

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии Федеральной службы
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
и Российской академии наук»
(ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»)

ISSN 0207-2564

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭКОСИСТЕМ**

Том XXVI

№ 2

Москва 2015

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XXVI

№ 2

2015 год

Научный журнал, публикующий статьи о методах и результатах мониторинга загрязнения и состояния окружающей среды, по сопряженным вопросам моделирования. Публикуются также статьи о системах мониторинга и их функционировании, информационные материалы. Издание «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» выпускается с 1978 года. Для экологов, климатологов и специалистов в области охраны окружающей среды.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: С.М. Семенов (главный редактор), О.Н. Булыгина, В.А. Гинзбург, С.А. Громов, Г.Э. Инсаров, М.Д. Корзухин, А.А. Минин, А.В. Ольчев, В.А. Романенков, А.А. Романовская (заместитель главного редактора), А.А. Тишков, В.М. Хромов, С.Ю. Чайка, В.В. Ясюкевич (заместитель главного редактора), Н.В. Румянцева (ответственный секретарь).

Все статьи рецензируются.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Семенову С.М.; эл. почта: Semenov@igce.ru. Правила оформления рукописей и их представления для публикации – см. <http://www.igce.ru/>

ISSN 0207-2564

© Оформление издания: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2015

PROBLEMS OF ECOLOGICAL MONITORING AND ECOSYSTEM MODELLING

Volume XXVI

№ 2

2015

A scientific journal publishing papers on methodologies and results of monitoring of pollution and state of the environment, as well as on associated modelling issues. Papers on monitoring systems and their functioning, and information materials are also presented. Published since 1978. The journal may be of interest for ecologists, climate scientists and experts in environment protection.

EDITORIAL BOARD: S.M. Semenov (Editor-in-Chief), O.N. Bulygina, V.A. Ginzburg, S.A. Gromov, G.E. Insarov, M.D. Korzukhin, A.A. Minin, A.V. Ol'chev, V.A. Romanenkov, A.A. Romanovskaya (Deputy Editor-in-Chief), A.A. Tishkov, V.M. Khromov, S.Yu. Chaika, V.V. Yasukevich (Deputy Editor-in-Chief), N.V. Rumiantseva (Executive Secretary).

All papers are subject for peer reviewing.

Primary submission of manuscripts: Semenov S.M., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258 Moscow, Russian Federation; e-mail: Semenov@igce.ru. Rules for manuscripts preparation and submission are available at <http://www.igce.ru/>

ISSN 0207-2564

© Design: FSBI "IGCE", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

События и памятные даты

Александр Сергеевич **Комаров** (1945 – 2015)..... 5

Исследования

Ветров В.А. Ограничение антропогенного воздействия на окружающую среду в России: состояние проблемы и перспективная стратегия..... 10

Корзухин М.Д. Расчетные оценки влияния изменения климата на продуктивность лесов (обзор подходов)..... 33

Лапина Л.Э., Михайлов О.А., Успенский И.М. Факторный анализ микрометеорологических данных по мезоолиготрофному болоту в Республике Коми..... 59

Припутина И.В. Методология критических нагрузок и ее развитие в связи с Конвенцией о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния..... 80

Романенков В.А. Исследование эффективности управления плодородием в агроэкосистемах на основе изучения рядов урожайности в длительных полевых опытах..... 97

Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. Технические возможности создания аэрозольного слоя в стратосфере с целью стабилизации климата..... 115

Осуществление мониторинга

Черногаева Г.М., Малеванов Ю.А., Журавлева Л.Р. Мониторинг загрязнения окружающей среды в Российской Федерации: организация наблюдений, обобщение и распространение информации..... 128

CONTENTS

Events and commemorative dates

In memoriam of Alexander Komarov (1945 – 2015).....	5
--	---

Studies

Vetrov V.A. Restraining the anthropogenic impact on environment in Russia: state of the problem and prospective strategy.....	10
--	----

Korzukhin M.D. Quantitative estimates of the impact of climate change on forest productivity (review of approaches).....	33
---	----

Lapina L.E., Mykhaylov O.A., Uspensky I.M. Factor analysis of micrometeorological data on mesooligotrophic bog in Komi Republic.....	59
---	----

Priputina I.V. Critical loads methodology and its elaboration in connection with the Convention on long-range transboundary air pollution.....	80
---	----

Romanenkov V.A. Study of efficiency of productivity management in agroecosystems based on analysis of yield series in long-term field experiments.....	97
---	----

Revokatova A.P., Ryaboshapko A.G. Technical capabilities for creating an aerosol layer in the stratosphere for climate stabilization purpose.....	115
--	-----

Monitoring implementation

Chernogaeva G.M., Malevanov Yu.A., Zhuravleva L.R. Environmental pollution monitoring in the Russian Federation: observations arrangements, information synthesis and distribution.....	128
--	-----

В начале 2015 года Лаборатория моделирования экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН) в Пущино отмечала свое 20-летие. Ее образование было закономерным этапом развития математического направления в почвоведении и экологии, которое было характерно для пущинского института почвоведения, начиная с момента его основания. Создателем и бессменным руководителем лаборатории все эти годы был Александр Сергеевич Комаров – профессор, доктор биологических наук. Он пришел работать в Институт агрохимии и почвоведения АН СССР (первоначальное название ИФХиБПП РАН) в



КОМАРОВ
Александр Сергеевич
(20.03.1945 – 31.05.2015)

начале 1970-х годов после окончания кафедры теории функций и функционального анализа механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по приглашению основателя института – члена-корреспондента АН СССР В.А. Ковды, который считал важным и необходимым внедрение математических методов в почвенные и биосферные исследования.

В век узкой специализации науки не так много ученых, которые успешно сочетают глубокие знания и имеют научные результаты в далеко отстоящих друг от друга областях, таких как математика и экология. Александр Сергеевич Комаров – один из самых заметных отечественных ученых, получивших математическое образование и посвятивших свою жизнь математическим проблемам в биологии, в частности, в лесной экологии и почвоведении.

Александр Сергеевич родился 20 марта 1945 г. в семье кадрового офицера – инженера-строителя. Его детство и юность прошли в Крыму. Будучи учеником одной из Симферопольских школ, он увлекся астрономией. Это увлечение и дружба с товарищами по Симферопольскому обществу любителей астрономии остались с ним на всю жизнь, также как и любовь к чтению, и

коллекционированию книг. Его пушкинская квартира едва вмещает большую библиотеку по разным направлениям литературы и искусства, любовно собиравшуюся им многие годы.

Во время учебы в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова Александр Сергеевич заинтересовался радиобиологией, что и предопределило его профессиональную судьбу, связанную с Пушкинским Биологическим Центром. Период конца 1960-х и 1970-х годов в молодом научном городке на юге Подмоскovie характеризовался уникальной атмосферой научного творчества и энтузиазма, «философского» отношения к бытовым трудностям и полным погружением в научные проблемы. В этом «плавильном котле» идей и задач бурно развивающейся биологической науки ученые разных направлений – математики, физики, химики и другие специалисты – во взаимодействии с биологами легко находили неисследованные области, и каждый шаг вперед являлся уникальным достижением, который соответствовал словосочетанию «первые в мире».

В Пушино Александр Сергеевич знакомится с выдающимися представителями московской математической школы – А.М. Молчановым, Э.Э. Шнолем, А.Д. Базыкиным и другими сотрудниками Научно-исследовательского вычислительного центра АН СССР. В это же время Александром Сергеевичем были пройдены и «биологические университеты» под влиянием таких классиков отечественной биологии и почвоведения как Н.В. Тимофеев-Ресовский, В.А. Ковда, С.М. Разумовский, Н.И. Базилевич и А.Н. Тюрюканов.

Большое влияние на научный путь Александра Сергеевича оказало знакомство с представителями созданной А.А. Урановым школы геоботаники, которое переросло в многолетнее и плодотворное сотрудничество с Л.А. Жуковой, О.В. Смирновой и Л.Б. Заугольной. Популяционный подход к изучению функций экологических систем оказался плодотворным методом исследования сложных биологических систем. Кроме того, обширный экспериментальный материал, накопленный в лаборатории А.А. Уранова, позволял переходить от описательного формализма к точным математическим формулировкам и построению моделей. Как итог этого успешного сотрудничества, в 1986 г. А.С. Комаров защитил кандидатскую диссертацию на тему «Дискретные динамические модели ценопопуляций растений».

В 1989 г. Александр Сергеевич организывает группу диагностики и моделирования биогеоценологических процессов, в которой объединились специалисты из разных областей знаний. В 1995 г. эта группа была преобразована в Лабораторию моделирования экосистем.

В начале 1990-х годов, совместно с О.Г. Чертовым (в то время заведующим Лабораторией биохимии почв Биологического НИИ

Санкт-Петербургского государственного университета), А.С. Комаров начинает разработку системы моделей динамики лесных экосистем. Первая версия модели динамики органического вещества почвы (SOMM) была опубликована в 1996 г. Ее последующая версия (ROMUL) широко известна в стране и в мире. Затем был реализован еще один замысел – в 1997 году была опубликована статья по индивидуально ориентированной модели системы древостоя и почвы, что положило начало целому классу моделей EFIMOD, успешно развиваемым в последнее десятилетие. Созданные модели применяются для решения широкого круга задач лесной экологии не только в России, но и в других странах – Финляндии, Канаде, Германии, Голландии.

В этих моделях лесных экосистем впервые были объединены популяционный и балансовый подходы, что позволило выяснить взаимодействие и объяснить особенности продукционных процессов, обусловленные взаимосвязью популяционной структуры растительности и циклов элементов в системе «почва – растительность – климат». Также была продемонстрирована стабилизирующая роль почвы и обратная связь между процессами разложения органического вещества в почве и продуктивностью древесной растительности, оценена экологическая роль рубок, ведущих к изменению структуры популяций деревьев, в накоплении и потерях углерода и азота в лесных экосистемах.

Теоретические обобщения огромного эмпирического материала и работоспособная модель, позволяющая с высокой степенью достоверности предсказывать поведение растительного сообщества (как сложной многоаспектной системы и, одновременно, части биогеоценоза), были представлены и успешно защищены Александром Сергеевичем в 2004 г. в его докторской диссертации на тему «Имитационные модели нелинейной динамики сообществ растений». В 2008 г. ему было присвоено звание профессора.

Под руководством А. С. Комарова в возглавляемой им лаборатории был создан метод прогноза продуктивности лесных экосистем, который может существенно дополнить традиционные таблицы хода роста, используемые в практическом лесоводстве. Он позволяет анализировать иерархию влияния внешних факторов (изменения климата, поступления соединений азота из атмосферы, различных нарушений), а также параметров древостоя и почвенных характеристик на рост и видовой состав лесов бореальной и умеренной зон. Успешно опробован оригинальный метод оценки динамики углерода и его распределения по основным компонентам лесных экосистем (древостой, сухостой и валеж, лесная подстилка, минеральные горизонты почвы) на уровне лесотаксационного выдела и для генерализованных данных учета лесного фонда на уровне субъекта РФ. На примере лесов южной Финляндии исследо-

вана динамика смешанных древостоев для разных типов леса в условиях изменения климата.

Александр Сергеевич, пожалуй, как никто другой придавал огромное значение пространственной структуре растительного сообщества, важность которой только в последнее время стала осознаваться специалистами по экологическому моделированию. Именно учет пространственной структуры позволяет точнее оценить динамику ведущих переменных и предсказывать эффекты, которые в физике получили название «фазовые переходы».

Одной из воплощенных им идей включения пространственных взаимоотношений в модель растительной ассоциации является клеточно-автоматная модель травянистой и кустарничковой растительности. Александр Сергеевич неоднократно возвращался к этой модели, которая служила прекрасным инструментом проверки биологических гипотез. Ему удалось формализовать и использовать понятие онтогенетических состояний растений, проследив изменения демографической структуры растительного сообщества на основе обширных имитационных экспериментов. Результаты, полученные с помощью моделирования, хорошо согласовывались с экспериментальными данными, что свидетельствовало о большом потенциале этого подхода. Александр Сергеевич по праву является пионером применения в экологическом моделировании клеточно-автоматной методологии – направления, которое успешно развивается в настоящее время.

Кроме того, на базе пространственно-распределенной модели травянистых растений Александр Сергеевич предложил метод анализа устойчивости популяций и сообществ растений по отношению к внешним воздействиям, позволяющий определить критические условия существования природных популяций растений разных жизненных форм. Подобные модели незаменимы при решении задач сохранения биоразнообразия, охраны редких и исчезающих видов.

А.С. Комаров – автор более 150 научных работ, многие из которых опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Он входит в «элитный» список ученых, индекс цитирования которых по базе цитирования Web of Science превышает 1000 ссылок. Многие годы он являлся одним из редакторов журнала «Ecological Modelling», входил в редколлегии журналов «Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences», «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» и других, был выбран в состав Правления международного общества по экологическому моделированию (International Society for Ecological Modelling). Его международные связи и научные контакты были обширны.

Известен Александр Сергеевич и своим педагогическим талантом. Начиная с 1993 г., его жизнь была тесно связана с Пушкинским

государственным университетом, в создании которого он принимал самое непосредственное участие, был доцентом и потом профессором, руководил магистерской программой «Системная экология». Он с удовольствием вел целый «букет» математических дисциплин в различных университетах, включая зарубежные. Под его руководством были защищены 6 кандидатских диссертаций, он консультировал докторские диссертации.

К числу научных «детищ» А.С. Комарова можно отнести и организованные им, начиная с 2009 г., национальные конференции по математическому моделированию в экологии «ЭкоМатМод». Задуманные как продолжение широко известных среди биологов «Молчановских школ» 1970 – 1980-х годов, конференции «ЭкоМатМод», безусловно, стали значимыми событиями в научной жизни современной России. В мае 2015 г. он провел, к сожалению, свою последнюю конференцию...

Его жизнь оборвалась внезапно в момент наибольшей научной активности.

Александр Сергеевич был многогранно одаренным человеком, энциклопедически эрудированным, обаятельным и легким в общении, умевшим создать атмосферу доброжелательности и непринужденности. С нами – своими коллегами и друзьями – он успел поделиться не только своими научными знаниями, но и мудростью человека, умевшего жить в согласии с собой и в мире с окружающими. Следующее его высказывание четко характеризует его мироощущение и систему жизненных ценностей:

«Главная составляющая свободы заключается в возможности делать то, что тебе всегда было интересно. Если все идет хорошо, то у тебя не хватает сил и времени, чтобы сделать все, что хочется. И хорошо, когда есть команда, которая помогает тебе сделать это.

Другая часть свободы – это возможность поделиться радостью результатов с единомышленниками. Если все в твоей жизни идет правильно, то результатов много и радости хватает многим. Это очень важно и позволяет действительно почувствовать свободу, которую доставляет творчество.» (А.С. Комаров, 2005).

Лаборатория моделирования экосистем
Института физико-химических
и биологических проблем почвоведения РАН

УДК 550.4: 504.0549(571.50)

ОГРАНИЧЕНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В РОССИИ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ

В.А. Ветров

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20б, vetrov.igce@mail.ru

Резюме. В работе дан критический обзор современных представлений о проблеме ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду («защиты окружающей среды») в России. Выполнен анализ основных понятий, терминов и проблем, относящихся к негативному воздействию хозяйственной деятельности на природную среду и природные ресурсы, которое трактуется как «ущерб природным ресурсам». Рассмотрены основные подходы к классификации природных комплексов и всех возможных видов природных и антропогенных систем по степени их хозяйственного освоения. Краткий обзор состояния знаний и идей в сфере «защиты окружающей среды» дает основания для определения перспективных направлений природоохранной деятельности, которые должны играть ключевую роль в стратегии решения проблемы «защиты окружающей среды» в России. Основные составляющие стратегии: классификация экологических систем, концепция эколого-экономического ущерба, методология оценки «эколого-экономической безопасности», теория и практика экологического нормирования, программы экологического мониторинга, методология оценки состояния экосистем.

Ключевые слова. Антропогенное воздействие, окружающая среда, ущерб, природные ресурсы, классификация, экологические системы, природные комплексы, методология, экологическое нормирование, мониторинг окружающей среды.

RESTRAINING THE ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE ENVIRONMENT IN RUSSIA: STATE OF THE PROBLEM AND PROSPECTIVE STRATEGY

V.A. Vetrov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia, vetrov.igce@mail.ru

Summary. The paper presents a critical review of existing restraints of anthropogenic impact on the environment (the problem of «environmental protection») in Russia. The research analyses the main concepts, terminology and issues associated with negative impact of

economic activities on the natural environment and natural resources, which is treated as «damage to natural resources». It considers the main approaches to the classification of natural and human-made («anthropogenic») systems of all types according to the degree of their economic use. A brief review of the state of knowledge in the field of «environmental protection» provides a rationale to identify prospective directions for environmental activities, which should play the key role in a strategy of «environmental protection» in Russia. The pillars of the proposed strategy are as follows: a classification of environmental systems; a concept of «ecological-economic damage»; a methodology for assessing «ecological-economic safety»; the theory and practice of environmental standards setting; environmental monitoring programs; a methodology for assessing the state of ecosystems.

Keywords. Anthropogenic impact, environment, damage, natural resources, classification, ecological systems, natural systems, methodology, ecological standard setting, environmental monitoring.

*«Мы переходим сейчас в новую фазу культуры,
в которой ответом на вопросы будут
не утверждающие высказывания, а новые,
более глубоко сформулированные вопросы».*

В.В. Налимов «Канатоходец»

*«Каждый имеет право на благоприятную
окружающую среду...»*

Конституция РФ

Введение

Интенсивное развитие научных исследований в середине XX века, ускоренный научно-технический прогресс обещали к его концу решить основные глобальные проблемы человечества – обеспечить устойчивое социально-экономическое развитие, сохранить и улучшить состояние окружающей среды.

Но экономический рост остается постоянным источником серьезной опасности для окружающей человека среды обитания и для биосферы в целом. Постоянное стремление человека к наиболее полному удовлетворению своих материальных и духовных потребностей приводит к продолжающемуся экспоненциальному росту производства и, как следствие, к резкому повышению уровня антропогенной нагрузки на биосферу (Медоуз и др., 2007).

На определение взаимосвязи между валовым внутренним продуктом (ВВП) и нагрузкой на окружающую среду ушло больше 20 лет, а без этой зависимости не решается проблема пределов роста. Были разработаны новые количественные показатели выхода системы за пределы: например, M. Wackernagel и его коллеги

(Wackernagel et al., 2002) сумели оценить нагрузку на окружающую среду со стороны человека («экологический след», «*ecological footprint*») и сравнить её с поддерживающей способностью (потенциальной емкостью) планеты. Начиная с 1980-х гг., потребности человека превышают возможности планеты, и выход за пределы возможностей в 1999 г. составил порядка 20%.

В конце XX века началась революционная перестройка мировоззрения в отношении человека с природой, которая продолжается в наши дни в условиях нарастающего кризиса этих отношений. В настоящее время мы имеем сложную ситуацию в России и в мире в таких трудно определяемых областях как «охрана (защита) окружающей среды», «рациональное использование природных ресурсов», «устойчивое развитие» и т.п. Для гармонизации взаимодействия общества с природой требуется объективная оценка последствий влияния человека на окружающую среду в двух базовых взаимосвязанных параметрах – экологическом и экономическом.

Всему комплексу сложных и взаимозависимых проблем окружающей среды и природных ресурсов в России и в мире посвящено огромное число публикаций, содержащих практически необозримое количество информации в этой области. Однако лишь небольшое число исследователей рассматривают проблему ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду (научное содержание социально-политического термина «защита/охрана окружающей среды») в целом – с позиций передовых идей и современных представлений об источниках экологического кризиса и путях его преодоления.

Ресурсы в системном моделировании материальных потоков в мировой экономике играют роль источников. Ключевая проблема устойчивости источников заключена в скорости, с которой убывают (истощаются) невозобновляемые ресурсы и в скорости восстановления (или замены) возобновляемых ресурсов. В категорию физических ресурсов, о которых идет речь, входят обязательные физические (материальные) компоненты, поддерживающие биологическую и промышленную деятельность – воздух (кислород), вода, плодородные земли, полезные ископаемые, энергия и экологические системы планеты, которые поглощают отходы (стоки) и определяют состояние климата (Медоуз и др., 2007). Одним из важнейших условий устойчивого развития человеческого общества становится ресурсосбережение, т.е. ограничение и стабилизация потребления ресурсов. По единодушному мнению специалистов по глобальному моделированию, ресурсосбережение являются одной из ключевых проблем, от которых зависит будущее человечества (Вайцзеккер, Отт, 1998). В самом широком смысле «охрана окружающей среды» есть, по существу, охрана природных ресурсов.

В настоящей работе мы делаем критический обзор имеющихся на сегодняшний день представлений о состоянии проблемы ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду («защиты окружающей среды»), прежде всего, на основе анализа основных понятий, терминов и проблем, относящихся к негативному воздействию хозяйственной деятельности на природную среду и природные ресурсы. При этом любое негативное воздействие на природные системы и ресурсы трактуется как «ущерб природным ресурсам».

Решение проблемы «защиты окружающей среды» от антропогенного воздействия приводит к необходимости классифицировать природные комплексы и все возможные виды природных и антропогенных систем по степени их хозяйственного освоения (Израэль, 1979).

Краткий обзор состояния знаний и идей в сфере «защиты окружающей среды» дает основания для определения перспективных направлений природоохранной деятельности, которые, по нашему мнению, должны играть ключевую роль в стратегии решения проблемы «защиты окружающей среды» в России

Ущерб природным ресурсам: основные понятия, термины, проблемы.

*«Мы избежим половины разногласий,
если сойдемся в определениях».*

Р. Декарт

Природная среда

В России вопросы экономической оценки и возмещения вреда (ущерба), причиненного окружающей (природной) среде, природным ресурсам, здоровью населения, а также различным субъектам правовых отношений и хозяйственной деятельности регламентируются большим количеством законодательных и нормативно-методических документов, принятых как на федеральном, так и на региональном уровнях. При этом следует признать, что несмотря на длительную практику расчета размера исковых претензий за нарушение природоохранного законодательства, понятие собственно «экологического ущерба» не получило однозначного толкования.

В Федеральном законе... (2002) используются следующие основные понятия, относящиеся к рассматриваемой нами проблеме «защиты (охраны) окружающей (природной) среды»:

- ***окружающая среда*** – совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов;
- ***природная среда*** – совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов;

- **компоненты природной среды** – земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле;
- **природный объект** – естественная экологическая система, природный ландшафт и составляющие их элементы, сохранившие свои природные свойства;
- **природно-антропогенный объект** – природный объект, измененный в результате хозяйственной и иной деятельности, и (или) объект, созданный человеком, обладающий свойствами природного объекта и имеющий рекреационное и защитное значение;
- **антропогенный объект** – объект, созданный человеком для обеспечения его социальных потребностей и не обладающий свойствами природных объектов;
- **естественная экологическая система** – объективно существующая часть природной среды, которая имеет пространственно-территориальные границы и в которой живые (растения, животные и другие организмы) и неживые ее элементы взаимодействуют как единое функциональное целое и связаны между собой обменом вещества и энергии;
- **природные ресурсы** – компоненты природной среды, природные объекты и природно-антропогенные объекты, которые используются или могут быть использованы при осуществлении хозяйственной и иной деятельности в качестве источников энергии, продуктов производства и предметов потребления и имеют потребительскую ценность;
- **охрана окружающей среды** (также – **природоохранная деятельность**) – деятельность органов государственной власти Российской Федерации, ...направленная на сохранение и восстановление природной среды.

Эти термины и понятия дают достаточные основания для их использования при решении проблемы ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду в России.

Природные ресурсы

Как было отмечено, в самом широком смысле «охрана окружающей среды» есть, по существу, охрана природных ресурсов биосферы (техносферы): атмосферного воздуха, природных вод, почв, растительного и животного мира и т.п. В этой связи весьма показательна разница в определении понятий «**природная среда**» и «**окружающая среда**» в Федеральном законе... (2002): т.н. **антропо-**

погенные объекты являются частью **окружающей среды**, но выведены за рамки собственно природной среды.

В этих дефинициях мы усматриваем значительный прогресс в направлении дифференцированного подхода к объектам биосферы (точнее, техносферы) при осуществлении природоохранной деятельности: (см. ниже).

Негативное воздействие на окружающую среду – вред, ущерб

При определении степени негативного воздействия на окружающую среду применяются термины **«вред»** и **«ущерб»**. Так, оба термина используются в Конституции РФ, Федеральном законе... (2002), Федеральном законе «О недрах», Федеральном законе «Об особо охраняемых природных территориях», Водном кодексе, Федеральном законе «О животном мире» и во множестве других нормативных и законодательных документах, регламентирующих природоохранную деятельность.

Во всех документах **вред** окружающей природной среде в результате экологического правонарушения определяется как негативные изменения окружающей природной среды, вызванные антропогенной деятельностью, в частности, в результате загрязнения природной среды, истощения природных ресурсов, повреждения или разрушения экосистем. Наиболее авторитетное определение термина **«вред окружающей среде»** содержится в Федеральном законе... (2002), Ст. 1: **«вред окружающей среде – негативное изменение окружающей среды в результате ее загрязнения, повлекшее за собой деградацию естественных экологических систем и истощение природных ресурсов»**.

К этому определению имеется, по крайней мере, два существенных замечания.

Во-первых, понятие «вред» толкуется через столь же расплывчатое понятие «негативное изменение окружающей среды», для которого отсутствует независимое определение. Имеющееся в Ст. 1 Федерального закона (2002) определение понятия «негативное воздействие на окружающую среду» («воздействие хозяйственной и иной деятельности, последствия которой приводят к негативным изменениям качества окружающей среды») практически ничего не проясняет, поскольку является одним из многочисленных тавтологических казусов, отмечаемых в Федеральном законе... (2002). Условное разъяснение термина «негативное воздействие...» можно с трудом найти в Ст. 16, п. 2: «К видам негативного воздействия на окружающую среду относятся:

- выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и иных веществ;

- сбросы загрязняющих веществ, иных веществ и микроорганизмов в поверхностные водные объекты, подземные водные объекты и на водосборные площади;
- загрязнение недр, почв;
- размещение отходов производства и потребления;
- загрязнение окружающей среды шумом, теплом, электромагнитными, ионизирующими и другими видами физических воздействий; иные виды негативного воздействия на окружающую среду».

Но этот перечень явно ограничен последствиями загрязнения и никак не отражает других видов негативного воздействия, таких, например, как истощение природных ресурсов.

Во-вторых, в самом концептуальном определении **«вреда»** в Ст. 1 Федерального закона... (2002) «негативное изменение...» ставится в соответствие только с загрязнением окружающей среды, что хорошо видно из вышеприведенного перечня видов негативного воздействия. Гораздо более полный набор характеристик **«вреда»** содержится в Ст. 77, п. 1 в перечне негативных результатов нарушений законодательства: порча, уничтожение, повреждение, нерациональное использование природных ресурсов, разрушение естественных экологических систем и т.п.

Таким образом, в действующих правовых актах содержатся достаточно развернутые, но в той же степени неоднозначные толкования понятий **«ущерб (вред) окружающей среде»**, **«ущерб (вред) природным ресурсам»**. По этой причине, ввиду несогласованности определений этих понятий в разных документах и неполноты самих определений, их нельзя признать как точные и исчерпывающие дефиниции, и как следствие, использовать при разработке практических критериев в оценках антропогенного воздействия на окружающую среду.

Классификация экологических систем

Общие соображения и основные подходы

Из многих определений и толкований понятия «экологическая система» («экосистема») для содержания нашей работы ближе всего подходит наиболее общее и краткое определение Н.Ф. Реймерса (1990): «...Сообщество живых существ и его среда обитания, объединенные в единое функциональное целое...». Так как все экосистемы составляют иерархию в составе биосферы и функционально связаны между собой, имеется непрерывный континуум, в котором прерывность и непрерывность сосуществуют одновременно (Яблоков, Юсуфов, 1981). Завершает иерархию экосистем биосфера в целом.

Традиционные подходы к классификации системно-территориальных образований исходили либо из биологических, либо из

сугубо географических (ландшафтных) представлений о пространственно-ограниченных системах – без участия человека. В хронологическом порядке можно перечислить наиболее употребительные термины и понятия, введенные с этих точек зрения в разное время биологами и географами в попытках навести относительный порядок в бесконечном разнообразии того мира, который мы называем довольно расплывчатым термином «**окружающая среда**». Этот перечень составлен по обзору Б.Б. Прохорова (2003).

Экосистема – определенная организация и функциональная связь живых и абиотических компонентов, которую можно рассматривать как квазиорганизм (Tansly, 1935).

Биогеоценоз – совокупность на участке земной поверхности однородных *природных явлений* (атмосфера, горные породы, биота, почва и т.п.), имеющая свою собственную специфику взаимодействия слагающих её компонентов и определенные типы обмена веществом и энергией между собой и другими связями (Сукачев, 1964).

Геосистема – особого рода материальная система, состоящая из взаимообусловленных природных компонентов, взаимосвязанных в своем размещении и развивающихся во времени как части целого; практически любые структурные физико-географические образования – от фации до ландшафтной оболочки Земли (Сочава, 1978).

Природная система – эволюционно сложившаяся, относительно пространственно ограниченная, внутренне однородная система функционально связанных живых организмов и окружающей их абиотической среды, характеризующаяся определенным энергетическим состоянием, типом и скоростью обмена веществом и информацией (Реймерс, 1990). В экосистемно-таксономическом смысле при таком понимании биогеоценоз – элементарная экосистема и геосистема.

С ростом интереса к проблеме «человек и окружающая среда» стали появляться термины, относящиеся к территориальным системам жизнедеятельности людей. Наиболее известные термины появились почти одновременно, настолько были востребованы новые подходы к эколого-географической классификации территорий.

Антропобиогеоценоз – системное образование, которое можно обозначить формулой: *популяция людей* → *производство* → *среда*; в этой триаде производство играет системообразующую роль, регулирующую все взаимосвязи и все взаимоотношения между компонентами системы (Казначеев, 1973).

Антропогеоценоз – реально существующее явление в составе хозяйственно-культурного типа; структурные компоненты – хозяйственный коллектив, его производственная деятельность, эксплуатируемая географическая среда – объединяются функциональными связями. Антропогеоценозы первой степени – в которых преобла-

дает роль географической среды, в антропогеоценозах второй ступени преобладающую роль играет направленная человеческая деятельность (Алексеев, 1974).

Антропосистема – сложное образование, состоящее из человечества как целого, включающего человека как биологический вид, материальную и духовную культуру, производительные силы и производственные отношения общества. Между антропосистемой и природными комплексами от самых мелких (биогеоценоз, фация) до глобального (биосфера) существуют прямые и обратные связи, возникают урбанопромышленные структуры и инфраструктуры. Все возможные сочетания антропосистем, природных систем и урбанопромышленных структур составляют окружающую (человека) среду (Реймерс, 1974).

Антропоэкосистема – пространственное подразделение среды обитания человека, во всех своих частях обладающее сходством природных, социально-экономических, производственных и т.п. условий жизнедеятельности населения. Антропоэкосистема состоит из совокупности компонентов и связывающих их процессов, происходящих в определенном пространстве в конкретное время. Центральным блоком антропоэкосистемы является *общность людей*, взаимодействующая с *природой*, *хозяйством*, *населением*, с *социально-экономическими условиями* (Преображенский, Райх, 1974; Прохоров, 2003).

Последний термин и его толкование весьма типичны для «географического» подхода к задаче пространственной классификации территорий со всеми недостатками, традиционными для этого раздела знаний: концептуального «антропоцентризма», описательного стиля, крайне неконкретных, размытых понятий и терминов. Например, само определение антропоэкосистемы основано на таких невнятных понятиях, как *общность людей*, *определенное пространство*, к тому же содержит неуклюжую тавтологию («*общность людей*, *взаимодействующая с ... населением*»).

С точки зрения предмета нашего анализа («защита окружающей среды») наиболее близким по духу к проблемам экологии нам представляется предложенное Н.Ф. Реймерсом (1974) понятие «*антропосистема*», в котором недвусмысленно указывается на принципиальную разницу между искусственными («антропогенными», как стали выражаться позднее) и «природными» системами и дается внятное толкование избитого и у многих авторов путаного термина «*окружающая среда*».

Решение назревшей к середине 1970-х гг. задачи оценки последствий антропогенного воздействия на природные системы, прежде всего локального и регионального рангов (масштабов), по здравому рассуждению должно было прямо зависеть как от ценности природной системы для общества, так и от степени вовлечения данной системы в хозяйственную деятельность. **Цели и задачи природо-**

охранных мероприятий должны быть разными в зависимости от степени преобразования природного объекта в антропогенный. Этот весьма продуктивный тезис дает, наконец, прочную концептуальную основу для разработки реалистичных критериев и пределов антропогенного воздействия (включая экономические основы оценки и возмещения экологического ущерба) для всего разнообразия природных и антропогенных комплексов.

По этим признакам Ю.А. Израэль (1979) предложил при оценках допустимых антропогенных нагрузок все пространственно-ограниченные экологические системы разделить на три категории:

- 1) уникальные, или заповедные – полностью исключается выпадение (гибель) любого биологического вида;
- 2) широко распространенные естественные – возможны некоторые (частичные) изменения при сохранении основных параметров экосистемы и высокого качества окружающей среды;
- 3) сильно преобразованные или искусственные – возможны любые обоснованные практическими задачами антропогенные изменения.

Достойно сожаления, что несмотря на разумность, рациональность и очевидную плодотворность такого подхода, в течение прошедших более 35 лет после выхода монографии (Израэль, 1979), предложенная автором концепция не получила сколько-нибудь заметного развития. То же можно сказать и о других перспективных подходах (Казначеев, 1973; Алексеев, 1974; Реймерс, 1974; Преображенский, Райх, 1974; Прохоров, 2003). Основная причина, на наш взгляд, кроется в принципиальных трудностях, которые неизбежно возникают при любых попытках перейти от нечетких, качественных категорий и понятий, на которых были основаны дефиниции различных систем (*общность людей, определенное пространство, некоторые частичные изменения, сохранение основных параметров, высокое качество среды, обоснованные изменения и т.п.*) к содержательным количественным мерам и критериям.

Причина отсутствия развития, на первый взгляд, плодотворной концепции «антропоэкосистемы» (Преображенский, Райх, 1974; Прохоров, 2003), кроется, по нашему мнению, в её явном «антропоцентризме», т.е. направленности на решение задач экологии человека, где сама природная среда играет роль лишь «фона», субстрата, на котором стихийно произрастают и по чуждым природе человеческим законам развиваются различные антропоэкосистемы. По идее, категория «антропоэкосистем» (Прохоров, 2003) должна стать частью общей классификации пространственно-ограниченных экосистем всех видов и рангов – от нетронутых природных («заповедных») комплексов до полностью преобразованных человеком антропоэкосистем (например, промышленных и урбанизированных территорий).

С этих позиций наиболее перспективными для развития общей теории природных комплексов следует признать идеи Н.Ф. Реймерса (1974) (антропосистема) и Ю.А. Израэля (1979) (три категории систем) с выделением трех верхних таксонов в иерархии экосистем: природные (естественные, уникальные, заповедные и т.п.), природно-антропогенные (частично преобразованные природные), антропогенные (полностью преобразованные природные). Основное преимущество, которое отличает их от других подходов к классификации пространственно-ограниченных экосистем, состоит в том, что в основе предлагаемых подходов лежат именно экологические (биологические) характеристики параметров системы.

Категории экологических систем в Федеральном законе... (2002)

Значительный прогресс в отношении рационального подхода к классификации экологических систем и к оценке экологического «качества» и, соответственно, экономической ценности различных объектов биосферы, был достигнут принятием Федерального закона... (2002). Концепция этого закона отражена в приведенных выше определениях основных понятий (Ст. 1), принципиально новым и исключительно плодотворным и важным элементом которых служат понятия ***окружающая среда, природная среда*** с четким разделением ***компонентов природной среды*** (по существу, объектов биосферы/техносферы – земля, недра, воздух, воды, животный мир, ...) на ***природные, природно-антропогенные и антропогенные объекты***.

При этом понятие «экосистема» напрямую появляется в Федеральном законе (2002) всего в одном качестве, а именно как «***естественная экологическая система***» в перечне основных понятий и в определении термина ***природный объект*** («естественная экологическая система...») (Ст. 1). Однако понятия ***природные, природно-антропогенные и антропогенные объекты*** при желании можно трактовать как соответствующие категории экосистем, определения которых практически совпадают с классификацией Ю.А. Израэля (1979).

В концептуальных определениях понятий, которыми оперирует Федеральный закон (2002), явно прослеживается дифференцированный подход к оценке ***качества окружающей среды*** для разных категорий объектов окружающей среды; это видно из следующих определений (Ст. 1):

- ***естественная экологическая система*** – ...часть природной среды, которая имеет пространственно-территориальные границы...;
- ***природный комплекс*** – комплекс... связанных между собой природных объектов, объединенных географическими и иными соответствующими признаками;

- **качество окружающей среды** – состояние окружающей среды, которое характеризуется физическими, химическими, биологическими и иными показателями и (или) их совокупностью;
- **благоприятная окружающая среда** – окружающая среда, качество которой обеспечивает устойчивое функционирование **естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов**;
- **негативное воздействие на окружающую среду** – воздействие хозяйственной и иной деятельности, последствия которой приводят к негативным изменениям **качества окружающей среды**.

Отмечая попутно уже упомянутую тавтологию («негативное воздействие» – «негативные изменения») и терминологическую путаницу в определении понятия «благоприятная окружающая среда» (которое, согласно данным в Ст. 1 определениям, следует толковать как «благоприятная природная среда», поскольку речь идет только о природных и природно-антропогенных объектах, см. выше), следует отметить, что основным критерием благополучия служит «устойчивое функционирование». Разумеется, это понятие также нуждается в определении и толковании, но его уже можно использовать в практических разработках, основываясь хотя бы на частично разработанных научных либо неформализованных (интуитивных) представлениях об устойчивости природных комплексов и экосистем.

В целом, рассмотренные нами определения и толкования, применяемых в Федеральном законе... (2002) понятий и терминов дают достаточно широкую концептуальную основу для разработки классификации разного вида и ранга экологических систем и пространственно-ограниченных природных комплексов, начиная от основных категорий (верхних таксонов в иерархии) – **природных, природно-антропогенных и антропогенных систем**.

