формирования СП получены отрицательные тенденции для зональной эпохи и положительные – для меридиональной (см. рис. 4 б). Для дат окончания схода СП для зональной эпохи почти для всех географических групп тенденции изменения дат незначимы, а для меридиональной – почти все значимы и имеют отрицательный знак (см. рис. 4 г). Таким образом, продолжительность периода с СП в меридиональную циркуляционную эпоху имеет явные тенденции к снижению по сравнению с зональной (см. рис. 4 е). Исключение составляет группа высоко расположенных станций, которая демонстрирует тенденцию к увеличению продолжительности этого сезона в зональную циркуляционную эпоху и отсутствие значимых изменений в меридиональную.

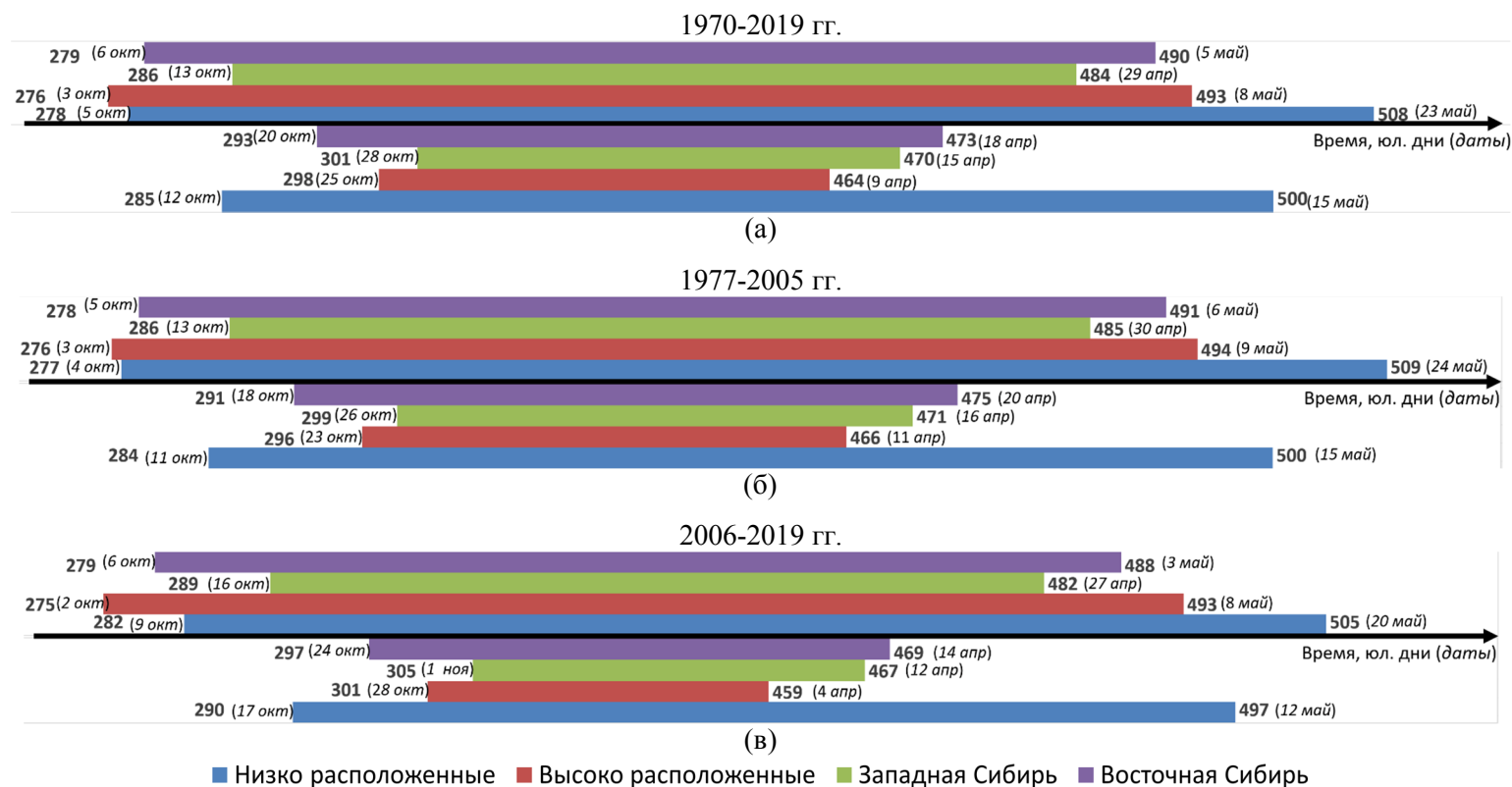


Рисунок 3. Схема расположения на временной оси периодов со снежным покровом (*над осью времени*) и с устойчивым снежным покровом (*под осью времени*), выраженные в юлианских днях. Линия времени обозначена жирной горизонтальной стрелкой. В скобках на схеме – соответствие указанного юлианского дня дате для не високосного года. Изображения имеют одинаковый масштаб по времени

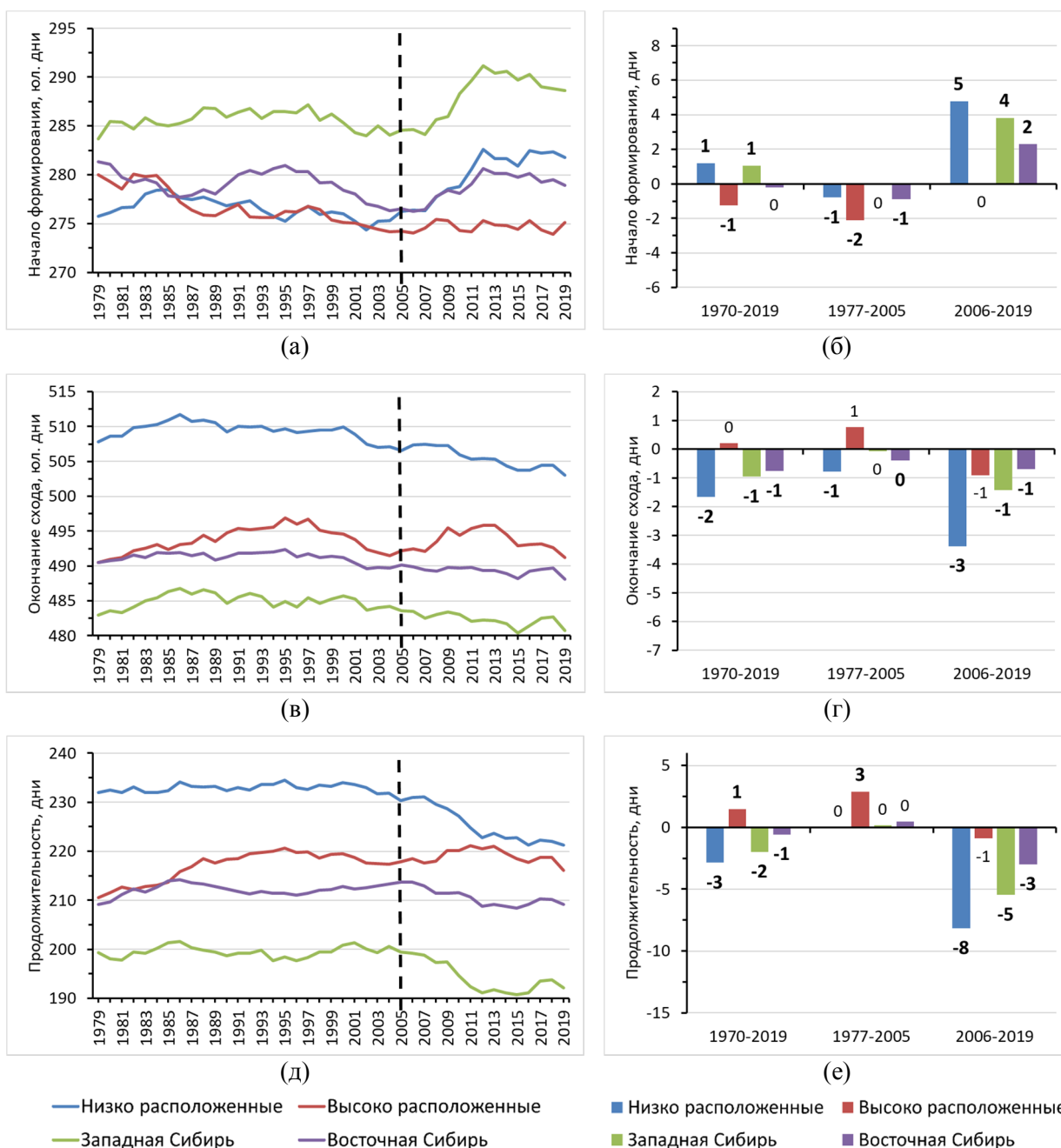


Рисунок 4. Межгодовая вариация (а, в, д) и тренд (б, г, е) средних по группе станций дат начала формирования (а, б) и окончания схода (в, г) снежного покрова, а также продолжительности этого периода (д, е) после применения скользящего среднего с 10-летним окном. Вертикальная пунктирная линия – граница между циркуляционными эпохами. Значения на диаграммах (справа) приведены с математическим округлением до целого дня, но высота столбца соответствует значению без округления. Выделение полужирным шрифтом (справа) – статистически значимые тренды для уровня значимости $\alpha=0.05$

Период с устойчивым снежным покровом

Между началом формирования и окончанием схода СП для рассматриваемых регионов происходит установление и разрушение УСП (см. схему на рис. 2). В общем случае, в рамках одного холодного сезона на станции может быть отмечено несколько последовательных интервалов времени с УСП. В настоящем исследовании внимание уделялось датам, ограничивающим весь период залегания УСП (с $D_{уст}^{УСП}$ по $D_{разр}^{УСП}$).

Наиболее раннее установление УСП для общего периода, 1970–2019 гг., получено для низко расположенных северных станций, далее, спустя 8 дней он устанавливается в Восточной Сибири, затем через 5 дней – на высоко расположенных станциях, и спустя ещё 3 дня – в Западной Сибири (см. табл. 1 и рис. 3 а). Разрушение УСП начинается с высоко расположенных станций, затем через 6 дней оно происходит в Западной Сибири, спустя 3 дня – в Восточной Сибири, и только ещё через 27 дней – на территории с низко расположенными северными станциями. Стоит отметить, что последовательность групп станций по установлению и разрушению УСП отличается от их последовательности по началу формирования и окончанию схода СП.

Для каждой географической группы станций присутствует существенный разброс дат установления и разрушения УСП относительно среднего значения, превышающий в большинстве своём разброс, полученный для дат СП (см. табл. 1). Минимальный разброс (11 дней) приходится на даты установления УСП для низко расположенных северных станций, а максимальный – на даты разрушения УСП для высоко расположенных станций. Разброс для дат установления УСП превышает разброс для дат начала формирования СП на 1–4 дня; разброс для дат разрушения УСП превышает разброс для дат окончания схода СП на 4–7 дней. Исключение составляет только разброс дат разрушения УСП в Западной Сибири, который, в отличие от остальных, ниже разброса дат окончания схода СП на 2 дня.

При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе (от 1977–2005 гг. к 2006–2019 гг.) для всех выделенных географических групп станций происходит смещение дат установления УСП на более поздние сроки, а дат разрушения – на более ранние (см. табл. 1 и рис. 3 б, в). Таким образом, происходит сокращение общей продолжительности периода залегания УСП. Изменение характера межгодового хода на границе циркуляционных эпох для временных характеристик УСП для всех выделенных географических групп станций проявляется ещё более выражено, чем для СП (рис. 5).

При анализе на всем многолетнем периоде исследования, 1970–2019 гг., для каждой географической группы были выделены станции, имеющие в отдельные годы два или три последовательных интервала с УСП за один холодный сезон (табл. 2). Наименьшее количество случаев с двумя такими интервалами приходится на территории с низко расположенными северными станциями (0.5 % от суммарного количества холодных сезонов по всем станциям географической группы), а наибольшее – с высоко расположенными (4.1 %). Кроме того, для территории с высоко расположенными станциями возможны случаи трех за холодный сезон интервалов с УСП (0.5 %). На станциях Западной и Восточной Сибири отмечаются только случаи с двумя такими интервалами: 1.2 % и 1.5 %, соответственно.

Интересно отметить, что большая часть случаев с несколькими за холодный сезон интервалами с УСП приходится на период зональной циркуляционной эпохи, 1977–2005 гг., в сравнении с последующей меридиональной, 2006–2019 гг. (см. табл. 2). Такое проявление означает, в целом, более стабильное в течение холодного сезона залегание СП на всей территории Сибири в условиях преобладающей меридиональной циркуляции (2006–2019 гг.) в сравнении с зональной (1977–2005 гг.).

Таблица 2. Количество холодных сезонов с двумя (с тремя) периодами с УСП, выраженное в процентах (%) от общего (суммарного) количества холодных сезонов по всем станциям географической группы

Группа станций	1970–2019	1977–2005	2006–2019
Низко расположенные	0.5	0.9	0.0
Высоко расположенные	4.1 (0.5)	6.7 (0.8)	0.6 (0.3)
Западная Сибирь	1.2	1.7	0.5
Восточная Сибирь	1.5	2.4	0.4

Величины трендов дат установления и разрушения УСП на общем периоде 1970–2019 гг. близки к трендам, полученным для дат начала формирования и окончания схода СП. При этом УСП демонстрирует значимые тенденции изменения даты установления только для группы низко расположенных станций: смещение в сторону более поздних дат на 2 дня за 10 лет (рис. 5 б). Тенденции смещения дат разрушения УСП значимы для всех выделенных географических групп и соответствуют смещению дат в сторону более ранних со значениями в рамках одного дня за 10 лет

(рис. 5 г). Таким образом, продолжительность периода с УСП имеет значимую тенденцию к уменьшению на 3 дня за 10 лет для низко расположенных станций и на 1 день за 10 лет для станций Восточной Сибири средней высоты (рис. 5 е).