Примеры практического применения: «зонирование» промышленной и городской территории

Пример попытки «зонирования» территории промышленного освоения (в нашей классификации – «антропогенной системы») по степени антропогенной нагрузки содержится в работе Е.В. Хлобыстова (1998) по анализу и нормированию экологической безопасности промышленного производства. По его представлениям, площадь, занимаемую промышленным предприятием вместе с прилегающей территорией можно разделить на четыре зоны, в соответствии с убыванием степени вредного воздействия предприятия: **территория предприятия, зона воздействия предприятия,**

зона загрязнения предприятия, ареал вредного воздействия предприятия.

Этот подход вряд ли может получить практическое развитие из-за груза банальных неопределенностей (о чем уже говорилось выше) – «отдельные реципиенты», «значительное», «вредное техногенное воздействие», – совершенно неизбежных при отсутствии внятной концепции экологического нормирования, содержащей количественные критерии экологического ущерба.

Проблема классификации окружающей человека среды по степени антропогенной трансформации в последние десятилетия в связи с ростом урбанизации приобретает особую актуальность в контексте формирования устойчивой городской среды, как среды обитания основной массы населения. Очевидно, что основным системообразующим природным компонентом окружающей (внешней) среды в городе является почва. Именно поэтому состоянию почв в городах стали уделять особое внимание. Идея классификации городской среды отражена, в частности, в методических указаниях по гигиенической оценке качества почвы в населенных пунктах (Почва..., 1999), в которых объекты наблюдения классифицируются по функциональным признакам: жилая зона, детские дошкольные и школьные учреждения, территории дворов и т.п.

Близкий подход к классификации городской среды был предложен А.В. Раппопортом (2004), который проводил комплексные экологические исследования территорий городских ботанических садов, находящихся в разных климатических зонах и подвергающихся разной степени антропогенного воздействия. Предложенная им методология позволяет подбирать почвы и флористические наборы для разных экологических условий и разных режимов землепользования в городах. Эта работа ясно демонстрирует дифференцированный подход к оценке качества окружающей среды в зависимости от категории городской антропоэкосистемы.

Таким образом, в настоящее время можно найти лишь редкие примеры практического применения идеи классификации пространственно-ограниченных экологических систем.

Перспективная стратегия

Передовые идеи

Наиболее яркие и содержательные идеи и концепции в области взаимоотношения человеческого общества и природы были приведены в монографии (Ветров, Казаков, 2010) на основе обзора перспективных подходов к регулированию природопользования, появившихся в этой области к началу XXI века. На этих подходах и идеях может быть основана стратегия решения проблемы ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду в России.

По мнению О. Kinne (1997), ключевые вопросы в решении проблемы – место человека в природе (***«человек существует внутри,***

а не вне природы») и взаимоотношения экономики и экологии («экономика против экологии»).

Главная идея философии устойчивого развития: **от антропоцентризма к экоцентризму.** По концепции Н.Ф. Реймерса (1992), все три блока глобальной системы «биосфера-общество-человек» рассматриваются как подсистемы, интегрированные в единую социо-экологическую («биоэкономическую», «социоприродную») систему мира. Главная мировоззренческая идея: необходимость коренного изменения парадигмы индустриального общества. Согласно положениям экотеки (Kinne, 1997), многие экологические проблемы представляют по своей сути этические проблемы, а этический принцип лежит в основе гармонизации природы и общества.

Можно выделить некоторые передовые идеи и концептуальные принципы в рассматриваемой области «защиты окружающей среды», которые лежат в основе регулирования природопользования в развитых странах (Ветров, Казаков, 2010):

- философия устойчивого развития: от антропоцентризма к экоцентризму;
- здоровая экосистема – залог здоровья людей и процветания экономики;
- перестройка экономики в сторону сокращения производства энергии и отходов;
- принцип «платит тот, кто загрязняет» – основной инструмент стимулирования природоохранной деятельности;
- ранжирование экосистем по категориям хозяйственного использования;
- переориентация природопользования в сторону общества экономии природных ресурсов.

Эти идеи и концептуальные основы принимались во внимание при рассмотрении направлений природоохранной деятельности, которые, по нашему мнению, должны играть ключевую роль в стратегии решения проблемы «защиты окружающей среды» в России, а именно:

- Классификация экологических систем.
- Разработка методологии эколого-экономического ущерба;
- Определение понятия «эколого-экономическая безопасность» и методология её оценки.
- Разработка методологии и практических методов экологического нормирования.
- Обоснование программ экологического мониторинга и методологии оценки состояния экосистем.

Первое из этих направлений было рассмотрено выше. Ниже мы даем краткую характеристику состояния дел по каждому из остальных направлений и формулируем актуальные задачи исследований.

Эколого-экономический ущерб

Анализ понятий «**вред**» и «**ущерб**» окружающей среде, широко применяемых в природоохранном законодательстве (см. выше), привел нас к неутешительному выводу, что их затруднительно использовать при разработке практических методов оценки антропогенного воздействия на окружающую среду. Остается наметить возможные пути улучшения ситуации с экономической оценкой экологического ущерба, отталкиваясь от современного состояния проблемы.

Все имеющиеся на сегодня правовые и нормативные документы декларируют оценку ущерба для природы в понятиях и категориях, являющихся по своей сути обоснованием исключительно экономических потерь для хозяйства и последствий для социальной сферы человека, что находится в явном противоречии с основным постулатом философии устойчивого развития: **от антропоцентризма к экоцентризму**.

До недавнего времени было принято считать, что основополагающий принцип оценки экологического ущерба в результате загрязнения окружающей среды, лежащий в основе существующих на сегодняшний день подходов, может быть сформулирован следующим образом: при загрязнении окружающей среды на уровне, не превышающем пороговых значений (ПДК, ПДУ, ОДУВ и т.п.), ущерб абсолютно не эластичен и равен нулю (Измалков В.И., Измалков А.В., 1998). Однако в настоящее время это утверждение находится в противоречии с Федеральным законом... (2002), в котором один из основополагающих принципов охраны окружающей среды (Ст. 3) говорит о **презумпции экологической опасности** любой планируемой хозяйственной или иной деятельности. Кроме того, в этом же Законе к видам негативного воздействия в результате загрязнения относятся: «выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и иных веществ ... **независимо от их количества**» (Ст. 16, п. 2, см. выше, п. «Негативное воздействие...»).

Таким образом, обратная сторона принципа презумпции экологической опасности приводит к заключению, что при достижении (а тем более превышении) ПДК, ПДУ и т.п. пределов, экологический ущерб становится абсолютно эластичным и, следовательно, сколь угодно большим (Измалков В.И., Измалков А.В., 1998).

Другой важный методологический вопрос, требующий решения при оценке эколого-экономического ущерба – необходимость учета фактора времени, т.е. продолжительности негативного воздействия на окружающую среду и человека и, соответственно, динамики во времени негативного воздействия и «эффектов» от него.

Ключевой проблемой взаимоотношений экологии и экономики остается игнорирование экологического фактора в процессе экономического развития и принятия стратегических решений. Среди причин традиционной коллизии **«экономика против экологии»**

следует отметить отсутствие цены, стоимостных оценок экологических ущербов и выгод от сохранения чистой окружающей среды, поддержания экосистемных функций, недоучет экстерналий (внешних) издержек. В современной экономике действует суровое правило: то, что не имеет цены или экономической оценки, не существует для экономики и игнорируется в процессе принятия решений. Это означает, что заболеваемость и смертность населения от загрязнения окружающей среды, различные экологические ущербы просто не учитываются в процессе принятия хозяйственных решений, разработки программ и планов и т.п. Проведенные Всемирным Банком расчеты на основе методики истинных сбережений (*genuine savings*) показали значительное расхождение традиционных экономических показателей и экологически скорректированных. Например, для европейских стран ущерб для здоровья от загрязнения среды на макроуровне доходит до 3-5% ВВП (Бобылев, 2004).

В монографии (Ветров, Казаков, 2010) дается краткий обзор методов экономической оценки экологического ущерба, принятых в большинстве развитых стран. Принятые в передовых странах принципы экологического регулирования служат как один, из инструментов для достижения главной цели – сохранения и восстановления природных комплексов **«до желательного состояния»**. В этом проявляется приверженность западного менталитета принципу «серой зоны» в этических и юридических нормах, который гораздо ближе «природе вещей» реального мира, нежели принципы жесткого регулирования, характерные для российского менталитета во всех сферах управления. «Жесткое» (прямолинейное, «волевое») регулирование природных процессов всегда рискованно для экологии и экономики, и в итоге неэффективно в долгосрочном плане. По нашему мнению, в основу решения проблемы оценки эколого-экономического ущерба должна быть положена концепция **единой социо-эколого-экономической системы** Н.Ф. Реймерса (1992). Основное положение концепции: экономика должна выйти за пределы цепочки «товар – деньги – товар» в область **«природная система – природные ресурсы – товар – деньги – воспроизводство природных систем»**, что вполне соответствует философии устойчивого развития (от антропоцентризма к экоцентризму). На деле это означает, что переход к устойчивому развитию делает необходимым включение экологического фактора в систему основных социально-экономических показателей развития. А это, в свою очередь, требует разработки стоимостных оценок экологических ущербов. Например, использование показателей истинных сбережений вместо ВВП более объективно отражает реальный совокупный капитал общества (Бобылев, 2004).

В итоге, можно указать на две ключевые задачи для решения проблемы оценки эколого-экономического ущерба: разработку кон-

цепции **единой социо-эколого-экономической системы** (Реймерс, 1992) и разработку стоимостных оценок экологических ущербов в рамках общей методологии показателей истинных сбережений.

«Эколого-экономическая безопасность»

В последние десятилетия широкую популярность получили разнообразные вариации на общую тему «безопасности» общества от различных «вызовов» и «угроз», в частности, со стороны внешней («окружающей») среды. Проблема упорно ставится с ног на голову: обществу предлагается постоянно заботиться об обеспечении собственной безопасности в связи с «угрозами» со стороны враждебной окружающей среды. Примером может служить классическое (для рассматриваемого образа узковедомственного и утилитарного мышления) определение понятия «экологическая безопасность» (Гордеев, 2004): «Приемлемая на данном этапе социально-экономического развития степень защищенности жизненно важных интересов личности, общества, государства, мирового сообщества от последствий и угроз, которые обусловлены негативными изменениями (деградацией) окружающей среды, возникающими в результате антропогенного и природного воздействия на неё».

Под это определение можно подвести любую самую разрушительную для природы деятельность по обеспечению «экологической безопасности» личности и (что особенно ценно для чиновников) государства, сообразуясь с «приемлемым» («допустимым» и т.п. эластичными терминами) уровнем деградации окружающей среды.

Е.В. Хлобыстов (1998) в своей работе по анализу и нормированию «экологической безопасности» промышленного производства демонстрирует типичную для этой темы путаницу в понятиях «опасность» и «безопасность». Приведенная им схема расчета т.н. «интегрального показателя экологической опасности» (*или безопасности?*) промышленного предприятия – наглядный пример бюрократического подхода к оценке воздействия отдельного промышленного объекта на окружающую среду, совершенно неэффективного в деле реальной защиты окружающей среды.

Как показывает анализ практики применения разного вида «комплексных показателей» экологической опасности/безопасности, широко используемых в официальной отчетности, они имеют слабое отношение к живой природе и её проблемам и демонстрируют беспомощность в регулировании антропогенных воздействий на собственно природную среду, т.е. **природные и природно-антропогенные комплексы/объекты** в терминах Федерального закона... (2002). В то же время «комплексные показатели» могут быть полезными индикаторами состояния **антропогенных комплексов/объектов** (промышленные и урбанизированные территории) – но только в аспекте безопасности окружающей среды для человека.

Экологическое нормирование

В Ст. 1 Федерального закона... (2002) даются достаточно внятные определения и толкования понятий и терминов, относящихся к проблеме так называемого «экологического нормирования»: **нормативы в области охраны окружающей среды** (также – **природоохранные нормативы**), **нормативы качества окружающей среды**, **нормативы допустимого воздействия на окружающую среду**, **нормативы допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду**.

Оставляя без внимания некоторые рутинные неопределенности («устойчивое функционирование естественных экологических систем», «благоприятная окружающая среда»), следует признать что термины и понятия, которыми оперирует основополагающий в природоохранной деятельности Федеральный закон... (2002), в достаточной степени соответствуют задачам экологического нормирования как инструмента ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду.

Детальный анализ ситуации с экологическим нормированием в практике «защиты окружающей среды» в России был представлен в монографии (Ветров, Казаков, 2010). По результатам этого анализа ключевыми задачами при решении проблемы экологического нормирования должны быть следующие:

- поиск и определение количественных критериев пограничных состояний биологических систем, разделяющих состояния «нормы» и «патологии»;
- отказ от жестких стандартов (типа ПДК, ПДУ, ЭДУ и т.п.) в пользу методологии оценки **«желательного состояния»** конкретных экосистем, с учетом степени их антропогенной трансформации;
- разработка методологии экологического нормирования химического загрязнения компонентов природных систем, основанной на сохранении «доиндустриальных» уровней геохимического фона в природных экосистемах всех рангов;
- систематизация и картирование пространственно-ограниченных экологических систем (геосистем) на всей территории страны по трем основным категориям антропогенной нагрузки (**природные, природно-антропогенные и антропогенные комплексы**) для разработки интегральных программ «экологической оптимизации» – создания условий для поддержания экологического равновесия и видового разнообразия.

Экологический мониторинг и оценка состояния экосистем

Согласно определению в Федеральном законе... (2011) **«государственный экологический мониторинг** (государственный

мониторинг окружающей среды) – комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды». По существу, эти положения полностью соответствуют «каноническому» определению в виде трех основных взаимосвязанных направлений (этапов) деятельности в области мониторинга окружающей среды: наблюдения, оценка, прогноз (Израэль, 1979).

В свое время нами было принято более широкое концептуальное определение мониторинга антропогенных изменений природной среды как **системы наблюдений, оценки и прогноза состояния среды с целью научного и информационного обеспечения управления качеством среды** (Ветров, 1985). Это дополнение к «каноническому» определению ставит мониторинг в строго подчиненное положение по отношению к практическим задачам контроля и управления качеством природной среды во всей сфере взаимоотношений общества и природы, которые в разных разделах и формулировках отражены в Федеральных законах... (2002, 2011). В частности, в Ст. 1 Федерального закона (2002) в определении термина **оценка воздействия на окружающую среду** целью деятельности по «выявлению... последствий воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности» декларируется «принятие решения о возможности или невозможности ее осуществления». В Федеральном законе... (2011, Ст. 63.1) федеральным органам исполнительной власти вменяется в обязанность «выработка предложений о предотвращении негативного воздействия на окружающую среду...» «при подготовке документов территориального планирования... в интересах нынешнего и будущего поколений».

Наибольшее количество вопросов вызывает этап в деятельности экологического мониторинга «Оценка состояния среды», критериями которой должны быть нормативы качества окружающей среды, которые «устанавливаются **для оценки состояния окружающей среды** в целях сохранения естественных экологических систем...» (Федеральный закон..., 2011, Ст. 21).

Следуя нашему определению, приведенному в работе (Ветров, 2015), конкретная экосистема (в классификации и иерархии **природных, природно-антропогенных и антропогенных комплексов**) должна описываться некоторым набором абиотических и биологических параметров (показателей) природных сред, характеризующих и описывающих «образ» системы в её некотором исходном состоянии («норме»). Количественные значения этих параметров (показателей) должны играть роль индикаторов состояния системы и его изменения под действием антропогенных или природных факторов. Оценка состояния экосистемы состоит в отве-

тах на два вопроса: 1) каковы отклонения параметров состояния экосистемы от «нормы»? и 2) выходят ли эти отклонения за установленные пределы («экологические нормы»)?

Таким образом, задачи всех трех этапов собственно **экологического мониторинга** (наблюдения, оценка, прогноз) должны решаться в тесной связи с решением задач **классификации экологических систем** – в части проектирования набора наблюдаемых показателей и сети наблюдений, и задач **экологического нормирования** – в части оценки и прогноза состояния системы.

Заключение

1. Для гармонизации взаимодействия общества с природой требуется объективная оценка последствий влияния человека на окружающую среду в двух базовых взаимосвязанных параметрах – экологическом и экономическом. «Охрана окружающей среды» есть, по существу, охрана природных ресурсов: любое негативное воздействие на природные системы и ресурсы должно рассматриваться как «ущерб природным ресурсам».

2. Термины и понятия, которыми оперирует основополагающий в природоохранной деятельности Федеральный закон... (2002), в достаточной степени соответствуют задачам ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду в России. Это дает достаточно широкую концептуальную основу для разработки классификации экологических систем и пространственно-ограниченных природных комплексов, начиная от основных категорий (верхних таксонов в иерархии) – **природных, природно-антропогенных и антропогенных систем**.

3. Решение проблемы ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду в России и мире должно опираться на передовые подходы и идеи в области взаимоотношения человеческого общества и природы. Ключевые направления стратегии «защиты окружающей среды» в России:

- классификация экологических систем;
- разработка методологии эколого-экономического ущерба;
- определение понятия «эколого-экономическая безопасность» и методология её оценки;
- разработка методологии и практических методов экологического нормирования;
- обоснование программ экологического мониторинга и методологии оценки состояния экосистем.

4. Основные направления в решении задачи оценки эколого-экономического ущерба: разработка концепции **единой социо-эколого-экономической системы** (Реймерс, 1992) и разработка стоимостных оценок экологических ущербов в рамках общей методологии показателей истинных сбережений.

5. «Комплексные показатели» экологической опасности/безопасности, широко используемые в официальной отчетности, по существу, не имеют отношения к регулированию антропогенных воздействий на собственно природную среду. Они, могут быть полезными индикаторами состояния **антропогенных комплексов/объектов** (промышленные и урбанизированные территории) – но только в аспекте безопасности окружающей среды для человека.

6. Ключевые направления при решении проблемы экологического нормирования:

- поиск и определение количественных критериев состояния «нормы» и «патологии» природных экосистем;
- отказ от жестких стандартов (типа ПДК, ПДУ, ЭДУ и т.п.) в пользу методологии оценки **«желательного состояния»**;
- развитие подхода к экологическому нормированию, основанного на сохранении «доиндустриальных» уровней геохимического фона;
- систематизация и картирование пространственно-ограниченных экологических систем (геосистем) на всей территории страны по трем основным категориям антропогенной нагрузки: **природные, природно-антропогенные и антропогенные комплексы**.

7. Задачи всех трех этапов построения системы **экологического мониторинга** (наблюдения, оценка, прогноз) должны решаться в тесной связи с решением задач **классификации экологических систем** (в части проектирования набора наблюдаемых показателей и сети наблюдений) и **экологического нормирования** (в части критериев для оценки и прогноза состояния системы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.П. 1974. География человеческих рас. –М.: Мысль. 352 с.
- Бобылев С.Н. 2004. Экологические аспекты макро-экономической политики. Международная научно-практическая конференция МГУ-СУНИ «Человечество и окружающая среда». 26-28 окт. 2004 г. Россия, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. Сборник материалов. –М.: Изд. МГУ, с. 93-94.
- Вайцеккер Э.У., Отт Г.Э. 1998. Налоги на плохое, а не на хорошее. Наша планета. Т. 9. № 6. с. 1.
- Ветров В.А. 1985. Некоторые вопросы построения системы наблюдений за гидрохимическим состоянием оз. Байкал. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 7. –Л.: Гидрометеиздат. с. 37-50.

- Ветров В.А., Казаков С.В. 2010. Природопользование и ядерная энергетика в России. –М.: Атомэнергоиздат. 415 с.
- Ветров В.А. 2015. Обоснование программ экогеохимического мониторинга природных сред в регионе озера Байкал. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 26. № 1. –М.: ИГКЭ. с. 9-27.
- Гордеев А.И. 2004. Управление эколого-экономической безопасностью субъекта Федерации. Бюллетень по атомной энергии. № 6. с. 28-31.
- Измалков В.И., Измалков А.В. 1998. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. –С.-Пб.: РАН. С.-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности. 482 с.
- Израэль Ю.А. 1979. Экология и контроль состояния природной среды –Л.: Гидрометеиздат. 375 с.
- Казначеев В.П. 1973. Биосистема и адаптация. Новосибирск: Наука. 73 с.
- Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д. 2007. Пределы роста. 30 лет спустя. –М.: ИКЦ «Академкнига». 342 с.
- Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Методические указания МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». 1999.
- Преображенский В.С., Райх Е.Л. 1974. Проблемы экологии человека и география. В кн.: Теория и методика географических исследований экологии человека. –М.: ИГ РАН. с. 12-22.
- Прохоров Б.Б. 2003. Формирование теории антропоэкосистем. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 19. – С.-Пб.: Гидрометеиздат. с. 237-255.
- Раппопорт А.В. 2004. Ботанические сады и их почвы как пример устойчивого развития городских экосистем – В кн.: Международная научно-практическая конференция МГУ-СУНИ «Человечество и окружающая среда». 26-28 окт. 2004 г., Россия, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. Сборник материалов. –М.: Изд. МГУ. с. 92.
- Реймерс Н.Ф. 1974. Экология человека как междисциплинарная научная отрасль. В кн.: Теория и методика географических исследований экологии человека. –М.: Изд. ИГ РАН. с. 29-37.
- Реймерс Н.Ф. 1990. Природопользование. Словарь-справочник. –М.: Мысль. 639 с.

Реймерс Н.Ф. 1992. Надежды на выживание человечества. Концептуальная экология. –М.: Изд. центр «Россия молодая». 363 с.

Сукачев В.Н. 1964. Основы лесной беогеоценологии. –М.: Наука. 22 с.

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

Федеральный закон РФ «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. ФЗ-№ 7. Принят Государственной Думой 20 декабря 2001г.

Федеральный закон РФ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21 ноября 2011 г. ФЗ-№331. Принят Государственной Думой 2 ноября 2011 года.

Хлобыстов Е.В. 1998. Методология анализа и нормирования экологической безопасности промышленного производства. Экология городов и рекреационных зон: матер. междунар. научн.-практ. конф. Одесса. с. 87-94.

Яблоков А.В., Юсуфов А.Г. 1981. Эволюционное учение. – М.: Высшая школа. 343 с.

Kinne O. 1997. Marine Ecology Progress Series, v. 153, No 1-3.

Tansley A.G. 1935. The use and abuse of vegetation concepts and terms. Ecology. v. 16. No 3. 284-307.

Wackernagel M., Schulz N., Deumling D., Linares A.C., Jenkins M. et al. 2002. Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy. Proc. of the Acad. of Sci. v. 99, No. 14. pp. 9266-9271.

УДК 630.52: 630.181: 630.161.32

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЛЕСОВ (ОБЗОР ПОДХОДОВ)

М.Д. Корзухин

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, mdkorz@gmail.com

Резюме. Обсуждаются принципы и возможности расчета чистой первичной продукции (*NPP*) лесов с помощью современных математических моделей. Приводятся примеры приложений – оценок *NPP* при изменениях климата в XXI веке. Цитируемые 80 (в основном зарубежных) работ помогут читателю ориентироваться в интенсивно развивающейся области, использующей идеи и теории, слабо известные в России.

Ключевые слова. Продуктивность лесов, изменение климата, расчетные оценки продуктивности, моделирование.

QUANTITATIVE ESTIMATES OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON FOREST PRODUCTIVITY (REVIEW OF APPROACHES)

M.D. Korzukhin

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia, mdkorz@gmail.com

Summary. The paper discusses the principles and approaches to the calculation of net primary production (*NPP*) of forests using modern mathematical models. Examples of *NPP* estimates under climate change for the 21st century are presented. The 80 literature sources (mainly non-Russian) cited in the paper can help the readers to navigate the actively developing scientific area that is built upon theories and ideas not very well known in Russia

Keywords. Forest productivity, climate change, productivity simulation, modeling.

Каждая страна имеет свой обычай по климату своему (по особому ее строения чину солнечного ради обхождения и воздушного пошества) ? Зиновий Отенский (ученик Максима Грека), XVI в. от Рождества Христова

(цитата по: С.М. Соловьев, История России с древнейших времен, т. 7, гл. 1)

Введение

Заявленная тема является частью общей проблематики, касающейся изучения влияния климата на состояние лесов. Среди мно-

гих параметров состояния важнейшими, по-видимому, можно считать область распространения (ареалы пород), видовой состав, и скорость образования фитомассы (поглощения = ассимиляции углерода). Последняя величина обозначается как *NPP* (Net Primary Production – нетто-продуктивность растительности); предмет настоящей статьи состоит в изложении современных возможностей расчета и прогноза *NPP* при изменениях климата. При извлечении из статей результатов расчетов возникают проблемы: в некоторых случаях авторы не выделяют *NPP* из суммарного баланса С, а глобальные модели дают суммарное *NPP* по всем биомам, не выделяя из них собственно лесные; оценки (напр., Del Grosso et al., 2008) показывают, что глобально $NPP_{\text{forest}} / NPP_{\text{sum}} \sim 0,62$; надеюсь, что из контекста будет понятно, какая именно ситуация имеет место.

Статья не претендует на исчерпывающий обзор состояния области исследований с многими сотнями публикаций. Приводимые работы носят характер представительных примеров в рамках основных направлений. В качестве приложения методов расчета *NPP* приводятся прогнозные оценки, полученные для ожидаемого климата XXI в. Применяемые авторами прогнозные сценарии климата (и лежащие в их основе модели) весьма разнообразны; ниже берутся наиболее вероятные, средние варианты; соответствующие ссылки могут быть найдены в цитируемых работах и не приводятся для облегчения изложения.

Методы и материалы

Методические замечания

Поскольку мы рассматриваем не отдельное дерево, а растительный покров, то *NPP* – это количество углерода, ассимилированного или единицей площади растительного покрова за год, с единицей измерения $\text{г} \cdot \text{С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (удельная величина), или абсолютное количество, $\text{г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$, если рассматривается цикл углерода некоторой территории. По физическому смыслу этого понятия, нетто-продуктивность растительности есть:

$$NPP = GPP - Ra, \quad (1)$$

где *GPP* (Gross Primary Production) – первичная брутто-продуктивность (количество поглощенного углерода);

Ra – суммарные затраты на дыхание растений.

Если стоит задача оценки запасаемого в системе углерода, то из *NPP* следует вычесть величину *Loss* – прочих потерь углерода. В зависимости от объекта, задачи и типа данных, которые предполагается описывать моделью, величина *Loss* имеет разное «наполнение». Если объект – отдельное дерево и исследуется его собственный рост, то:

$$Loss = Decay, \quad (2)$$

где *Decay* – опад листвы, ветвей и корней.

Если рассматривается ансамбль деревьев (насаждение), то к *Loss* добавляется отпад (гибель деревьев). Баланс углерода экосистемы требует введения гетеротрофного дыхания почвы *Rh*, что дает величину:

$$NEP = NPP - Rh \quad (3)$$

где *NEP* (Net Ecosystem Productivity) – нетто-продуктивность экосистемы.

При учете внешних факторов можно ввести потерю биомассы из-за нападения любых ее природных (насекомые, травоядные и т.д.) или антропогенных (напр., рубки) потребителей, а также вынос из экосистем растворенного органического и неорганического углерода; из внешних факторов существенны пожары. Все эти факторы продолжают действовать для объектов более высоких уровней – от ландшафтов до лесорастительных зон.

Отклик *NPP* территории на изменение климата происходит, вообще говоря, по двум причинам (коллектив исследователей VEMAP Members, 1995): структурной – из-за изменений площадей биомов, и функциональной – из-за изменения удельной *NPP* данного биома.

Наведению понятийного порядка помогло бы введение индексов, различающих эти варианты – *NPP_K*; также удобно было бы ввести свои обозначения для удельной (напр., *NPP* или *npp*) и абсолютной (напр., *NPP*) продуктивности.

Основные виды данных

Для расчета и прогноза обычно используются базовые климатические параметры:

- температура воздуха – *T* (°C, обычно на высоте 2 м);
- осадки – *P* (мм, за нужный период, или их производная);
- *W* – влажность почвы, мм в слое выбранной толщины);
- концентрация углекислого газа в приземном слое воздуха – [*CO₂*] (ppm);
- фотосинтетически активная радиация – *Q* (в нужных единицах);
- дефицит упругости водяного пара в воздухе – *D* (кПа).

Прогнозные значения этих величин получаются с использованием тех или иных моделей общей циркуляции атмосферы – GCMs (General Circulation Models).

Огромное количество лесных данных по продуктивности может быть использовано для «запуска» прогнозных моделей с расчетом *NPP*, но практически непригодно для собственно прогноза при изме-

нении климата; в благоприятном варианте данные годятся для (несомненно важной) задачи прогноза при неизменном климате. Основные типы таких данных:

- Базы данных с пробных площадей: Замолодчиков и др. (2003) (крупнейшая из имеющихся для СССР – 535 пробных площадей); Усольцев (2007) (1134 пробных площадей в Северной Евразии, прил. 16); Уткин и др. (1994); Del Grosso et al. (2008) (крупнейшая из имеющихся мировых баз данных – 5600 пунктов, доступна на http://daac.ornl.gov/NPP/html_docs/EMDI_des.html); Olson et al. (2001): описание баз данных, касающихся измерений *NPP* с целью дальнейшего моделирования (2523 пунктов и 5164 значений в $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ сетке); Luysaert et al. (2007): общедоступная мировая база данных (513 пунктов), основные компоненты углеродного баланса и их зависимость от T , P .
- Дистанционно определяемые значения *LAI* (см. обзор в Грабовский и др., 1915) и *NPP* (Running et al., 2004), которые могут использоваться для калибровки моделей.
- Ввиду полного охвата ими территории России, особо ценны ежегодные государственные отчетные данные (напр., Лесной фонд..., 2007). Привлекательная возможность использовать их для отслеживания динамики лесов России – иллюзорна (см. обсуждение в Лесные ресурсы..., 2013, стр. 28-29).

Современная «средняя» лесная модель содержит до нескольких десятков параметров, которые, как правило, невозможно достоверно определить для рассматриваемого объекта. Высокая развитость моделирования в лесной экологии позволяет подбирать многие значения в литературе. Таблицы параметров накапливаются десятилетиями. Уже в 1993 году вышла работа (Wullschlegel, 1993) со сводкой значений максимальных скоростей карбоксилирования ($V_{c_{max}}$) для модели Фаркуара; для этой модели есть сводки параметров температурных зависимостей (Medlyn et al., 2002). Сводка данных по значениям максимальной устьичной проводимости для многих видов приведена в Körner (1995). Собираение значений параметров для т.н. «gap models» начал Botkin et al. (1972); оно продолжилось, например, в Forest Succession... (1981); Korzukhin et al., 1989; Nikolov, Helmisaari (1992); Shuman (2010). Большая сводка экофизиологических параметров приведена в White et al. (2000).

Основные модельные подходы и примеры прогноза продуктивности

Расчет (прогноз) *NPP* для лесов на любых территориях может проводиться в рамках двух «макро» подходов – эмпирического и механизменного; возможны промежуточные модели смешанного типа, в которых, например, общая форма описания – физична, а некоторые внутренние зависимости – регрессионны.

Эмпирические модели

При эмпирическом подходе к проблеме используются регрессионные зависимости и нахождения *GPP* и *Ra* не требуется. Идея, например, прогноза проста: пусть *c* – параметры климата; по данным наблюдений для выбранной породы или группы пород находим зависимость

$$NPP(c). \quad (4)$$

Пусть *x*, *y* – географические координаты; текущий климат имеет значения $c_0(x, y)$, что дает соответствующее значение $NPP_0(x, y) = NPP(c_0(x, y))$, а прогнозный – $c_1(x, y)$, что дает прогноз продуктивности $NPP_1(x, y) = NPP(c_1(x, y))$. Схема может быть применена к любому параметру растительности независимо от прочих параметров (напр., для прогноза *GPP* или смены набора пород в данной точке); это значит, что полученные оценки будут не согласованы в отношении соблюдения баланса потоков углерода.

Примеры прогноза

Биоклиматическая модель MIAMI (Lieth, 1975), по-видимому, наиболее популярна. В удобной записи формулы выглядят так ($k_1..k_5$ – свободные параметры):

$$\begin{aligned} NPP &= \min[f_1(T), f_2(P)]; \\ f_1(T) &= k_1 / (1 + k_2 \times \exp(-k_3 \times T)); \\ f_2(P) &= k_4 \times (1 - \exp(-k_5 \times P)). \end{aligned} \quad (5)$$

Meyer (1988) применил модель для расчета долговременной эволюции *NPP* со времени последнего оледенения (около 20 тыс. лет назад).

Pittock and Nix (1986) для половины территории Австралии нашли, что к середине нынешнего столетия *NPP* возрастет на 20%.

Zhang et al. (1996) оценили изменение состояния растительности Тибетского плато при потеплении на 4°C, увеличении *P* на 10% и удвоении [*CO*₂]; результаты прогноза *NPP* неизвестны ввиду недоступности источника.

Модель (4) неоднократно использовалась для прогноза расположения биомов (Smith, Shugart, 1993; Yue et al., 2011 и др.), запаса углерода (Smith, Shugart, 1993) и *GPP* (Beer et al., 2010) при изменении климата.

Механизменные модели

В основе подхода лежит то или иное описание физического устройства объекта.

Предложены модели динамики площадей, занятых лесами, находящимися в разных состояниях (назовем их ADM – Area Dynamics

Models, Модели Динамики Площадей). Базовые уравнения описывают баланс площадей:

$$S(t+1) = B \times S(t), \quad (6)$$

где S – вектор площадей ($\sum S = 1$);

B – матрица удельных скоростей перехода между ними, описывающая процессы смены пород (сукцессии), внешние нарушения, образование и застарение гарей и вырубок.

Если не описывать рубки, то B можно считать постоянной; введение рубок может сделать B зависящей от S и система становится нелинейной. Для привязки к динамике запасов (биомассы деревьев) должны быть заданы кривые хода роста пород от возраста. Подробно устройство типичной модели описано, например, в Лесные ресурсы... (2013), гл. 3. При описании породно-возрастной динамики реальной системы (например, лесов Канады или России) с шагом по времени и возрасту в один год размерность системы (6) имеет порядок нескольких тысяч.

Эти конструкции ориентированы на использование государственной отчетности и, помимо собственно динамики площадей, могут рассчитывать потоки углерода в лесах или лесных экосистемах; величина NPP и ее прогноз могут быть выделены, как часть общего расчета баланса C . Воздействие климата вводится применением регрессионных зависимостей скоростей роста от параметров климата.

Примеры прогноза

1. Удачным примером здесь является модель баланса C для России (Кокорин и др., 2000). Пусть g – базовая (при текущем климате) скорость роста каждой породы (66 пород в отчетности ГУЛФ – государственного учета лесного фонда), а $K_{clim}(T, P, [CO_2], [O_3]) \times g$ – скорость роста при измененном климате; функция влияния выбранных факторов взята линейной

$$K_{clim}(T, P, [CO_2], [O_3]) = 1 + a \times T + b \times P + c \times [CO_2] + d \times [O_3] \quad (7)$$

где (a, b, c, d – регионально- и пороодно-специфичные параметры).

К сожалению, значения и даже знаки параметров не приводятся. Результаты дифференцированы по шести геоклиматическим регионам РФ. Расчеты, проведенные для постоянной интенсивности рубок и пожаров, показали, что суммарное поглощение углерода к середине XXI в. стабилизируется и составит около 150×10^{12} г·С·год⁻¹.

Замолодчиков и др. (2013) осуществили прогноз баланса C для управляемых лесов РФ ($5,5 \times 10^6$ км² из общих $7,4 \times 10^6$ км²), т.е. величины, линейно зависящей от NPP , по ADM модели CBM-CFS3

(Канада) при сохранении текущего климата. Расчет основан на данных ГУЛФ. Сейчас леса поглощают $128 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$, к 2050 году прогнозируется уменьшение стока до $28-63 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ за счет постарения лесов. Результаты полезны при сравнении с расчетами, учитывающими изменение климата.

Та же модель с использованием данных ГУЛФ для всех лесов РФ была применена В.И. Грабовским (частное сообщение) для прогноза динамики ряда пулов С при изменении Т и Р до 2050 г. по сценариям МГЭИК А1В, А2, В1. Для всех пород была найдена регрессионная зависимость скоростей роста $g(T, P)$. Баланс С (в данном случае – сток) уменьшается с $200 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ до $60 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ (постоянный климат), $10-30 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ («мягкие» сценарии А2, В1), и до $-20 \times 10^{12} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ («жесткий» сценарий А1В).

Модель близкого типа была применена для прогноза компонент баланса С для территории США, с учетом изменений в землепользовании и лесных пожаров (Hurt et al., 2002).

Ввиду эмпиричности моделей роста, компоненту баланса *NPP* в приведенных случаях вычлениить невозможно.

2. Если расчет *NPP* делается на основе баланса углерода, то естественно применять базовую формулу (1). Здесь имеется большая группа механизменных («физических», «mechanistic», «process-based») моделей, основанных на морфологических и экофизиологических зависимостях; именно такой подход составляет «мэйн-стрим» мировой науки в обсуждаемой области. Расчет *NPP* обычно производится не сам по себе, но в рамках более общей модели, дающей на выходе значения или только «лесных» переменных, или также и абиотических переменных.

2.1. Динамические модели типа ITM (Individual-Tree Models, модели «в особях») – см. обзор в (Bugmann, 2000), применяются для уровня насаждения (stand). Оперирование деревьями высоко «физично» по очевидным соображениям и позволяет привлекать и интегрировать множество сведений из морфологии, экологии и экофизиологии растений.

Скорость фотосинтеза (или прироста по диаметру) берется пропорциональной производству

$$A \sim \prod f_k(\varphi_k), \quad (8)$$

где φ_k – экологический фактор,

f_k – зависимость от него.

Подход естественно применим к лесу с любым числом пород. На Западе так считают едва ли не с возникновения вычислительных машин (~ 60-е годы). Сейчас мощность машин позволяет обсчитывать большие территории (конечно, не сплошь, но представительными кусочками). Исходно этот

тип моделей был ориентирован на описание лесных сукцессий в многовидовых сообществах и в разных климатических условиях, т.е. на моделирование смен видового состава; расчет углеродного баланса в принципе возможен, но реально проводится редко.

Примеры прогноза

Несмотря на архаичность описания скорости ассимиляции (8) в моделях ITM (в модели EFIMOD – Komarov et al., 2003, есть дополнительные слабые пункты), они применяются в прогнозных расчетах, имеющих реальное прикладное значение.

Авторы модели EFIMOD (Моделирование динамики..., 2007) провели анализ совместного влияния изменения климата и других факторов для бореальных лесов Канады. Изменение удельной *NPP* за 150 лет составит около $+47 \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (порядка 10% от среднего значения *NPP* для этой зоны; результат можно извлечь из таб. 7.4.6 в цитируемой работе).