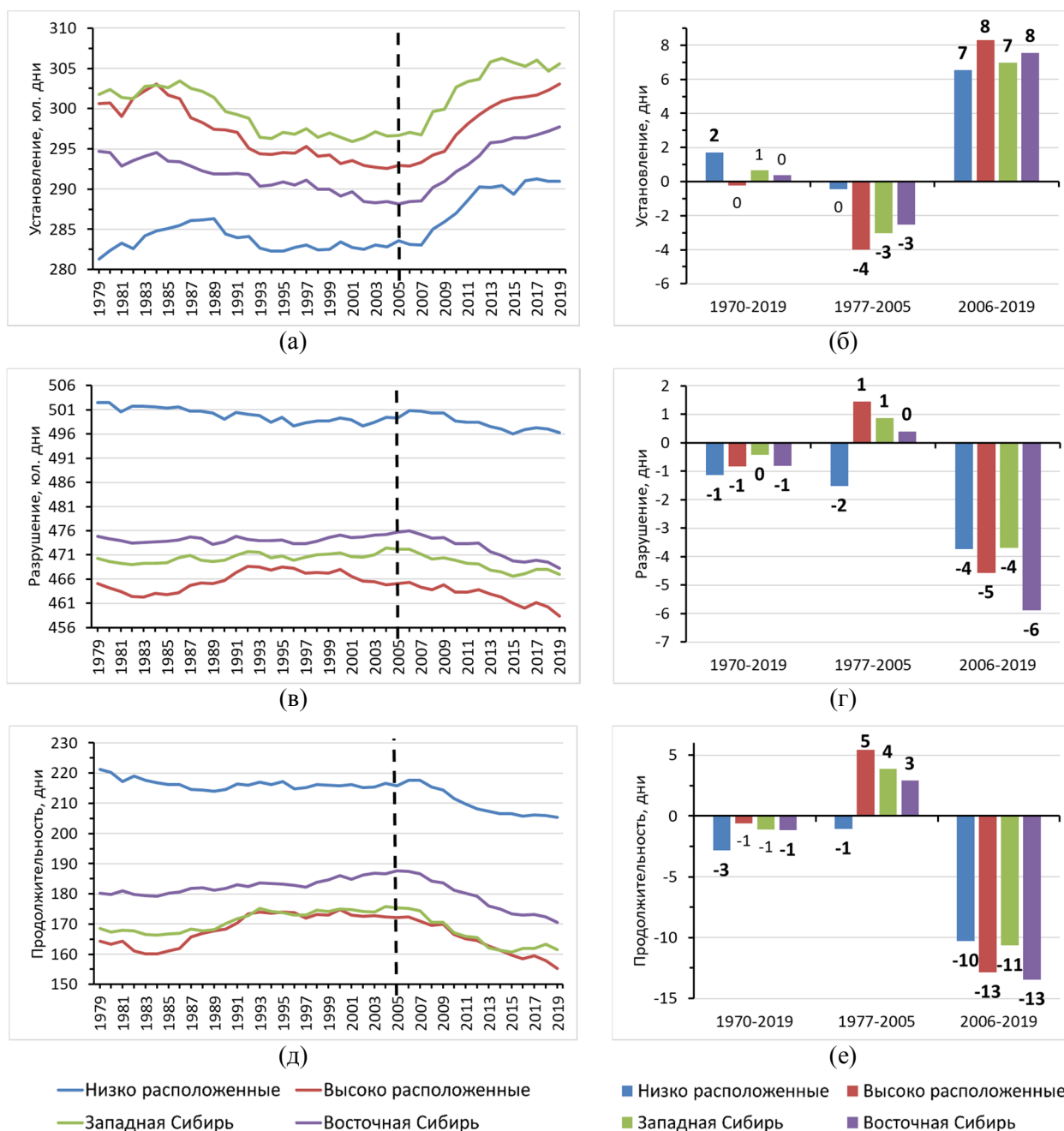


Рисунок 5. То же, что на рис. 4, но для дат установления (а, б) и разрушения (в, г) устойчивого снежного покрова и продолжительности этого периода (д, е)

Получены существенно более явные различия между циркуляционными эпохами для дат, ограничивающих период с УСП, в сравнении с приведенными ранее временными характеристиками СП. В зональную эпоху, 1977–2005 гг., все группы станций демонстрируют тенденцию к более раннему установлению УСП, а в меридиональную, 2006–2019 гг. – к более позднему (см. рис. 5 б). При этом абсолютные значения трендов для меридиональной эпохи в два раза превышают значения для зональной. Для сроков разрушения УСП получена противоположная картина: тенденция к более позднему разрушению в зональную эпоху и к более раннему – в меридиональную (см. рис. 5 г). Исключение составляет только группа низко расположенных северных станций, где для обеих эпох получена тенденция к более раннему установлению УСП. Абсолютные величины, как и для сроков

установления УСП, в меридиональную циркуляционную эпоху существенно превышают тенденции в зональную. Как результат, продолжительность залегания УСП имеет тенденцию к увеличению в зональную циркуляционную эпоху и к существенно большему сокращению – в меридиональную (см. рис. 5 е). Исключение составляют только низко расположенные северные станции, для которых продолжительность сокращалась для обеих эпох, но с разной интенсивностью: на 1 день за 10 лет в зональную и на 10 дней за 10 лет в меридиональную.

Может показаться, что такие существенные различия в абсолютных значениях получены вследствие заметной разницы в длине рядов данных для рассматриваемых циркуляционных эпох (27 холодных сезонов для зональной и 13 для меридиональной), однако проведённые дополнительные расчёты с усечёнными рядами для зональной циркуляционной эпохи, сопоставимыми по длине с рядом для меридиональной эпохи (в статье не приведены) не выявили значимых различий с представляемым результатом. Окончательно же убедиться в точности полученных оценок можно будет только по окончании длящейся в настоящее время меридиональной циркуляционной эпохи.

Периоды формирования и схода снежного покрова

При переходе от одной географической группы станций к другой в разной степени варьируются продолжительности не только периодов залегания СП и УСП, но и периодов формирования и схода СП ($P_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ и $P_{\text{сход}}^{\text{СП}}$ на схеме на рис. 2). Для общего периода, 1970–2019 гг. для территории с низко расположенными северными станциями получена наименьшая продолжительность периодов формирования (7 дней) и схода СП (8 дней) (рис. 6 а, б), что говорит о наиболее быстром по сравнению с остальными группами закрытии территории плотным СП и освобождении её от СП. Противоположная картина получена для территории с высоко расположенными станциями. Здесь продолжительность периода формирования и схода СП составляет 22 и 29 дней, соответственно. Для Западной и Восточной Сибири продолжительность этих периодов получена в пределах двух / двух с половиной недель.

При переходе от зональной, 1977–2005 гг., к меридиональной, 2006–2019 гг., циркуляционной эпохе увеличивается продолжительность периодов формирования и схода СП для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных северных (см. рис. 6 а-б). Для последних происходит увеличение только периода формирования СП, а период схода – сокращается.

Для всех выделенных групп станций для каждого из рассмотренных многолетних периодов разброс относительно среднего значения дат, ограничивающих залегание УСП, превышает разброс, полученный для дат начала формирования и окончания схода СП (на рисунках не показано).

Существенную смену характера межгодового хода на границе циркуляционных эпох проявляет только продолжительность периода схода СП (см. рис. 6 д). Для периода формирования СП смена характера если и происходит, то позже на 4–5 лет относительно границы между циркуляционными эпохами (см. рис. 6 в). Также для периода формирования СП отмечается явное изменение хода после первой трети зональной циркуляционной эпохи. Схожий характер изменений демонстрируют даты установления УСП (см. рис. 5 а).

Тренды длительности периодов формирования и схода СП являются отражением тенденций изменения дат, ограничивающих периоды залегания СП и УСП. Близкие по значению тренды для дат начала формирования СП и установления УСП (см. рис. 4 б и рис. 5 б, соответственно), а также для дат разрушения УСП и окончания схода СП (см. рис. 4 г и рис. 5 г, соответственно), на общем периоде (1970–2019 гг.) определяют аналогичные значения для трендов длительности периодов формирования и схода СП (см. рис. 6 г, е, соответственно). Таким образом, для периода формирования СП получена значимая тенденция к увеличению его продолжительности на 1 день за 10 лет для низко и высоко расположенных станций, для периода схода СП – тенденция к его увеличению на 1 день за 10 лет для высоко расположенных станций и уменьшению на 1 день за 10 лет для низко расположенных северных станций и станций Западной Сибири средней высоты. Для остальных групп станций тренды на общем периоде статистически незначимы.