Lindner et al. (2002): ITM модели SILVA (Pretzsch et al., 2002) и FORESEE(4C) (Bugmann et al., 1997) были применены к расчетам перспектив Лесного Сектора Германии при изменениях климата; модель привязана к данным инвентаризации и включает в себя различные стратегии управления лесами. Найдено, что продуктивность лесов более всего чувствительна к изменениям количества осадков: при сценариях, предсказывающих рост *P*, растет продуктивность ели, сосны и бука. В целом, серьезных изменений для лесного сектора экономики не предвидится.

2.2. Модели более высокого уровня используют идеализацию BLM (Big Leaf Models), когда отдельных деревьев (в модели) нет, а полог представлен сплошным светопоглощающим тонким слоем, иногда распределенным по высоте; все характеристики рассчитываются на единицу поверхности земли. Подход применим к одно- и многовидовому лесу (последнее почти не встречается).

Современное экологическое моделирование активно развивает и использует теоретические построения, касающиеся различных аспектов функционирования растительности. Ниже приводятся некоторые из них (по-видимому, не существует лесной модели, применяющей все эти теории и (под)модели):

а. В центре каждой модели находится та или иная (под)модель фотосинтеза листа. После публикации биохимической модели фотосинтеза Фаркуара (Farquhar et al., 1980, более современный вариант: DePury, Farquhar, 1997)

она быстро стала стандартным инструментом для расчета скорости фотосинтеза и часто применяется в моделях разного уровня – от роста насаждения до глобальных моделей растительного покрова, ориентированных на учет влияния климата. Достоинство ее состоит а) в высокой степени физической обоснованности, и б) в эксплицитном оперировании экологически важнейшими климатическими факторами (T , $[CO_2]$, Q); объединение с моделью устьичной проводимости включает в описание D , а включение в модель роста дерева – возможность учета влажности почвы W . Центральным параметром модели является максимально возможная скорость карбоксилирования $V_{c_{max}}$, $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В массовом применении модели Фаркуара имеются исключения. Например, по неясным причинам она почти не используется в ITM; в модели TEM (Euskirchen et al., 2009) скорость фотосинтеза (или прироста по диаметру) берется в виде произведения (8). Известная глобальная модель SDGVM (Woodward, Lomas, 2004) использует свою простую формулу для NPP .

б. Оптимальная регуляция устьичной проводимости g_s : при любых значениях внешних факторов g_s равна такой величине $g_{s_{opt}}$, чтобы при заданной скорости ассимиляции затраты воды на испарение были минимальны. Теория предложена в (Cowan, 1977), современный расчетный вариант – в (Arneeth et al., 2002; Medlyn et al., 2011). В частности, теория предсказывает немонотонную зависимость g_s от $[CO_2] = C$: функция $g_s(C)$ проходит через максимум при некотором $C = C_{max}$; согласно расчетам, C_{max} лежит во вполне реалистическом диапазоне, $C_{max} \sim 200\text{--}300 \text{ ppm}$, а уменьшение g_s – заметно. Эффект немонотонности $g_s(C)$ наблюдается при измерениях. Поведение g_s от внешних факторов критически важно при осуществлении климатических прогнозов; например, модель Farquhar'a предсказывает монотонный рост $A(C)$, который при больших $[CO_2]$ будет замедляться за счет уменьшения $g_s(C)$.

с. Теория аллометрического поста (MSTF – Metabolic Scaling Theory of Forests – West et al., 1999) исходно была сформулирована для отдельной особи, однако при определенных условиях имеет расширение на растительный покров (Enquist et al., 1998). Пусть m – биомасса дерева (g), N – плотность деревьев (м^{-2}), тогда в соответствии с теорией m и суммарная биомасса $M = m \times N$ связаны с максимальным числом особей N_{max} как:

$$m = a \times N_{\max}^{-4/3}; M = b \times N_{\max}^{-1/3} \quad (9)$$

где (a, b – некоторые параметры), что хорошо подтверждается эмпирически для большого диапазона величин $m, M, N_{\max}$ (Enquist et al., 1998, figs. 2, 3)

$$m = 9191 \times N_{\max}^{-1.341}; M = 103 \times N_{\max}^{-0.325}. \quad (10)$$

Соотношение используется в некоторых динамических моделях глобальной растительности (однако, например, в распространенной модели TRIFFID (Cox, 2001) применен вариант теории для отдельной особи). Современная модификация MSTF содержится в Coomes et al. (2012).

d. В простейшем и часто применяемом в моделях варианте доли ассимилятов, идущие на рост листы (aL), корней (aR) и ствола (aS) – постоянны. Однако, теория оптимального распределения ассимилятов в ходе роста особи давно и активно разрабатывается и применяется в моделях лесной динамики (Cannell, Dewar, 1994; Arora, Boer, 2005; Collalti et al., 2014, McCarthy, Enquist, 2007 и мн. др.). Самый типичный вариант применения – описание увеличения aR при недостатке влаги, и aL при недостатке света; возможно также увеличение вложения в рост в высоту при затенении (Mäkelä, Sievanen, 1992). Критерий распределения – максимизация NPP .

e. Динамика увеличения высоты полога $h_{\max}$ существенна для описания динамики LAI и распределения ассимилятов. Механизм замедления роста в высоту достоверно неизвестен (Ryan et al., 2006); скорее всего, он связан с совместной регулировкой водного и углеродного балансов особи (снижение проводимости ксилемы с высотой и изменение распределения ассимилятов в ходе роста). Предложены различные теории явления (Woodward, Lomas, 2004; Makela, Sievanen, 1992; Zaehle et al., 2007).

f. Оптимальное строение лесного полога как следствие многочисленных адаптаций к освещенности $Q(h)$ (Chen et al., 2012), что нетрудно перевести в зависимость от $LAI^+(h)$ (накопленный листовой индекс выше h) используя уравнение поглощения света в пологе растительности.

f1. Зависимость $V_{c\max}(Q)$ или $V_{c\max}(LAI^+)$ типична для BLMs и соответствует известному различию в скорости ассимиляции между световой и теневой листвой (Nikolov, Zeller, 2003; Dai et al., 2004):

$$V_{c\max}(LAI^+) = V_{c\max}(0) \times \exp(-k \times LAI^+) \quad (11)$$

f2. Удельная поверхность листы (на единицу массы), SLA , $\text{см}^2 \text{ г}^{-1}$, растет с глубиной полога (Anten, 2005); согласно (Thornton, Zimmermann, 2007) зависимость от LAI^+ линейна:

$$SLA(LAI^+) = SLA(LAI^+) = SLA_0 + q \times LAI^+, q > 0 \quad (12)$$

f3. Коэффициент экстинкции k зависит от Q и LAI^+ через изменение пространственной ориентации и SLA листы для оптимального улавливания света (k растет с LAI^+) (Baldocchi et al., 1984; Nikolov and Zeller, 2003; Anten, 2005).

g. Оптимальная величина LAI лесного полога (Haxeltine, Prentice, 1996; Kergoat et al., 2002). Ищется величина LAI , которая доставляет максимально возможную величину NPP . Идея состоит в нахождении компромисса: при увеличении LAI растет ассимиляция углерода пологом, но также и испарение воды из почвы, уменьшающее ассимиляцию. Выбирается такое промежуточное LAI , при котором ассимиляция пологом, и в результате NPP максимальна.

h. Многочисленные адаптации параметров растительности к изменению $[CO_2]$, важнейшие из них:

- При росте $[CO_2]$ морфологическая адаптация ведет к уменьшению числа устьиц на поверхности листа и к уменьшению gs (Boer et al., 2011).
- $V_{c\max}$ уменьшается с ростом $[CO_2]$ (Ainsworth, Rogers, 2007).

Обзор многих моделей оптимизации см. в Anten (2005), Dewar et al. (2009).

Идеология BLM отрабатывается на локальном уровне насаждения/экосистемы. Существенно, что эти модели ориентированы на расчет потоков CO_2 , H_2O и энергии, и не являются полноценными моделями динамики собственно растительного покрова; это видно, например, из отсутствия уравнений для нахождения LAI как независимой переменной, которая задается как внешний параметр (как и прочие параметры растительности). При этих ограничениях, например, модель Mixfor-SVAT (Olchev et al., 2009) для еловых лесов Европейской части России предсказывает к концу XXI в. рост NPP до 68%.

Среди моделей, использующих идеализацию BLM, особенно интересны модели глобальной растительности – стационарные SGVM и динамические DGVM (Stationary/Dynamic Global Vegetation Models). Модели оперируют экологически близкими группами видов – PFT (Plant Functional Types) и рассчитывают наиболее полный набор параметров растительности и абиотических переменных,

вплоть до пространственного расположения биомов, углеродного и гидрологического циклов, энергетического баланса растительного покрова. В последнее время эти модели объединяются с моделями GCM (General Circulation Models); также вводится взаимодействие растительности и климата. Перечень наиболее распространенных SGVM, DGVM см. в (Методы оценки..., 2012).

Стационарные модели глобальной растительности

Все прогнозные параметры растительности вычисляются для фиксированного будущего климата без указания времени установления равновесия растительности. Наиболее распространенным здесь является семейство моделей BIOME, которые применяются и сами по себе, и в составе DGVM:

BIOME1 (Prentice et al., 1992) – биогеографическая;

BIOME2, 3, 4 (Haxeltine et al., 1996; Haxeltine, Prentice, 1996; Kaplan et al., 2003) – экофизиологические.

Вводятся 12 функциональных типов древесных и травянистых растений (PFT – Plant Functional Types), которые могут образовывать порядка 15-30 биомов (совокупностей нескольких PFT). Задаются тип и глубина почвы для определения влагоемкости. Пространственной единицей является ячейка градусной сетки, например, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Ассимиляция углерода считается по модели Фаркуара (исходно предложенной для растений с C3 типом фотосинтеза, но затем обобщенной на тип C4). Каждый PFT имеет свой набор биоклиматических ограничений, определяющих возможность существования в каждой ячейке. Например, биом «тундра» всегда присутствует при $GDD < 350$. Аналогично, для всех древесных PFT задается минимально возможная среднемесячная за год температура $T_{\min}$; например, для биома «бореальный вечнозеленый лес» $T_{\min} = -45^\circ\text{C}$. Если PFT существовать может, то находится такое LAI_{opt} , при котором NPP максимально (см. выше); найденное NPP должно быть больше заданного порогового значения NPP_{crit} , равного величине годичного опада листвы для данного PFT (энергетический предел существования PFT). Принято, что в ячейке доминирует тот древесный PFT, у которого NPP максимально. Затем этот PFT конкурирует с травянистыми или кустарниковыми PFT снова по признаку наибольшего NPP .

Система условий, определяющих тип биома по найденным PFT, довольно сложна и включает в себя условия на величины LAI , влажность почвы и NPP (Haxeltine, Prentice, 1996). $[\text{CO}_2]$ входит как параметр в устьичное сопротивление и в скорость ассимиляции. Близкая к BIOME2,3 модель с более простыми правилами образования биомов представлена в (Foley et al., 1996). Алгоритмы моделей семейства BIOME половинчаты в том смысле, что кроме

экофизиологических механизмов применяются и биогеографические ограничения.

Отсылаем читателя к обзору и сравнению 17 SGVM моделей (Cramer et al., 1999).

Примеры прогноза

Melillo et al. (1993) осуществили стационарный прогноз *NPP* для сценария, предполагающего удвоении $[CO_2]$ (от 312,5 до 625 ppm) к концу XXI в. для 18 глобальных биомов по модели TEM. Суммарная *NPP* изменится с 51×10^{15} г·С·год⁻¹ до 64×10^{15} г·С·год⁻¹.

VEMAP Members (1995) применили три биогеографических (BIOME2, DOLY, MAPSS) и три биогеохимических (термин авторов) модели (CENTURY, TEM, BIOME-BGC) к прогнозу *NPP* для территории США; прогноз изменения площадей биомов сделан по BIOME2, DOLY, MAPSS, а изменения *NPP* – по CENTURY, TEM, BIOME-BGC. Климатические сценарии включали в себя удвоение $[CO_2]$. Совокупное изменение площадей биомов и *NPP* для них ведет к увеличению *NPP* территории в среднем на 20%, однако, разброс результатов довольно велик. Вклад структурного и функционального откликов *NPP*, примерно, одинаков.

Ni et al. (2000) осуществили стационарный прогноз состояния растительности для территории Китая по BIOME3; $[CO_2]$ менялась от 340 до 500 ppm. Удельная *NPP* почти всех биомов (исключая сильно засушливые) выросла на 5-40%; *NPP* всей территории изменяется, примерно, от 3,4 до $5,0 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹, причем наибольший вклад в увеличение вносят два биома – «умеренный листопадный лес» ($+0,8 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹) и «умеренный широколиственный вечно-зеленый лес» ($+0,5 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹).

Kaplan et al. (2003, 2006) осуществили стационарный прогноз состояния растительности для Арктики по BIOME3, но, к сожалению, приведено только распределение растительности для 2100 г., без *NPP* (хотя она и рассчитывается для нахождения расположения биомов).

Динамические модели глобальной растительности

Аббревиатура DGVM принята в литературе для семейства моделей, в которых стационарные SGVM расширены добавлением описания динамики всех переменных. По-видимому, самой распространенной можно считать LPJ-DGVM (Lund-Potsdam-Jena) (Sitch et al., 2003; описание модели сильно запоздало относительно ее создания и реального использования). Алгоритм определения биомов взят из BIOME3-SGVM (Haxeltine, Prentice, 1996). В каждой

ячейке, выбранной градусной сетки для каждого из 10 PFT, описывается: динамика числа деревьев (соответственно, их смертность, плодоношение и возникновение новых особей); LAI ; фенология; углеродный и водный баланс растений и почвы; пожары; сосуществование нескольких PFT с описанием динамики их долей покрытия.

Примеры прогноза

Результаты прогноза NPP зависят от того, учитывается ли в модели обратная связь [растительность-климат]; разрабатываются соответствующие модельные подходы (напр., Krinner et al., 2005). Исследования этой связи показывают, что глобальный эффект взаимного влияния может составить $-3-7 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ (т.е. при учете связи NPP уменьшается – см., напр., Matthews et al., 2005, fig. 3; состояние растительности рассчитывалось по TRIFFID-DGVM). По сравнению с базовым изменением $\delta NPP \sim 30 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 1) это является эффектом второго порядка.

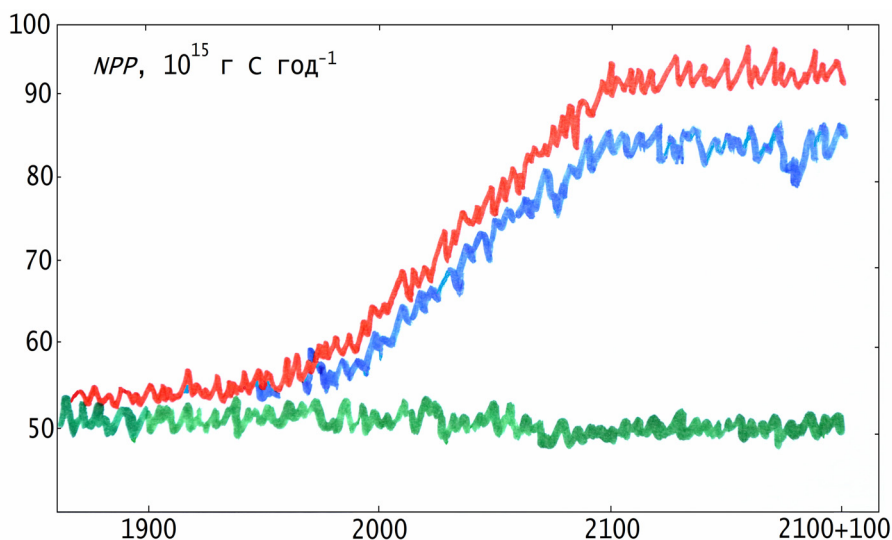


Рисунок 1 – Прогнозируемая глобальная динамика NPP согласно трем численным экспериментам, средняя по пяти DGVM (Cramer et al., 2001): ■ только рост $[\text{CO}_2]$ (до 800 ppm к 2100 г.), ■ только рост T (на 4°C к 2100 г.), ■ оба изменения вместе.

Расчет глобального углеродного цикла как части климатической системы был проведен с помощью климатической модели Института Физики Атмосферы РАН (Елисеев, 2011); найдено, что за XXI в. NPP суши возрастет с $74 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ до $94 - 107 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ (в зависимости от сценария МГЭИК).

Cramer et al. (2001) сравнили результаты расчетов по шести DGVM моделям при эмиссионном сценарии IS92a (Climate Change 2001, 2001); усредненный по пяти моделям прогноз дает к 2100 г. глобальное значение $NPP \sim 90 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹ (рис. 1). Найдено также, что к 2100 году растительность все еще далека от равновесия.

Zaehle et al. (2007) использовали LPJ-DGVM для расчета углеродного баланса Западной Европы; предсказывается увеличение NPP от $1,6 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹ до, примерно, $1,8 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹ (помимо изменения климата, учтены лесные пожары и изменения в землепользовании).

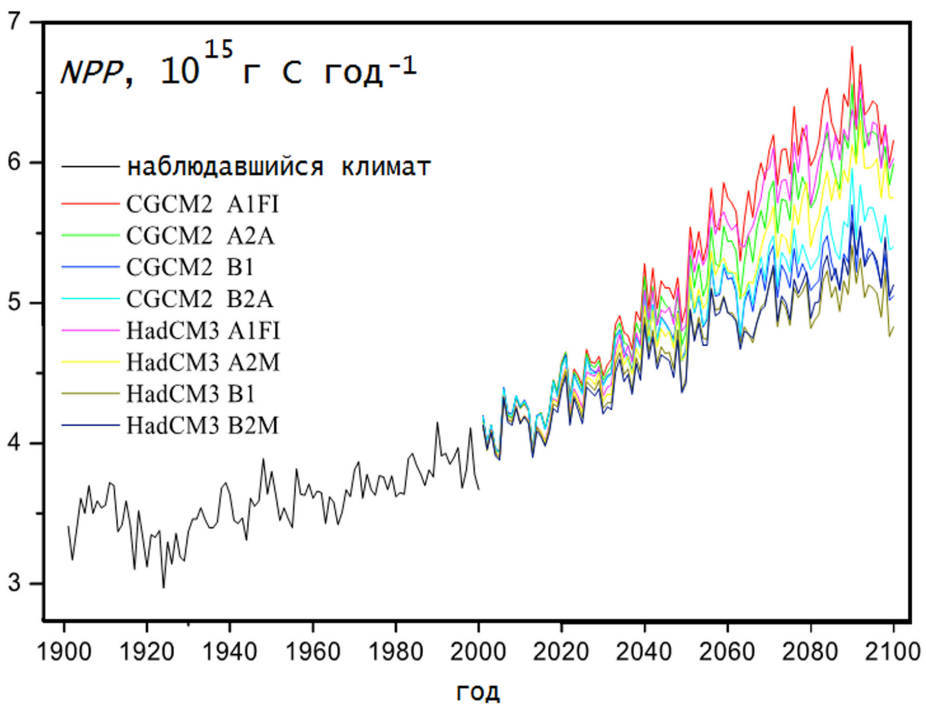


Рисунок 2 – Модельные оценки NPP для растительного покрова Китая при четырех климатических сценариях МГЭИК (A1FI, A2A, B1, B2A) и двух моделях климата (Ni et al., 2000)

Cao, Woodward (1998) по модели CEVSA-DGVM предсказывают рост глобального NPP с 52×10^{15} г·С·год⁻¹ (2000 г.) до 62×10^{15} г·С·год⁻¹ (2070 г.). Модель SDGVM (Woodward, Lomas, 2004) также предсказывает рост большинства региональных (рис. 3), а также глобального значения NPP ; последняя увеличивается с 50×10^{15} г·С·год⁻¹ (2000 г.) до, примерно, 67×10^{15} г·С·год⁻¹ (2100 г.). Та же задача решалась White et al. (1999) с помощью HYBRID.v4.1-DGVM и моделью климата HadCM2;

получено, что глобальная NPP возрастет с $NPP(2000) \sim 46 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ до $NPP(2100) \sim 64 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$. Berthelot et al. (2002) применили SLAVE-DGVM к прогнозу NPP при климатическом сценарии МГЭИК А2; NPP считается по формуле типа (8). Прогнозируется изменение от $NPP(2000) \sim 65 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$ до $NPP(2100) \sim 80 \times 10^{15} \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{год}^{-1}$.

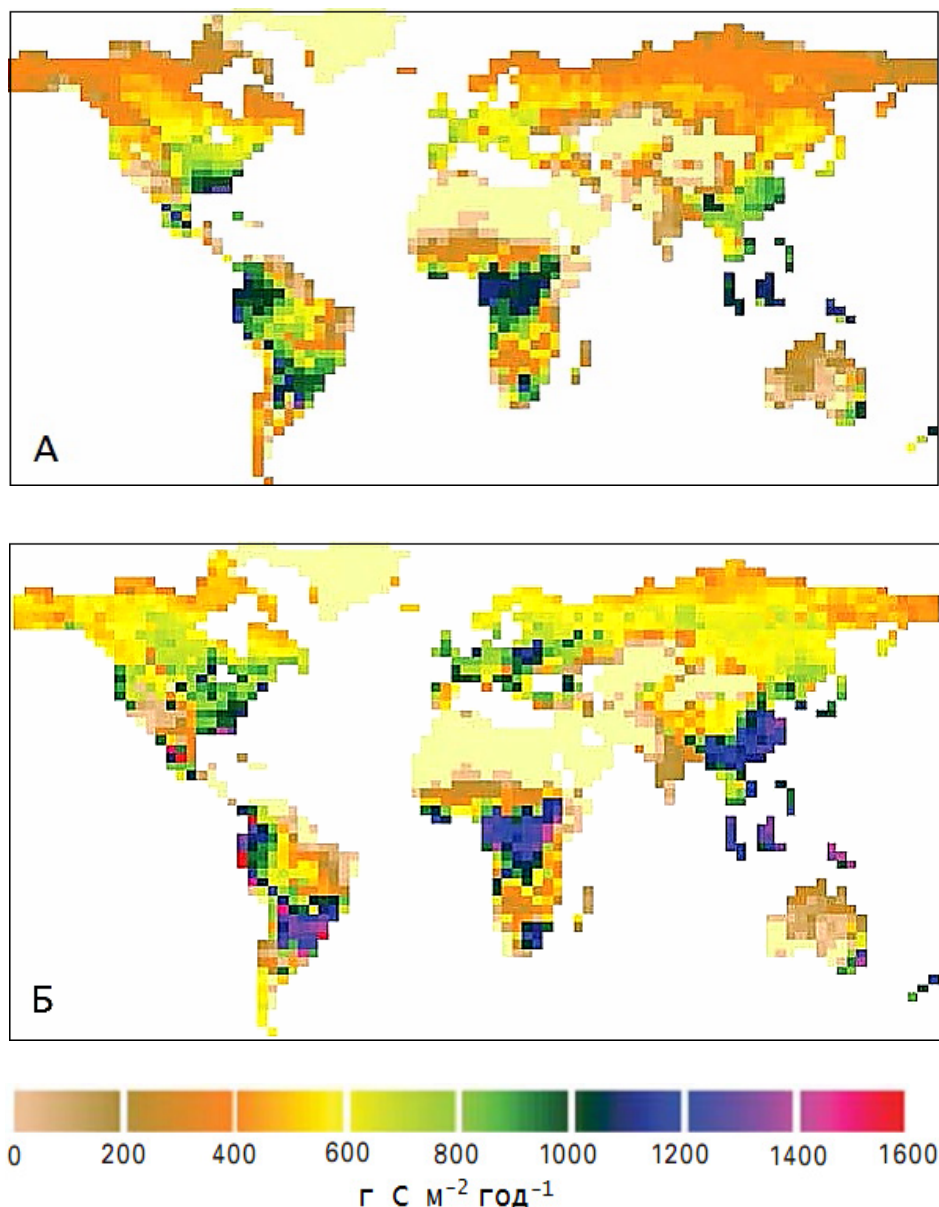


Рисунок 3 – Глобальное распределение NPP для (А) 2000 г. и (Б) 2100 г. согласно модели SDGVM (Woodward, Lomas, 2004).

Цитировавшаяся выше работа Ni et al. (2000) была продолжена для того же объекта (растительность Китая) и для той же задачи

(баланс С), но в динамическом варианте, путем применения LPJ-DGVM (Tao, Zhang, 2010) (рис. 2).

Levy et al. (2004) применили HYLAND-DGVM для расчета баланса С на период до 2100 г. при нескольких климатических сценариях МГЭИК, модели климата HadCM3 и прогнозе землепользования. Приводится только величина глобальной *NEP* (3), которая с *NEP*(2000) $\sim 2 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹ возрастет до *NEP*(2100) $\sim 4-8 \times 10^{15}$ г·С·год⁻¹ (в зависимости от сценария).

Последние оценки *NPP* (Wieder et al., 2015) сделаны с учетом лимитирования роста растений азотом и фосфором в рамках проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), занимающегося сравнением глобальных климатических моделей. При прогнозном сценарии RCP8.5 (прогнозирующем максимальный рост температуры $\delta T(2100) \sim 4,2 - 5^\circ\text{C}$) результат приведен в таблице.

Таблица 1 – Среднее по 11 моделям CMIP5 глобальное *NPP* при разных вариантах лимитирования N и P (Wieder et al., 2015)

	1995-2004 гг., без лимитирования	2090-2099 гг., без лимитирования	2090-2099 гг., лимитирование N	2090-2099 гг., лимитирование N+P
<i>NPP</i> , 10^{15} г·С·год ⁻¹	63	88	69	64

Заключение

Точность модельных прогнозов динамики углерода пока что невелика, что видно из различий в результатах, даваемых различными DGVM. Например, в Sitch et al. (2008) предпринято систематическое сравнение пяти моделей DGVM; при одинаковых сценариях климата результаты различаются даже для глобальных величин. Тем не менее, область энергично развивается путем включения новых сведений по экофизиологии растений, накопления эмпирических, в частности, спутниковых данных, а также отработкой способов включения моделей растительности в глобальные климатические модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Грабовский В.И., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. 2015. Оценка индекса листовой поверхности для территории России по данным Государственного лесного реестра. Лесоведение, № 4. (в печати)

Елисеев А.В. 2011. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты. Известия РАН, Физика Атмосферы и Океана, Т. 47, № 2, с. 147-170.

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б. 2003. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. –М.: Товарищество научных изданий КМК. 200 с.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В. 2013. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990-2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз. Метеорология и Гидрология, № 10, с. 73-92.

Кокорин А.О., Лелякин А.Л., Назаров И.М. 2000. Моделирование углеродного цикла в лесных экосистемах России. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, том XVII. – М.: Гидрометеиздат. с. 142-157.

Лесной фонд России (по данным государственного учета лесного фонда по состоянию на 1 января 2007 г.). Справочник. 2007. – М.: Рослесинфорг / ВНИИЛМ. 637 с.

Лесные ресурсы: динамика, прогнозирование и оптимальное управление: науч. Издание. 2013. Коровин Г.Н., Голованов А.С., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д., Нефедьев В.В. – М.: ЦЕПЛ РАН. 173 с.

Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. 2012. С.М.Семенов (ред.). – М.: Росгидромет. 508 с.

Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. 2007. Комаров и др.; (ред. Кудеяров В.Н.). Ин-т. физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. – М.: Наука. 380 с.

Усольцев В.А. 2007. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург, УрО РАН. 640 с.

Уткин А.И., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Ермолова Л.С. 1994. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. – М.: ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН.

Ainsworth E.A., A. Rogers. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising $[CO_2]$: mechanisms and environmental interactions. Plant, Cell and Environment, V. 30, pp. 258-270.

Anten N.P.R. 2005. Optimal photosynthetic characteristics of individual plants in vegetation stands and implications for species coexistence. Annals of Botany, V. 95, pp. 495-506.

Arneth A., Lloyd J., Santruckova H., Bird M., Grigoriev S., Kalaschnikov Y.N., Gleixner G., Schulze E.-D. 2002. Response of central Siberian Scots pine to soil water deficit and long-term trends in atmospheric CO₂ concentration. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 16, No 1, pp. 1-13.

Arora V.K., Boer G.J. 2005. A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, V. 11, No 1, pp. 39-59.

Baldocchi D.D., Matt D.R., Hutchison B.A., McMillen R.T. 1984. Solar radiation within an oak–hickory forest: an evaluation of the extinction coefficients for several radiation components during fully-leafed and leafless periods. *Agricultural and Forest Meteorology*, V. 32, No 3-4, pp. 307-322.

Beer C., Reichstein M., Tomelleri E., Ciais P., Jung M., Carvalhais N., Rödenbeck C., Arain M.A., Baldocchi D., Bonan G.B., Bondeau A., Cescatti A., Lasslop G., Lindroth A., Lomas M., Luyssaert S., Margolis H., Oleson K.W., Rouspard O., Veenendaal E., Viovy N., Williams C., Woodward F.I., Papale D. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, V. 329, pp. 834-838.

Berthelot M., Friedlingstein P., Ciais P., Monfray P., Dufresne J. L., Le Treut H., Fairhead L. 2002. Global response of the terrestrial biosphere to CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 16, No 4, art. 1084.

Boer H.J. de, E.I. Lammertsma, F. Wagner-Cremer, D.L. Dilcher, M.J. Wassen, S.C., Dekker. 2011. Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation under rising CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, V. 108, No 10, pp. 4041-4046.

Botkin D.B., J.F. Janak, and J.R. Wallis. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, V. 60, pp. 849-872.

Bugmann H., Grote R., Lasch P., Lindner M., Suckow F. 1997. A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. In *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Eds. G.M.J. Mohren, K. Kramer and S. Sabate. *Proceedings of the International Conference on Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*, Wageningen. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp. 255-261.

Bugmann H.K.M. 2000. A review of forest gap models. *Climatic Change*, V. 51, pp. 259-305.

Cannell M.G.R., Dewar R.C. 1994. Carbon allocation in trees: a review of concepts for modelling. *Advances in Ecological Research*, V. 25, pp. 59-104.

Cao M., Woodward F.I. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, V. 393, No 6682, pp. 249-252.

Chen J.M., Mo G., Pisek J., Liu J., Deng F., Ishizawa M., and Chan D. 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 26, GB1019.

Climate Change 2001. 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.T. Houghton Y., Ding D.J., Griggs M., Noguer P.J., van der Linden X., Dai K., Maskell C.A., Johnson (eds.), Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 881 pp.

Collalti A., Perugini L., Santini M., Chiti T., Nolè A., Matteucci G., Valentini R. 2014. A process-based model to simulate growth in forests with complex structure: Evaluation and use of 3D-CMCC Forest Ecosystem Modeling a deciduous forest in Central Italy. *Ecological Modelling*, V. 272, pp. 362-378.

Coomes D.A., Holdaway R.J., Kobe R.K., Lines E.R., Allen R.B. 2012. A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests. *Journal of Ecology*, V. 100, pp. 42-64.

Cowan I.R. 1977. Stomatal behaviour and environment. *Advances in Botanical Research*, V. 4, pp. 117-227.

Cox P.M. 2001. Description of the «TRIFFID» dynamic global vegetation model. Hadley Centre Technical note 24, Hadley Centre, Meteorological Office, London, UK. 28 pp.

Cramer W., Kicklighter D.W., Bondeau A., Moore III B., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A.L. 1999. The Participants of the Potsdam NPP model Intercomparison. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, V. 5 (*Suppl. 1*), pp. 1-15.

Cramer W., Bondeau A., Woodward F.I., Prentice I.C., Betts R.A., Brovkin V., Cox P.M., Fisher V., Foley J.A., Friend A.D., Kucharik C., Lomas M.R., Ramankutty N., Sitch S., Smith B., White A., Young-Molling C. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, V. 7, No 4, pp. 357-373.

- Dai Y., Dickinson R.E., Wang Y-P. 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance. *Journal of Climate*, V. 17, pp. 2281-2299.
- Del Grosso S., Parton W., Stohlgren T., Zheng D., Bachelet D., Prince S., Hibbard K., and Olson R. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation and temperature. *Ecology*, V. 89, No 8, pp. 2117-2126.
- DePury D.G.G., Farquhar G.D. 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell and Environment*, V. 20, pp. 537-557.
- Dewar R.C., Franklin O., Mäkelä A., McMurtrie R.E., Valentine H.T. 2009. Optimal function explains forest response to global change. *BioScience*, V. 59, pp. 127-139.
- Enquist B., Brown J., West G. 1998. Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature*, V. 395, No 6698, pp. 163-166.
- Euskirchen E.S., A.D. McGuire, F.S. Chapin, III, S. Yi, and C.C. Thompson. 2009. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003-2100: implications for climate feedbacks. *Ecological Applications*, V. 19, No 4, pp. 1022-1043.
- Farquhar G.D., von Cammerer S., Berry J.A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, V. 9, pp. 78-90.
- Foley J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Levis S., Pollard D., Sitch S., Haxeltine A. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 10, No 4, pp. 603-628.
- Forest Succession: Concepts and Application. 1981. Eds. D.C. West, H.H. Shugart and D.B. Botkin. New-York: Springer-Verlag. 512 p.
- Haxeltine A., Prentice I.C. 1996. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 10, No 4, pp. 693-709.
- Haxeltine A., Prentice I.C., Creswell I.D. 1996. A coupled carbon and water flux model to predict vegetation structure. *Journal of Vegetation Science*, V. 7, No 5, pp. 651-666.
- Hurtt G.C., Pacala S.W., Moorcroft P.R., Caspersen J., Shevliakova E., Houghton R.A., Moore III B. 2002. Projecting the future of the U.S. carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, V. 99, No 3, pp. 1389-1394.
-

Kaplan J.O., Bigelow N.H., Prentice I.C., Harrison S.P., Bartlein P.J., Christensen T.R., Cramer W., Matveyeva N.V., McGuire A.D., Murray D.F., Razzhivin V.Y., Smith B., Walker D.A., Anderson P.M., Andreev A.A., Brubaker L.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V. 2003. Climate change and arctic ecosystems II: Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. *Journal of Geophysical Research*, V. 108, No D19, pp. 8171.

Kaplan J.O., New M. 2006. Arctic climate change with a 2°C global warming: Timing, climate patterns and vegetation change, *Climatic Change*, V. 79, No 3-4, pp. 213-241.

Kergoat L., Lafont S., Douville H., Berthelot B., Dedieu G., Planton S., Royer J.-F. 2002. Impact of doubled CO₂ on global-scale leaf area index and evapotranspiration: Conflicting stomatal conductance and LAI responses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, V. 107, Issue D24, 4808.

Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E. and Zoubkova E. 2003. EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling*, V. 170(2-3), pp. 373-392.

Körner C. 1995. Leaf Diffusive Conductances in the Major Vegetation Types of the Globe. Chapter 22 in: *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer Study Edition. V. 100, pp. 463-90.

Korzukhin M.D., Rubina A.E., Bonan G.B., Solomon A.M., Antonovski M.Ya. 1989. The silvics of some east European and Siberian boreal forest tree species. Working Paper of IIASA, Laxenburg, Austria. WP-89-56. 27 pp.

Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudrée N., Ogée J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch, Prentice I.C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 19, GB1015.

Levy P.E., Cannell M.G.R., and Friend A.D. 2004. Modelling the impact of future changes in climate, CO₂ concentration and land use on natural ecosystems and the terrestrial carbon sink. *Global Environmental Change*, V. 14, pp. 21-30.

Lieth H. 1975. Modeling the primary productivity of the world, in: *Primary Productivity of the Biosphere*, H. Lieth and R. H. Whittaker (eds.), New York, USA, Springer-Verlag, pp. 237-264.

Lindner M., Badeck F.-W., Bartelheimer P. et al. (26 authors in total) 2002. Integrating forest growth dynamics, forest economics and decision making to assess the sensitivity of the German forest sector to climate change. *Forstwirtschaft. Cbl.* 121, Supplement 1, pp. 191-08.

Luyssaert S., Inglisma I., Jung M. et al. (65 authors in total) 2007. The CO₂-balance of boreal, temperate and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, V. 13, pp. 2502-2537.

Mäkelä A., Sievanen R. 1992. Height growth strategies in open-grown trees. *Journal of Theoretical Biology*, V. 159, No 4, pp. 443-467.

Matthews H.D., Weaver A.J., Meissner K.J. 2005. Terrestrial carbon cycle dynamics under recent and future climate change. *Journal of Climate*, V. 18(10), pp. 1609-1628.

McCarthy M.C., Enquist B.J. 2007. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. *Functional Ecology*, V. 21, No 4, pp. 713-720.

Medlyn B.E., Dreyer E., Ellsworth D., Forstreuter M., Harley P.C., Kirschbaum M.U.F., Roux X. Le, Montpied P., Strassemeier J., Walcroft A., Wang K., Loustau D. 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell and Environment*, V. 25, No 9, pp. 1167-1179.

Medlyn B.E., Duursma R.A., Eamus D., Ellsworth D.S., Prentice I.C., Barton C.V.M., Crous K.Y., Angelis P.D., Freeman M., Wingate L. 2011. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. *Global Change Biology*, V. 17, pp. 2134-2144.

Melillo J.M., McGuire A.D., Kicklighter D.W., Moore B., Vorosmarty C.J., Schloss A.L. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, V. 363, No 6426, pp. 234-240.

Meyer M.K. 1988. Net primary productivity estimates for the last 18000 years evaluated from simulations by a global climate model. University of Wisconsin, Madison.

Ni J., Sykes M.T., Prentice I.C., Cramer W. 2000. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecology and Biogeography*, V. 9, No 6, pp. 463-479.

Nikolov N., Helmisaari H. 1992. Silvics of the circumpolar boreal forest tree species. A systems analysis of the global boreal forest (ed. by H.H. Shugart, R. Leemans and G.B. Bonan), pp. 13-84. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Nikolov N.T., Zeller K.F. 2003. Modeling coupled interactions of carbon, water, and ozone exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. I: Model description. *Environmental Pollution*, V. 124, pp. 231-246.

Olchev A., Novenko E., Deshrevskaya O., Krasnorutskaya K., Kurbatova J. 2009. Effects of climatic changes on carbon

dioxide and water vapor fluxes in boreal forest ecosystems of European part of Russia. *Environmental Research Letters*, V. 4, No 4, 045007 (8 pp).

Olson R.J., Johnson K., Zheng D., Scurlock J.M.O. 2001. Global and regional ecosystem modeling: databases of model drivers and validation measurements. ORNL/TM-2001/196. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. 95 pp.

Pittock A.B., Nix H.A. 1986. The effect of changing climate on Australian biomass production – a preliminary study. *Climatic Change*, V. 8, No 3, pp. 243-255.

Prentice C., Cramer W., Harrison S.P., Leemans R., Monserud R.A., Solomon A.M. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, V. 19, pp. 117-134.

Pretzsch H., Biber P., Durský J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, V. 162, No 1, pp. 3-21.

Running S.W., Nemani R.R., Heinsch F.A., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H. 2004. A continuous satellite derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, V. 54, No 6, pp. 547-560.

Ryan M.G., Phillips N., Bond B.J. 2006. The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell and Environment*, V. 29, pp. 367-381.

Shuman J.K. 2010. Russian forest dynamics and response to changing climate: a simulation study. A Dissertation. 156 pp.

Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, V. 9, No 2, pp. 161-185.

Sitch S., Huntingford C., Gedney N., Levy P.E., Lomas M., Piao S.L., Betts R., Ciais P., Cox P., Friedlingstein P., Jones C.D., Prentice I.C., Woodward F.I. 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology*, V. 14, No 9, pp. 2015-2039.

Smith T.M., Shugart H.H. 1993. The transient response of terrestrial carbon storage to a perturbed climate. *Nature*, V. 361, No 6412, pp. 523-526.

Tao F., Zhang Z. 2010. Dynamic responses of terrestrial ecosystems structure and function to climate change in China. *Journal of Geophysical Research*, V. 115, G03003.

Thornton P.E., Zimmermann N.E. 2007. An improved canopy integration scheme for a land surface model with prognostic canopy structure. *Journal of Climate*, V. 20, No 15, pp. 3902-3923.

VEMAP Members (J.M. Melillo, J. Borchers, J. Chaney, H. Fisher, S. Fox, A. Haxeltine, A. Janetos, D.W. Kicklighter, T.G.F. Kittel, A.D. McGuire, R. McKeown, R. Neilson, R. Nemani, D.S. Ojima, T. Painter, Y. Pan, W.J. Parton, L. Pierce, L. Pitelka, C. Prentice, B. Rizzo, N.A. Rosenbloom, S. Running, D.S. Schimel, S. Sitch, T. Smith, and I. Woodward). 1995. Vegetation/ecosystem Modelling and Analysis Project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, V. 9, pp. 407-437.

West GB, Brown J.H, and Enquist B.J. 1999. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature*, V. 400, No 6745, pp. 664-667.

White A., Cannell M.G.R., Friend A.D. 1999. Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment. *Global Environmental Change*, V. 9, S21-S30.

White M.A., Thornton P.E., Running S.W. 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model. *Earth Interactions*, V. 4, No 1, pp. 1-85.

Wieder W.R., Cleveland C.C., Smith W.K., Todd-Brown K. 2015. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. *Nature Geoscience*, V. L8, pp. 441-445.

Woodward F.I., Lomas M.R. 2004. Vegetation dynamics – simulating responses to climate change. *Biological Reviews*, V. 79, pp. 643-670.

Wullschlegel S.D. 1993. Biochemical limitations to carbon assimilation in C₃ plants. A retrospective analysis of the A/C_i curves from 109 species. *Journal of Experimental Botany*, V. 44, pp. 907-920.

Yue T.-X., Fan Z.-M., Chen C.-F., Sun X.-F., Li B.-L. 2011. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. *Ecological Modelling*, V. 222, No 14, pp. 2342-2361.

Zaehle S., Bondeau A., Carter T.R., Cramer W., Erhard M., Prentice I.C., Reginster I., Rounsevell M.D.A., Sitch S., Smith B., Smith P.C., Sykes M. 2007. Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990-2100. *Ecosystems*, V. 10, No 3, pp. 380-401.

Zhang X.S., Yang D.A., Zhou G.S., Liu C.Y., Zhang J. 1996. Model expectation of impacts of global climate change on biomes of the Tibetan Plateau. In: K. Omasa, K. Kai, H. Taoda, Z. Uchijima, M. Yoshino (Eds.), *Climate change and plants in East Asia*. Tokyo, JP: Springer-Verlag. pp. 25-38.

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО МЕЗООЛИГОТРОФНОМУ БОЛОТУ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ

*Л.Э. Лапина*¹⁾, *О.А. Михайлов*²⁾, *И.М. Успенский*¹⁾

¹⁾ Отдел математики Коми НЦ УрО РАН,
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Чернова, д. 3а, lapina@dm.komisc.ru

²⁾ Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28, mikter@mail.ru

Резюме. Работа выполнена основе исходных данных, полученных методом турбулентной ковариации (eddy covariance) в августе 2012 г. и с помощью автоматической метеостанции. Использовались также вычисляемые показатели: кинетическая энергия ветра (без пульсаций), динамическая скорость трения. Показано, что в группу наиболее весомых показателей, описывающих болотные экосистемы на характерных временах порядка суток, входит не только температура воздуха, но и относительная влажность, суммарная радиация, температура и влажность почвы на разных глубинах, фотосинтетически активная радиация (ФАР), кинетическая энергия турбулентности, атмосферное давление, скорость трения и производство концентрации водяного пара на температуру. Приведены результаты расчетов попарных коэффициентов корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми другими геофизическими характеристиками, значения факторных нагрузок метеорологических величин и концентраций парниковых газов в отдельные дни августа 2012 г. Приводится итоговая таблица частоты встречаемости показателей в основных шести факторах, которые объясняют около 70 процентов общей дисперсии всех значений. Проведен также анализ на всем массиве данных в целом и с разделением на две группы по условию освещенности. Почти все параметры, выделенные посуточно, остались значимыми и в течение месяца, за исключением относительной влажности и атмосферного давления.

Ключевые слова. Парниковые газы, болото, факторный анализ, микрометеорология.

FACTOR ANALYSIS OF MICROMETEOROLOGICAL DATA ON MESOOLIGOTROPHIC BOG IN KOMI REPUBLIC

*L.E. Lapina*¹⁾, *O.A. Mykhaylov*²⁾, *I.M. Uspensky*¹⁾

¹⁾ Department of Mathematics, Komi SC UB RAS,
3a, Chernova str, 167982, Syktyvkar, Russia, lapina@dm.komisc.ru

²⁾ Institute of Biology, Komi SC UB RAS,
28, Communisticheskay str., 167982, Syktyvkar, Russia, mikter@mail.ru

Summary. The work is based on primary data obtained using the eddy covariance method in August, 2012 and an automatic meteorological station. Calculated indicators, namely kinetic wind power (without pulsations) and dynamic speed of friction were applied. It is shown that a group of the most powerful indicators describing bog ecosystems on daily characteristic time scales include not only air temperature, but also relative humidity, total radiation, soil temperature and humidity at different depths, photosynthetic active radiation (PAR), kinetic energy of turbulence, atmospheric pressure, speed of friction, and product of concentration of water vapor by temperature. The work includes the results of calculations of pairwise correlation coefficients between concentrations of greenhouse gases and some other geophysical characteristics, as well as values of factor loadings of meteorological variables and greenhouse gases concentrations for selected days of August, 2012. The summarizing table showing the frequency of occurrence of indicators in six major factors explaining approximately 70 percent of the total variance of all values is presented in the paper. Additionally, analysis of the entire data base and two subgroups related to different illumination condition was carried out. Almost all parameters determined on a daily scale remained significant within a month time frame, except for relative humidity and atmospheric pressure.

Keywords. Greenhouse gases, bog, factor analysis, micrometeorology.

Введение

Одной из актуальных проблем в климатологии является прогнозирование реакции экосистем различных пространственных масштабов на возможные изменения условий внешней среды. Такое прогнозирование невозможно без построения динамических моделей, которые должны отражать два фундаментальных свойства экосистем: сложность структуры и нелинейность процессов на разных уровнях.

Двуокись углерода (CO_2) и метан (CH_4) вносят наибольший вклад в формировании парникового эффекта (60% и 20% соответственно (Кароль, Киселев, 2004). Важнейшим компонентом цикла углерода являются болота. Например, величина эмиссии CH_4 в западносибирских болотах колеблется в интервале от $-0,11$ до $40 \text{ мг/м}^2/\text{час}$ (Бажин, 1993) В коллективной монографии (Семенов (ред.), 2012, с. 218) указывается, что торфяные болота, благодаря особому участию в круговороте воды и углерода, имеют большое значение в формировании климата. Крупнейшим в мире по занимаемой площади является Большое Васюганское болото, результаты комплексных исследований которого с привлечением широкого спектра научных методов отражены в коллективных монографиях (Исследования природно-климатических..., 2012, Большое Васюганское

болото, 2002). В работе (Глаголев, 2010) отражены экспериментальные исследования обмена углерода между болотами и атмосферой, проводившихся на территории России, проанализировано около 200 литературных источников. В работе (Курганова, Кудеяров, 2012) приводятся оценки бюджета углерода применительно к экосистемам России.

Известно, что выделение и поглощение углерода меняется в разные годы из-за погодных условий (Оценка баланса углерода..., 2013). И, возможно, на разных географических объектах влияние погодных условий будет различным. Поэтому имеет смысл изучать влияние этих условий сначала статистическими методами по данным наблюдений. Именно этому исследованию и посвящена данная работа.

Методы прогнозирования отклика болотных экосистем на изменения условий внешней среды рассматривались в работах Н.Н. Завалишина и Д.О. Логофета (Завалишин, Логофет, 1997, 2001; Завалишин, 2005). В этих работах углеродный цикл рассматривался на временах порядка года и больше. В работе (Завалишин, 2005) построена модель круговорота органического вещества в экосистеме переходного болота и исследована ее реакция на повышение концентрации углерода в атмосфере при различных удельных скоростях торфообразования. Модель в этой работе построена на основе агрегирования данных наблюдений, проводившихся в течение 20 лет на экспериментальном полигоне Института географии РАН «Таежный Лог» (Новгородская область).

В работе (Оценка баланса углерода..., 2013) представлены основные итоги международного проекта «Оценка баланса углерода на севере России: прошлое, настоящее и будущее», профинансированного VI Рамочной программой Европейского Союза в 2006-2010 гг. Зарубежом этот проект носит название «CARBO-North». В данном проекте были получены, в частности, выводы о том, что болота тундровой зоны аккумулируют максимальное количество мерзлотного углерода, также показано, что переувлажненные участки болот имеют значение в качестве стока диоксида углерода и одновременного источника метана. Результаты проекта «CARBO-North» показывают, что учет изменений наземных экосистем, расположенных в высоких широтах, имеет большое значение для будущих сценариев развития парникового эффекта IPCC и пост-Киотских соглашений об ограничении процессов изменения климата. (Оценка баланса углерода..., 2013).

Принятые обозначения

ФАР – фотосинтетически активная радиация,

CH₄ – концентрация метана (ммоль·м⁻³),

CO₂ – концентрация углекислого газа (ммоль·м⁻³),

H_2O – концентрация водяного пара ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$),

$H_2O \cdot T$ – произведение концентрации водяного пара на температуру воздуха ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}$),

H_{s1}, H_{s2} – объемная влажность почвы на глубинах 1(25 см) и 2 (15 см), соответственно,

Humidity – относительная влажность,

KET – кинетическая энергия турбулентности, которая считалась как сумма кинетических энергий осредненных соответствующих компонент вектора скорости (не пульсаций),

KETP – кинетическая энергия турбулентных пульсаций,

P – атмосферное давление,

R – суммарная радиация,

rsdownwell – коротковолновая падающая радиация,

rsupwell – коротковолновая отраженная радиация,

rlownwell – длинноволновая падающая радиация,

rlupwell – длинноволновая отраженная радиация,

T – температура воздуха ($^\circ\text{C}$),

T_{s1}, T_{s2} – температура почвы на глубинах 1 (25 см) и 2 (15 см),

T_{surf} – температура поверхности почвы ($^\circ\text{C}$), T_{surf} вычисляется по следующей формуле:

$$T_{\text{surf}} = \left(\frac{rlupwell}{0,98} \cdot 5,67 \cdot 10^{-3} \right)^{1/4} - 273,15$$

U, V, W – соответственно компоненты вектора скорости ветра по осям координат (м/с),

U^* – динамическая скорость или скорость трения.

Выражения в угловых скобках <> означают операцию осреднения за 1 минуту, u', v', w' – пульсации компонент вектора скорости. В таблицах в скобках после значения указывается, в какой фактор F входит показатель. $F1$ – первый фактор, $F2$ – второй и т.д.

Объект исследования

В данной работе объектом исследования является мезоолиготрофное болото Медла-Пэв-Нюр (Усть-Пожегское), которое исследовалось в 2008-2009 гг. в рамках проекта «CARBO-North». Исследования проводили сотрудники Института биологии Коми научного центра УрО РАН с 1 по 31 августа 2012 г. на указанном болоте, расположенном в подзоне средней тайги на Европейском Северо-Востоке России, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара

(Республика Коми, 61°56'с.ш. 50°13'в.д.). На участке болота, где проводили измерения, преобладают растительные сообщества: 1) *Carexrostrata*Stokes – *Oxycoccuspalustris*Pers. – *Carexlimoza*L. – *Sphagnum*sp.; 2) *Andromedapolyfolia*L. – *Oxycoccuspalustris* – *Scheuchzeriapalustris*L. – *Sphagnum*sp. Незначительную площадь (до 5%) занимают олиготрофные сообщества: 3) *Chamaedaphnecalyculata* (L.) Moench – *Oxycoccuspalustris* – *Andromedapolyfolia* – *Sphagnum*sp. Площадь болота 2790 га, средняя мощность торфа 1,4 м, максимальная 3,4 м. Болото располагается на второй надпойменной террасе, его водоприемниками служат р. Пожег и р. Пычим (Торфяные ресурсы..., 2000). Более подробное описание растительности можно найти в (Углерод в лесных и болотных экосистемах..., 2014, с. 130-133).

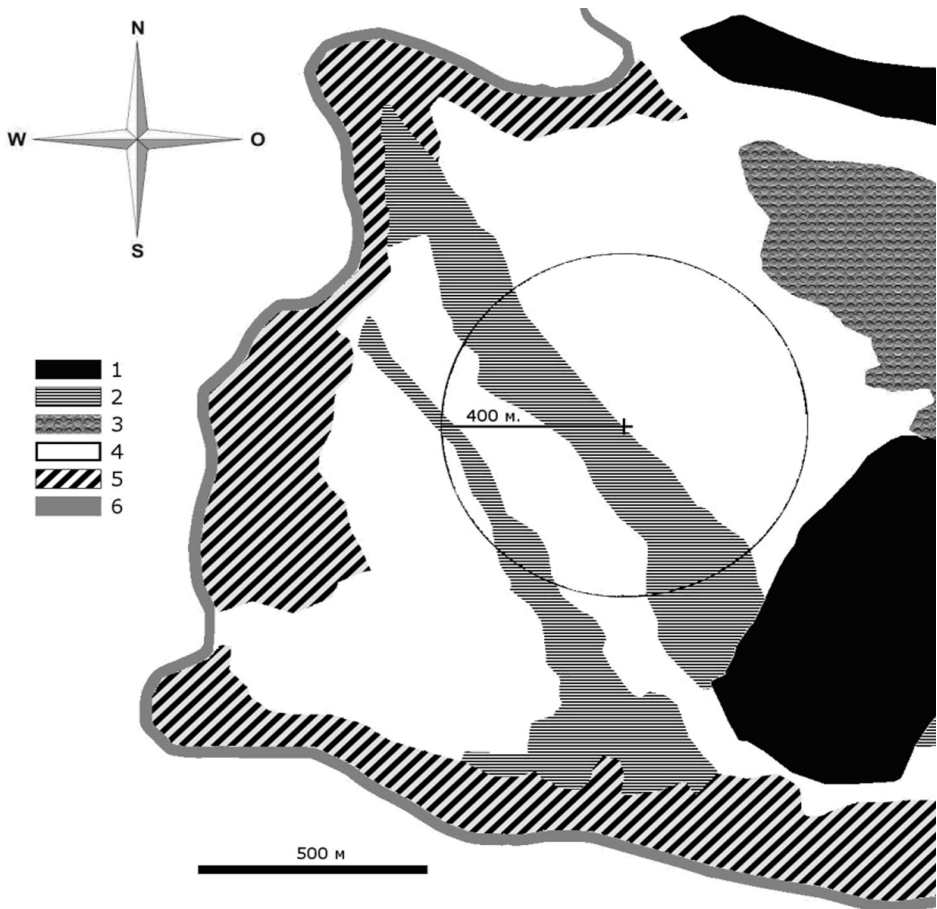


Рисунок 1 – Схема расположения измерительной системы на участке болота. 1 – минеральный лесной остров; 2 – мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь; 3 – олиготрофные сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества; 4 – мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества; 5 – окраинная топь; 6 – граница болота.

Результаты исследований в период 2008-2009 гг. опубликованы в нескольких работах (Gažovič, 2010; Runkle et al., 2014; Schneider et al., 2012). В зарубежных исследованиях болото известно как Усть-Пожегское (Ust-Pojeg). Во время исследований на данном болоте верховой участок выделял CO_2 в атмосферу, а низинный – поглощал углекислый газ. В то же время низинный участок выделял больше метана, чем верховой. (Оценка баланса углерода..., 2013) Эти результаты подробно описаны в работе (Shneider J. et al., 2012), в которой изучаются потоки диоксида углерода по измерениям с 25 апреля 2008 года по 20 октября 2008 г. на 7 различных микроформах с помощью закрытых камер. В работе (Runkle et al., 2014) изучались процессы эвапотранспирации, потоки скрытого тепла. В работе (Gažovič et al., 2010) рассматривается суточная динамика метана с данного болота в период снеготаяния по данным с 21 апреля по 3 мая 2008 г. Используется метод eddy covariance. Результаты исследований данного болота, проводимых с помощью различных инструментов измерений, представлены в работах сотрудников Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Михайлов и др., 2013а; Михайлов и др., 2013б; Мигловец, Лукашева, 2012) и в совместной работе с математиками (Лапина и др., 2014). Среднесуточные значения некоторых характеристик в течение месяца представлены на рис. 2, а на рис. 3 и 4 представлены временные ряды некоторых характеристик и производных концентраций парниковых газов и температуры воздуха.

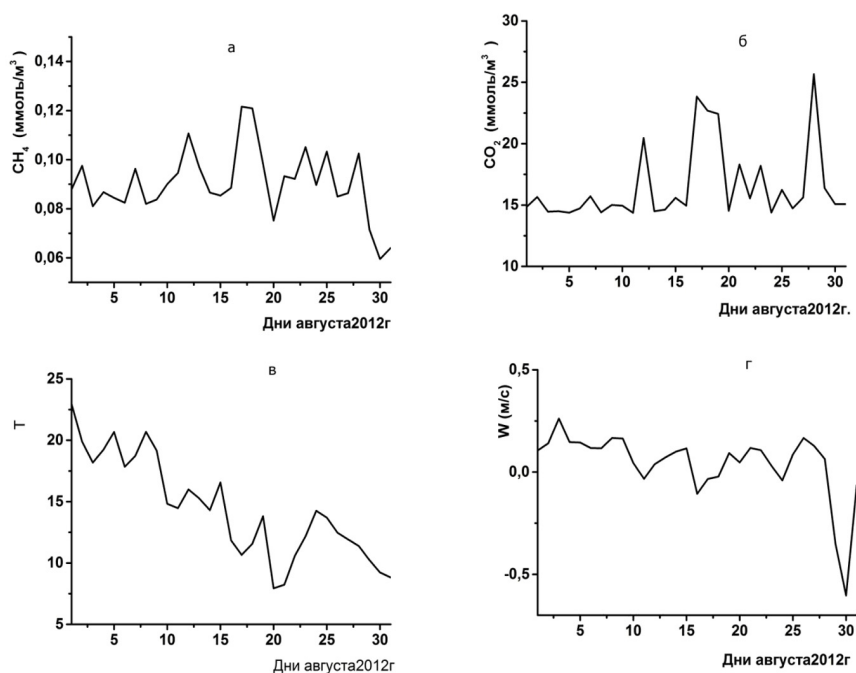


Рисунок 2 – Среднесуточные значения концентраций метана (а), углекислого газа (б), температуры воздуха (в) и вертикальной компоненты вектора скорости (г) по данным за август 2012 г.

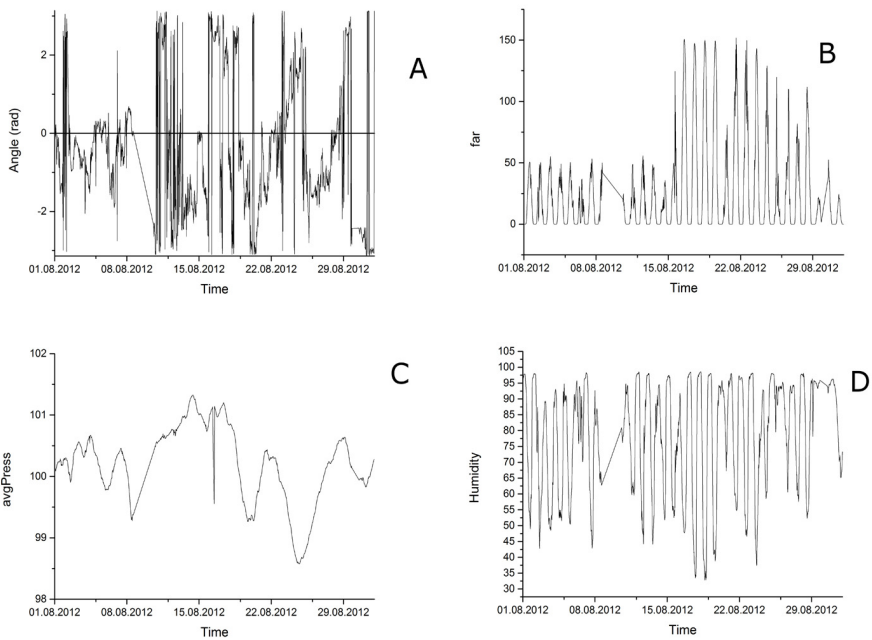


Рисунок 3 – Угол ветра (А), ФАР(В), атмосферное давление Р(С) и относительная влажность (D) в августе 2012 г.

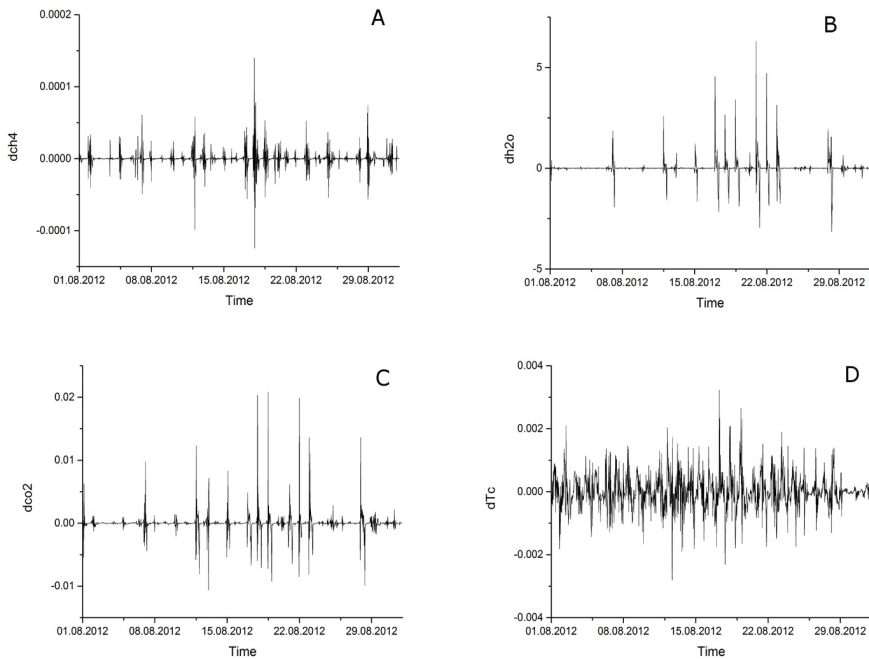


Рисунок 4 – Локальные производные по времени концентраций метана (А), водяного пара (В), диоксида углерода (С) и температуры воздуха (D).

Метод анализа данных

Факторный анализ относится к методам многомерного статистического анализа и широко используется для снижения размерности анализируемого пространства признаков, отбора наиболее информативных показателей и классификации объектов. Данный метод анализ является той ветвью многомерного анализа, которая исследует внутреннюю структуру ковариационных и корреляционных матриц. В работе используется метод главных компонент, который представляется наиболее удобным для выяснения весовых параметров. О самом методе достаточно подробно описано в работах (Лоули, Максвелл, 1967; Ким, 1989). Цель исследования данных с помощью данного метода анализа – выявить такие параметры из всей совокупности наблюдений.

В системе обыкновенных дифференциальных уравнений, представленных в работе (Завалишин, 2005) есть нелинейные слагаемые в виде произведения изучаемых характеристик, например, скорость поглощения углерода растениями животными описывается слагаемым вида $Y_{12} \cdot X_1 \cdot X_2$, где X_1 – биомасса растений, X_2 – биомасса животных, Y_{12} – коэффициент пропорциональности, т.е. произведение параметров, является простейшим способом учета нелинейности.

Концентрации парниковых газов, температура, давление и компоненты вектора скорости рассматриваются авторами как основные параметры, описывающие данное болото. По-видимому, возможны и другие способы выделения параметров в зависимости от рассматриваемых пространственных и временных масштабов. В число анализируемых данных включены производные от этих параметров.

Поскольку одним из недостатков факторного анализа является то, что он может выявить только линейные связи, то попытались смягчить этот недостаток введением отдельно нелинейных показателей в самом простом виде. Например, в качестве таких нелинейных показателей может служить U^* , КЕТ, КЕТР, а также произведение концентраций парниковых газов на некоторые параметры. Возможных пар произведений – 28, но рассматриваем только 10, в частности, все возможные произведения концентрации метана на другие основные параметры (7), также произведение $H_2O \cdot T$, и пара произведений с диоксидом углерода. Эти пары выбраны случайным образом.

Было рассмотрено несколько вариантов факторного анализа:

- 1) посуточный анализ,
- 2) анализ в целом за месяц без разделения данных на дневные и ночные (в целом),
- 3) анализ данных месяца отдельно «дневных» и «ночных».

Во втором и третьем варианте были учтены результаты первого варианта и было уменьшено число рассмотренных параметров.

Результаты расчетов

Посуточный компонентный анализ

Для анализа посуточно используется 54 переменных: концентрации парниковых газов, T , U , V , W , P , квадраты пульсаций компонент скорости, вертикальные турбулентные потоки тепла, метана, углекислого газа, водяного пара, полученные по одноминутным интервалам осреднения, производные основных параметров, произведения концентраций метана на остальные основные параметры, $H_2O \cdot T$, $CO_2 \cdot T$, $CO_2 \cdot H_2O$, атмосферное давление, осредненное по 30-минутным интервалам, плотность воздуха, поток углекислого газа, поток скрытого тепла, также осредненные по 30-минутным интервалам, Humidity, R , Albedo, rsdownwell, rsupwell, rldownwell, rlupwell, T_{s1} , T_{s2} , H_{s1} , H_{s2} , ФАР, KET, T_{surf} , скорость трения U^* .

Корреляционная матрица строилась из попарных коэффициентов корреляции между соответствующими признаками. Между разными парами переменных могло быть разное число наблюдений, так как некорректные значения исключались из дальнейшего рассмотрения. Некоторые значения коэффициентов корреляции представлены в табл.1.

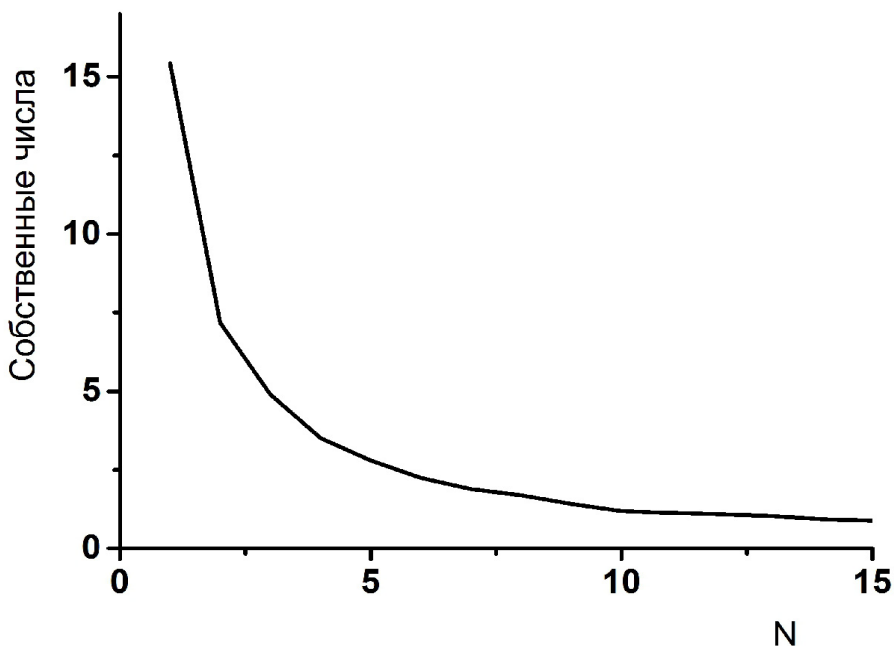


Рисунок 5 – Собственные числа корреляционной матрицы по данным за 6 августа 2012 г.

Рисунок 5 представляет собой типичное распределение собственных чисел корреляционных матриц, которые считались за каж-

дый день августа 2012 г. По принципу Кэттелла выделяется 6 факторов, а по принципу «собственные числа, большие 1» – 13 факторов, причем, 13 факторов объясняют, примерно 90 процентов дисперсии признаков, а 6 факторов объясняют, примерно, 70 процентов общей дисперсии, а два фактора – около половины. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать структуру первых шести признаков в течение месяца. Данные за 4 августа и 16 августа ввиду плохого качества некоторых переменных не анализировались.

Результаты и обсуждение

Результаты посуточного анализа представлены в табл. 1-4. В табл. 1 представлены значения коэффициентов корреляций между концентрациями парниковых газов и некоторыми характеристиками в отдельные дни августа, в табл. 2 представлены факторные нагрузки некоторых переменных в отдельные дни августа, в табл. 3 – факторные нагрузки ветровых характеристик, их пульсаций и концентраций парниковых газов в те же дни, что и показатели предыдущей таблицы.

Из данных табл. 1 видно, что от суток к другим суткам коэффициенты корреляции сильно меняются. Заметим, что на разные парниковые газы влияние, например, почвенных характеристик различно в разные дни. Поэтому использование одного корреляционного анализа смысла не имеет, необходимы и другие методы исследований и расчетов. Например, значение коэффициента корреляции между концентрацией метана и температурой воздуха меняется от $-0,77$ (21 августа) до $0,18$ (30 августа).

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми характеристиками

1 августа			
Параметры	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
T	-0,65	-0,38	0,58
U*	-0,20	0,27	-0,15
KET	-0,45	-0,26	0,31
R	-0,62	-0,23	0,54
ФАР	-0,62	-0,26	0,55
T _{s1}	0,15	-0,19	0,27
T _{s2}	-0,11	-0,38	0,37
H _{s1}	-0,15	0,19	-0,26
H _{s2}	0,09	0,38	-0,37
P	-0,13	–	0,56
Albedo	-0,35	0,09	0,17

5 августа			
	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
T	-0,63	-0,92	0,09
U*	-0,53	-0,66	-0,11
KET	-0,49	-0,66	-0,11
R	-0,45	-0,57	-0,39
ΦAP	-0,45	-0,59	-0,37
T _{s1}	0,40	0,24	0,35
T _{s2}	-0,31	-0,73	0,61
H _{s1}	-0,38	-0,21	-0,39
H _{s2}	0,31	0,73	-0,61
P	0,53	0,78	-0,79
Albedo	-0,58	-0,62	-
14 августа			
	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
T	-0,64	-0,19	0
U*	-0,55	0	0
KET	-0,5	-0,1	-0,09
R	-0,59	-0,17	-0,07
ΦAP	-0,59	-0,18	-0,11
T _{s1}	0,43	0,08	0
T _{s2}	0,10	0	0,07
H _{s1}	-0,48	-0,21	-0,09
H _{s2}	-0,10	0	-0,06
P	-0,45	0,39	0,30
Albedo	-0,38	-0,08	-0,02
21 августа			
	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
T	-0,77	-0,60	-0,75
U*	-0,60	-0,31	-0,44
KET	-0,55	-0,34	-0,43
R	-0,65	-0,35	-0,52
ΦAP	-0,67	-0,37	-0,53
T _{s1}	0,59	0,24	0,47
T _{s2}	-0,08	-0,43	-0,35
H _{s1}	-0,61	-0,25	-0,49
H _{s2}	0,24	0,09	0,29

P	-0,59	-0,18	-0,44
Albedo	-0,56	0	-0,16
30 августа			
	CH₄	CO₂	H₂O
T	0,18	0,25	0,40
U*	0,43	0,31	0,32
KET	0,35	0,08	0,26
R	-0,62	0,08	-0,23
ФАР	-0,65	0,08	-0,24
T_{s1}	-0,15	0,13	0,30
T_{s2}	0,05	0	0,51
H_{s1}	-0,09	-0,15	-0,43
H_{s2}	-0,06	0	-0,52
P	0,48	-0,08	0,53
Albedo	-0,48	-0,10	-0,29

Примечание: при уровне значимости 0,05 критическое значение коэффициента корреляции равно 0,05 (данных достаточно много).

Как видно из представленных табл. 2 и 3, структура факторов меняется от суток к суткам. Поэтому имеет смысл объединить результаты всех расчетов в итоговую таблицу 4, в которой представлены частоты повторяемости тех или иных параметров в факторах и, тем самым, выделилась группа весомых показателей. Например, по данным табл. 2 видно, что температура воздуха далеко не всегда является определяющим параметром (31 августа она входит всего лишь в фактор F6). Иногда факторные нагрузки показателей распределяются на несколько факторов: например, 22 августа U^* есть и в F1, и в F6. Интересным является произведение концентрации водяного пара и температуры воздуха $H_2O \cdot T$. Остальные пары произведений оказались не значимыми, факторные нагрузки отдельно взятых переменных оказались выше факторных нагрузок произведений и в дальнейшем будут исключены из рассмотрения. Ввиду этого, результаты факторных нагрузок рассмотренных пар произведений не публикуются. Интересным представляется тот результат, что не всегда компоненты вектора скорости ветра входят в первые 6 факторов. 31 августа они вошли лишь в седьмой фактор. Также не всегда все компоненты вектора скорости входят в один фактор. Так случилось, например, 1 августа, т.е. разные компоненты вектора скорости могут иметь разное значение, что может быть обусловлено биологической неоднородностью болота. Заметим, что такое бывает относительно редко. И характеристики почвенных процессов (температура и объемная влажность) не всегда входили в один фактор, иногда влияние различных глубин было различным, хотя чаще всего они оказывались в одном факторе.

**Таблица 2 – Факторные нагрузки некоторых переменных
за отдельные дни августа 2012 г.**

Пере- менная	Дата					
	01 авг.	05 авг.	13 авг.	22 авг.	26 авг.	31 авг.
Albedo	-0,55 (F6)	-0,43 (F3)	0,62 (F4)	-0,63 (F3)	0,47 (F1) 0,38 (F2)	0,56 (F4)
T	-0,93 (F1)	0,64 (F1)	0,94 (F1)	0,91 (F1)	0,96 (F1)	-0,94 (F6)
R	-0,91 (F1)	0,88 (F1)	0,92 (F1)	0,87 (F1)	0,71 (F1)	-0,96 (F3)
T_{s1}	0,93 (F4)	-0,82 (F1)	-0,69 (F2)	0,88 (F2)	0,80 (F8)	-0,71 (F3) -0,59 (F4)
T_{s2}	0,88 (F4)	0,88 (F2)	-0,92 (F2)	0,85 (F2)	0,90 (F9)	-0,83 (F4)
H_{s1}	-0,93 (F4)	0,82 (F1)	0,62 (F2)	-0,89 (F2)	-0,78 (F8)	0,72 (F4)
H_{s2}	-0,88 (F2)	-0,88 (F2)	0,92 (F2)	0,72 (F3)	-0,90 (F9)	0,83 (F4)
ФАР	-0,94 (F1)	0,86 (F1)	0,93 (F1)	0,90 (F1)	0,75 (F1)	-0,96 (F3)
КЕТ	-0,6 (F1)	-0,81 (F5)	-0,73 (F5)	0,52 (F6) 0,44 (F1)	0,87 (F2)	-0,75 (F2)
U*	-0,85 (F2)	-0,81 (F5)	0,68 (F5)	0,55 (F1) 0,57 (F6)	-0,85 (F2)	-0,88 (F2)

**Таблица 3 – Факторные нагрузки ветровых характеристик
и концентраций парниковых газов в отдельные дни авгу-
ста 2012 г.**

Показа- тели	Дата					
	01 авг.	05 авг.	13 авг.	22 авг.	26 авг.	31 авг.
CH₄	0,53 (F1)	0,86 (F3)	-0,63 (F10)	0,80 (F4)	0,91 (F3)	-0,88 (F12)
CO₂	-0,58 (F6)	-0,72 (F2)	-0,85(F4)	0,71 (F3)	-0,64 (F4)	0,82 (F1)
H₂O	-0,5 (F1)	0,86 (F2)	-0,95 (F12)	0,90 (F3)	0,99 (F4)	-0,89 (F1)
H₂O·T	-0,88 (F1)	0,79 (F2)	0,73 (F1)	0,88 (F3)	0,84 (F4)	-0,76 (F1)
U	0,9 (F9)	-0,78 (F5)	-0,5 (F6)	0,61 (F6)	0,87 (F5)	0,88 (F7)
V	0,77 (F1)	-0,92 (F6)	-0,67 (F5)	0,90 (F5)	0,8 (F2)	0,89 (F7)
W	0,76 (F5)	-0,7 (F5)	-0,88 (F6)	0,78 (F6)	-0,67 (F2)	0,92 (F7)
<u'²>	-0,89 (F2)	-0,80 (F5)	0,73 (F5)	0,56 (F1)	-0,75 (F2)	-0,92 (F2)
<v'²>	-0,96 (F2)	-0,77 (F5)	0,68 (F5)	0,59 (F1)	-0,82 (F2)	-0,94 (F2)
<w'²>	-0,93 (F2)	-0,84 (F5)	0,70 (F5)	0,67 (F1)	-0,85 (F2)	-0,94 (F2)

В данной работе в анализ данных были включены несколько параметров, осредненные по разным периодам. В их числе – атмосферное давление и вертикальный поток тепла. Результаты для атмосферного давления оказались независимыми от периода

осреднения, поток тепла, осредненный по одномоментному интервалу времени, практически всегда входил в число факторов F10-F12, поток тепла, осредненный по 30-минутным интервалам, практически никогда не входил в число первых пятнадцати факторов. Это, скорее всего, обусловлено тем, что осреднение по 1 минуте времени фильтрует лишь самые высокочастотные колебания.