Сравнение циркуляционных эпох, как и для дат, ограничивающих залегание СП и УСП, показало для всех групп станций существенные различия тенденций изменения продолжительности периодов формирования и схода СП как по абсолютному значению, так и по знаку тренда. Для обоих периодов при переходе от зональной (1977–2005 гг.) к меридиональной (2006–2019 гг.) циркуляционной эпохе происходит смена знака тренда с отрицательного на положительный и почти

для всех групп станций существенное увеличение его абсолютного значения (см. рис. 6 г, е). Таким образом, в зональную эпоху происходит уменьшение продолжительности периодов формирования и схода СП, а в меридиональную – существенно большее увеличение продолжительности этих периодов. Исключение составляет только группа низко расположенных северных станций, для которой периода формирования СП в зональную эпоху не имел вообще значимых трендов, период же схода СП в зональную эпоху имел тенденцию к увеличению на 1 день за 10 лет, а в меридиональную тенденций к изменению не демонстрировал.

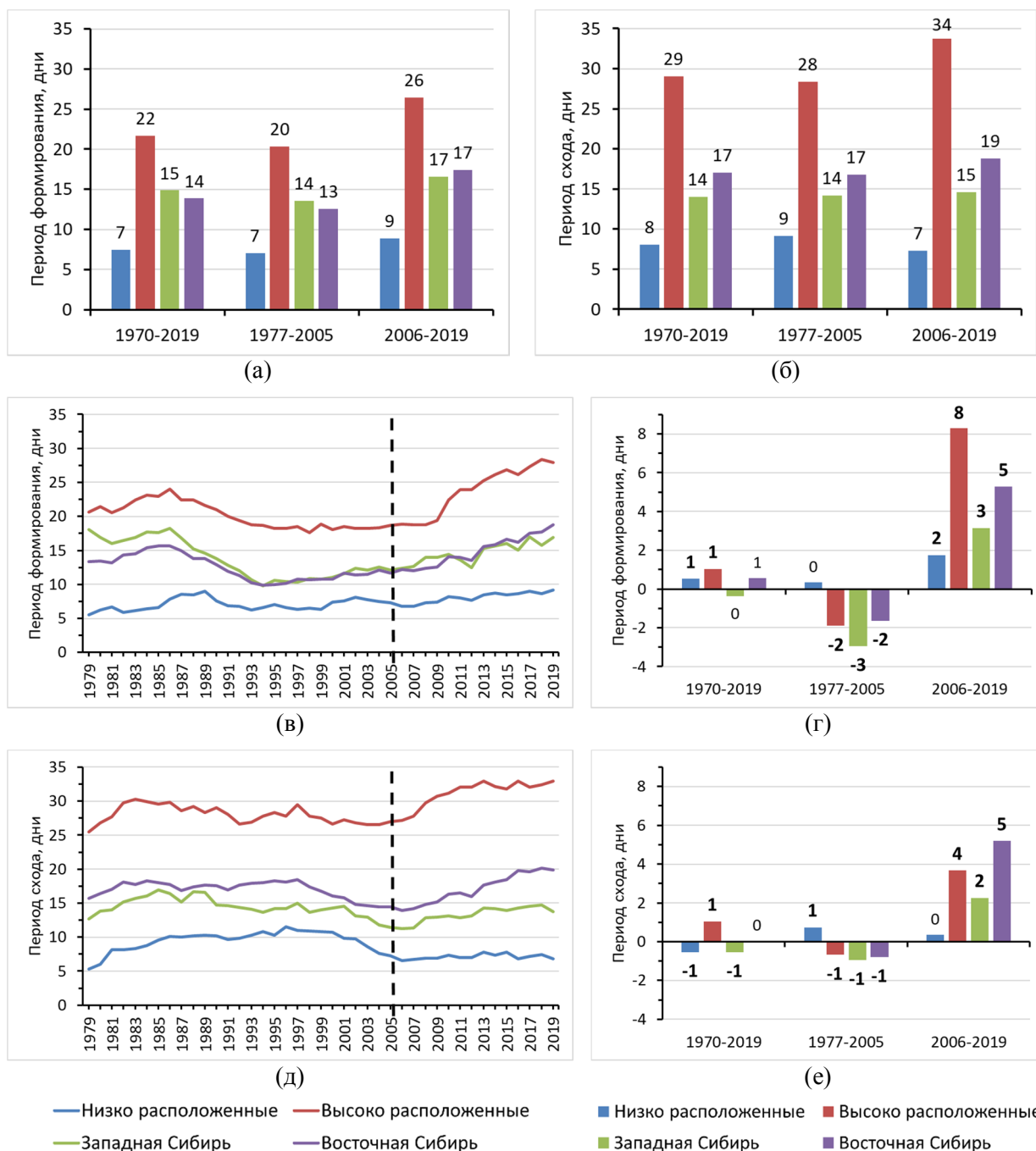


Рисунок 6. Осреднённые за временной период продолжительности периодов формирования (а) и схода (б) снежного покрова, их межгодовой ход (в, д), выраженные в днях, и тренды (г, е), выраженные в днях за 10 лет. Выделение полужирным шрифтом (г, е) – статистически значимые тренды для уровня значимости $\alpha=0.05$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе архива данных наземных наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за состоянием снежного покрова для периода с 1970 по 2019 г. для Западной и Восточной Сибири получены количественные и качественные оценки современной изменчивости сроков начала формирования и окончания схода снежного покрова, формирования и разрушения устойчивого снежного покрова, продолжительности этих периодов, количества интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне, а также продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова. Основные выводы, касающиеся этого периода, совпадают с работами других авторов [Катцова, 2022]. Наряду с общим периодом (1970–2019 гг.) проанализировано поведение указанных характеристик для двух подпериодов 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг., соответствующих согласно Н. К. Кононовой зональной и меридиональной циркуляционным эпохам [Конопова, 2015]. Проанализированы также различия в поведении характеристик в зависимости от географических особенностей территории.

Получен отклик снежного покрова на смену общего характера атмосферной циркуляции в регионе. При преобладающей меридиональной циркуляции в сравнении с зональной начало формирования снежного покрова происходит позже и в большей степени синхронно на большей части станций каждой из выделенных географических групп, а сход снежного покрова происходит раньше, но при этом существенно в большей степени неоднородно по времени (неодновременно). Для условий преобладающей меридиональной циркуляции, 2006–2019 гг., в сравнении с зональной, 1977–2005 гг., показано меньшее количество интервалов с устойчивым снежным покровом в одном сезоне, что означает более стабильное в течение холодного сезона его залегание.

При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе получено увеличение продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных северных. Для последних происходит увеличение только периода формирования снежного покрова, а период схода сокращается. Таким образом, для всех выделенных географических групп станций, кроме низко расположенных, в меридиональную циркуляционную эпоху (2006–2019 гг.) происходит не только компенсация изменений, произошедших в зональную эпоху (1977–2005 гг.), но и внесение новых изменения в сроки формирования и схода снежного покрова в Сибири.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы ИМКЭС СО РАН № 121031300158-9 за исключением анализа трендов временных характеристик СП для Восточной Сибири, который был выполнен в рамках проекта АААА-А21-121012190059-5.