Здесь не были использованы вычисляемые экологические характеристики, такие как экосистемное дыхание, *NPP* и др. Табл. 4 представляет собой итоги посуточного компонентного анализа, в котором собраны наиболее часто повторяющиеся в первых шести факторах параметры и производные основных параметров. Заметим, что показатели производных основных параметров входят в число факторов F4-F6 относительно часто. По мнению авторов, анализ зависимости производных стоит исследовать на часовых масштабах времени и с небольшим числом показателей.

Таблица 4 – Частота попаданий некоторых показателей в основные шесть факторов

Переменная	F1	F2	F3	F4	F5	F6
P	9	9	4	3	0	0
R	20	3	4	0	0	0
CH ₄ (ммоль · м ⁻³)	5	3	7	3	5	1
CO ₂ (ммоль · м ⁻³)	8	5	5	4	0	3
U*	7	10	3	0	3	1
ФАР	20	3	4	0	0	0
H ₂ O (ммоль · м ⁻³)	6	7	8	3	0	4
H ₂ O · T	13	6	3	3	0	2
Humidity	19	5	1	1	0	0
H _{s1}	4	8	5	3	1	1
H _{s2}	1	10	9	3	1	1
KET	8	8	3	2	3	1
<w'CO ₂ '>	14	1	0	0	1	1
<w'H ₂ O'>	13	2	2	0	2	1
rsdownwell	20	3	4	0	0	0
rldownwell	22	4	0	0	0	1
T	21	5	0	0	0	1
T _{s1}	3	10	5	2	2	1
T _{s2}	2	11	8	3	1	1
U	4	1	4	5	6	2

V	7	7	4	2	2	2
W	3	5	4	5	6	2
Локальная производная по времени CH_4	0	0	0	0	1	2
Локальная производная по времени CO_2	0	0	1	2	2	5
Локальная производная по времени H_2O	0	0	1	5	2	5
Локальная производная по времени атмосферного давления	0	0	0	1	3	6
Локальная производная по времени температуры воздуха	0	0	0	1	3	6

По данным табл. 4 можем сделать вывод, что основными параметрами являются:

- температура воздуха,
- относительная влажность,
- суммарная радиация,
- температура и влажность почвы на разных глубинах,
- ФАР,
- кинетическая энергия турбулентности,
- атмосферное давление,
- динамическая скорость или скорость трения,
- произведение концентрации водяного пара и температуры.

В данной части работы можно предварительно сделать следующие выводы:

1. Структура факторов меняется от суток к суткам.
2. Из рассмотренных пар произведений оставить в дальнейших исследованиях произведение концентрации водяного пара и температуры воздуха. Остальные рассмотренные пары произведений (произведение концентраций метана и атмосферного давления, концентраций углекислого газа и водяного пара и др.) оказались не значимыми по сравнению с рассмотрением показателей в отдельности.
3. В регрессионных моделях, описывающих те или иные характеристики, необходимо учитывать не только температуру воздуха, но и другие характеристики. Так, например, в работе (Gažovič, 2010) для описания потока метана предложена регрессионная модель, включающая в себя динамическую скорость и температуру почвы, которая обсчитывалась аналогично данной работе.

Заметим, что по данным Бакчарского болота Томской области (56°51'29"с.ш., 82°50'91"в.д.) в теплое время 2014 г. для CO_2 найдена значимая корреляция с атмосферным давлением (Краснов и др., 2015), что было использовано для корректировки показаний датчиков автоматического комплекса измерений.

Анализ в целом

С учетом полученных результатов, проведены еще два варианта использования метода главных компонент к анализу данных, но уже в течении месяца в целом. Из рассмотренных переменных перестали рассматривать все возможные пульсации, а также произведения переменных, за исключением произведения водяного пара и температуры и добавили в рассмотрение кинетическую энергию турбулентных пульсаций, которую считали относительно получасовых осредненных значений. Все остальные переменные также брались с получасовым осреднением. В итоге получены, примерно, те же 1440 значений, что были и в варианте посуточного анализа. Всего было рассмотрено 32 переменные. Также было разделение данных по условию освещенности. При значении $\text{ФАР} \geq 20 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ данные были отнесены к дневным значениям, в противном случае, к ночным. Оказалось, «ночных» данных больше, чем «дневных». Коэффициенты корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми переменными в течение месяца приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми характеристиками в течение полного месяца

Переменная	CH_4			CO_2			H_2O		
	В целом	День	Ночь	В целом	День	Ночь	В целом	День	Ночь
T	-0,38	-0,06	-0,35	-0,50	-0,37	-0,53	-0,49	-0,07	-0,57
U^*	-0,45	-0,56	-0,41	-0,21	-0,16	-0,18	-0,26	-0,21	-0,25
KET	-0,15	-0,29	-0,14	-0,07	-0,06	-0,07	-0,08	–	-0,08
KETP	-0,11	-0,21	-0,13	–	–	-0,06	-0,06	–	-0,09
R	-0,28	–	-0,25	-0,25	-0,26	-0,16	-0,23	-0,11	-0,17
ФАР	-0,22	0,13	-0,31	-0,20	-0,13	-0,13	-0,20	-0,21	-0,18
T_{s1}	0,09	–	0,11	-0,09	-0,12	-0,11	-0,06	0,09	-0,10
T_{s2}	–	-0,19	–	-0,28	-0,28	-0,32	-0,23	–	-0,32
H_{s1}	-0,11	–	-0,13	0,08	0,12	0,10	0,05	-0,09	0,09
H_{s2}	–	0,07	–	0,27	0,14	0,32	0,26	-0,06	0,33
P	0,14	0,14	0,16	0,07	–	0,13	0,07	–	0,14
Albedo	-0,33	0,28	-0,28	-0,26	0,15	-0,21	-0,31	–	-0,25
$\text{H}_2\text{O} \cdot T$	0,27	0,14	0,31	0,53	0,42	0,58	0,61	0,59	0,65

В табл. 6 приведены коэффициенты корреляции между производными концентраций парниковых газов и некоторыми параметрами. Собственные числа представлены на рис. 6. Как видим, по принципу Кеттела здесь факторы не выделяются, поэтому, используя общепринятый критерий, выделяется 8-9 факторов, которые объясняют, примерно, 80 процентов общей дисперсии, а первые три фактора объясняют 50 процентов дисперсии.

Факторные нагрузки представлены в таблице 7.

Как видно из табл. 5, коэффициенты корреляции для месяца в целом и для «дневных» и «ночных» данных серьезно отличаются. Отсюда можно сделать вывод, что имеет смысл разделять данные таким образом. Возможно, имеет смысл разделять данные и по другим условиям и рассматривать группы в отдельности. В табл. 6 приведены коэффициенты корреляций между локальными производными концентраций парниковых газов по времени и некоторыми характеристиками в течение месяца.

Таблица 6 – Коэффициенты корреляции между локальными производными концентраций парниковых газов по времени и некоторыми характеристиками в течение полного месяца

Переменная	$\partial\text{CH}_4/\partial t$			$\partial\text{CO}_2/\partial t$			$\partial\text{H}_2\text{O}/\partial t$		
	В целом	День	Ночь	В целом	День	Ночь	В целом	День	Ночь
CH_4	-	-0,14	-	-	-0,37	0,07	-	-0,30	0,06
CO_2	-	-0,32	-	-	-0,64	0,08	-0,17	-0,88	-0,10
H_2O	-	-0,32	-	0,14	-0,36	0,16	-	-0,75	0,06
T	-	0,07	-	-	0,26	-0,08	-0,05	0,27	-0,10
U^*	-	0,06	-	-	0,18	-	-	0,16	-0,05
KET	-	-	-0,05	-	0,08	-	-	0,05	-
KETP	-	-0,13	-	-	-	-	-	-	-
R	-0,23	-	-	0,65	0,15	-0,08	0,24	0,18	-0,09
ФАР	-	-	-	-0,06	0,05	-0,09	-0,05	0,08	-0,13
T_{s1}	-	-	-	-	0,10	-	-	0,08	-
T_{s2}	-	0,09	-	-	0,25	-	0,06	0,20	-
H_{s1}	-	-	-	-	-0,09	-	-	-0,08	-
H_{s2}	-	-0,08	-	-	-	-	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Albedo	-0,09	0,10	-0,08	-0,14	-0,15	-0,12	-0,18	-0,18	-0,16
$\text{H}_2\text{O} \cdot T$	-	-0,21	-	0,12	-0,13	0,16	-	-0,37	-
Humidity	-	-0,18	-	-	-0,28	-	-	-0,26	-
U_x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U_y	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-
U_z	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ridownwell	-	0,12	-	-	0,33	-0,06	-	0,32	-0,08

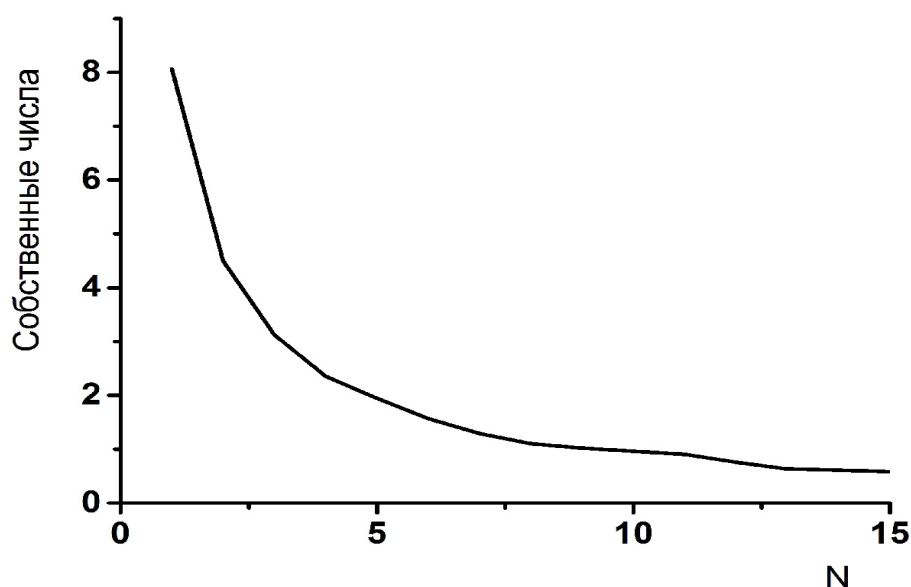


Рисунок 6 – Собственные числа корреляционной матрицы, построенной сразу по всему месяцу с использованием 30-минутных осредненных данных.

Таблица 7 – Максимальные факторные нагрузки параметров за весь месяц после вращения VARYMAX

Переменная	В целом	День	Ночь
CH ₄	0,42 (F4)	0,53(F3)	-0,59 (F5)
CO ₂	0,85 (F4)	0,92 (F2)	-0,88 (F5)
H ₂ O	0,88 (F4)	0,81 (F2)	-0,91(F5)
T	0,63(F2), -0,63 (F1)	-0,86(F1)	-0,73(F1)
U _x	-0,72(F3)	0,46(F3)	-0,74 (F2)
U _y	0,82 (F8)	0,80(F6)	-0,65 (F2)
U _z	-0,88(F3)	0,68(F6)	-0,85 (F2)
P	-0,82 (F7)	0,88(F7)	-0,66(F7)
H ₂ O·T	0,82 (F4)	-0,71(F1)	-0,80 (F5)
Humidity	0,82(F1)	0,59 (F8)	-0,58 (F8)
R	-0,96(F1)	-0,88(F4)	-0,95(F3)
Albedo	-0,42 (F1)	-0,72(F8)	-0,52(F3)
rsdownwell	-0,96 (F1)	-0,90(F4)	-0,95(F3)
rsupwell	-0,98 (F1)	-0,95(F4)	-0,94(F3)
rldownwell	-0,64 (F1), 0,62 (F2)	-0,84 (F1)	-0,72(F1)

T_{s1}	0,92 (F2)	-0,90 (F1)	-0,91(F1)
T_{s2}	0,95 (F2)	-0,95(F1)	-0,95(F1)
H_{s1}	-0,92 (F2)	0,90(F1)	0,91 (F1)
H_{s2}	-0,89 (F2)	0,81 (F1)	0,94(F1)
ФАР	-0,89 (F2)	-0,80 (F4)	-0,93(F1)
КЕТ	0,82(F3)	-0,84(F3)	0,91(F2)
КЕТР	0,85 (F3)	-0,80(F3)	0,89 (F2)
U^*	0,62 (F3)	-0,78(F3)	0,5 (F2)

То, что кажется незначимым для месяца в целом, может оказаться значимым или днем, или ночью. Так, например, коэффициент корреляции между производной концентрации метана и диоксидом углерода в целом за месяц незначим, но в дневное время существенен, т.е. между этими двумя характеристиками нелинейное соотношение. Аналогичные примеры находятся и между производной водяного пара и температурой воздуха. В табл. 7 находятся значения максимальных факторных нагрузок параметров после вращения. Интерпретация факторов будет различной как в целом за месяц, так и в отдельности для дневных и ночных данных. Так, в целом за месяц фактор F1 – радиация (все виды), F2 – температура воздуха, почвенные характеристики и ФАР, F3 – турбулентность, днем: F1 – T , $H_2O \cdot T$, длинноволновая радиация и почвенные характеристики, F2 – концентрации диоксида углерода и водяного пара, F3 – турбулентность, в ночное время F1 – почвенные характеристики, F2 – турбулентность, F3 – радиация.

Заключение

Поскольку используемая методика измерений позволяет получить большой массив данных, то на основании всего исследования можно сделать следующие выводы:

1. Организация расчетов имеет большое значение для интерпретации получаемых факторов.
2. Использование осредненных поминутно данных, посуточно в анализе выделяет больше весомых показателей по сравнению с использованием осредненных по 30-минутным интервалам данных в течение месяца. Так, атмосферное давление почти всегда было в первом факторе, а в анализе в целом, оно оказалось лишь седьмым. Возможно, это связано с тем, что осреднение по малому промежутку времени фильтрует лишь самые высокочастотные колебания, осреднение по 30 минут фильтрует больше колебаний. Кроме того, влияние одного и того же параметра в разные дни может быть разнонаправленным и в итоге за месяц быть нивелированным.

3. Тем не менее, среди всех вариантов расчета выделились показатели, которые оказались значимыми во всех вариантах расчетов. Это – температура воздуха, суммарная радиация и все виды радиации, ФАР, кинетическая энергия турбулентности, динамическая скорость, температура и объемная влажность почвы на двух глубинах, производство концентрации водяного пара и температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бажин Н.М., 1993. Атмосферный метан. Химия в интересах устойчивого развития, т. 1, с. 381-396.

Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития, 2002. / Под редакцией М.В. Кабанова, – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002-230 с.

Глаголев М.В., 2010. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России. Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, т. 1, № 2. с. 1.

Завалишин Н.Н., Логофет Д.О., 1997. Моделирование экологических систем по заданным диаграммам «запасы – потоки». Математическое моделирование, т. 9. № 9. с. 3-17.

Завалишин Н.Н., Логофет Д.О., 2001 Динамические блоковые модели углеродного цикла в экосистеме переходного болота. Математическое моделирование, т. 13, № 4, с. 3-18.

Завалишин Н.Н., 2005 Динамические режимы функционирования углеродного цикла в экосистеме переходного болота. Математическое моделирование, т. 17, № 1, с. 43-64.

Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота, 2012. /Под ред. М.В.Кабанова. – Новосибирск, 243 с.

Кароль И.Л., Киселев А.А. 2004. Атмосферный метан и глобальный климат. Природа, № 7, с. 47-52.

Краснов О.А., Maksyutov S., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. 2015. Мониторинг потоков метана и двуокиси углерода на Бакcharайском болоте в теплый период года. Материалы XXI Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика океана», Томск, 22-26 июня 2015 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. D129-D132.

Курганова И.Н., Кудеяров В.Н., 2012. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода. Наука в России. № 5, с. 25-32.

Лапина Л.Э., Успенский И.М., Михайлов О.А., 2014. Факторный анализ концентраций парниковых газов и других

параметров с мезоолиготрофного болота Медла-Пэв-Нюр. Труды Коми научного центра УрО РАН, № 187, с. 94-108.

Мигловец М.Н., Лукашева М.В. 2012. Суточная динамика эмиссии метана и ее зависимость от температуры почвы на различных участках мезо-олиготрофного болота подзоны средней тайги. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем», Киров, 4-5 декабря 2012 г. – Киров: ООО «Лобань». с. 84-87.

Михайлов О.А., Загирова С.В., Мигловец М.Н., Вилле К., 2013а. Потоки диоксида углерода в экосистеме мезоолиготрофного болота в переходный период осень-зима. Сибирский экологический журнал, № 2, с. 181-187.

Михайлов О.А., Загирова С.В., Гончарова Н.Н., Мигловец М.Н., 2013б. Суточная динамика CO₂ в системе «болото-атмосфера» в период отсутствия активной вегетации растений. Известия Коми научного центра, № 3, с. 35-40.

Лоули Д., Максвелл А., 1967. Факторный анализ как статистический метод. – М., Мир,

Ким Дж. О., Мьюллер Ч.У., 1989. Факторный анализ: статистические методы и практические вопросы. В кн: Факторный, дискриминантный и кластерный анализ, –М.: Финансы и статистика, с. 5-77.

Оценка баланса углерода на севере России: прошлое, настоящее и будущее. 2013. / Под ред. П. Кури и В. Пономарева. – Сыктывкар. Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 64 с.

Семенов С.М. (Ред.), 2012. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М.: Росгидромет. 507 с.

Торфяные ресурсы Республики Коми, 2000. – Сыктывкар. 613 с.

Углерод в лесных и болотных экосистемы особо охраняемых природных территорий Республики Коми, 2014. /Отв. ред.: К.С. Бобкова, С.В. Загирова. Сыктывкар. Институт биологии КомиНЦУрОРА. 202 с.

Gažovič M., Kutzbach L., Schreiber P., Wille C., Wilmking M., 2010. Diurnal dynamics of CH₄ from a boreal peatland during snowmelt. Tellus B. v. 62, Issue 3. pp. 133-139.

Runkle B.R.K., Wille C., Gažovič M., Wilmking M., Kutzbach L., 2014. The surface energy balance and its drivers in a boreal peat land fen of North-Western Russia. Journal of Hydrology. V. 511. pp. 359-379.

Schneider J., Kutzbach L., Wilmking M. 2012. Carbon dioxide exchange fluxes of a boreal peat land over a complete growing season, Komi Republic, NW Russia. Biogeochemistry, v. 111, No 1-3, pp. 485-513. DOI 10.1007/S10533-011-9684.

УДК 504.054: 574.21: 502.2.05

МЕТОДОЛОГИЯ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ЕЕ РАЗВИТИЕ В СВЯЗИ С КОНВЕНЦИЕЙ О ТРАНСГРАНИЧНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВОЗДУХА НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

И.В. Припутина

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, Институтская ул., 2,
irina.priputina@gmail.com

Резюме. В статье представлены основные положения и история развития методологии критических нагрузок. Она используется для количественной оценки допустимых уровней воздействия атмосферных загрязняющих веществ на наземные и пресноводные экосистемы в рамках международной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Приведены примеры использования методологии критических нагрузок, в том числе, в отечественных экологических исследованиях.

Ключевые слова. Атмосфера, загрязняющие вещества, критические нагрузки, кислотообразующие выпадения, эвтрофирование экосистем, модели баланса массы, биоиндикаторы, критические уровни.

CRITICAL LOADS METHODOLOGY AND ITS ELABORATION IN CONNECTION WITH THE CONVENTION ON LONG-RANGE TRANSBOUNDARY AIR POLLUTION

I.V. Priputina

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science,
Russian Academy of Sciences
2, Institutskaya Str., Pushchino, Moscow region, 142290, Russia,
irina.priputina@gmail.com

Summary. The article presents basic approaches and history of the development of critical loads methodology. The methodology is used for quantitative assessment of permissible levels of impacts of atmospheric pollutants on terrestrial and freshwater ecosystems in the context of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Examples of critical loads methodology application are presented, in particular, in Russian environmental researches.

Keywords. Atmosphere, pollutants, critical loads, acid deposition, ecosystem eutrophication, mass-balance models, bioindicators, critical levels.

Введение

Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (The Convention on Long-Range Transboundary Air

Pollution, далее Конвенция), подписанная в Женеве в 1979 г. и объединяющая в настоящий момент 51 государство, включая РФ, относится к числу первых международных конвенций в области охраны окружающей среды. Ее принятие было связано с необходимостью решения проблемы кислотных дождей, вызванных техногенным загрязнением атмосферного воздуха кислотообразующими соединениями (прежде всего, оксидами серы и азота). Эта экологическая проблема, ставшая в 1970-1980-х годах особо актуальной для стран северной и центральной Европы, показала условность государственных границ при распространении загрязняющих веществ, когда техногенные выбросы от источников в одних странах становятся причиной деградации экосистем в соседних государствах (Agren, 2000). Подробная информация о структуре и рабочих органах Конвенции представлена на сайте <http://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>.

Список атмосферных поллютантов, включенных в Конвенцию, со временем был расширен и, помимо оксидов серы и соединений азота, включает тяжелые металлы (Pb, Cd, Hg и др.), стойкие органические соединения (Persistent Organic Pollutants), приземный озон и твердые частицы. Мониторинг их трансграничного распространения проводится в рамках европейской программы ЕМЕП (The European Monitoring and Evaluation Programme; <http://www.emep.int>), входящей в структуру Конвенции.

В рамках Конвенции решаются следующие основные задачи:

- Инвентаризация национальных данных о выбросах загрязняющих веществ и количественное определение вклада каждой из европейских стран в загрязнение воздушной среды в разных регионах Европы.
- Выявление и мониторинг экологических эффектов для здоровья человека, состояния биоты и технологических объектов, вызванных поступлением в природные среды атмосферных поллютантов. Оценка интенсивности процессов деградации природных экосистем при разных уровнях поступления загрязняющих веществ с атмосферными выпадениями.
- Количественное определение экологически допустимых уровней поступления поллютатов из атмосферы для разных типов экосистем и их картографирование на национальном и общеевропейском уровне. Сравнительный анализ экологически безопасных и реальных уровней выпадений поллютантов с целью обоснования сокращения объемов техногенной эмиссии загрязняющих веществ разными странами.
- Анализ и распространение информации о технологиях снижения техногенной эмиссии загрязняющих веществ в разных секторах экономики.

- Разработка согласованной межгосударственной политики по снижению загрязнения воздушной среды.

За прошедшие годы основной текст Конвенции был дополнен восемью Протоколами, в которых сформулированы согласованные мероприятия по организации мониторинга и сокращению эмиссии загрязняющих веществ странами, подписавшими Конвенцию. Наиболее значимым результатом ее деятельности является существенное снижение эмиссии оксидов серы в Европе, интенсивность которой в период с 1980 по 2004 г. сократилась примерно на 75% (Sliggers, Kakebeeke, 2004), а также зафиксированное снижение уровней их содержания на станциях ЕМЕП (Tørseth et al., 2012).

Следует отметить значительный вклад Советского Союза, а затем Российской Федерации в подготовку и реализацию основных направлений деятельности Конвенции, в том числе, в обеспечение регулярной оценки трансграничного переноса и выпадений тяжелых металлов и стойких органических соединений, которые выполняются в международном Метеорологическом Синтезирующем Центре ЕМЕП «Восток» в Москве (<http://www.msceast.org/>).

Для выполнения задач Конвенции, помимо координирующих органов, были созданы несколько центров и международных программ сотрудничества, осуществляющих научные исследования, в которых важная роль принадлежит экологическому мониторингу и математическому моделированию процессов переноса и трансформации загрязняющих веществ в воздушной среде, почвах и водных экосистемах. Обязательной составляющей этих исследований является широкое обсуждение их результатов на постоянно организуемых в рамках Конвенции совещаниях и конференциях, а также в многочисленных публикациях (<http://www.unece.org/env/treaties/publications.html>; <http://wge-cce.org/Publications>).

В данной статье мы остановимся на одном из направлений деятельности Конвенции – оценке экологически безопасных уровней поступлений загрязняющих веществ в экосистемы, которые в рамках Конвенции определяются термином «критическая нагрузка» (Critical Load). Согласование методов расчета критических нагрузок (далее КН), создание единой европейской базы данных, а также карт величин КН и их превышений проводятся Координационным центром по воздействиям (Coordination Centre for Effects (CCE): <http://wge-cce.org/>) и международной программой сотрудничества по моделированию и картографированию (ICP Modelling and Mapping of Critical Levels and Loads and Air Pollution Effects, Risks and Trends (ICP M&M): <http://www.icpmapping.org/>). Расчеты величин КН для территорий разных стран выполняются национальными центрами (National Focal Centers), а результаты расчетов, подготовленные в едином масштабе для специальной проекции ЕМЕП (http://www.emep.int/mscw/Grid/emep_grid.html), включаются в объединенную базу данных ICPM&M.

Основные положения методологии критических нагрузок

Базовые экологические принципы, положенные в основу методологии критических нагрузок, начали обсуждаться научным сообществом в конце 1970 годов. К этому времени уже был накоплен положительный опыт международного сотрудничества в области экологических исследований, в частности, по Программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера». Методология КН согласуется с научными положениями отечественной школы геоэкологии и биогеохимии в критериях оценки допустимых воздействий и пороговых уровней содержания химических элементов и соединений в природных средах, учете ландшафтно-геохимических условий и использовании масс-балансового подхода при анализе процессов трансформации техногенных поллютантов в природных потоках миграции вещества (Глазовская, 1972, 1994; Ковальский, 1974; Израэль, 1975, 1984; Израэль и др., 1985; Моисеенко, 2003).

Согласно определению, термин *«критическая нагрузка»* означает количественную оценку воздействия одного или нескольких поллютантов, ниже которого, в соответствии с современным уровнем знаний, не возникает существенных вредных последствий для конкретных чувствительных элементов окружающей среды (Nilsson, Grenfield, 1988, цит. по: Протокол об ограничении выбросов окислов азота..., 1988). Таким образом, речь идет об определении экологически безопасного порога поступления загрязняющих веществ в экосистемы (в частности, с атмосферными выпадениями), при котором сохраняются благоприятные условия функционирования биоты, видовой состав и структура биоценозов. Соответственно, при уровне воздействия техногенного потока загрязняющих веществ ниже величин КН обеспечивается долговременное отсутствие негативных изменений, тогда как превышение КН является косвенным показателем экологического риска. Следует подчеркнуть, что КН – это экосистемный показатель, нормирующий «пороговое значение» величины поступления тех или иных поллютантов в экосистемы, меньше которого в их компонентах не происходит накопления загрязняющих веществ выше критических (экологически опасных) концентраций.

Важным моментом в методологии КН является определение «конкретных чувствительных элементов окружающей среды» – реципиентов или индикаторов, по состоянию или отдельным характеристикам которых судят о наличии негативного воздействия. В роли реципиентов могут выступать человек или отдельные виды биоты (например, охраняемые виды флоры и фауны, или эдификаторные виды и сообщества, или виды, играющие важную роль с позиций экосистемных услуг). Помимо биоиндикаторов, при определении КН используются и геохимические индикаторы (например, pH почв и воды, или повышенное содержание в них токсичных элементов и соединений). Это позволяет учесть специфику воздействия

одних и тех же загрязняющих веществ на разные группы реципиентов, что проявляется через разные экологические эффекты и определяется в рамках методологии КН как *эффект-ориентированный подход* (Effect Based Approach).

Известно, что неблагоприятные эффекты для живых организмов возникают при их контакте с загрязненными средами, если в них превышены экологически безопасные концентрации тех или иных поллютантов. Допустимый уровень содержания загрязняющих веществ определяется в методологии КН термином «*критические уровни*» (Critical Levels), которые являются аналогами отечественных средовых показателей ПДК и ОДК. Согласование значений критических уровней поллютантов, включенных в Конвенцию и определяемых для разных природных сред, групп реципиентов или типов экосистем на основе экспериментальных и мониторинговых данных, является важным направлением исследований международных совместных Программ Конвенции: программы комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы (ICP Integrated Monitoring; <http://www.syke.fi/nature/icpim>), программы по оценке и мониторингу подкисления водных экосистем (ICP Waters; <http://www.icp-waters.no/>), по оценке и мониторингу воздействий загрязнения воздуха на леса (ICP Forests; <http://icp-forests.net/>) и по воздействию загрязнения воздуха на природную растительность и урожаи (ICP Vegetation; <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/>).

Таким образом, для одной и той же экосистемы (или типа экосистем) может быть определено несколько значений КН одного и того же поллютанта, в зависимости от (i) выбранных реципиентов или (ii) критических уровней поллютантов или (iii) соответствующих разным видам экологических эффектов.

Величины КН могут быть получены на основе анализа данных мониторинговых и экспериментальных полевых исследований (так называемые, *эмпирические КН*), и одновременно были разработаны *математические методы расчета величин КН* с использованием биогеохимических моделей масс-баланса (UBA, 1996; Mapping Manual, 2004). В настоящее время в рамках Конвенции согласованы и утверждены алгоритмы расчета КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений, а также тяжелых металлов (Pb, Cd и Hg). Предложен, но пока не утвержден алгоритм расчета КН стойких органических соединений (Bakker, DeVries, 1996). Наиболее полная информация об эмпирических КН соединений азота дана в работе (Bobbink, Hettelingh, 2011).

Математические модели, используемые для расчета КН

Для расчетов КН используются *простые биогеохимические модели*, включающие уравнения двух типов. Первый – базовые уравнения баланса масс элементов и их соединений в почве, являющейся основной средой депонирования большинства техногенных соединений. Второй тип уравнений характеризуют интенсивность

потоков миграции элементов из почв в сопряженные среды. Подробная информация о расчетах КН дана в руководствах (UBA, 1996; Mapping Manual, 2004), в том числе, в русскоязычной версии (http://www.icpmapping.org/Mapping_Manual, далее по ссылке «Mapping Manual in Russian»).

Расчеты величин КН, выполнявшиеся национальными центрами в 1990-2000-х годах и использованные для обоснования сокращения эмиссии атмосферных поллютантов в уже принятых Протоколах, были основаны на равновесной эффект-ориентированной модели масс-баланса в почве (*Simple Mass Balance Model* (Posch et al., 1995)). Она базируется на представлении об относительном геохимическом равновесии потоков вещества, существующем между почвой и другими компонентами экосистем при постоянных внешних воздействиях. Таким образом, рассчитанные значения КН являются постоянной величиной, что не учитывает естественной динамики экосистем и климатические изменения. В модели SMB делается целый ряд допущений. Так, например, глубина рассматриваемого слоя почвы условно равняется глубине корневой зоны, что позволяет пренебречь циклом питательных веществ. Модель реализована с шагом 1 год, при этом, сезонные, межгодовые и другие краткосрочные изменения показателей в данной модели не учитываются, что позволяет использовать средние многолетние значения необходимых входных параметров. Физико-химические константы, используемые в ряде уравнений, принимаются постоянными для всего рассматриваемого слоя почвы. Модель не учитывает такие процессы, как внутривидовая конкуренция или наличие вредителей, вынос элементов с приростом той части фитомассы, которая ежегодно возвращается в почву с опадом растительности, и другие. При оценках потоков водной миграции считается, что эвапотранспирация происходит на поверхности почвы, а просачивание атмосферных осадков является постоянным по всему профилю почвы и происходит только вертикально.

В качестве примера можно привести уравнения, использующиеся в модели SMB при расчетах КН эвтрофирующих соединений азота для лесных экосистем (уравнение 1 и 2).

$$KH\ N(nutr) = N(im) + N(upt) + \frac{N(le_acc)}{1 - f(de)} \quad (1)$$

где $KH\ N(nutr)$ – критическая нагрузка питательного азота [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(im)$ – количество азота, ежегодно закрепляемого (иммобилизованного) в почве в результате образования почвенного органического вещества, [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(upt)$ – азот, аккумулированный в приросте фитомассы растительности, [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(le_acc)$ – допустимое вымывание азота из почв в почвенно-грунтовые воды [экв. $\cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$];

$f(de)$ – коэффициент денитрификации, который определяет интенсивность потерь почвенного азота и зависит от условий увлажнения почв и наличия в них минеральных соединений азота [-].

$$N(upt) = Y \cdot [N] \quad (2)$$

где $N(upt)$ – азот, аккумулированный в приросте фитомассы растительности, [экв. $\cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$];

Y – ежегодная продукция той части фитомассы, которая может быть удалена за пределы экосистем (для лесов – это стволовая часть древесины, $[\text{кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}]$;

$[N]$ – концентрация азота в фитомассе, [экв. $\cdot \text{кг}^{-1}$].

Для экологических ситуаций, когда качество природных сред и экономическая целесообразность допускают более интенсивные техногенные нагрузки (которые, однако, не должны в будущем привести к загрязнению почв и сопряженных с ними компонентов экосистем выше установленных нормативов) предлагается использовать *динамические модели*. В настоящее время разработано несколько моделей, позволяющих анализировать динамику почвенных характеристик при разных сценариях выпадений атмосферных поллютантов. Это голландская почвенная модель VSD и ее версия VSD+ (Posch et al., 2003; Posch, Reinds, 2009), шведская модель SAFE и ее версия ForSAFE-VEG (Alveteg et al., 1995; Belyazid et al., 2011), а также британская модель MAGIC (Cosby et al., 2001; Oulehle et al., 2012). Данные модели относятся к математическим динамическим моделям ионного обмена и циклов углерода и азота в почвах. Изменение химического состава почвенного раствора и динамика пулов обменных катионов имитируются, используя данные о минералогическом составе почв и регрессионные уравнения, описывающие процессы обмена между Al, H и основными катионами. Для описания кинетики разложения и трансформации органического вещества (далее ОВ), нитрификации и денитрификации в моделях используются системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами и поправками на температуру и влажность почвы. Минерализация азота и его иммобилизация рассчитываются в зависимости от соотношения C:N в основных пулах ОВ и корректируются в зависимости от поступления азота с атмосферными выпадениями и возможного вымывания

нитратов с почвенно-грунтовым стоком. Все модели реализуются с временным шагом один год.

Помимо прочего, использование рассматриваемых динамических моделей позволяет оценить период времени, за который концентрация поллютантов или другие почвенные характеристики достигнут критического уровня при той или иной интенсивности выпадений и в зависимости от природно-климатических условий конкретных регионов. Также, подобные модели могут использоваться для анализа изменений почвенных параметров в результате снижения атмосферных нагрузок кислотообразующих и эвтрофирующих соединений. Версии моделей VSD и VSD+ находятся в открытом доступе (http://wge-cce.org/Methods_Data/The_VSD_suite_of_models).

Карты критических нагрузок и их превышений

Для целей Конвенции пространственная «привязка» входных данных моделей расчета КН и визуализация результатов выполняются с использованием картографической модели (проекции) ЕМЕР, которая «разбивает» всю территорию Европы (включая Европейскую часть РФ) на сеть условных квадратов размером $150 \times 150 \text{ км}^2$ или $50 \times 50 \text{ км}^2$ (http://www.emep.int/mscw/Grid/emep_grid.html). При этом каждому квадрату должно соответствовать одно значение КН конкретного поллютанта (рис. 1).

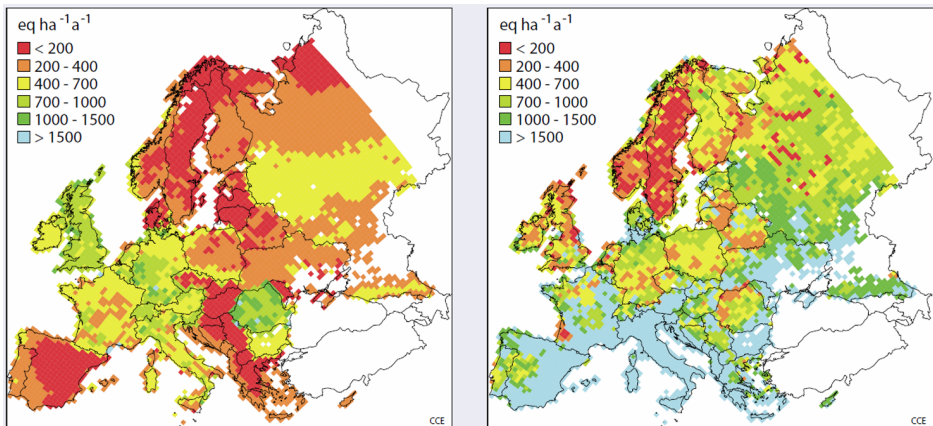


Рисунок 1 – Пример карт величин КН эвтрофирующих (слева) и кислотообразующих (справа) соединений (CCE Status Report, 2008).
Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹.

Но, как правило, в пределах территорий такого масштаба выделяется несколько типов экосистем, которые характеризуются разной степенью устойчивости к воздействию загрязняющих веществ.

При обосновании результирующей величины КН обычно используют принцип 95-ти % защищенности, который означает, что данная величина КН обеспечивает сохранность экосистем, чья совокупная площадь составляет не менее 95% от общей площади соответствующего квадрата ЕМЕП.

Метеорологическими Синтезирующими Центрами ЕМЕП в той же сетке проекции выполняются модельные оценки интенсивности выпадений поллютантов, что позволяет на основе сравнительного анализа данных по выпадениям и величин КН оценить вероятность превышений допустимых уровней поступления загрязняющих веществ (*превышения КН*) и определить территории, где необходимо снижение техногенных воздействий. Как следует из результатов оценки превышений КН кислотообразующих соединений, к 2000 г. в Европе существенно сократились экологические риски для природных экосистем, связанные с выпадением кислотных осадков (рис. 2).

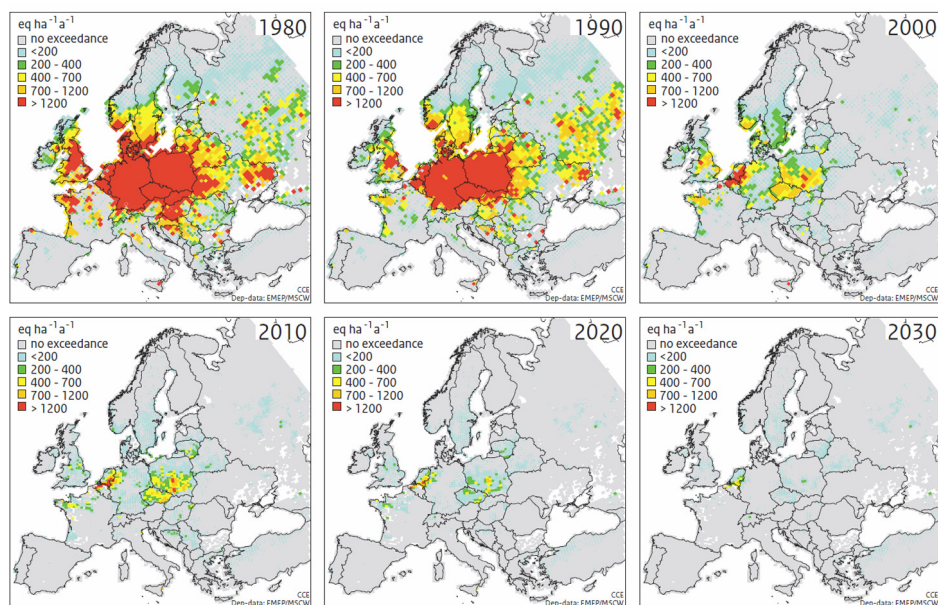


Рисунок 2 – Пример ретроспективных и прогнозных карт превышения КН кислотообразующих соединений (CCE Status Report, 2012). Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹; «no exceedance» – нет превышений КН.

В тоже время, антропогенная эмиссия соединений азота продолжает оставаться достаточно высокой, определяя повышенные риски эвтрофирования природных экосистем на территории большинства европейских стран не только в настоящее время, но и в ближайшее десятилетие (рис. 3).

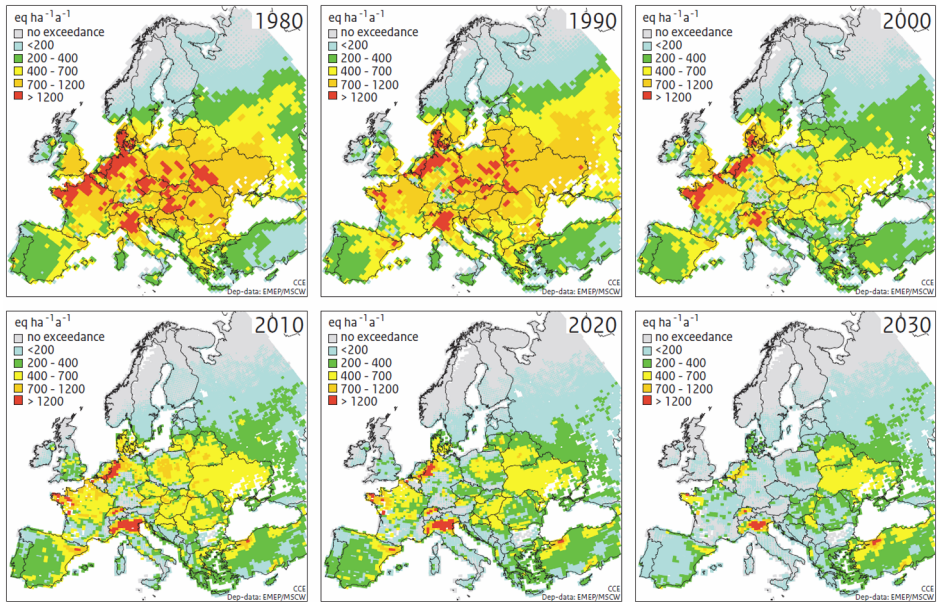


Рисунок 3 – Пример ретроспективных и прогнозных карт превышения КН эвтрофирующих соединений (CCE Status Report, 2012). Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹; «no exceedance» – нет превышений КН.

Опыт использования методологии КН для оценки допустимых антропогенных воздействий на природные экосистемы в РФ

В 1990-х годах функции российского национального центра (далее НЦ) были возложены на Всероссийский научно-исследовательский институт охраны природы (ВНИИ Природа), подведомственный МПР России. Соисполнителем работ по расчету КН, начиная с 1993 г., был Институт почвоведения и фотосинтеза РАН (ныне ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН). В соответствии с обязательствами РФ по Конвенции, в 1990-2000-х годах были выполнены расчеты величин КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений и тяжелых металлов (Pb и Cd) для европейской территории РФ с детальностью пространственного разрешения 150×150 км и 50×50 км (Башкин и др., 1998; CCE Status Report, 1991, 1993, 1995; Hettelingh et al., 2002; Priputina et al., 2007). Результаты этих расчетов опубликованы в Национальном Атласе России (2007). Одновременно, российский НЦ был ответственным за методическое обеспечение расчетов КН в странах СНГ. В рамках этой деятельности было организовано несколько субрегиональных совещаний в Москве, Пуцино, Минске и других городах (Calculation and Mapping..., 1999; Sliggers, Kakebeeke, 2004; Subregional meeting, 2004; и др.). Кроме того, были выполнены исследования, в которых подтверждена применимость

методик расчета КН тяжелых металлов (Pb и Cd) для ландшафтных условий и почв европейской части России (Pampura et al., 2007). Методики расчета КН подкисляющих соединений были апробированы для пресноводных экосистем территории РФ (Моисеенко, 2002, 2005).

После 2008 года из-за организационно-финансовых проблем деятельность НЦ по расчету и картографированию КН была приостановлена, а участие РФ в этом направлении Конвенции ограничилось участием отечественных специалистов в качестве экспертов в совещаниях, организуемых Рабочей группой по воздействиям и программой сотрудничества по моделированию и картографированию, где обсуждаются научно-методические вопросы оценки КН и их превышений. В настоящее время РФ не предоставляет официальных данных на запросы Координационного центра по воздействиям (так называемые Call for Data) и не участвует в ежегодных отчетах национальных центров, несмотря на неоднократные обращения руководства Координационного центра в МПР России легализовать статус российского НЦ и поддержать его деятельность. Как следствие, в периодически обновляемой общеевропейской базе данных КН для территории РФ используются величины КН, рассчитанные в Координационном центре по воздействиям в Нидерландах, которые не всегда согласуются с оценками, выполненными нашими специалистами на основе отечественных источников данных.

В тоже время, методология КН, первоначально не нашедшая широкой поддержки у российских геоэкологов (Глазовская, 1994), за прошедшие годы была успешно использована в ряде отечественных региональных исследований. В работах В.Н. Башкина с соавторами (Bashkin et al., 1995) и М.Ю. Семенова (2002) выполнены оценки величин КН кислотообразующих соединений для наземных экосистем азиатской части РФ. В исследованиях Г.Н. Копчик (2004) расчеты величин КН кислотообразующих соединений и ТМ применены для оценки устойчивости лесов Кольского полуострова к воздействию выбросов Мончегорского медно-никелевого комбината. Выполнены расчеты КН серы и азота для наземных экосистем в районах расположения российских станций ЕМЕП (Рябошапко и др., 2007). Для основных типов лесов Подмоскovie проведены расчеты величин КН эвтрофирующих соединений азота (Припутина и др., 2012). На примере г. Москвы методология КН была использована для оценки допустимых уровней воздействия атмосферных поллютантов на различные функциональные зоны урбанизированных территорий (Башкин и др., 2006).

Следует подчеркнуть перспективность методологии КН для целей экологического мониторинга, оценки воздействий на окружающую среду в рамках проектной документации крупных производственных проектов (ОВОС) и при анализе экологических рисков в

связи с возрастанием техногенной эмиссии атмосферных поллютантов и их выпадений. Это связано с тем, что принципы расчета величин КН в целом соответствуют определению нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, данному в Федеральном законе «Об охране окружающей среды». Согласно закону, это нормативы, которые установлены в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду, и при которых соблюдаются нормативы качества окружающей среды» (Цитата по: Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Глава 1. Статья 1. <http://www.rg.ru/2002/01/12/oxranasredy-dok.html>). Таким образом, на законодательном уровне подчеркивается необходимость единства двух групп нормативов: нормативов качества окружающей среды (ПДК, ОДК и других средовых показателей), и нормативов допустимого воздействия на окружающую среду (которые в отечественном природоохранном законодательстве пока разработаны слабо). Расчет величин КН и их превышений для экосистем разного иерархического уровня существенно дополняет результаты экологического мониторинга, позволяя выполнять разномасштабные экологические оценки влияния хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды с учетом тех или иных природоохранных приоритетов. В качестве примера можно привести опыт расчета КН эвтрофирующих соединений для прогнозной оценки экологических рисков, связанных с влиянием техногенной эмиссии оксидов азота на природные экосистемы в районах газодобычи и транспортировки природного газа (Припутина и др., 2006; Башкин и др., 2009; Башкин, Припутина, 2010). О востребованности методологии КН в современной практике экологических исследований свидетельствует включение базовой информации о принципах и методах расчета КН в учебные курсы подготовки специалистов экологического направления в ряде ВУЗов страны (Толпешта, 2014).

В то же время, следует отметить необходимость более широкого и всестороннего обсуждения вопросов использования методологии КН российскими специалистами с целью адаптации методов расчета КН к особенностям природных условий РФ и с учетом специфики имеющихся национальных данных. Это могло бы способствовать легализации КН как показателей допустимого воздействия на окружающую среду на нормативно-правовом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башкин В.Н., Козлов М.Я., Припутина И.В., Абрамичев А.Ю. 1998. Количественная оценка и картографирование критических нагрузок серы и азота на наземные и пресноводные экосистемы Европейской части России. – Проблемы региональной экологии, № 1, с. 26-42.

Башкин В.Н., Припутина И.В., Дмитриев В.В. 2006. Нормирование воздействия поллютантов на экосистемы урбанизированных территорий. – Использование и охрана природных ресурсов в России. № 5. с. 64-70.

Башкин В.Н., Припутина И.В., Маклюк О.В., Танканаг А.В. 2009. Экологическое обоснование региональных нормативов допустимых воздействий атмосферных поллютантов для наземных экосистем на основе процедур оценки риска. – Наука и техника в газовой промышленности. № 2, с. 33-40.

Башкин В.Н., Припутина И.В. 2010. Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ. 186 с.

Глазовская М.А. 1972. Технобиогеоомы – исходные физико-географические объекты ландшафтно-геохимического прогноза. – Вестник МГУ, сер. 5 (географ.). № 6, с. 23-35.

Глазовская М.А. 1994. Качественные и количественные оценки сенсорности и устойчивости природных систем к техногенным кислотным воздействиям. – Почвоведение. № 1, с. 134-139.

Израэль Ю.А. 1975. Комплексный анализ окружающей среды. Подходы к определению допустимых нагрузок на окружающую среду. В кн.: Всесторонний анализ окружающей природной среды. – Л.: Гидрометеиздат. с. 17-25.

Израэль Ю.А. 1984. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеиздат, 560 с.

Израэль Ю.А., Филлипова Л.М., Инсаров Г.Э., Семевский Ф.Н., Семенов С.М. 1985. К проблеме оценки и прогноза изменений состояния экосистем. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том VIII. – Л.: Гидрометеиздат, с. 9-26.

Ковальский В.В. 1974. Геохимическая экология. – М.: Наука. 326 с.

Копчик Г.Н. 2004. Устойчивость лесных почв к атмосферному загрязнению. – Лесоведение. № 4. с. 61-71.

Моисеенко Т.И. 2002. Определение критических нагрузок кислотных выпадений для поверхностных вод. – Водные ресурсы. Т. 29, № 3. с. 350-356.

Моисеенко Т.И. 2003. Антропогенная изменчивость пресноводных экосистем и критерии оценки качества вод. – В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 19. с. 72-94.

Моисеенко Т.И. 2005. Теория критических нагрузок и ее приложение к определению воздействия загрязняющих веществ на поверхностные воды Севера. – Труды Карельского НЦ РАН. Т. 1. с. 337-342.

Национальный Атлас России. 2007. Т. 2. Природа и экология. – М.: Роскартография. с. 421-424.

Припутина И.В., Башкин В.Н., Казак А.С., Горлов Д.В. 2006. Биогеохимические подходы к оценке устойчивости экосистем в зонах воздействия системы газопроводов «Средняя Азия – Центр». – Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. № 2. с. 102-109.

Припутина И.В., Аверкиева И.Ю., Танканаг А.В. 2012. Применение метода Монте-Карло в оценках допустимых воздействий атмосферных поллютантов на лесные экосистемы. – Математическая биология и биоинформатика, Т. 7, № 1, с. 322-333. doi: 10.17537/2012.7.322.

Протокол об ограничении выбросов окислов азота или их трансграничных потоков к Конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (русская версия текста). 1988. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/azot.pdf

Рябашапко А.Г., Брюханов П.А., Брускина И.М. 2007. Мониторинг атмосферного переноса загрязняющих веществ на территории Центрально-лесного биосферного заповедника. Заповедники России и устойчивое развитие. Материалы конференции. Труды Центрально-лесного государственного биосферного заповедника. Выпуск 5. – Великие Луки. с. 354-362.

Семенов М.Ю. 2002. Критические нагрузки подкисляющих соединений на наземные экосистемы Азиатской части России. – Новосибирск: Наука. 314 с.

Толпешта И.И. 2014. Методологические подходы к расчету критических нагрузок на экосистемы соединений серы и азота. Учебно-методическое пособие. – Тула: ЗАО «Аквариус». 128 с.

Agren C. 2000. Transboundary Air Pollution: The profit potential of further reductions. Stockholm, Sweden. The Swedish Environmental Protection Agency. URL: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c14/e1-44-02-08.pdf>.

Alveteg M., Sverdrup H., Warfvinge P. 1995. Regional assessment of the temporal trends in soil acidification in southern Sweden, using the SAFE model. Water, Air and Soil Pollution. V. 85. pp. 2509-2514.

Bakker D.J., W. De Vries. 1996. Manual for calculating critical loads of persistent organic pollutants for soils and surface waters. TNO-MEP report 96/509, The Netherlands.

Bashkin V.N., Kozlov M.Y., Priputina I.V., Abramychiev A.Y., Dedkova I.S. 1995. Calculation and mapping of critical loads of S, N and acidity on ecosystems of the Northern Asia. – Water, Air, and Soil Pollution. V. 85. pp. 2395-2400.

Bobbink R., Hettelingh J.-P. (eds.). 2011. Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. RIVM report 680359002. Bilthoven, the Netherlands. URL: <http://www.b-ware.eu/sites/default/files/publicaties/Review-revision-empirical-critical-loads-2011.pdf>.

Belyazid S., Kurz D., Braun S., Sverdrup H., Rihm B., Hettelingh J.-P. 2011. A dynamic modelling approach for estimating critical loads of nitrogen based on plant community changes under a changing climate. – *Environmental Pollution*. V. 159. pp. 789-801.

Calculation and Mapping of Critical Loads for Air Pollutants Relevant to the UN ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 1999. Proceedings of the Second training workshop, Pushchino, Russia, 27 September – 2 October, 1999., Moscow: POLTEX. 132 p.

CCE Status Report. 1991: Hettelingh J.-P., Downing R.J., de Smet P.A.M. (eds.). 1991. Mapping critical loads for Europe. RIVM report No. 259101001. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1991.

CCE Status Report. 1993: Posch M., Hettelingh J.-P., Sverdrup H., Bull K., De Vries W. (eds.). Calculation and Mapping of Critical Loads in Europe. RIVM Report 259101003. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1993.

CCE Status Report. 1995: Posch M., de Smet P.A., Hetteling J.-P., Downing R. (eds.). Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. RIVM Report № 59101004. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1995.

CCE Status Report. 2008: Hettelingh J.-P., Posch M., Slootweg J. (eds.). 2008. Critical Load, Dynamic Modelling and Impact Assessment in Europe. RIVM report № 500090003. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_2008.

CCE Status Report. 2012: Posch M., Slootweg J., Hettelingh J.-P. (eds.). 2012. Modelling and Mapping of Atmospherically-induced Ecosystem Impacts in Europe. RIVM report № 680359004. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_2012.

Cosby B.J., Ferrier R.C., Jenkins A., Wright R.F. 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 5. pp. 499-517.

Hettelingh J.-P., Slootweg J., Posch M., Dutchak S., Ilyin I. (eds.) 2002. Preliminary modelling and mapping of critical loads of cadmium and lead in Europe. RIVM Report 259101011/2002. Bilthoven, The Netherlands. 127 p.

Mapping Manual, 2004: Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. 2004. URL: http://icpmapping.org/Mapping_Manual.

Nilsson J., Grennfelt P. (eds.) 1988. Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skokloster. Sweden 19-24 March 1988. Miljörapport 15. 418 p.

Oulehle F., Cosby B.J., Wright R.F., Hruška J., Kopáček J., Krám P., Evans C.D., Moldan F. 2012. Modelling soil nitrogen: the MAGIC model with nitrogen retention linked to carbon turnover using decomposer dynamics. *Environmental Pollution*. V. 165. pp. 158-166. doi: 10.1016/j.envpol.2012.02.021.

Pampura T., Groenenberg J.E., Loft S. Pripulina I. 2007. Validation of transfer functions predicting Cd and Pb free metal ion activity I soil solution as a function of soil characteristics and reactive metal content. *Water, Air and Soil Pollution*. V. 184. pp. 217-234. doi: 10.1007/s11270-007-9410-4.

Posch M., De Smet P.A.M., Hettelingh J.-P., Downing R.J. (eds.). 1995. Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe: CCE Status report 1995. RIVM Report No 259101004. Bilthoven, The Netherlands.

Posch M., Hettelingh J.-P., Slootweg J., Downing R.J. (eds.) 2003. Modelling and Mapping of Critical Thresholds in Europe. CCE Status Report 2003, RIVM Report 259101013, Bilthoven, The Netherlands, pp. 37-44.

Posch M., Reinds G.J. 2009. A very simple dynamic soil acidification model for scenario analyses and target load calculations. *Environmental Modelling and Software* V. 24, No 3, pp. 329-340.

Pripulina I., Abramychiev A., Tankanag A. 2007. New dataset and results of calculating critical loads for forest ecosystems of European Russia // The 7th Sub-regional workshop of effect-oriented activities under Convention on LRTAP. Sept. 28 Oct. 1, 2006, Baia-Mare, Romania. Cluj-Napoca: RISOPRINT. pp. 79-90.

Sliggers J., Kakebeeke W. 2004. Clearing the air: 25 years of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. United Nations, Geneva. ISBN 92-1-116910-0.

Subregional meeting, 2004: Proceedings of the 6th Subregional meeting on Effect-Oriented Activities in the Countries of Eastern and South-Eastern Europe relevant for the Un ECE Convention on LRTAP. 2004. Moscow-Pushchino, September 16-18, 2004. Smolensk: Magenta Publ. House. 128 p.

Tørseth K., Aas W., Breivik K., Fjærraa A.M., Fiebig M., Hjellbrekke A.G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K.E. 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmos. Chem. Phys.*, V. 12, pp. 5447-5481. <http://www.atmos-chem-phys.net/12/5447/2012/acp-12-5447-2012.htm>.

UBA, 1996: Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. Text 71/96. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Germany, Berlin.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОДОРОДИЕМ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ РЯДОВ УРОЖАЙНОСТИ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ

В.А. Романенков

ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,
Россия, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31а, viua@online.ru

Резюме. На основе сопоставления урожайности зерновых культур, получаемой в различных вариантах трех полевых опытов с удобрениями, и урожайности при оптимальном питании, рассчитанном на основе моделирования. Оценено варьирование урожайности во времени. Результаты показывают возможности как последовательного возрастания урожайности с увеличением дисперсии, так и снижения урожайности и дисперсии под действием исследуемых факторов. Выявлено не только возрастание абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения минеральных и органических удобрений, как в прямом действии, так и в последствии. Анализ изменения во времени потенциала продуктивности зерновых позволил выявить эффект благоприятных и неблагоприятных лет в отношении погоды, а также эффект прекращения внесения удобрений.

Ключевые слова. Длительные полевые опыты, потенциал продуктивности, устойчивость урожаев, моделирование.

STUDY OF EFFICIENCY OF PRODUCTIVITY MANAGEMENT IN AGROECOSYSTEMS BASED ON ANALYSIS OF YIELD SERIES IN LONG-TERM FIELD EXPERIMENTS

V.A. Romanenkov

D.N. Pryanishnikov All-Russian Institute for Agrochemistry,
31a, Pryanishnikova str., 127550, Moscow, Russia, viua@online.ru

Summary. Grain yield data of three field experiments with fertilizers were compared to the yield under optimal nutrition calculated using a model. Yield variability with time was assessed. The results showed possibility of yield and its variance concurrent increase as well as possibility of their consistent decrease due to analyzed factors. The results showed the effect and aftereffect of mineral and organic fertilization both on growth in yield absolute values and their stability. Analysis of trends in the yield potential of cereals demonstrated effects of favorable and unfavorable years (in regard to weather conditions) on crops as well as the effect of cessation of fertilization.

Keywords. Long-term field experiments, yield potential, yield sustainability, modeling.

Введение

Одной из основных проблем, возникающих при анализе межгодовой изменчивости продуктивности культур в длительных полевых опытах, является выделение неконтролируемых факторов из комплекса факторов, определяющих конечный урожай, и, прежде всего, погодной составляющей урожайности. Многолетний ряд данных, получаемый в длительных опытах, включающий широкий диапазон реализаций погоды, является весьма перспективным для получения представлений об устойчивости функционирования системы «почва – погодные условия – продуктивность», но требует анализа диапазона изменчивости каждого из влияющих факторов (Фрид, 2003; Стребков и др., 1988; Сысуев, Мухамадьяров, 2001; Ранькова, 1976; Стребков, 1989). Учитывая новые задачи, ставшие актуальными в связи с глобальными изменениями климата, необходимо оценивать длительные последствия мероприятий по управлению плодородием в регулировании условий роста и развития растений таким образом, чтобы максимально использовать изменяющиеся климатические ресурсы и нейтрализовать, насколько это оказывается возможным, отрицательные эффекты. Использование данных длительных полевых опытов, в которых ведется сопряженный мониторинг растительных, климатических и почвенных показателей, оказывается актуальным для обоснованного выбора адаптационных мер в растениеводстве, связанных с развитием глобального изменения климата (Сиротенко, 2004; Сиротенко и др., 2008). Если удастся описать динамику продуктивности варианта опыта, связанную с изменением плодородия почвы, любая модель продукционного процесса, даже не включающая контролируемые факторы, исследуемые в опыте, может быть расширена за счет использования функциональных зависимостей, учитывающих комплексное воздействие агротехнических факторов, что значительно повышает практическую ценность прогнозных расчетов на основе подобной модели.

Объекты и методика исследования

Опыт Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС) (г. Долгопрудный, Московская область) № 1 «Сравнительная эффективность навоза и минеральных удобрений» закладки 1931 г. Четырехпольный севооборот первого опыта «черный пар – озимая пшеница (рожь) – пропашные (картофель, кормовая свекла, подсолнечник) – овес», проводится в 4 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные по урожайности овса 1931-1997 гг. всех 4 полей по следующим вариантам:

- абсолютный контроль;
- навоз 36 т/га за ротацию, внесение по 12 т/га под каждую культуру;

- полное минеральное удобрение (NPK) на фоне извести, внесение минеральных удобрений в дозах эквивалентных содержанию в навозе;
- навоз 18 т/га + NPK в эквиваленте 18 т/га навоза за ротацию на фоне извести.

Черный пар сменил занятый пар после 5 ротаций, в 1950 г. (Хлыстовский, 1992). Опыты Центральной опытной станции (ЦОС) ВНИИА (Барыбино, Домодедовский район, Московская область) «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» (опыт 1) последовательной закладки 1964-1966 гг. и «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте» (опыт 2) последовательной закладки 1960-1962 гг. Четырехпольный севооборот первого опыта «картофель – озимая пшеница – картофель – ячмень» проводится в 3 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные по урожайности ячменя в 1968-1999 гг. всех 3 полей по следующим вариантам:

- абсолютный контроль;
- навоз 50 т/га под пропашные (Н);
- NPK, внесение полного минерального удобрения в дозе, эквивалентной содержанию в навозе и втрое большей (3 NPK);
- навоз совместно с двойной дозой NPK (Н+2NPK).

Одинарная доза N минеральных удобрений, вносимых под ячмень, составляла в разные годы 26-39 кг/га. С 1992 г., после прекращения внесения удобрений, изучается последствие (Алиев и др., 2011).

Севооборот второго опыта «вики-овсяная смесь – озимая пшеница – картофель – ячмень с подсевом клевера – клевер – озимая пшеница проводится в 3 полях. Для расчетов и моделирования использованы данные 1965-1998 гг. по урожайности по следующим вариантам: навоз 10 т/га +N63P43K66 (средняя доза за севооборот) – Н+NPK, а также внесение на этом фоне гербицидов (с 1965 г.), гербицидов совместно с ретардантами и фунгицидами (с 1984 г.). При этом доза азотных удобрений, вносимых под ячмень, составляла в разные годы 35-85 ц/га (Ефремов, 2011).

Все из перечисленных выше опытов являются продолжающимися, выбор каждого из временных промежутков для моделирования обусловлен наличием электронной базы сопряженных данных опыта.

Моделирование продуктивности сельскохозяйственных культур основывалось на компьютерной имитационной модели «Климат – Почва – Урожай» (Сиротенко, 1981). Модель представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, численно интегрируемых с суточным временным шагом в течение вегетационного

периода культуры. Моделировались процессы формирования биомассы отдельных органов (листья, стебли, корни, зерно) и динамика составляющих баланса влаги и минерального азота в почве. Информационной базой для проведения расчетов по модели послужили локальные ежедневные метеоданные, полученные на метеорологических постах длительных опытов или ближайших метеостанциях. Как правило, доступными являлись данные по среднесуточной температуре и (или) минимальной и максимальной суточной температуре, ежедневному количеству осадков.

Моделируемыми показателями продуктивности, использованными в последующих расчетах, являлись урожайность яровой культуры при оптимальном минеральном питании (прежде всего – азотном на достаточном РК фоне) и при частичном азотном стрессе.

На основе сопоставления динамики фактической урожайности, получаемой в различных вариантах опыта и урожайности при оптимальном минеральном питании, рассчитанной моделью, вычисляли отношение:

$$W = Y/Y_N \quad (1),$$

где Y – фактическая урожайность,

Y_N – урожайность при оптимальном N питании. Показатель изменяется от 0 до 1; 1 соответствует реализации условий оптимального питания растений, 0 – отсутствию урожайности.

Для каждого года исследований рассчитывали с помощью модели «Климат – Почва – Урожай» величину Y_N и Y_{Nlim} (N-лимитированную урожайность), затем вычисляли W по формуле (1). Модель настраивалась с использованием соответствия значений урожайности, получаемой по модели при лимитировании азотного питания урожайности контрольных вариантов анализируемых опытов. Кривые динамики W построены в графическом модуле программы Statistica 5 с последующим сглаживанием методом минимализации средневзвешенного квадрата отклонений.

Ранее данный показатель использовался для расчетов возможностей агротехнического регулирования условий минерального питания в заданных агрометеорологических условиях, на основе средне-областных статистических данных (Сиротенко, Абашина, 1982). В применении к локальным условиям проведения длительного опыта он может не только показывать степень обеспеченности азотом в заданных агрометеорологических условиях, но и характеризовать изменчивость реализации продуктивности культуры в зависимости от динамики обеспеченности питательными элементами, что косвенно характеризует уровень плодородия почвы. В отличие от средне-областной статистики в полевом опыте предполагается единая система используемых элементов агротехнологии,

поэтому, при нормировании фактической урожайности расчетной оптимальной величиной появляется возможность оценить динамику потребности растений в питательных элементах с допущением нестационарности климата и плодородия, а также сравнить реализацию этих потребностей в различных вариантах длительных полевых опытов.

Анализ влияния изменения продуктивности культуры за время проведения полевого опыта возможен на основе метода EV-диаграмм для скользящих оценок средних (E) и дисперсий (V). Метод использован Сиротенко (2007) в качестве оценки текущих изменений климата на продуктивности сельского хозяйства. В приложении к исследованиям длительного полевого опыта появляется возможность сравнительной оценки изменений как климатически обусловленной урожайности, получаемой по модели «Климат – Почва – Урожай», так и реальной урожайности, лимитированной условиями минерального питания растений. Расчеты средних и средних квадратических отклонений урожайности по различным скользящим периодам выполнены в программе Excel.

Оптимальным периодом осреднения для температуры и осадков в агрометеорологии считается обычно интервал в 15-20 лет, но, как показывают последние исследования, при учете воздействия изменений климатических условий выбор оптимального периода осреднения является функцией от скорости их изменения (Сиротенко, 2007). С учетом периода установления равновесия для полевых опытов в Нечерноземной зоне, требующего, например, для органического углерода почвы не менее 10-20 лет (Романенков и др., 2009) нами использовался период осреднения 10 лет.

Результаты

Как видно из анализа показателя W в опыте ДАОС, ряд урожайности овса достигает состояния, близкого к стационарному, на что потребовалось около 30 лет (рис. 1). Разумеется, реальные данные обнаруживают колебания по годам наблюдений, но выбранная процедура сглаживания дает возможность сравнить скорость изменения W во времени опыта. Размах колебаний в данном случае обусловлен тем, что оптимизация минерального питания растений непосредственно зависит от агрометеорологических условий.

Как правило, наибольших значений относительное увеличение урожайности при постоянной дозе N удобрений достигает в неблагоприятные годы. Чтобы проиллюстрировать это положение, используем данные по азотно-лимитированному уровню урожайности, также являющегося выходными данными моделирования. Н-лимитированная урожайность и W связаны обратной зависимостью (r отрицателен, по абсолютной величине = 0,48-0,56, значим при 95%-ном уровне значимости). Корреляция растет при исключении 1931-1951 гг. (r по абсолютной величине = 0,64-0,70). Таким обра-

зом, в первые 20 лет исследования эффективность оптимизации минерального питания растений менее выражена на фоне изменения уровня плодородия почвы. В последующем, когда абсолютные изменения W снизились, выявляется, что при неблагоприятных погодных условиях формируемая вегетативная масса растений меньше вследствие лимитирования ростовых процессов, следовательно, снижения потребности растений в элементах питания, прежде всего в N, и количество минерального N в почве обеспечивает в большей степени потребности растений. Наличие данной зависимости показывает, что эффективность потребления питательных веществ растениями овса изменяется в зависимости от типа погоды.

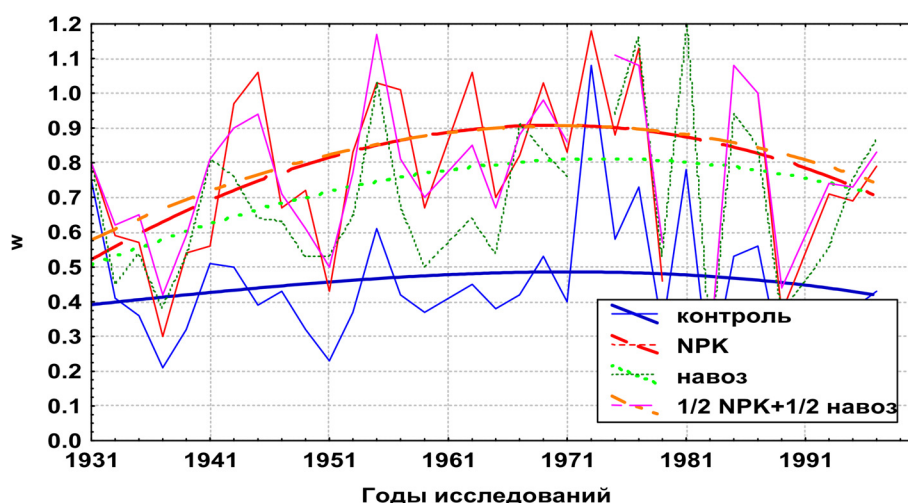


Рисунок 1 – Динамика реализации потенциала продуктивности овса в длительном полевым опыте ДАОС: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

При естественном плодородии почвы (контрольный вариант) потенциал продуктивности реализуется в среднем на 40-50%, обнаруживая максимальные значения в 1961-1981 гг. Относительная средняя прибавка за счет оптимизации условий минерального питания растений может достигать 39% на варианте полного минерального удобрения и 1/2 дозы NPK и навоза. Для варианта с внесением навоза W увеличивается в среднем на 29%. Уже в первые годы после применения удобрений прирост относительной урожайности составляет 12-25%, достигая наибольших значений для органо-минерального варианта. Влияние эквивалентных доз навоза остается на протяжении всего периода наблюдений менее эффективным в увеличении условий питания растений, в среднем на 10%, за исключением нескольких последних лет наблюдений. Реализация потенциала продуктивности овса при внесении минерального и

эквивалентной дозы органо-минерального удобрения практически одинакова.

Можно заметить, что достигнутый уровень окультуренности почвы в данном опыте не является постоянным, изменяясь во времени в результате антропогенного или климатического воздействия. Вероятными причинами снижения относительных прибавок урожая, более заметных на минеральном и органо-минеральном вариантах после 80-х гг., могут быть изменение погодных условий, влияющих на чередование благоприятных и неблагоприятных лет, а также изменение агротехники – например, несвоевременность выполнения технологических операций.

В первом опыте ЦОС ВНИИА при естественном плодородии почвы (контрольный вариант) потенциал реализации продуктивности вначале составлял 50%, снижение за 10 лет опыта составило около 10% (рис. 2). Он оставался на уровне 40% в 1975-90 гг.

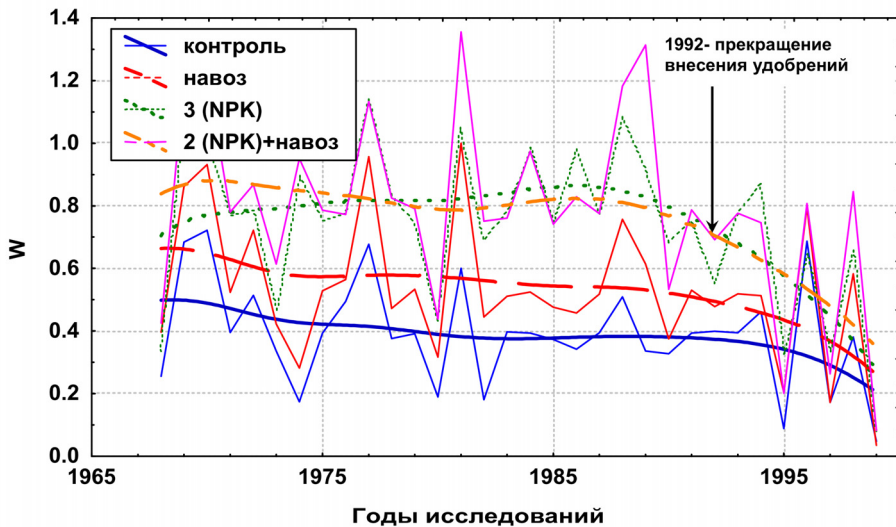


Рисунок 2 – Динамика реализации потенциала продуктивности ячменя в длительном полевым опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв»: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

Динамика W для варианта Н сходна с контрольным вариантом, оставаясь в среднем больше на 15%, а после 1990 г. – 10%, как результат ускоренного снижения потенциала продуктивности по сравнению с контролем в конце описываемого периода. Потенциал продуктивности у варианта NPK превышал таковой для Н в среднем на 5%, но в последствии за 7 лет упал до уровня контрольного. Снижение потенциала продуктивности на варианте Н составило около 20%, последствие внесения навоза в 1993-96 гг. позволяло обеспечить большую продуктивность по сравнению с вариантом с

внесением минеральных удобрений. Варианты 3NPK и H+2NPK оказались близкими в реализации потенциала продуктивности ячменя, составлявшего в 1975-90 гг. в среднем 80-85% от оптимального, при этом его возрастание для органо-минерального варианта происходило быстрее, чем на варианте 3NPK, для достижения которого потребовалось около 10 лет. После прекращения внесения удобрений снижение потенциала продуктивности составило 50% за 7 лет, происходя одинаково для обоих вариантов. Со снижением величины N-лимитированной урожайности W возрастает, корреляция значима при 95% для варианта Н и H+2NPK (r отрицателен, составляя 0,43 и 0,38 по абсолютной величине, соответственно), возрастая при исключении периода 1967-1977 гг. до 0,69 и 0,62 по абсолютной величине, соответственно.

Второй опыт ЦОС ВНИИА интересен с той точки зрения, что он заложен в расчете на достижение максимально возможной продуктивности за счет последовательного наложения на фон органо-минерального питания комплекса средств защиты и роста растений. Органо-минеральный фон опыта позволил достичь через 12 лет потенциал продуктивности 90% от оптимального, впоследствии оставаясь на уровне 85-95% (рис. 3).

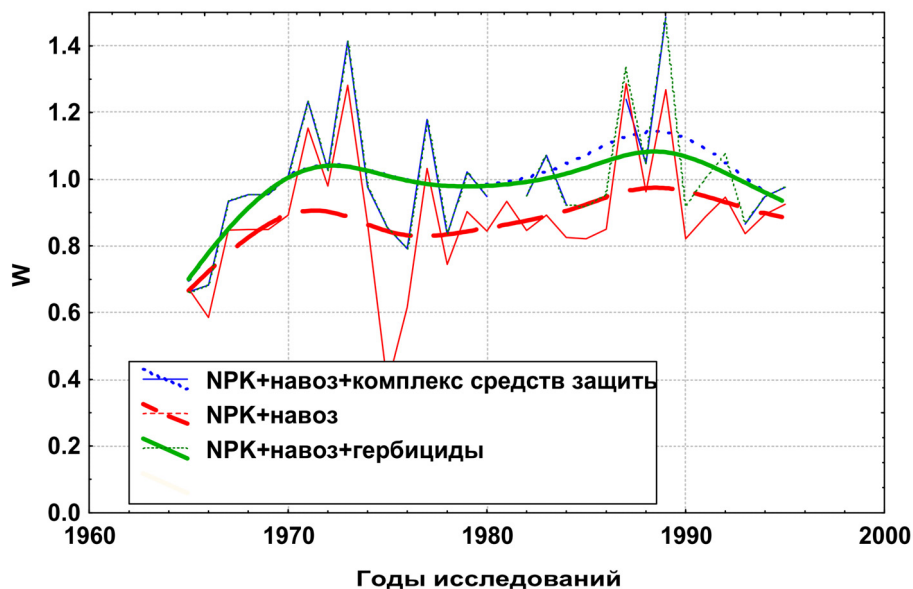


Рисунок 3 – Динамика реализации потенциала продуктивности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте»: ежегодные (тонкие линии) и сглаженные данные.