Acknowledgments. The research was carried out according to State project No.121031300158-9 with the exception of the analysis of trends in the temporal characteristics of snow cover for Eastern Siberia, which was carried out within the framework of the АААА-А21-121012190059-5 project.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Groisman P.Y., Karl T.R., Knight R.W., Stenchikov G.L. 1994. Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere *Journal of Climate*, 7(11): 1633–1656.
- Vavrus S. 2007. The role of terrestrial snow cover in the climate system. *Climate Dynamics*, 29(1): 73–88.
- Henderson G.R., Leathers D.J., Hanson B. 2013. Circulation response to Eurasian versus North American anomalous snow scenarios in the Northern Hemisphere with an AGCM coupled to a slab ocean model. *Journal of Climate*, 26(5): 1502–1515.
- Ye K., Wu R., Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(7): 2738–2753.
- Walsh J.E., Ross B. 1988. Sensitivity of 30-day dynamical forecasts to continental snow cover. *Journal of Climate*, 1(7): 739–754.
- Walland D.J., Simmonds I. 1996. Modelled atmospheric response to changes in Northern Hemisphere snow cover. *Climate Dynamics*, 13(1): 25–34.
- Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Zhou L., Wang T. 2013. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environ. Res. Lett.*, 8: 014008.
- Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N. 2010. Issledovanie chuvstvitel'nosti prizemnoy temperatury Evrazii v zimniy period k anomal'iyam snezhnogo pokrova. Rol' stratosfery. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 46(6): 818–830 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н. 2010. Исследование чувствительности приземной температуры Евразии в зимний период к аномалиям снежного покрова. Роль стратосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 46. № 6. С. 818–830].
- Chen X., Liang S., Cao Y. 2016. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013. *Environ. Res. Lett.*, 11: 084002.

- Titkova T.B., Vinogradova V.V. 2017a. Sroki zaleganiya snezhnogo pokrova na territorii Rossii v nachale XXI V. po sputnikovym dannym. *Led i Sneg*, 57(1): 25-33. (in Russian). [Титкова Т.Б., Виноградова В.В. 2017. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // Лёд и Снег. Т. 57. № 1. С. 25-33].
- Titkova T.B., Kitaev L.M., Vinogradova V.V. 2017b. Korotkoperiodnaya izmenchivost' srokov zaleganiya snezhnogo pokrova po dannym MODIS na severe Evrazii v usloviyakh sovremennogo klimata. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 14(5): 223-238 (in Russian). [Титкова Т.Б., Китаев Л.М., Виноградова В.В. 2017. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. № 5. С. 223-238].
- Voropay N.N., Vlasov V.K. 2017. Osobennosti raspredeleniya snezhnogo pokrova na poberezh'e ozera Baykal. *Led i sneg*, 57(3): 355-364. (in Russian). [Воропай Н.Н., Власов В.К. 2017. Особенности распределения снежного покрова на побережье озера Байкал // Лёд и снег. Т. 57. №3. С. 355-364.]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-355-364>
- Matyukhina A.A., Voropay N.N. 2020. Long-term dynamics of snow cover in the Baikal region. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 611: 012007. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012007.
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. 2009. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades. *Environ. Res. Lett.*, 4: 045026.
- Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. 2011. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environ. Res. Lett.*, 6: 045204.
- Zhong X., Zhang X., Kang S., Wang K., Zheng L., Hu Y., Wang H. 2018. Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012. *The Cryosphere*, 12: 227-245.
- Kononova N.K. 2012. Vliyanie tsirkulyatsii atmosfery na formirovaniye snezhnogo pokrova na severo-vostoke Sibiri. *Led i sneg*, 52(1): 38-53 (in Russian). [Кононова Н.К. 2012. Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лёд и снег. Т. 52. № 1. С. 38-53].
- Derksen C., Brown R. 2012. Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical research letters*, 39: L19504.
- Brown R.D., Derksen C. 2013. Is Eurasian October snow cover extent increasing?. *Environ. Res. Lett.*, 8: 024006.
- Martynova Yu.V. 2020. Special aspects of snow cover formation in Western and Eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 611: 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012006>
- Martynova Yu.V., Matyukhina A.A., Voropay N.N., Krupchatnikov V.N. 2021. Osobennosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Sibiri i ikh svyaz' s anomal'iyami dinamiki atmosfery Severnogo polushariya. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemyy analiz i modelirovaniye ekonomicheskikh i ekologicheskikh system*, 6: 118-123 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Матюхина А.А. Воропай Н.Н., Крупчатников В.Н. 2021. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Том 6. С. 118-123].
- Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2014. Sroki ustanovleniya snezhnogo pokrova na severe Evrazii: pryamye i obratnye svyazi s krupnomasshtabnoy atmosfernoy tsirkulyatsiyey. *Led i sneg*, 3: 39-49 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2014. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и снег. № 3. С. 39-49].
- Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryayeva A.V., Kitaev L.M. 2015. Regional'nye osobennosti sovremennykh izmeneniy zimney akkumulyatsii snega na severe Evrazii po dannym nablyudeniyy, reanaliza i sputnikovym izmereniy. *Led i Sneg*, 55(4): 73-86 (in Russian). [Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. 2015. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. Т. 55. № 4. С. 73-86].
- Peings Y., Brun E., Mauvais V., Douville H. 2013. How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? *Geophysical Research Letters*, 40(1): 183-188.
- Martynova Yu.V. 2019. October snow cover and winter atmospheric conditions in Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 386: 012001.
- Peings Y., Douville H., Colin J., Martin D.S., Magnusdottir G. 2017. Snow-(N) AO teleconnection and its modulation by the Quasi-Biennial Oscillation. *Journal of Climate*, 30: 10211-10235.
- Yeo S.R., Kim W., Kim K.Y. 2017. Eurasian snow cover variability in relation to warming trend and Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 48: 499-511.
- Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N., Gochakov A.V., Antokhina O.Yu. 2022. Vzaimosvyaz' anomal'iy intensivnosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Zapadnoy Sibiri s dinamicheskimi sostoyaniyem atmosfery v Severnom polusharii v osenne-zimniy period. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 58(1): 109-124 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н., Гочаков А.В., Антохина О.Ю. 2022. Взаимосвязь аномалий интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с динамическим состоянием атмосферы в Северном полушарии в осенне-зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 58. № 1. С. 109-124].
- Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2018. Izmeneniya kharakteristik snezhnogo pokrova na territorii Rossii v 1950-2013 godakh: regional'nye osobennosti i svyaz' s global'nym potepleniem. *Kriosfera Zemli*, XXII(4): 65-75 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2018. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950-2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. Т. XXII. № 4. С. 65-75].
- Popova V.V., Polyakova I.A. 2013. Izmeneniye srokov razrusheniya ustoychivogo snezhnogo pokrova na severe Evrazii v 1936-2008 gg.: vliyanie global'nogo potepleniya i rol' krupnomasshtabnoy atmosfernoy tsirkulyatsii. *Led i sneg*, 53(2): 29-39 (in Russian). [Попова В.В., Полякова И.А. 2013. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936-2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лёд и снег. Т. 53. № 2. С. 29-39].
- Wegmann M., Orsolini Y., Vázquez M., Gimeno L., Nieto R., Bulygina O., Jaiser R., Handorf D., Rinke A., Dethloff K. 2015. Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. *Environ. Res. Lett.*, 10: 054015.