Внесение гербицидов на этом фоне позволило достичь в тот же период оптимальной продуктивности, в среднем в период 1970-

80 гг. различия составляли 15%, впоследствии сократившись до 10-12%. Введение варианта с дополнительным наложением средств защиты растений проявлялось в лишь в отдельные годы, дополнительное повышение продуктивности составляло не более 6% (максимальные усредненные значения продуктивности достигли 115%), впоследствии снизившись до уровня варианта с гербицидами. Следовательно, исключение конкуренции за минеральное питание с сорняками позволило достичь устойчивого увеличения продуктивности, а использование на этом фоне дополнительных средств защиты давало нестабильный эффект. Последнее, впрочем, может быть связано с меньшим временным рядом по сравнению с двумя другими вариантами. Вариант с внесением органических и минеральных удобрений позволял обеспечить уровень продуктивности, превышающий на 5-10% аналогичный вариант первого опыта ЦОС, вероятно, за счет меньшей интенсивности севооборота, при этом сроки достижения продуктивности в обоих случаях оказывались равными.

Снижение потенциала реализации продуктивности ячменя после 1988 г., заметное для всех вариантов, не связано с модификациями опыта и, как в случае опыта ДАОС, может быть связано как с неблагоприятными условиями периода уборки, так и с несвоевременным выполнением технологических операций. Со снижением величины N -лимитированной урожайности W возрастает для варианта с внесением органических и минеральных удобрений, корреляция значима при 95% уровне значимости (r отрицателен, составляя по абсолютной величине 0,56), возрастая при исключении первых 12 лет до 0,71.

Более подробный анализ влияния изменения продуктивности культуры за время проведения полевого опыта возможен на основе метода EV-диаграмм для скользящих оценок средних (E) и дисперсий (V). Конечные и начальные точки диаграмм, а также отдельные точки, когда дисперсия достигала максимальных или минимальных значений, выделены цифрами, обозначающими номер члена временного сглаженного ряда (т.е. номер соответствующего периода, за который проведено сглаживание). Рост среднего уровня урожайности уменьшает риск получения низких урожаев, а увеличение дисперсии увеличивает его. Для графического представления варьирования урожайности на EV-диаграммах также построены прямые, каждая из которых задает области получения заданной урожайности с соответствующей вероятностью.

Рассмотрим динамику урожайности ячменя 5 вариантов первого опыта ЦОС (рис. 4). В период 1968-1989 гг. (точки 1-13) для контрольного варианта происходило снижение, как уровня урожайности, так и снижение дисперсии, так что расстояние от точек диаграммы до прямой 80% обеспеченности урожайности 10 ц/га практически не изменялось (рис. 4а). Исключение составляет

период 1970-1982 гг. (точки 3-6), когда происходило падение урожайности с сохранением дисперсии, т.е. условия получения урожая ячменя ухудшались, затем урожайность вновь возросла. В 1980-1992 гг. (точки 13-16) условия обеспечения урожая 10 ц/га улучшились – точки располагаются между прямыми 80 и 90% обеспечения урожайности. В 1985-1999 гг. (точки 18-23) происходило увеличение стандартного отклонения – более чем в 2 раза при снижении урожайности – т.е. условия обеспечения урожайности 10 ц/га ухудшились и точки стали вновь удаляться от прямой 80% обеспеченности. В этом варианте без внесения удобрений ухудшение условий получения урожая может быть связано с повторением неблагоприятных погодных лет.

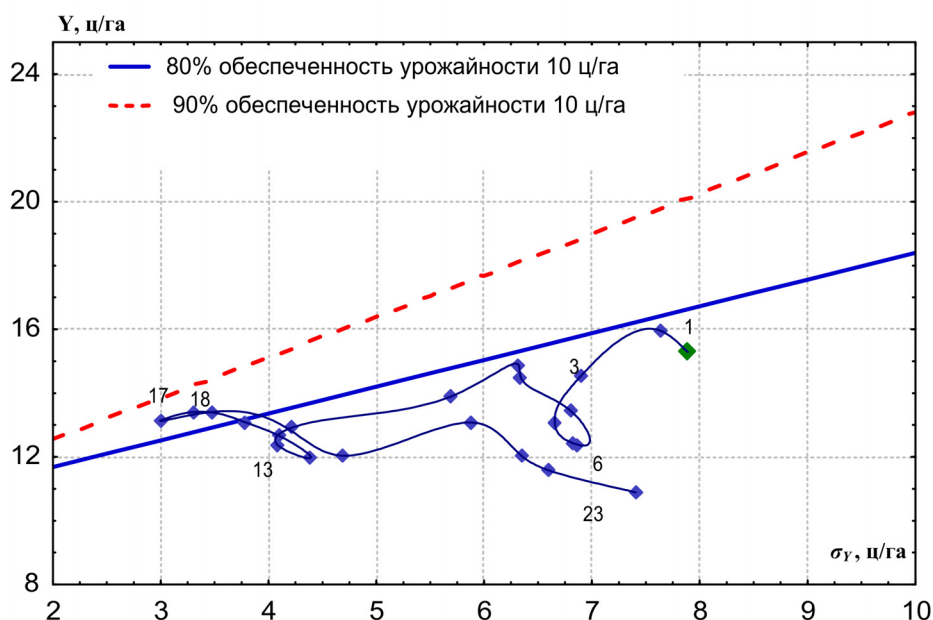


Рисунок 4 а – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» по 10-летним скользящим периодам в 1968-1999 гг. Вариант: а – абсолютный контроль. Прямые соответствуют 80 и 90% обеспеченности заданной урожайности, цифры на графиках обозначают соответствующий период, за который проведено сглаживание.

Применение тройной дозы NPK и эквивалентной ей дозы органо-минеральных удобрений позволяет достичь устойчивой урожайности 20 ц/га – для минерального варианта достижение 80% вероятности потребовало периода 1968-82 гг., а на органо-минеральном варианте достигалось практически сразу (рис. 4 б, в).

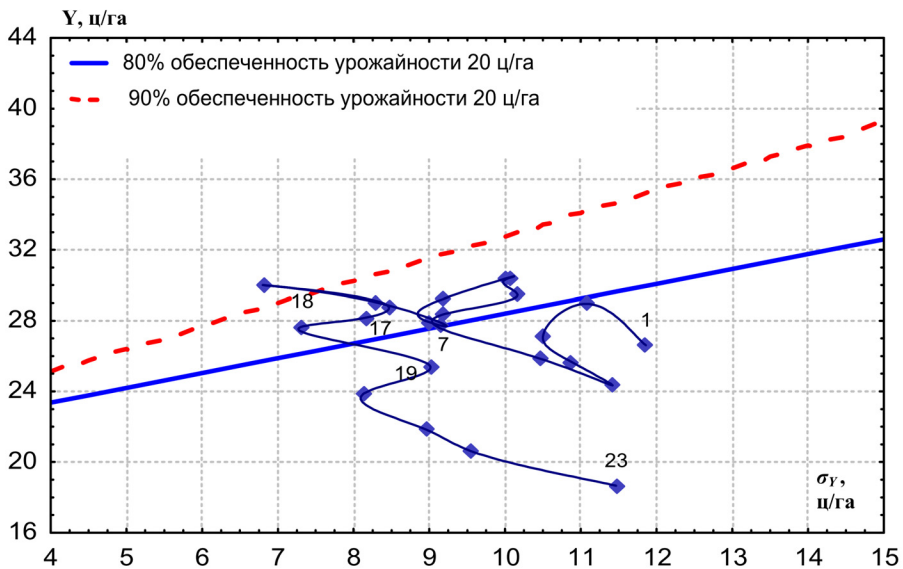
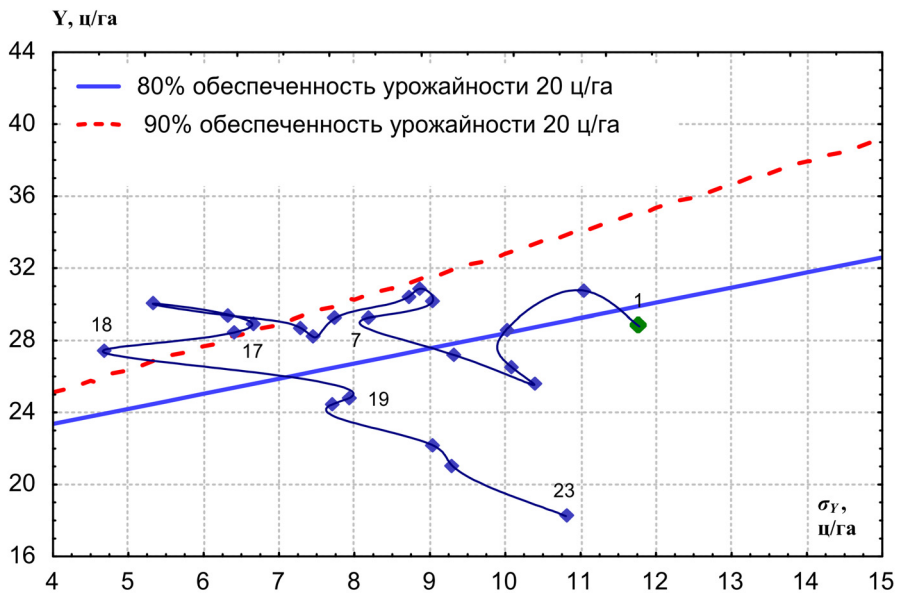


Рисунок 4 б, в – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв» по 10-летним скользящим периодам в 1968-1999 гг. Варианты: б – Н+2НРК, в – НРК в дозе, эквивалентной содержанию в Н. Прямые соответствуют 80 и 90% обеспеченности заданной урожайности, цифры на графиках обозначают соответствующий период, за который проведено сглаживание.

Урожайность органо-минерального варианта оставалась в 1974-94 гг. (точки 7-18) на уровне 28-31 ц/га, но квадратичное отклонение снижалось последовательно практически вдвое, достигая минимума 4,7 ц/га, что позволило достичь и превысить вероятность 90% получения урожая 20 ц/га.

В этот же период урожайность минерального варианта также составляла 28-30 ц/га, при большей величине межгодовой изменчивости – минимальное значение в полтора раза превышает минимум органо-минерального варианта и, как следствие, достигалась не более чем 85%-ная вероятность урожая 20 ц/га, за исключением короткого периода 1985-94 гг. (точка 18). В 1986-99 гг. (точки 19-23) урожайность падает в обоих вариантах до уровня 18 ц/га при квадратическом отклонении 11 ц/га, что примерно соответствует 80%-ной обеспеченности урожайности 10 ц/га. Проведенный анализ дает возможность не только констатировать повышение дисперсии при увеличении урожайности, но и сравнивать влияние различных систем удобрения, оценивать риск получения низких урожаев и вероятность поддержания заданного уровня урожайности в отдельные отрезки времени проведения опыта. В частности, для всех вариантов данного опыта выявляется возможность обеспечения увеличения не только абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения агрохимических средств, а также возрастание дисперсии при одновременном снижении урожайности после прекращения внесения удобрений.

Динамика урожайности и дисперсии ячменя, оцененная с помощью EV-диаграмм во втором опыте ЦОС ВНИИА показана на рис. 5. Органо-минеральная система позволяет достичь стабильной урожайности 20 ц/га – достижение уровня 90%-ной вероятности потребовало периода 1965-84 гг. (точки 1-11) (рис. 5б). В отдельные периоды достигалась 80%-ная обеспеченность урожайности 25 ц/га. В период 1976-95 гг. (точки 12-22) урожайность на органо-минеральном варианте составляла 32-34 ц/га, при среднеквадратичном отклонении 7,6-10,3 ц/га. В 1982-1991 гг. (точка 18) достигалась максимальная продуктивность при наименьшей величине дисперсии.

Такую же динамику продуктивности обнаружил и второй опыт ЦОС. Хотя органо-минеральный Н+2NPK вариант первого опыта (рис. 4в) достигает на 3,5 ц/га меньшей продуктивности, в обоих случаях обеспечивается 80%-ное достижение вероятности 25 ц/га (для этого можно сравнить расположение соответствующей прямой на рис. 5а). Таким образом, в благоприятные климатические годы в обоих опытах органо-минеральные варианты двух опытов обеспечивали одинаковую стабильность урожаев ячменя, несмотря на различия в севооборотах. В 1983-1995 гг. (точки 19-22) органо-минеральный вариант первого опыта оказался менее устойчивым, следовательно, менее благоприятным.

Наложение на данный фон гербицидов обеспечило достижение 90%-ной вероятности урожая 25 ц/га к периоду 1973-82 гг. (точка 9) и впоследствии – выше, за исключением последних четырех периодов.

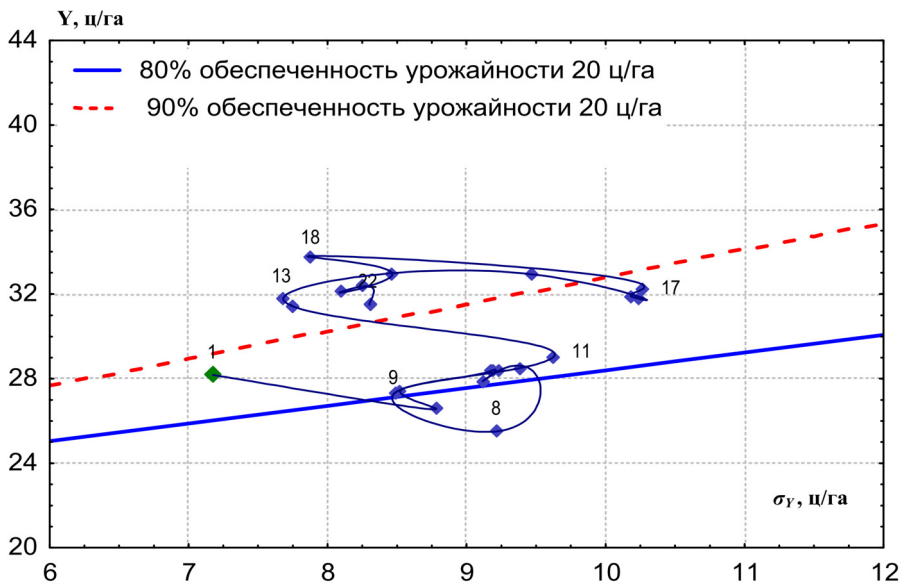
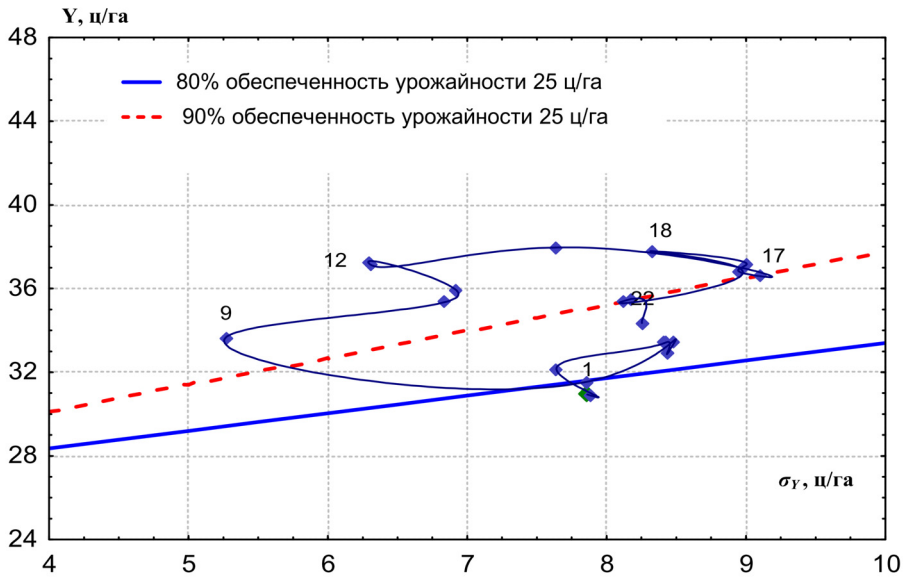


Рисунок 5 а, б – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя в длительном полевом опыте ЦОС «Эффективность удобрений при комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте» по 10-летним скользящим периодам. Варианты: а – органо-минеральный фон со средствами защиты; б – органо-минеральный фон.

Динамика урожайности и дисперсии в этом случае другая – до 1976-85 гг. (точка 12) обеспечивалось снижение риска при возрастании урожайности, но, при достижении уровня 37 ц/га и среднеквадратичном отклонении 6,3 ц/га, впоследствии происходило постоянное возрастание изменчивости – она увеличилась в 1,4 раза к периоду 1982-91 гг. (точка 18) при сохранении прежней урожайности, что увеличило риск снижения урожайности ниже 25 ц/га, особенно после 1983-95 гг. (точки 19-22). К концу исследуемого периода условия получения урожайности были близки к начальным, обнаружив отсутствие однонаправленного изменения под дополнительным воздействием средств защиты растений. Очевидно, что возрастание урожайности до уровня оптимального обеспечило участие новых факторов изменчивости урожайности, действие которых не проявлялось на органо-минеральном фоне.

EV-диаграммы также позволяют косвенно оценить сравнительное влияние элементов агротехнологии и агроклиматических условий на обеспечение устойчивости урожая. Для этого целесообразно сравнить направленность изменений на диаграммах реальных и полученных с помощью имитационной модели данных урожайности (рис. 6). В условиях оптимального минерального питания по данным модели в 1965-80 гг. (точки 1-7) обеспечивалась реализация 80%-ной вероятности урожайности 25 ц/га, поскольку с ростом урожайности в 1,5 раза возросла межгодовая изменчивость. Период 1973-90 гг. (точки 9-18) характеризовался варьированием между 80 и 90% вероятности урожайности, после которого вновь произошло снижение урожайности с одновременным снижением дисперсии. Если сравнить данные модели с вариантом Н+NPK+гербициды второго опыта ЦОС, урожайность 25 ц/га в нем обеспечивалась в большинстве периодов на уровне вероятности 90% и выше, при меньшем, более чем в 1,5 раза, среднеквадратичном отклонении (рис. 5а). Колебания погодных условий в 1975-95 гг. (точки 11-22) выражались, главным образом, в изменении дисперсии при достаточно устойчивом сохранении уровня урожайности > 35 ц/га. Внесение комплекса агрохимических средств привело к улучшению условий получения стабильного урожая ячменя в данном варианте опыта за счет стабилизации как урожая, так и величины дисперсии – более чем вдвое по сравнению с вариантом модели.

Сравнение EV-диаграммы N-лимитированной урожайности (рис. 6а) с органо-минеральным вариантом второго опыта ЦОС (рис. 5б) показывает, что в обоих вариантах в 1973-91 гг. (точки 9-18) происходило практически однонаправленное снижение дисперсии при сохранении обеспеченности урожайности, модель предсказывает такую же динамику дисперсии в 1981-1997 гг. (точки 17-24). В вариантах опыта среднеквадратичное отклонение оставалось всегда выше предсказанного моделью.

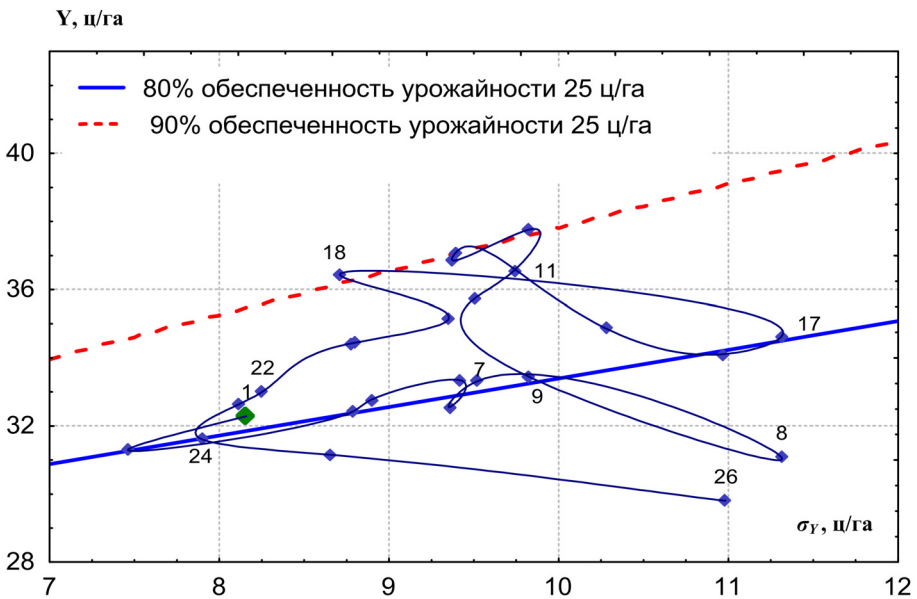
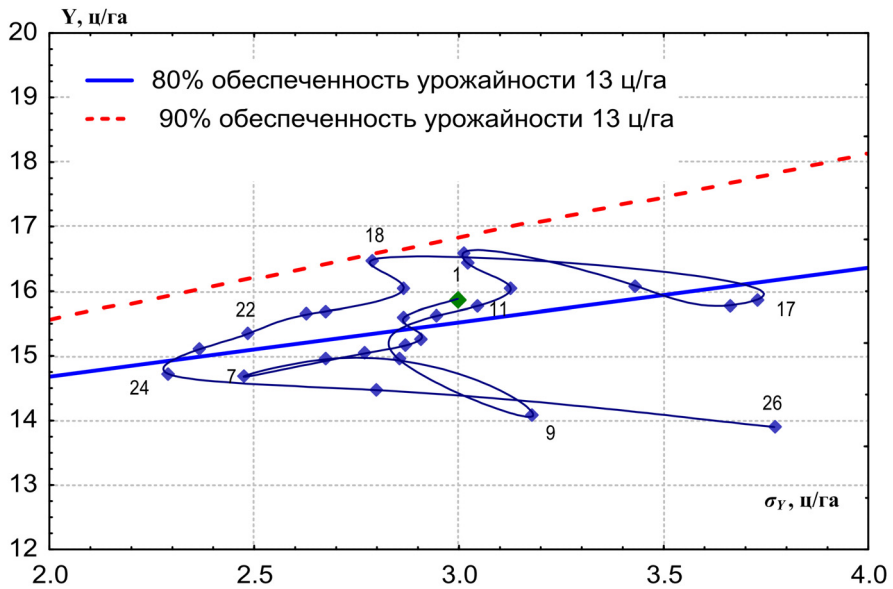


Рисунок 6 а, б – EV-диаграмма оценок средних величин и средних квадратичных отклонений урожайности ячменя, полученная с помощью модели «Почва – Климат – Урожай» в период 1965-1999 гг. по 10-летним скользящим периодам. Варианты: а – N-лимитированная урожайность; б – оптимальное N-питание.

Следовательно, внесение удобрений обеспечило при изначально высокой изменчивости урожайности возможность ее последовательного снижения, т.е. уменьшения риска низких урожаев,

хотя абсолютная величина межгодовой изменчивости оставалась выше рассчитанных для условий N-лимитирования. При прекращении внесения удобрений (после 1992 г., рис. 2; точки 19-23 рис. 4 б, в) данная тенденция сразу прекращалась, хотя климатические условия благоприятствовали, согласно модели, ее проявлению (тот же период на рис. 6). Это обстоятельство является свидетельством прямого действия минеральных и органических удобрений на изменение условий устойчивости урожая яровых зерновых культур.

Заключение

В условиях Нечерноземной зоны при естественном плодородии в течение длительного периода обеспечивается не более 40% потенциала продуктивности яровых зерновых культур. Динамика реализации потенциала продуктивности культуры обнаруживает эффект благоприятных и неблагоприятных климатических лет, а также прекращения внесения удобрений. Рост потенциала продуктивности составлял 15-30% при внесении удобрений и дополнительно около 10% при использовании средств защиты.

Диапазон варьирования урожайности яровых зерновых культур увеличивается при увеличении доз применяемых удобрений и при уровне минерального питания, отличного от оптимального. При значительном увеличении варьирования с ростом урожайности проявляется преимущество органо-минеральных систем удобрения в обеспечении устойчивости урожая, при слабом увеличении варьирования – минеральных систем при эквивалентных дозах внесения. Выявлено влияние увеличения не только абсолютной величины, но и стабильности урожаев за счет внесения агрохимических средств, как в прямом действии, так и в последствии. При росте обеспеченной урожайности возможно последовательное снижение среднеквадратичного отклонения более чем вдвое по сравнению с условиями питания, отличными от оптимальных.

В течение достаточно длительных периодов времени может происходить последовательное возрастание урожайности с увеличением дисперсии, либо обратный процесс – снижения урожайности и дисперсии (в обоих случаях – с сохранением вероятности получения заданного урожая). В определенные периоды возможно увеличение урожайности с одновременным снижением дисперсии – под воздействием улучшения условий питания растений за счет внесения агрохимических средств и реализации благоприятных погодных условий, но, как правило, данное изменение не стабильно. В неблагоприятные годы и при прекращении внесения удобрений урожайность снижается на фоне повышения дисперсии. При достижении оптимальной урожайности повышение урожаев возможно и за счет снижения межгодовой изменчивости, т.е. уменьшения риска низких урожаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алиев А.М., Варламов В.А., Державин Л.М. и др. 2011. Эффективность удобрений при их комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте (опыт СШ 2/60). В сб.: Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации (К 70-летию Геосети). – М.: ВНИИА. с. 17-33.

Ефремов В.Ф. 2011. Изучение роли органического вещества навоза в повышении плодородия дерново-подзолистых почв. В сб.: Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации (К 70-летию Геосети). – М.: ВНИИА. с. 47-71.

Ранькова Э.Я. 1976. Объективная типизация метеорологических условий вегетационного периода озимых культур. В кн.: Агрометеорологические аспекты применения минеральных удобрений и агротехники. Труды Института экспериментальной метеорологии. – М.: Гидрометеиздат. Вып. 9 (68). с. 20-39.

Романенков В.А, Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А, Шевцова Л.К., Королева П.В. 2009. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. – М.: ВНИИА. 96 с.

Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л: Гидрометеиздат. 188 с.

Сиротенко О.Д. 2007. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. Методическое пособие. – М: Росгидромет. 77 с.

Сиротенко О.Д. 2004. Оценка влияния глобального изменения климата на агроклиматические ресурсы и климатообусловленную урожайность основных сельскохозяйственных культур. В кн.: Глобальные проявления техногенеза и изменения климата в агропромышленной сфере. – М.: РАСХН. с. 24-32.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В, Павлова В.Н., Попова Е.Н., Романенков В.А. 2008. Сельское хозяйство. В кн.: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 2. Последствия изменений климата. – М.: Росгидромет. с. 223-234.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В. 1982. Об использовании динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования урожая. Метеорология и гидрология. № 8. с. 95-101.

Стребков И.М. 1989. Основные закономерности взаимодействия векторов почвенного плодородия, удобрений и погоды в условиях дерново-подзолистых почв Центрального района НЧЗ РСФСР. Агрохимия. № 2. с. 36-41.

Стребков И.М., Кирикой Я.Т., Халанская Т.П. 1988. Методическое руководство по использованию принципов системного анализа в агрохимических исследованиях закономерности действия удобрений. – М.: ВИУА. 72 с.

Сысуев В.А., Мухамадьяров В.Ф. 2001. Методы повышения агробиологической эффективности растениеводства. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 216 с.

Фрид А.С. 2003. Методы сравнения вариантов в длительных полевых опытах. В сб.: Совершенствование методики проведения длительных опытов и математические методы обработки экспериментальных данных. – М.: Агроконсалт. с. 66-73.

Хлыстовский А.Д. 1992. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести. – М.: Наука. 192 с.

УДК 551.510.42+551.521+551.583

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО СЛОЯ В СТРАТОСФЕРЕ С ЦЕЛЬЮ СТАБИЛИЗАЦИИ КЛИМАТА

А.П. Ревокатова, А.Г. Рябошапка

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, revokatova@gmail.com

Резюме. Рассмотрены источники образования аэрозоля в стратосфере и возможные способы доставки предшественников аэрозолей в высокие слои атмосферы. Оценены достоинства и недостатки использования SO_2 и H_2S в качестве предшественников сернокислотного аэрозоля в стратосфере. Проведен анализ стоимости стабилизации климата с использованием метода управления потоком приходящей солнечной радиации.

Ключевые слова. Стабилизация климата, управление солнечной радиацией, стратосферный аэрозоль, предшественники аэрозоля, стоимость стабилизации климата.

TECHNICAL CAPABILITIES FOR CREATING AN AEROSOL LAYER IN THE STRATOSPHERE FOR CLIMATE STABILIZATION PURPOSE

A.P. Revokatova, A.G. Ryaboshapko

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, revokatova@gmail.com

Summary. Sources of aerosol formation in the stratosphere and possible methods of delivery of the aerosol precursors to the upper atmosphere are considered. Advantages and disadvantages of SO_2 and H_2S usage as precursors of sulfuric acid aerosols in the stratosphere are assessed. Costs of climate stabilization through management of incoming solar radiation flux are assessed.

Keywords. Climate stabilization, solar radiation management, stratospheric aerosols, aerosol precursors, climate stabilization costs.

Введение

Ежегодные оценки глобальных выбросов CO_2 в атмосферу показывают, что их рост опережает самые пессимистические прогнозы МГЭИК, сделанные в первых годах 21 века. По данным Международной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2014) антропогенный выброс CO_2 достиг в 2011 году 9,5 (от 8,7 до 10,3) ГтС, что на 54% больше, чем в 1990 г. За период с 1750 по 2011 годы за счет

сжигания ископаемого топлива и производства цемента антропогенный выброс CO_2 составил от 335 до 395 (среднее 365) ГтС. К этому нужно добавить поступление CO_2 в атмосферу за счет вырубки лесов и изменения характера землепользования в объеме 180 (100 – 260) ГтС. Все это привело в результате к величине кумулятивной антропогенной эмиссии в 545 (460 – 630) ГтС. Возросшие антропогенные выбросы CO_2 привели к росту его концентрации в атмосфере на глобальном уровне. С начала индустриальной революции (условно 1750 год) концентрация CO_2 в атмосфере выросла с 277 ppm(v) на 44%, и в 2013 году достигла отметки 400 ppm. Если темпы роста концентрации CO_2 сохранятся, это приведет к катастрофическому повышению средней глобальной температуры. В этой ситуации методы целенаправленного изменения параметров климатической системы (инженерия климата) могут быть востребованы уже в ближайшие десятилетия. В работе (Рябошапко, Ревокатова, 2015) показано, что даже совокупность всех разработанных к настоящему моменту эффективных методов удаления CO_2 из атмосферы не способна удержать глобальную температуру в рамках допустимых значений, при реализации сценариев RCP6.0 и RCP8.5 (а также при любом промежуточном сценарии). Поэтому человечество должно быть готовым применить методы воздействия на климатическую систему Земли (методы SRM – Solar Radiation Management).

В работах (Израэль и др., 2009; Lenton, Vaughan, 2009; The Royal Society, 2009) было выполнено сравнение различных методов и технологических схем реализации инженерного воздействия на климатическую систему для предотвращения недопустимого повышения глобальной температуры. Сравнение показало, что с точки зрения эффективности, реализуемости в ближайшие десятилетия и минимизации затрат наиболее перспективным методом является создание в стратосфере отражающего аэрозольного слоя. Потенциальная возможность геоинженерной стабилизации глобальной температуры на приемлемом уровне методом инъекции стратосферного аэрозоля была продемонстрирована в работе (Израэль и др., 2013).

Выбор оптимальной методологии создания аэрозольного слоя с заданными оптическими свойствами в стратосфере предполагает учет нескольких факторов: метод получения аэрозоля, способ его доставки в стратосферу, выбор оптимального района Земли, времени года и режима введения для создания аэрозольного слоя, стоимость использования технологии. Поскольку практические знания в области инженерии климата основаны только на изучении проявлений вулканизма (Асатуров, 1986; Pyle et al., 1996), определение параметров методологии может быть основано лишь на теоретических предположениях.

Возможные источники образования аэрозоля в стратосфере

Расчеты параметров взаимодействия солнечной радиации с аэрозолем показали (Израэль и др., 2007; Rasch et al., 2008; Teller et al., 1997), что для максимального отражения оптимальными могут быть аэрозольные частицы с диаметром в диапазоне 0,2 – 0,5 мкм. Создание аэрозольных частиц субмикронного размера возможно двумя путями – дроблением материала или получением частиц из газообразных предшественников. Первый путь не эффективен, поскольку при измельчении энергетические затраты растут обратно пропорционально квадрату линейного размера. Кроме того, при измельчении образуются частицы с широким спектром размеров от долей микрона до десятков микрон. Кроме того, недостатком тонкодисперсных сыпучих порошков является их высокая аутогезия (слипаемость), что затрудняет их рассеивание в стратосфере.

Второй путь связан с химической трансформацией газов-предшественников с образованием жидких или твердых продуктов. В этом случае, в результате нуклеации, конденсации и коагуляции образуются частицы с узким диапазоном размеров в субмикронной области. Технология введения должна предусматривать максимально возможное разбавление газа-предшественника в процессе введения, поскольку коагуляция протекает тем медленнее, чем больше расстояние между отдельными прото-частицами. Это ведет к образованию и длительному существованию в стратосфере частиц малых размеров, наиболее эффективных для отражения солнечной радиации в видимой области спектра.

В природных условиях постоянно реализуется второй путь образования аэрозольных частиц в стратосфере. Газообразными предшественниками в этом случае служат соединения серы, которые поступают в стратосферу либо за счет диффузии из тропосферы (диоксид серы SO_2 , сероуглерод CS_2 , карбонилсульфид COS), либо при вулканических извержениях (диоксид серы SO_2 , сероводород H_2S). В цепочке реакций окисления данные газы образуют серную кислоту, которая частично нейтрализуется с образованием ее солей – сульфатов. При целенаправленном создании сульфатных аэрозольных частиц наиболее реально использование двух серосодержащих газов – SO_2 и H_2S .

Способы доставки исходного вещества в стратосферу

За последние два десятилетия предложено несколько способов доставки необходимого вещества в стратосферу. Некоторые варианты представляются вполне реалистичными на уровне современного технического развития, другие выглядят весьма экзотичными.

Первый детальный обзор вариантов доставки вещества аэрозольных частиц в стратосферу был сделан экспертами США в 1992

году (COSEPUP, 1992). Ими было рассмотрено четыре потенциально возможных способа: вертикальная стрельба из корабельных орудий большого калибра, использование ракет, запуск воздушных шаров с грузом и выброс части топлива самолетами коммерческой авиации в виде субмикронных капель. Три первых из рассмотренных вариантов оказались высоко затратными. Более дешевым представился четвертый способ, но он не эффективен, поскольку практически все коммерческие полеты осуществляются ниже тропопаузы, где время жизни аэрозольных частиц весьма мало. Кроме того, следует учитывать постоянный рост цен на авиационное топливо. Высказывалась также идея добавлять соединения серы в топливо. Она нереалистична по двум причинам. Первая, указанная выше – недостаточная высота коммерческих полетов. Вторая – невозможность существенного увеличения сернистости без потери необходимых свойств авиационного топлива.

В работе (Robock et al., 2009) дополнительно рассмотрены еще несколько вариантов. Возможен запуск шаров, наполненных смесью H_2S или SO_2 с водородом. Оценки показали (Robock et al., 2009), что такой метод потребовал бы около 10 миллионов запусков в год и в расчете на 1 Мт поднимаемой в стратосферу серы. В условиях Арктики, где высота тропопаузы составляет около 8 км, возможно поднятие привязного аэростата, соединенного с землей рукавом (шлангом) из тканого полимера (Lane et al., 2007). Закачка газов на высоту установки аэростата производится с земли насосами. Экзотичным, но технически реализуемым представляется проект строительства башни высотой около 20 км. Считается, что современные сооружения ограничены по высоте лишь архитектурными решениями и отсутствием необходимости строить выше. На самом деле, современные наука и техника теоретически позволяют построить башню из углеродно-эпоксидных композитов высотой более 100 км (Robock et al., 2009). В таком варианте доставка газов также может производиться с земли насосами.

Представляется, что наиболее близким к реализации может быть вариант использования современных крупнотоннажных самолетов. Основные лимитирующие факторы при использовании самолета в целях инженерии климата – это максимальная высота, на которую он может подняться, и его грузоподъемность. В табл. 1 приведены характеристики самолетов, которые потенциально могли бы использоваться в настоящее время или после модернизации для целей доставки аэрозоля или его предшественников в стратосферу.

Из табл. 1 следует, что уже в настоящее время уровень развития авиационных технологий может обеспечить потребности инженерии климата. Наиболее близкими прототипами являются самолеты-заправщики. Так, заправщик KC-135 имеет полезную нагрузку около 100 тонн и крейсерский потолок 15,2 км. Такие самолеты могут применяться в высоких и средних широтах, где высота тропопаузы не

превышает 15 км. Стоимость бомбардировщиков существенно выше, что обусловлено стоимостью оборудования военного назначения, но они имеют более высокий потолок. Наконец, самолеты коммерческого назначения имеет максимальную полезную нагрузку, но относительно небольшой потолок. В последних трех строчках таблицы 1 представлены самолеты, ныне не выпускаемые. Требованиям инженерии климата мог бы полностью соответствовать советский самолет Т-4МС. Он прошел летные испытания, но серийно не выпускался.

Таблица 1 – Характеристики самолетов, потенциально пригодных для использования в целях инженерии климата

Марка, страна	Тип	Полезная нагрузка, т	Рабочий потолок, км	Примерная стоимость, 10 ⁶ USD
ИЛ-78М, Россия	Танкер	80	12	30
КС-135, США	Танкер	91	15,2	40
КС-10, США	Танкер	160	13	90
В-1В, США	Бомбардировщик	36	18	290
ТУ-160, Россия	Бомбардировщик	40	15	250
A380-800F, Airbus S. A. S.	Пассажирский	150	13	30
АН-225, Украина	Транспортный	247	11	20
Ту-144, СССР	Пассажирский	25	20	–
Concorde, Фр./Англ.	Пассажирский	13	19,2	–
Т-4МС, СССР	Бомбардировщик	45	23	–

По всей видимости, наиболее разумным вариантом была бы модернизация уже имеющихся самолетов-заправщиков с целью повышения их рабочей высоты за счет снижения скорости и дальности полета. Опыт такой модернизации ИЛ-76 показал, что за счет увеличения площади крыла можно значительно поднять практический потолок самолета. Кроме того, увеличение грузоподъемности и снижения стоимости (вплоть до порядка величины) возможно за счет удаления чисто военного оборудования. Самолетный вариант доставки вещества в стратосферу обладает существенными преимуществами перед ранее описанными. Решающим достоинством является очень низкая удельная стоимость в расчете на массу вещества.

H₂S или SO₂?

Если представить, что найдена (или создана) оптимальная модель самолета, то далее встает вопрос о виде выбрасываемого вещества и о способе его выведения непосредственно из фюзеляжа самолета. В литературе (Будыко, 1974; COSEPUP, 1992; Crutzen, 2006) чаще всего в качестве предшественника аэрозольных частиц рассматривается SO₂, однако, обоснованный выбор должен опираться на сравнение важнейших свойств H₂S и SO₂ (табл. 2).

Таблица 2 – Свойства H₂S и SO₂

Свойство	H ₂ S	SO ₂
Молекулярная масса, г/моль	34	64
Температура кипения (при 1 атм), °C	–60,2	–10,1
Температура замерзания, °C	–86	–76
Плотность газовой фазы (при 1 атм, 0°C), кг/м ³	1,54	2,93
Плотность жидкой фазы (при 1 атм, температур. кипения), кг/м ³	915	1458
Скрытая теплота испарения (при 1 атм), кДж/кг	548	390
Токсичность (ПДК для рабочей зоны), мг/м ³	10	10
Класс опасности	II	III

Из таблицы следует, что молекулярная масса H₂S практически в 2 раза меньше, чем SO₂. Это означает, что для доставки в стратосферу 1 тонны серы (как действующего начала образования сульфатных частиц) требуется поднять 1,063 тонны H₂S или 2 тонны SO₂. Таким образом, с точки зрения доставляемой в стратосферу массы H₂S имеет неоспоримое преимущество.

Температура кипения H₂S ниже, чем типичная для стратосферы температура (около –50°C). Напротив, температура кипения SO₂ существенно выше. Это означает, что H₂S может вводиться в стратосферу в виде мелких капель, которые при –50°C будут быстро испаряться. Этот вариант не приемлем для SO₂ – процесс испарения капель займет длительное время, за которое капли под действием гравитации пролетят вниз существенное расстояние.

Если период пребывания самолета в стратосфере составит лишь несколько часов, жидкий газ в емкости не успеет охладиться до температуры стратосферы. При самопроизвольном испарении сероводород будет выходить из сопла в газообразном виде, тогда как диоксид серы на уровне сопла может сжижаться и выбрасываться в виде капель.

При транспортировке газов в стратосферу в жидком виде важным технологическим параметром является давление паров над жидкостью. Естественно, что емкости для транспортировки должны быть герметичными. Поскольку температуры кипения рассматриваемых газов довольно низки, в условиях обычных летних температур у поверхности земли жидкая фаза может существовать только при определенном давлении, при этом величина давления является функцией температуры. Для расчета прочностных свойств емкостей давление является важнейшим параметром, определяющим их массу. Зависимость давления над жидкой фазой от температуры индивидуальна для каждого вещества. Обычно для расчетов используется уравнение Антуана, имеющее вид:

$$\log_{10}(P) = A - (B / (T + C)),$$

где P – давление газа над жидкостью (бар);

$T(K)$ – температура системы «газ-жидкость»;

A , B и C – эмпирические константы.

Для H_2S и SO_2 эмпирические константы даны в табл. 3 (Stull, 1947).

Таблица 3 – Значения констант в уравнении Антуана для H_2S и SO_2

Газ	Температурный диапазон, К	A	B	C
H_2S	138,8 – 212,7	4,43681	829,439	-25,412
	212,7 – 349,4	4,52887	958,587	-0,5390
SO_2	177,6 – 263,0	3,48586	668,225	-72,252
	263,0 – 414,8	4,37798	966,575	-42,071

Результаты расчетов зависимостей давления от температуры для обоих газов, представленные на рисунке 1, выполнены для диапазона температур от 190K (минимально возможная в стратосфере) до 320K (максимально возможная в тропосфере). Расчеты показали, что при условиях стратосферы SO_2 будет находиться в жидком виде, тогда как H_2S – в газообразном. В период заправки емкостей на земле температура может быть очень высокой – до 40°C. В этом случае давление в емкостях может достигнуть 8 атм. в случае SO_2 и 34 атм. в случае H_2S . Это означает, что конструкция емкостей должна быть достаточно прочной, при этом для H_2S масса емкости будет существенно выше, чем в случае SO_2 .

Из табл. 2 следует, что значения скрытой теплоты испарения относительно велики для обоих газов. Это означает, что при испа-

рении температура оставшейся жидкости будет снижаться. Этому же способствует значительный градиент между начальной температурой емкости и температурой стратосферы. Расчеты показали, что при начальной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и внешнем давлении 0,1 атм. из емкости может испариться лишь 75% SO_2 , а температура остатка достигнет точки замерзания (-76°C), после чего испарение практически прекратится. В случае H_2S испарение практически прекратится, когда в емкости останется, примерно, 15% начального количества.

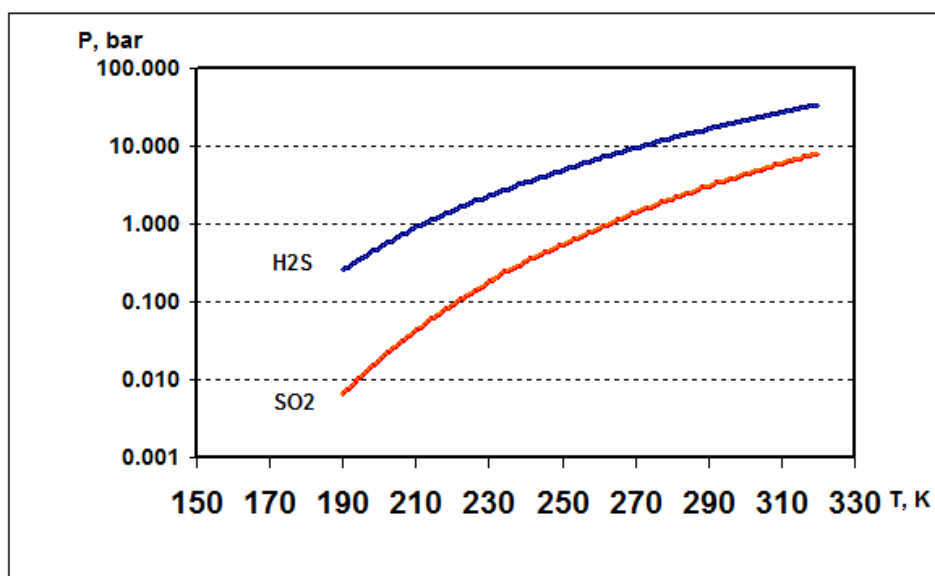


Рисунок 1 – Зависимость давления газа над жидкостью от температуры для H_2S и SO_2 .

Сказанное означает, что простое испарение сжиженного газа из емкости большого объема даже в случае H_2S потребует длительного времени. Поэтому, если выброс из самолета осуществлять в виде газа, потребуется затратить дополнительную энергию на испарение жидкости. Для этого может быть использован автономный нагреватель. Мощность такого нагревателя рассчитана для гипотетического случая, когда масса сжиженного газа составляет 50 тонн, а время испарения и выброса газа – 4 часа. В этом случае мощность должна составить 6300 кВт для H_2S и 4500 кВт для SO_2 .

Оба рассматриваемых газа являются токсичными веществами. Значения предельно допустимой концентрации (ПДК) для обоих газов в воздухе рабочей зоны одинаковы, однако H_2S считается более опасным и относится к веществам II класса опасности. Следует заметить, что оба вещества широко используются в химической промышленности. Объемы их транспортировки в сжатом или

сжиженном виде составляют во всем мире десятки миллионов тонн в год. В промышленности накоплен огромный опыт безопасного обращения с этими токсичными веществами. Например, только Астраханский газоперерабатывающий завод ежегодно выделяет из природного газа и перерабатывает около 4 Мт H_2S . По действующим санитарным нормам для аварийных ситуаций на опасных производствах радиус зоны отчуждения должен составлять 10 км для обеспечения не превышения 1 ПДК на границе зоны (Карабалин, 2008).

Рассмотрение пригодности обоих газов для инженерии климата показывает, что оба газа обладают определенными достоинствами. Тем не менее, H_2S имеет несомненное преимущество, как с экономической, так и с технологической точек зрения.

Стоимость стабилизации климата с помощью создания аэрозольного слоя в стратосфере

Одним из важнейших параметров, определяющих возможность применения инженерии климата, является стоимость применения описываемой технологии. Поскольку ее использование рассчитано на многие годы, важно оценить отдельно капитальные и текущие затраты. Здесь рассмотрен вариант введения в стратосферу 2 Мт H_2S в год с помощью гипотетического самолета с разовой загрузкой 50 т. Для обеспечения работ потребуются строительство аэродрома в малонаселенной местности, создание аэродромной инфраструктуры, строительство подъездных путей и т.д.

Парк самолетов при 2 вылетах в день в течение 250 дней в году должен составить 80 машин. Стоимость одного специально сконструированного самолета примем равной 40 Мд¹ (см. табл. 1). Таким образом, капитальные затраты на парк самолетов составят 3200 Мд. Период эксплуатации самолета примем равным 10 годам. Отсюда текущие расходы на возобновление парка в длительной перспективе составят 320 Мд/год.

Аэродром должен быть построен исключительно для нужд инженерии климата в малонаселенном районе. Идеальным решением могло бы стать использование для строительства изолированного острова в Тихом океане. В России в настоящее время имеются проекты реконструкции старых и строительство новых аэропортов (Иваново, Омск, Саратов, Геленджик). По аналогии стоимость аэродрома можно оценить в 330 Мд. Это, безусловно, оценка по максимуму, поскольку в нашем случае аэродром носит чисто техническое назначение. Аэродром должен включать в себя специфическую инфраструктуру хранения, транспортировки и заправки сжиженного газа. Приравняем стоимость такой системы к стоимости одного самолёта – 40 Мд.

1. Здесь и далее 1 Мд = 1 млн. долларов США.

Поскольку аэродром располагается в изолированном районе, к нему должна быть подведена автомобильная и железная дороги для транспортировки сжиженного газа и других грузов. Примем длину таких подъездных путей равной 100 км. Стоимость строительства 1 км автомобильной дороги шириной 6 м составляет 0,3 Мд, а одного километра однопутной железной дороги – 1,5 Мд. Таким образом, затраты на строительство подъездных путей составят 180 Мд. В непосредственной близости от аэродрома должен быть построен поселок для 1 тысячи человек персонала, работающего вахтовым методом. Общее количество персонала, вовлеченного в деятельность системы, примем равным 2000 человек. В соответствии с ценами на строительство в городах России стоимость строительства поселка составит 60 Мд.

Текущие затраты складываются из оплаты работы персонала (включая летный состав), обслуживание самолетов, стоимости сжиженного газа и его транспортировки, обслуживание автомобильной и железной дорог. Среднюю заработную плату всего персонала примем равной заработной плате пилота гражданской авиации в США (135 тыс. долларов в год <http://www.rhr.ru/index/jobmarket/foreign/12178,0.html>). Отсюда общие текущие затраты на оплату персонала составят 270 Мд/год. По оценкам, представленным в работе (Robock et al., 2009), стоимость обслуживания одного крупнотоннажного самолета в США составляет около 4 Мд/год при годовом налете 300 часов. Если принять, что стоимость обслуживания пропорциональна годовому налету, текущие расходы на одну машину составят 28 Мд/год, а на весь парк машин – 2240 Мд/год. Это явно завышенная оценка, поскольку она включает уже учтенную выше заработную плату персонала.

Сероводород во многих производствах является либо вредной примесью, либо побочным продуктом. Например, природный газ Астраханского месторождения содержит 26% H_2S . В цепочке технологических процессов из H_2S сначала получают SO_2 и далее серную кислоту. В работе (Robock et al., 2009) приводится стоимость SO_2 , равная 230 долларов за тонну в ценах 2008 г. Стоимость H_2S должна быть как минимум в 2 раза ниже, исходя из чего, принимаем значение цены H_2S равное 100 долларов за тонну. Отсюда затраты на закупку 2 Мт H_2S в год составят 200 Мд/год.

Стоимость доставки H_2S от поставщика к аэродрому зависит от вида транспорта и расстояния перевозки. По данным ОАО «РЖД» (<http://www.rtarif.ru>) удельная цена перевозки сжиженного H_2S цистернами на большие расстояния составляет около 1 руб/тонна·км. Если предположить, что дальность перевозки 2 Мт H_2S /год составит 3000 км, годовые затраты на транспортировку не превысят 200 Мд/год.

Итог сделанным оценкам представлен в табл. 4. Из нее следует, что капитальные затраты составят 3,8 млрд. долларов, а текущие 3,2 млрд. долларов. Необходимо учесть, что модификация существующих или конструирование и изготовление новых самолетов займет несколько лет. Строительство аэродрома и подъездных путей также достаточно длительный процесс. Таким образом, капитальные затраты распределятся на срок 5-10 лет.

Таблица 4 – Затраты на подготовку и реализацию инженерии климата с использованием технологии стратосферных аэрозолей

Капитальные затраты	10⁶ USD	Текущие затраты	10⁶ USD/год
Парк самолетов	3200	Замена самолетов	320
Аэродром	330	Оплата персонала	270
Система заправки газом	40	Обслуживание самолетов	2240
Подъездные пути	180	Закупка H ₂ S	200
Жилой поселок	60	Транспортировка H ₂ S	200
Итого:	3810	Итого:	3230

На первый взгляд, представленные значения необходимых затрат на стабилизацию климата могут показаться нереально большими. Однако, описанная выше технология решает глобальную задачу, и затраты следует соотносить со статьями расходов всего человечества. Так по данным Стокгольмского института изучения мира (http://www.mr7.ru/today/facts/2007/10/04/news_15.html) совокупный текущий военный бюджет всех стран составляет 1200 млрд. долларов в год. Следовательно, текущие затраты на стабилизацию климата могут составлять лишь доли процента военных расходов.

Затраты на снижение выбросов парниковых газов и на адаптацию к росту глобальной температуры могут лечь тяжелым бременем на мировую экономику. Оценено, что полное выполнение условий Киотского протокола в период 2008-2012 гг. обошлось бы в среднем в 180 млрд. долларов в год. Очень высокими будут затраты на адаптацию к новым климатическим условиям. По оценкам Всемирного банка для инвестиций в адаптацию мирового хозяйства к изменениям климата на современном этапе требуется 70-100 млрд. долларов в год (World Bank, 2010). Только для России адаптация экономики к климатическим изменениям может обойтись как минимум в 7 млрд. долларов в год (Порфирьев, 2008). По сравнению с этими величинами расходы на инженерию климата представляются ничтожными. Конечно, инженерия климата не является

панацеей и не может самостоятельно решить проблемы антропогенного влияния на климатическую систему Земли. Однако, она способна в существенной степени смягчить переход мировой экономики на такой путь, который не приводил бы к климатическому кризису.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асатуров М.Л. 1986. Влияние вулканических выбросов на стратосферный аэрозольный слой. Труды ГГИ, вып. 320, с. 38-49.

Будыко М.И., 1974. Метод воздействия на климат. Метеорология и Гидрология, № 2, с. 91-97.

Израэль Ю.А., Борзенкова И.И., Северов Д.А. 2007. Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата. Метеорология и Гидрология, № 1, с. 5-14.

Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г., Петров Н.Н. 2009. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. Метеорология и Гидрология, № 6, стр. 5-24.

Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. 2013. Возможность геоинженерной стабилизации глобальной температуры в XXI в. с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий. Метеорология и гидрология, № 6. с. 9-23.

Карабалин У.С. 2008. Методы ликвидации и предупреждения аварийных ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья. Алматы, 185 с.

Порфирьев Б.Н., 2008. Экономика климатических изменений. – М.: Анкил, 63 с.

Рябошапко А.Г., Ревокатова А.П. 2015. Потенциальная роль негативной эмиссии диоксида углерода в решении климатической проблемы. Метеорология и гидрология, № 7. с. 18-36.

COSEPUP. 1992. Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base. Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. National Academies Press, Washington, DC, 994 p.

Crutzen P.J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? Climate Change, V. 77, pp. 211-219.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Lane L., Caldeira K., Chatfield R., Longhoff S. 2007. Workshop Report on Managing Solar Radiation. Edited by L.Lane, K.Caldeira, R.Chatfield, S.Langhoff. Report NASA/CP-2007-214558, November 18-19, 2006, 40 p.

Lenton T.M., Vaughan N.E. 2009. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, V. 9, pp. 2559-2608.

Pyle D.M., Beattie P.D., Bluth G.J.S. 1996. Sulphur emission to the stratosphere from explosive volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.* V. 57, pp. 663-671. doi:10.1007/s004450050119.

Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B. 2008. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols: The role of particle size. *Geophys. Res. Lett.*, V. 35, L02809, doi:10.1029/2007GL032179.

Robock, A., Marquardt A., Kravitz B., Stenchikov G. 2009. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.*, V. 36. No 19.

Stull D.R. 1947. Vapor Pressure of Pure Substances Organic Compounds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, V. 39, pp. 517-540.

Teller E., Wood L., Hyde R. 1997. Global Warming and Ice Ages: Prospects for Physics-Based Modification of Global Change. UCRL-JC-128715, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA, 20 p.

The Royal Society. 2009. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. ISBN: 978-0-85403-773-5, 83 p.

World Bank. 2010. *Economics of Adaptation to Climate Change: Synthesis Report*, Washington DC: WB, 2010; *World Development Report 2010*, Washington DC: World Bank, p. 9.

УДК 504.064.36

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ, ОБОБЩЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Г.М. Черногаева, Ю.А. Малеванов, Л.Р. Журавлева

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20б,
gmchernogaeva@gmail.com

Резюме. Мониторинг загрязнения окружающей среды в стране был организован Гидрометеорологической службой (в настоящее время – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Росгидромет) в сотрудничестве с рядом министерств и ведомств, а также с Академией наук СССР (сейчас – Российская академия наук). Первичные и иные данные ежегодно поступают от территориальных подразделений и научно-исследовательских учреждений Росгидромета. Информация по отдельным природным средам анализируется и обобщается в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук (ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»). Результаты ежегодно публикуются в виде «Обзора состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» и размещается на двух сайтах: Росгидромета (<http://www.meteorf.ru/>) и ИГКЭ (<http://downloads.igce.ru/publications/reviews/>). Обзор предназначен для государственных органов, практиков охраны природы, ученых и заинтересованной общественности.

Ключевые слова. Россия, окружающая среда, загрязнение, мониторинг, потоки данных, обобщение информации, ежегодная публикация.

ENVIRONMENTAL POLLUTION MONITORING IN THE RUSSIAN FEDERATION: OBSERVATIONS ARRANGEMENTS, INFORMATION SYNTHESIS AND DISTRIBUTION

G.M. Chernogaeva, Yu.A. Malevanov, L.R. Zhuravleva

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia, gmchernogaeva@gmail.com

Summary. Monitoring of environmental pollution in Russia was organized by the Hydrometeorological Service (presently Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, or Roshydromet) in cooperation with some ministries and agencies, and national Academy

of Sciences (Russian Academy of Sciences at present). Primary data and other data are submitted annually by regional boards and research institutions under Roshydromet. The information is analyzed and summarized in the Institute of Global Climate and Ecology (IGCE). The results are presented on a yearly basis as part of the Review of Environment State and Pollution in the Russian Federation report and published on two websites: <http://www.meteorf.ru/> (Roshydromet) and <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/> (IGCE). The review is intended for public authorities, environmental specialists, scientists, and for public awareness purposes.

Keywords. Russia, environment, pollution, monitoring, data flows, synthesis of information, yearly publication.

Введение

Загрязнение окружающей среды, усилившееся в середине XX века, потребовало принятия мер по ограничению загрязнения на национальном и международном (региональном и глобальном) уровнях. Научное обоснование этих мер, контроль их выполнения и оценка эффективности невозможны без надежной информации о фактических и прогнозируемых уровнях загрязнения. В связи с этим, во многих странах и на международном уровне были разработаны программы и внедрены системы мониторинга и оценки загрязнения воздуха, поверхностных вод и почв, а также их влияния на человека и экосистемы.

В нашей стране лидирующая роль в области изучения загрязнения окружающей среды всегда принадлежала Гидрометеорологической службе, которая взаимодействовала с рядом министерств, ведомств, а также с академическим сообществом. В 1954 г. по инициативе академиков И.В. Курчатова и Е.К. Фёдорова на часть гидрометеорологических станций было возложено ведение наблюдений за выпадением радиоактивных продуктов ядерных взрывов из атмосферы на земную поверхность. Наблюдения проводились в 120 пунктах, и их результаты характеризовали всю территорию страны. В 1961 г. на основании Постановления Совета Министров СССР была создана Общегосударственная радиометрическая служба наблюдения и информации. В 1972 г. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 898 Главному управлению гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР (ГУГМС) было поручено:

- организовать общегосударственную службу наблюдений и контроля за уровнем загрязнения атмосферы, почвы и водных объектов по физическим, химическим и гидробиологическим (для водных объектов) показателям и экстренной информации о резких изменениях уровня загрязнения атмосферы, почвы и вод (ОГСНХ);

- обеспечивать заинтересованные организации и учреждения систематической информацией и прогнозами об уровнях загрязнения атмосферы, почвы, водных объектов и о возможности их изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий.

В порядке выполнения международных обязательств Российской Федерации с 1995 г. в системе Росгидромета проводится мониторинг выбросов и поглощения парниковых газов.

6 июня 2013 г. вышло Постановление Правительства РФ № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды», а 9 августа 2013 г. вышло Постановление Правительства РФ от № 681 «О государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды)».

В соответствии с этими Постановлениями, Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в настоящее время выполняются наблюдения за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха, почв, поверхностных вод водных объектов, включая морскую среду и донные отложения (по физическим, химическим и гидробиологическим показателям), внутренних морских вод и территориального моря Российской Федерации, исключительной экономической зоны Российской Федерации и континентального шельфа Российской Федерации, а также за радиационной обстановкой на территории Российской Федерации и даются результаты оценки объемов антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов и радиационной обстановки на территории Российской Федерации.

В настоящее время осуществляемый Росгидрометом мониторинг состояния и загрязнения абиотической составляющей окружающей среды – атмосферного воздуха, поверхностных вод и почв, а также радиационной обстановки, является основой государственной системы наблюдений за состоянием окружающей среды в Российской Федерации.

Действующая в настоящее время в России система мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета предназначена для решения следующих задач:

- изучение распределения уровней содержания загрязняющих веществ в окружающей среде и их изменения во времени;
- оценка и прогноз загрязнения окружающей среды;
- обеспечение органов государственного управления, хозяйственных организаций и населения систематической и экстренной информацией об изменениях уровней загрязнения (в том числе и радиоактивного) атмосферного

воздуха, почв, водных объектов под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий, прогнозами и предупреждениями о возможных изменениях уровней загрязненности;

- обеспечение заинтересованных организаций материалами для составления рекомендаций в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, составления планов развития хозяйства с учетом состояния окружающей среды;
- определение эффективности мер по защите окружающей среды.

В центральном аппарате Росгидромета функционирование этой системы координируется Управлением мониторинга загрязнения окружающей среды, полярных и морских работ (УМЗА).

Цель данной статьи – дать краткую информацию об организации измерений уровней загрязнения окружающей среды, основных потоках данных, процессе их анализа и обобщения, а также доведения до заинтересованных пользователей итоговой информации путем публикаций ежегодных «Обзоров состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» в период с 1991 года по настоящее время (Обзор..., 1991-2015).

Организация измерений уровней загрязнения

Измерения уровней загрязнения окружающей среды осуществляется на сети пунктов режимных наблюдений. Они расположены в городах, на водоемах и водотоках как в районах с выраженным антропогенным воздействием, так и на незагрязненных участках, в том числе, в биосферных заповедниках. Структура наблюдений (измерений) подробно представлена в работе (Обзор..., 2015).

Измерение уровней загрязнения атмосферного воздуха проводится в 252 городах и населенных пунктах России на 697 станциях. Из них регулярные измерения проводятся Росгидрометом в 229 городах на 636 станциях. Измеряются концентрации от четырех до 34 видов загрязняющих веществ.

Наблюдениями за загрязнением поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям охвачены 1 119 водных объектов, на которых находится 1 725 пунктов, 2 354 створа. Измеряются более 100 показателей качества воды.

Наблюдения за загрязнением поверхностных вод суши по гидро-биологическим показателям проводятся в семи гидрографических районах (Балтийском, Каспийском, Восточно-Сибирском, Карском, Тихоокеанском, Баренцевом и Азовском) на 164 водных объектах России, на 263 гидробиологических пунктах и 389 створах. Программа наблюдений включает от двух до шести показателей загрязнения.

Исследования уровней загрязнения морской среды в 2014 г. проводились на 292 станциях в шельфовых районах морей, омывающих территорию России.

Россия участвует в нескольких международных программах мониторинга, работающих в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (официальное английское название – The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, аббревиатура – CLRTAP).

Наблюдения за атмосферным трансграничным переносом химических веществ осуществляются на четырех станциях в Европейской части России в рамках Международной Европейской программы мониторинга и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ (The European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP, <http://www.emep.int/>). Наша страна участвует в этой программе с 1981 г. В настоящее время по программе проводится регулярный анализ содержания в атмосфере и атмосферных осадках химических соединений, определяющих кислотно-щелочной баланс. На основании экспериментально полученных данных дается оценка реальных величин концентраций и нагрузок соединений серы и азота в северо-западном и центральном районах России (http://downloads.igce.ru/publications/obz_fon_2/of_2014.pdf).

В целях осуществления мониторинга состояния экосистем и выявления связи их состояния с факторами окружающей среды, прогноза изменений состояния экосистем под воздействием меняющегося уровня антропогенного загрязнения среды на Европейской части России проводятся работы по Международной совместной программе комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы – МСП КМ (International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems, ICP IM, http://www.igce.ru/page/icp_im). Исследования и мониторинг в рамках этой международной программы в России начались еще на ее предварительной фазе в 1989-1992 гг. и продолжаются на постоянной основе с 1993 г.

Аналогичная ЕМЕП программа выполняется на четырех станциях в Азиатской части России на Международной сети мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, EANET, <http://www.eanet.asia/eanet/brief.html>). Эти наблюдения выполняются на регулярной основе с 2001 г. По программе EANET производится отбор проб атмосферного воздуха и осадков, и их анализ на содержание основных кислотообразующих веществ.

Пунктами сети наблюдений за загрязнением почв пестицидами являются сельскохозяйственные угодья (поля), отдельные лесные массивы, зоны отдыха (парки, санатории, дома отдыха), прибрежные зоны, а также территории вблизи объектов хранения (склады) и мест захоронения неликвидных пестицидов (полигоны). Отбор почв производится два раза в год (весной и осенью) на территориях 33 субъектов РФ в 467 пунктах. В отобранных пробах определяются пестициды 24-х наименований и их метаболиты.

Для оценки загрязнения почв токсическими веществами (токсикантами) промышленного происхождения один раз в пять лет проводится отбор проб в 101-м городе; в 2014 г. проведён отбор проб в районах 36 населенных пунктов (930 проб). В отобранных пробах определяется до 25 ингредиентов – веществ промышленного происхождения.

Сеть комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды и состояния растительности насчитывает 30 постов, которые располагаются на территориях 11-ти региональных Управлений гидрометеорологической службы (УГМС).

Посты наблюдения организованы:

- вокруг крупных промышленных предприятий, где отмечаются серьезные повреждения лесов на достаточно больших площадях;
- в ценных лесах, отнесенных к памятникам природы;
- в районах ввода в действие новых крупных промышленных предприятий, выбросы которых в ближайшее время могут привести к ослаблению и повреждению лесных насаждений.

Наблюдения проводятся на постоянных пробных площадях.

Сеть станций, осуществляющих наблюдения за химическим составом и кислотностью осадков, состоит из 215 станций. В пробах определяется до 12 компонентов.

Наблюдения за загрязнением снежного покрова на территории России осуществляются в 545 пунктах. В пробах определяется содержание основных ионов и уровень кислотности (рН).

Подсистема комплексного фоновый мониторинга (КФМ) в России ориентирована на получение информации о состоянии окружающей среды на территориях, удаленных от локальных источников загрязнения – городов, промышленных центров, объектов транспортной инфраструктуры, где также практически отсутствует локальная хозяйственная деятельность. На основании этой информации проводятся оценки фоновый загрязнения окружающей среды в пространственном масштабе от регионального и крупнее (континентального, глобального). На территории России сейчас действуют пять станций комплексного фоновый мониторинга, которые расположены в биосферных заповедниках: Воронежском, Приокско-Тerrasном, Астраханском, Кавказском и Алтайском. Современная концепция, структура КФМ в России и перспективы развития этой подсистемы мониторинга изложены в работе (Громов, Парамонов, 2015).

Наблюдения за радиационной обстановкой окружающей среды осуществляются в 1 286 пунктах стационарной сети. Гамма-спектрометрический и радиохимический анализ проб объектов окружающей среды проводится в специализированных радиометрических лабораториях и группах.

В системе Росгидромета также ведется работа по оперативному выявлению и расследованию опасных эколого-токсикологических ситуаций, связанных с аварийным загрязнением окружающей среды и другими причинами.

При осуществлении мониторинга загрязнения окружающей среды режимные наблюдения базируются на следующих основных принципах:

- комплексность и систематичность наблюдений;
- согласованность сроков их проведения с характерными гидрологическими ситуациями и изменением метеорологических условий;
- определение показателей по единым методикам на всей территории страны.

Анализ, обобщение и распространение информации

Информация, представляемая системой мониторинга загрязнения окружающей среды, по степени срочности подразделяется на следующие виды в соответствии с «Порядком подготовки и представления информации», введенным в действие приказом Росгидромета от 31.10.2000 г. № 156:

- экстренная информация о резких изменениях уровня загрязнения, немедленно передаваемая соответствующим органам для принятия мер;
- оперативная информация (как правило, за месячный период наблюдений) для проведения анализа и обобщения в территориальных (региональных) центрах;
- режимная информация (за годовой период наблюдений), передаваемая для обобщения и анализа в головные научно-исследовательские учреждения по видам наблюдений.

На рис. 1 представлена схема информационных потоков данных мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета. Территориальными Управлениями гидрометеорологической службы (УГМС, 24 подразделения Росгидромета) выполняются наблюдения, обработка и обобщение первичных данных наблюдений (измерений), а также составляются местные прогнозы и оценка состояния окружающей среды по территориям ответственности этих подразделений.

Данные наблюдений/измерений от региональных подразделений Росгидромета передаются научно-исследовательским институтам Росгидромета, которые осуществляют оценку и разработку прогнозов загрязнения окружающей среды в национальном и больших масштабах. Они также формируют и поддерживают базу данных о загрязнении окружающей среды.

Результаты этой работы используются при подготовке ежегодного «Обзора Росгидромета о состоянии и загрязнении окружающей

среды в Российской Федерации» (далее – «Обзор...»). Эти издания выходят ежегодно с 1991 г.

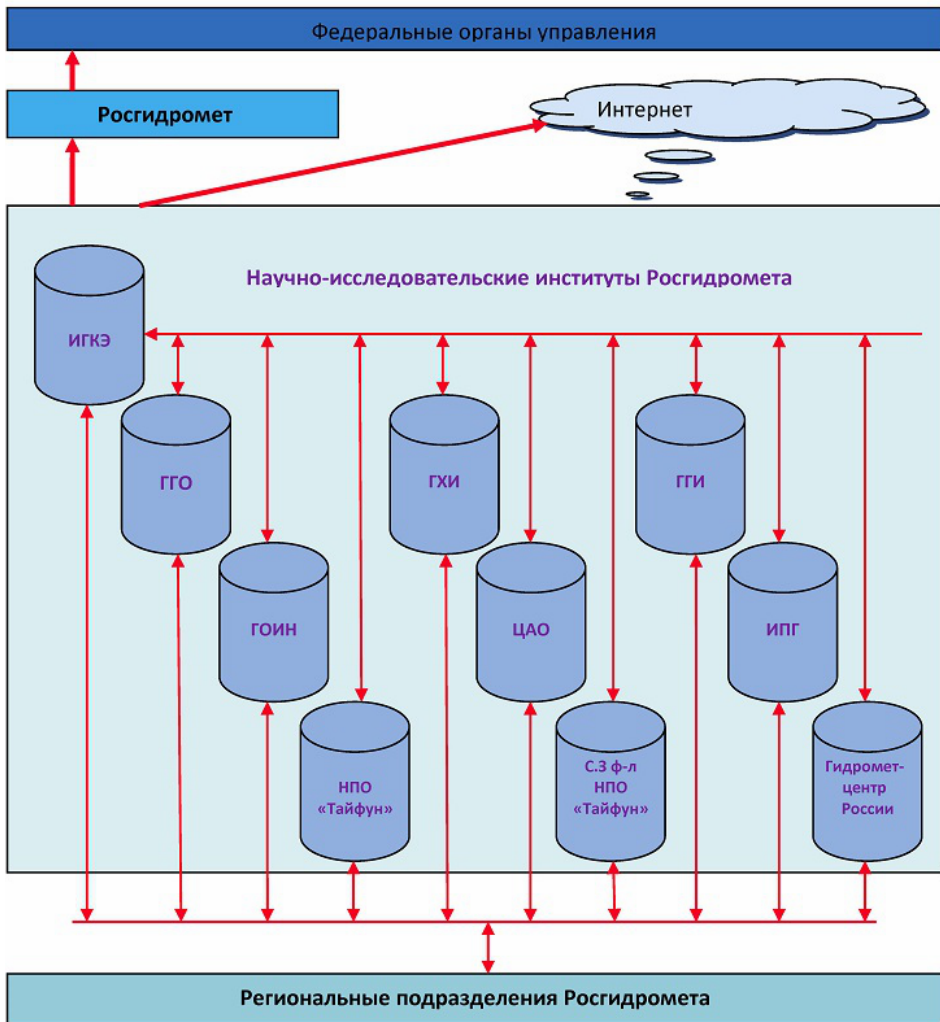


Рисунок 1 – Потоки данных мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета и обобщенной информации.

Материалы к «Обзору...» по компонентам природной среды представляются научно-исследовательскими учреждениями (ФГБУ) Росгидромета: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО), Гидрохимический институт (ГХИ), Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова (ГОИН), НПО «Тайфун», Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ), Государственный гидрологический институт (ГГИ), Гидрометцентр России, Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО), Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова (ИПГ), Северо-Западный филиал НПО «Тайфун». Анализ

материалов, их обобщение, подготовка окончательной редакции и издание ежегодного «Обзора...» выполняет Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН по согласованию с УМЗА Росгидромета.

В табл. 1 приведен перечень разделов, по которым научно-исследовательскими учреждениями – институтами Росгидромета – представляются материалы к «Обзору...».

Таблица 1 – Разделы, по которым учреждениями Росгидромета представляются материалы к «Обзору...»

Сокращенное название учреждения	Наименования разделов
ИГКЭ, г. Москва	Тенденции изменения климата Парниковые газы Фоновое загрязнение природной среды в биосферных заповедниках Кислотно-щелочные характеристики снежного покрова Атмосферный трансграничный перенос Гидробиологический мониторинг Мониторинг загрязнения Байкальского региона
ГГО, г. Санкт-Петербург	Загрязнение атмосферы в городах и субъектах РФ Фоновое состояние атмосферного воздуха на территории РФ Фоновое загрязнение атмосферных осадков на территории РФ
ГХИ, г. Ростов-на-Дону	Загрязнение поверхностных вод суши на территории РФ Фоновое загрязнение поверхностных вод суши Трансграничный перенос загрязняющих веществ Состояние и загрязнение вод озера Байкал и его притоков
ГГИ, г. Санкт-Петербург	Водные ресурсы в субъектах РФ
ГОИН, г. Москва	Качество морских вод в прибрежных районах для субъектов РФ

ЦАО, г. Москва	Состояние озонового слоя над территорией РФ
ИПГ, г. Москва	Основные параметры гелиогеофизической обстановки
НПО «Тайфун», г. Обнинск	Загрязнение почвенного покрова на территории РФ Радиоактивное загрязнение приземного слоя атмосферы, водных объектов и местности на территории РФ
Северо-западный филиал НПО «Тайфун», г. Санкт-Петербург	Загрязнение природной среды арктических морей
Гидрометцентр России, г. Москва	Стихийные природные явления Сезонные характеристики снежного покрова

«Обзор...» является обобщением информации о загрязнении окружающей среды за конкретный год, получаемой территориальными органами и научно-исследовательскими учреждениями Росгидромета. Представленные в нем данные и оценки являются основой вклада Росгидромета в «Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» – основной ежегодный информационный документ о состоянии окружающей среды в России, представляемый Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды) государственным органам страны.

Опубликованные «Обзоры...» рассылаются ИГКЭ во все территориальные управления и научно-исследовательские институты Росгидромета, а также в заинтересованные министерства, ведомства и учреждения. Кроме того, с «Обзорами...», начиная с «Обзора...» за 2007 год, можно ознакомиться на сайтах Росгидромета <http://www.meteorf.ru/> и Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/>.

На основе данных «Обзоров...» Росгидрометом периодически выпускаются издания, в которых анализируются тенденции изменения уровней загрязнения окружающей среды на территории страны (Тенденции и динамика..., 2007, 2013). Эти аналитические материалы готовятся и издаются Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН.

Результаты этого анализа и обобщения информации об уровнях загрязнения атмосферного воздуха в городах страны и поверхностных вод многих водных объектов (с оценкой приоритетности существующих проблем), о тенденциях их изменения являются важным элементом информационной поддержки реализации задач государственного надзора за источниками выбросов (сбросов) вредных веществ в окружающую среду.

Заключение

Анализ всего массива результатов мониторинга загрязнения окружающей среды на территории Российской Федерации показывает, что за последние десять лет, как по ряду контролируемых показателей, так и по комплексным оценкам, загрязненность природных сред практически не уменьшается. Неблагоприятное качество окружающей среды, прежде всего атмосферного воздуха и поверхностных вод, как правило, наблюдается в местах проживания большей части населения страны (урбанизированные территории, промышленные зоны).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Громов С.А., Парамонов С.Г. 2015. Современное состояние и перспективы развития комплексного фоновых мониторинга загрязнения природной среды. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXVI, № 1, с. 205-221.

Обзоры состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, 1991-2013. /Под ред. Ю.А. Израэля/. – М.: Росгидромет.

Обзоры состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, 2014-2015. /Под ред. Г.М. Черногаевой/. – М.: Росгидромет.

Тенденции и динамика загрязнения природной среды Российской Федерации на рубеже XX-XXI веков, 2007. /Под ред. Ю.А. Израэля/. – М.: Росгидромет. 64 с.

Тенденции и динамика загрязнения природной среды Российской Федерации в начале XXI века, 2013. /Под ред. Ю.А. Израэля/. – М.: Росгидромет. 42 с.