- Kitaev L.M., Titkova T.B. 2018. Sravnenie izmeneniy splochnosti morskogo l'da Arktiki i prodolzhitel'nosti snezhnogo perioda Severnoy Evrazii v usloviyakh sovremennogo klimata (po sputnikovym dannym). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2: 13–20 (in Russian). [Китаев Л.М., Титкова Т.Б. 2018. Сравнение изменений сплочности морского льда Арктики и продолжительности снежного периода Северной Евразии в условиях современного климата (по спутниковым данным) // Исследование Земли из космоса. № 2. С. 13–20].
- Zhang T., Wang T., Zhao Y., Xu C., Feng Y., Liu D. 2021. Drivers of Eurasian Spring Snow-Cover Variability. *Journal of Climate*, 34: 2037–2052.
- Song L., Wu R. 2019. Intraseasonal snow cover variations over western Siberia and associated atmospheric processes. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 124: 8994–9010.
- Brutel-Vuilmet C., Ménégot M., Krinner G. 2013. An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. *The Cryosphere*, 7: 67–80.
- Mudryk L.R., Kushner P.J., Derksen C., Thackeray C. 2017. Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles. *Geophys. Res. Lett.*, 44(2): 919–926.
- Mudryk L., Santolaria-Otín M., Krinner G., Ménégot M., Derksen C., Brutel-Vuilmet C., Brady M., Essery R. 2020. Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble. *The Cryosphere*, 14: 2495–2514.
- Zhu X., Lee S.Y., Wen X., Wei Z., Ji Z., Zheng Z., Dong W. 2021. Historical evolution and future trend of Northern Hemisphere snow cover in CMIP5 and CMIP6 models. *Environ. Res. Lett.*, 16: 065013.
- Zhong X., Zhang T., Kang S., Wang J. 2022. Snow depth trends from CMIP6 models conflict with observational evidence. *Journal of Climate*, 35(4): 1293–1307.
- Gastineau G., García-Serrano J., Frankignoul C. 2017. The Influence of Autumnal Eurasian Snow Cover on Climate and Its Link with Arctic Sea Ice Cover. *Journal of Climate*, 30(19): 7599–7619.
- Nikolaev A.N., Skachkov Yu.B. 2011. Vliyanie dinamiki snezhnogo pokrova na rost i razvitie lesov v Tsentral'noy Yakutii. *Kriosfera Zemli*, XV(3): 71–80 (in Russian). [Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. 2011. Влияние динамики снежного покрова на рост и развитие лесов в Центральной Якутии // Кriosфера Земли. Т. XV. № 3. С. 71–80].
- Jan A., Painter S.L. 2020. Permafrost thermal conditions are sensitive to shifts in snow timing. *Environ. Res. Lett.*, 15: 084026.
- Heim B., Lisovski S., Wiczorek M., Morgenstern A., Juhls B., Shevtsova I., Kruse S., Boike J., Fedorova I., Herzschuh U. 2022. Spring snow cover duration and tundra greenness in the Lena Delta, Siberia: two decades of MODIS satellite time series (2001–2021). *Environ. Res. Lett.*, 17: 085005.
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. 2017. Monitoring snezhnogo pokrova na territorii Rossiyskoy Federatsii. *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 366: 87–96 (in Russian). [Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. 2017. Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации // Труды Гидрометцентра России. Вып. 366. С. 87–96].
- Bespalov D.P. 1985. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam*. Meteorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh: Iss. 3. L: Gidrometeoizdat. 92 pp. (in Russian). [Беспалов Д.П. 1985. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Метеорологические наблюдения на станциях: Вып. 3. Л: Гидрометеоиздат, 1985. 92 с].
- Kattsova V.M. (ed.). 2022. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Rosgidromet. High Tech Publishing House, Saint Petersburg, 676 pp. (in Russian). [Катцова В.М. (ред.). 2022. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технические технологии, 676 с.]
- Kononova N.K. 2015. Tsirkulyatsionnye epokhi v sektorakh Severnogo polushariya v 1899–2014 gg. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 1(2): 56–66 (in Russian). [Кононова Н.К. 2015. Циркуляционные эпохи в секторах Северного полушария в 1899–2014 гг. // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 1. № 11. вып. 2. С. 56–66].

Поступила в редакцию: 10.12.23
Переработанный вариант: 27.12.2023

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM “MIREs OF NORTHERN EURASIA: BIOSPHERE
FUNCTIONS, DIVERSITY AND MANAGEMENT” (RUSSIA, PETROZAVODSK,
SEPTEMBER 25-28, 2023)**

Kuznetsov O.L.^{1*}

¹⁾ *Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск*

*kuznetsov@krc.kalelia.ru

Citation: Kuznetsov O.L. 2023. International Symposium “Mires of Northern Eurasia: biosphere functions, diversity and management” (Russia, Petrozavodsk, September 25-28, 2023). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(3): 198-203.

DOI: 10.18822/edgcc624077

Болотные экосистемы выполняют важную роль в биосфере, регулируют круговорот углерода, являются источниками полезных ресурсов, уникальными местообитаниями многих растений и животных, специфических сообществ. Болота являются объектами исследований широкого круга биологов, гидрологов, географов и других специалистов. В мире и в России сложились традиции болотоведческих исследований и научные школы, существует научное сотрудничество между ними. Важной формой научных коопераций исследователей являются научные мероприятия: конференции, симпозиумы, полевые семинары и экскурсии, на которых участники делятся результатами своих исследований, обсуждают сотрудничество и совместные работы. В Институте биологии Карельского научного центра РАН комплексные исследования болот ведутся с 1950 года и сложилась научная школа болотоведения, известная в России и за рубежом. На ее базе давно проводятся различные научные мероприятия с участием широкого круга исследователей из стран Европы. С 25 по 28 сентября 2023 года прошел очередной международный симпозиум «Болота Северной Евразии: биосферные функции, разнообразие и управление», который собрал около 100 участников из 42 научных организаций, вузов, охраняемых природных территорий России и Беларуси, приехавших из 24 регионов от Красноярска до Калининграда и Минска. На симпозиуме было заслушано более 60 устных докладов, а также представлено 28 стендовых, по разным проблемам изучения природы болот и их использования, на трех секциях. Состоялись полевые экскурсии на болота южной Карелии, в том числе и в заповеднике «Кивач».

Ключевые слова: болотные экосистемы, исследования, биоразнообразие, классификации, динамика, научный симпозиум, сотрудничество

Mire ecosystems play an important role in the biosphere, regulate the carbon cycle, are sources of useful resources and unique habitats for many plants, animals and specific communities. Mires are objects of research by a wide range of biologists, hydrologists, geographers and other specialists. Traditions of mire research and cooperating scientific schools have been established in the world and in Russia. An important form of scientific cooperation between researchers is scientific events: conferences, symposiums, field seminars and excursions, where participants share the results of their research, discuss cooperation and joint work. At the Institute of Biology of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, comprehensive studies of mires have been carried out since 1950 and a scientific school of mire science known in Russia and abroad has been developed. Various scientific events have long been held on its basis with the participation of a wide range of researchers from European countries. From September 25 to 28, 2023, the regular international symposium “Wetlands of Northern Eurasia: biosphere functions, diversity and management” was held and brought together about 100 participants from 42 scientific organizations, universities, protected natural areas of Russia and Belarus, who came from 24 regions from Krasnoyarsk to Kaliningrad and Minsk. At the symposium, more than 60 talks were given, and 28 posters were presented in three sections where various problems of studying the nature of mires and their use were discussed. Field excursions to the mires of southern Karelia including the Kivach nature reserve took place.

Key words: mire ecosystems, research, biodiversity, classifications, dynamics, scientific symposium, cooperation

В таежной и тундровой зонах северной Евразии болотные экосистемы занимают огромные площади. Они выполняют уникальные биосферные функции, внося значимый вклад в круговорот углерода и регулирование содержания парниковых газов в атмосфере, а также сильно влияют на гидрологический режим ландшафтов. Болота оказывают большое влияние на развитие экономики

северных регионов, часто затрудняя и удорожая освоение территории, при этом являются источниками торфа, ягодных и лекарственных растений, важными охотничьими угодьями, объектами туризма.

В ряде стран Северной Евразии давно сложились национальные научные школы по изучению болот и традиции их разностороннего использования. Интенсивное освоение болот на Севере со второй половины XX века потребовало разработки стратегий управления болотами и сохранения их разнообразия. В последние десятилетия во многих странах и регионах ведутся широкомасштабные работы по восстановлению нарушенных болот и искусственному заболачиванию. На протяжении нескольких десятилетий успешно развивается международное научное сотрудничество по этим проблемам, разрабатываются и внедряются новые методы исследований, активно развивающиеся с появлением новых технических возможностей. Результаты таких работ постоянно обсуждаются на различных научных мероприятиях. Среди них важными являются Международные торфяные конгрессы, проходящие раз в 4 года, и разнообразные симпозиумы Международного торфяного общества (IPS). Широкий спектр вопросов и проблем болотоведения обсуждается на регулярных Галкинских чтениях, проводимых секцией болотоведения РБО на базе Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН в С. Петербурге (начиная с 1997 года состоялось 12 конференций), а также Международных полевых семинарах и симпозиумах «Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее», организуемых Югорским государственным университетом раз в три года, начиная с 2001 года. Вопросы классификации и картирования растительности болот являются темой регулярных международных симпозиумов, которые проводит Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси.

Республика Карелия, расположенная на Европейском Севере России на восточном краю Фенноскандинавского щита, является одним из сильно заболоченных регионов России, ее заболоченность составляет около 30%. Исследования болот Карелии, начавшиеся в конце 20-ых годов прошлого века, постоянно ведутся с 1950 года с создания сектора болотоведения и мелиорации в Карело-Финском филиале АН СССР (сейчас это лаборатория болотных экосистем Института биологии Карельского научного центра РАН). К середине 70-ых годов сложилась карельская научная школа болотоведения, результаты ее многоплановых исследований широко известны в России и за рубежом. Основные итоги деятельности школы представлены в обзорной статье (Кузнецов, 2023).

Лаборатория болотных экосистем выполняет свои исследования в регионах Европейского Севера России, а также в соседних странах Европы, поэтому на протяжении десятилетий на ее базе проводятся различные научные мероприятия. Международные конференции и симпозиумы, посвященные болотам Европейского Севера, уже стали регулярными (1990, 1998, 2005, 2015).

Очередной симпозиум «Болота Северной Евразии: биосферные функции, разнообразие и управление» состоялся с 25 по 28 сентября 2023 года, который собрал около 100 участников из 42 научных организаций, вузов, охраняемых природных территорий России и Беларуси, приехавших из 24 регионов от Красноярск до Калининграда и Минска. 9 человек сделали доклады в формате онлайн. Следует отметить большое число молодых участников, среди которых студенты и аспиранты, представившие результаты своих первых исследований.

Ранее заявленная тематика симпозиума была скорректирована при организации его работы с учетом присланных заявок и тезисов докладов. Была проведена пленарная сессия и работали три секции.

С приветствиями к участникам симпозиума выступили генеральный директор ФИЦ «Карельский научный центр РАН» член-корр. РАН **О.Н. Бахмет**, директор Института биологии КарНЦ РАН д.б.н. **Н.В. Ильмаст**, ученый секретарь РБО **В.Ю. Нешатаева**.

На пленарной сессии было сделано 6 докладов. **О.Л. Кузнецов** (Институт биологии КарНЦ РАН) в своем докладе осветил основные направления и результаты исследований карельской школы болотоведения за прошедшие 70 лет. Разнообразие типов болот Республики Беларусь было представлено в докладе **Д.Г. Груммо** с соавторами (Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси). По результатам детальной инвентаризации сохранившихся в стране 845 тыс. га естественных болот (28,8% от имевшихся в начале XX века) сделана их типология по трофности и растительному покрову, включающая 3 типа верховых, 3 – переходных и 6 типов низинных болот, определены их площади, составлены карты распространения, разработаны программы охраны. Результаты эколого-флористической классификации растительности болот класса Охусоссо-Sphagnetea в российской Субарктике доложили **Е.Д. Лапшина** и **И.В. Филиппов** (Югорский государственный университет). Новые данные о растительности верховых и бугристых болот Севера позволили авторам выделить два новых союза и новый порядок в этом классе, что более

полно отражает разнообразие растительности верховых и бугристых болот северной Евразии. Комплексные палеогеографические реконструкции динамики растительности, климата и истории пожаров в предгорьях Алтая включал доклад **Т.А. Бляхарчук** с соавторами (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН), представленный он-лайн. Результаты исследований экосистемного обмена парниковых газов на торфяных болотах Европейского Севера России доложили **С.В. Загирова** и **М.Н. Мигловец** (Институт биологии ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН»). Авторами установлены значительные различия интенсивности потоков парниковых газов на сфагновом болоте и мерзлом бугристом болоте. Современный обзор методов и результатов исследований микроорганизмов и раковинных амеб при реконструкциях климата и палеоэкологических условий сделал **Ю.А. Мазей** с соавторами (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова).

Наиболее насыщенной была работа секции **«Разнообразие, структура, динамика и функционирование болотных экосистем»**, которая включала широкую тематику о природе как естественных, так и трансформированных болот. На ней в течение двух дней было заслушано 32 доклада. Разнообразие растительности, типов болот и их распространение в отдельных регионах страны было представлено в докладах **Е.М. Волковой** (Тульский гос. университет), **О.В. Галаниной** (БИН РАН), **О.Г. Гришуткина** (ИБВВ РАН), **Т.Г. Ивченко** (БИН РАН), **С.А. Кутенкова** с соавторами (ИБ КарНЦ РАН), **О.В. Лавриненко** с соавторами (БИН РАН), **В.Ю. Нешатаева** (С.-Петербургский ЛТИ), **Ю.А. Семенищенкова** (Брянский гос. университет). Ряд доложенных результатов был посвящен пожарам на болотах и постпирогенной динамике их растительности. Доклады по этой тематике сделаны сотрудниками Сибирского института сельского хозяйства и торфа СО РАН **Л.П. Гашковой**, **Н.Г. Коронатовой**, **А.А. Синюткиной**, **В.А. Степановой**, а также **А.Ю. Кочубей** (Ботанический сад УрО РАН), **М.А. Медведевой** с соавторами (Институт лесоведения РАН). Вопросы гидрологии болот освещались в докладах **Ю.А. Харанжевской** (Сибирский институт сельского хозяйства и торфа СО РАН), **М.Н. Мигловца** (ИБ ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН»), **С.Б. Селяниной** с соавторами (ФИЦ комплексного исследования Арктики УрО РАН), **Т.В. Скороспеховой**, **А.Д. Журавлевой** (ГГИ). В настоящее время большое внимание уделяется оценкам эмиссии и стоку парниковых газов в болотных экосистемах в рамках различных программ и проектов. Доклад, посвященный методам таких исследований, сделан **Ю.В. Куприяновой** (Югорский государственный университет). Ряд сообщений на симпозиуме был посвящен вопросам, затрагивающим разные уровни функционирования болотных экосистем. Биологическая продуктивность рассматривалась в докладах **Д.Г. Груммо** с соавторами (Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси), **А.В. Ниязовой**, **Д.В. Ильясова** (Югорский государственный университет), процессы разложения сфагновых мхов – в работе **Л.Г. Никоновой** с соавторами (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН).

В последние несколько лет набирают популярность исследования, связанные с инструментами и методами достижения углеродной нейтральности в сфере промышленности России при устойчивом росте экономики. Отчетностью крупных предприятий по сокращения выбросов парниковых газов все чаще выступают самые разные климатические проекты. В своих докладах сотрудники компании Северсталь **Казаков Р.А.** и **Белов Л.П.** осветили роль природно-климатических проектов в стратегии декарбонизации их компании и представили климатический проект по вторичному обводнению нарушенных торфяников на территории Вологодской области.

На секции **«Болота и климат в голоцене. Палеоэкология»** было заслушано и обсуждено 15 докладов, отражающих результаты по широкому кругу палеогеографических, экологических и исторических исследований позднеледниковья и голоцена в разных регионах России. Привлекло внимание широкое развитие палеогеографических исследований в Пермском крае, представленных в докладах **С.В. Копытова** с соавторами (Сибирский федеральный университет), **П.Ю. Санникова** с соавторами (Пермский государственный университет), **Е.Г. Лаптевой** с соавторами (Институт экологии растений и животных УрО РАН), авторы которых ранее не участвовали в научных мероприятиях болотоведов. Палеогеографические исследования активно ведутся на Алтае и в Саянах, их результаты были доложены **А.В. Гренадеровой** и **А.Б. Михайловой** (Сибирский федеральный университет), **М.А. Пупышевой**, **Т.А. Бляхарчук**, а также **Н.В. Шефер**, **Т.А. Бляхарчук** из Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Итоги комплексных палеоэкологических исследований озерно-болотных отложений центральной России отражены в докладах **А.Н. Цыганова** с соавторами, **Ю.А. Пастухова** с соавторами из МГУ им. М.В. Ломоносова, **АН. Суворовой** с соавторами (С.-Петербургский государственный университет), **М.Б. Носовой** с соавторами (Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН), **О.К. Борисовой**

(Институт географии РАН). Результаты многолетних палинологических исследований содержались в докладах по Калининградской области (**М.Г. Напреенко, Т.В. Напреенко-Дорохова**, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН), Западной Сибири (**Т.Г. Антипина**, Ботанический сад УрО РАН), Карелии (**Л.В. Филимонова**, Институт биологии КарНЦ РАН).

Секция «**Методы исследований. Управление болотными системами и их восстановление**» включала 9 докладов очень разной направленности. О планируемых работах по проекту предотвращения выноса радионуклидов поверхностными водами в зоне Чернобыльской АЭС путем повторного заболачивания осушенных болот содержал доклад **М.В. Максименкова** с соавторами (НИЦ НАН Беларуси по биоресурсам). Методические вопросы оценки динамики облесения верховых болот были изложены **К.П. Егоровым** с соавторами (Институт лесоведения РАН), использование данных космической съемки среднего разрешения в картировании и классификации растительности наземных экосистем Фенноскандии включал доклад В.В. Тарасенко, Б.В. Раевского (ОКНИ КарНЦ РАН).

Было представлено 28 стендовых докладов, которые активно обсуждались с их авторами.

В рамках симпозиума происходило обсуждение как представленных докладов, так и методов дальнейших исследований и дальнейшего сотрудничества. Отмечена важность проведения очных научных мероприятий, дающих возможность контактов широкого круга исследователей. В этой связи высказано недоумение отсутствием финансовой поддержки проведения научных конференций, симпозиумов Министерством науки и высшего образования РФ, притом, что в отчеты институтов по научно-организационной деятельности их проведение включается, а также число докладов сотрудников на научных мероприятиях различного уровня. Эти данные учитываются и при конкурсах и аттестации научных сотрудников.

Для участников симпозиума в течение двух дней были организованы научные экскурсии. На болотах в окрестностях деревни Колатсельга они познакомились с растительностью ряда ненарушенных евтрофных болот, характеризующихся высоким флористическим и ценотическим разнообразием, что обусловлено их развитием на территории, сложенной карбонатными коренными породами (доломитами), это редкий уголок Карелии с таким геологическим сложением. Особый интерес эти болота представляют и как объекты длительного мониторинга, так как многие из них (более 30) были детально исследованы финскими ботаниками в 1942 году и результаты позднее опубликованы (Loonamäa, 1961), а сейчас их исследования продолжены карельскими и финскими болотоведами (Кузнецов, Грабовик, 2010; Lindholm et al., 2018). В заповеднике «Кивач» участники симпозиума познакомились с растительностью обширного евтрофного травяно-гипнового болота «Чечкино» и очень маленького (около 3 га) верхового болота «Чудесное» с остаточным озерком (ламбой). Оно расположено в депрессии в водно-ледниковом ландшафте у подножия оза, имеет глубину 8,2 метра и возраст более 9 тыс. лет. Гости осмотрели знаменитый водопад Кивач и дендрарий заповедника.

Тезисы докладов симпозиума опубликованы (Болота..., 2023), ряд статей по докладам и путеводители экскурсий будут опубликованы в специальном выпуске Трудов Карельского научного центра РАН в серии «Экологические исследования» в декабре 2023 года.

Участники симпозиума выразили признательность организаторам симпозиума и желание вновь встретиться в Петрозаводске в будущем.



Рисунок 1. Доклад Казакова Р.А.
Фото Куприяновой Ю.В.



Рисунок 2. Приветственная речь Кузнецова О.Л.
Фото Лапшиной Е.Д.



Рисунок 3. На экскурсии на болоте «Чечкино». Фото Ю.В. Куприяновой.



Рисунок 4. На экскурсии на евтрофном болоте в окрестностях деревни Колатсельга.
Фото М.Г. Напреенко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mires of northern Eurasia: biosphere functions, diversity and management. 2023. In: *Abstracts of the report. Mezhdunarodnogo simpoziuma, Petrozavodsk, September 25-28, 2023*, p.113, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk (in Russian). [Болота северной Евразии: биосферные функции, разнообразие и управление. 2023. Тезисы докл. Международного симпозиума, Петрозаводск, 25-28 сентября 2023 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 113.]
- Kuznetsov O.L. 2023. Main directions and results of research of the Karelian scientific school of mire science. In: *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 3: 47-75. (in Russian). [Кузнецов О.Л. 2023. Основные направления и результаты исследований карельской научной школы болотоведения // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. №3. С. 47-75.]
- Kuznetsov O.L., Grabovik S.I. 2010. Monitoring of flora and vegetation of mire ecosystems // In *Monitoring and conservation of biodiversity of taiga ecosystems in the European North of Russia.*, pp. 19-31, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk (in Russian). [Кузнецов О.Л., Грабовик С.И. 2010. Мониторинг флоры и растительности болотных экосистем // Данилов П.И. (ред.) Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 19-31.]
- Lindholm, T., Heikkilä, R., Kuznetsov, O. 2018. Finnish botanists in the mires of Olonets region in Russian Karelia during the Second World War. *Mires and Peat*, 24(12): 1–18.
- Lounamaa J. 1961. Untersuchungen über die eutrophen Moore des Tulemajärvi-Gebietes im südwestlichen Ostkarelien, KASSR. *Societas zoologica-botanica Fennica Vanamo*, 32(3): 1-63

Поступила в редакцию: 08.11.2023
Переработанный вариант: 13.12.2023

Научное издание

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Том 14, выпуск 3/2023

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 27.12.2023

*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*

*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*

*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*

*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*

Главные редакторы:

*Лапина Елена Дмитриевна
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 313)
E-mail: e_lapshina@ugrasu.ru*

*Глаголев Михаил Владимирович
тел. +7-495-939-48-46
E-mail: m_glagolev@mail.ru*

