

УДК: 519.6

Применение метода сбалансированной идентификации для заполнения пропусков в рядах наблюдений за потоками CO_2 на сфагновом верховом болоте

А. В. Соколов^{1,2,a}, В. В. Мамкин³, В. К. Авиллов³, Д. Л. Тарасов⁴,
Ю. А. Курбатова³, А. В. Ольчев^{3,4}

¹ Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН,
Россия, 127051, г. Москва, Б. Каретный пер., д. 19, стр. 1

² Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19

³ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, Российская академия наук,
Россия, 109071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33

⁴ Географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

E-mail: ^a alexander.v.sokolov@gmail.com

Получено 06.09.2018, после доработки — 08.10.2018.

Принято к публикации 29.10.2018.

В работе рассматривается применение метода сбалансированной идентификации для построения многофакторной функциональной зависимости нетто CO_2 -обмена (NEE) от факторов внешней среды и ее дальнейшего использования для заполнения пропусков в рядах наблюдений за потоками CO_2 на верховом сфагновом болоте в Тверской области. Измерения потоков на болоте проводились с помощью метода турбулентных пульсаций в период с августа по ноябрь 2017 года. Из-за дождливых погодных условий и высокой повторяемости периодов с низкой турбулентностью на протяжении всего периода наблюдений доля пропусков в измерениях NEE на исследуемом болоте превысила 40 %. Разработанная для заполнения пропусков модель описывает NEE верхового болота как разность экосистемного дыхания (RE) и валовой первичной продукции (GPP) и учитывает зависимость этих параметров от приходящей суммарной солнечной радиации (Q), температуры почвы (T), дефицита упругости водяного пара (VPD) и уровня болотных вод (WL). Используемый для этой цели метод сбалансированной идентификации основан на поиске оптимального соотношения между простотой модели и точностью повторения измерений — соотношения, доставляющего минимум оценке погрешности моделирования, полученной методом перекрестного оценивания. Полученные численные решения обладают минимально необходимой нелинейностью (кривизной), что обеспечивает хорошие интерполяционные и экстраполяционные свойства построенных моделей, необходимые для восполнения недостающих данных по потокам. На основе проведенного анализа временной изменчивости NEE и факторов внешней среды была выявлена статистически значимая зависимость GPP болота от Q , T и VPD , а RE — от T и WL . При этом погрешность применения предложенного метода для моделирования среднесуточных данных NEE составила менее 10 %, а точность выполненных оценок NEE была выше, чем у модели REddyProc, учитывающей влияние на NEE меньшего числа внешних факторов. На основе восстановленных непрерывных рядов данных по NEE была проведена оценка масштабов внутрисуточной и межсуточной изменчивости NEE и получены интегральные оценки потоков CO_2 исследуемого верхового болота для выбранного летне-осеннего периода. Было показано, что если в августе 2017 года на исследуемом болоте скорость фиксации CO_2 растительным покровом существенно превышала величину экосистемного дыхания, то, начиная с сентября, на фоне снижения GPP исследуемое болото превратилось в устойчивый источник CO_2 для атмосферы.

Ключевые слова: метод сбалансированной идентификации, метод турбулентных пульсаций, верховое болото, нетто-экосистемный обмен CO_2 , экосистемное дыхание, валовая первичная продукция

Развитие модели А. В. Соколовым выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-07-00027). Анализ данных пульсационных измерений, проведенный В. В. Мамкиным, поддержан грантом Российского научного фонда (РНФ 14-14-00956-П).

© 2019 Александр Витальевич Соколов, Вадим Витальевич Мамкин, Виталий Константинович Авиллов, Денис Леонидович Тарасов, Юлия Александровна Курбатова, Александр Валентинович Ольчев
Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
Чтобы получить текст лицензии, посетите вебсайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/> или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 519.6

Application of a balanced identification method for gap-filling in CO₂ flux data in a sphagnum peat bog

A. V. Sokolov^{1,2,a}, V. V. Mamkin³, V. K. Avilov³, D. L. Tarasov⁴,
J. A. Kurbatova³, A. V. Olchev^{3,4}

¹ Institute for information transmission problem (Kharkevitch Institute) RAS,
19/1 Bolshoy Karetny per., Moscow, 127051, Russia

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,
19 Kosygin st., Moscow, 119991, Russia

³ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Science,
33 Leninsky prosp., Moscow, 109071, Russia

⁴ Faculty of Geography, Moscow State University,
1 Leninskie Gory st., Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^a alexander.v.sokolov@gmail.com

Received 06.09.2018, after completion — 08.10.2018.

Accepted for publication 29.10.2018.

The method of balanced identification was used to describe the response of Net Ecosystem Exchange of CO₂ (*NEE*) to change of environmental factors, and to fill the gaps in continuous CO₂ flux measurements in a sphagnum peat bog in the Tver region. The measurements were provided in the peat bog by the eddy covariance method from August to November of 2017. Due to rainy weather conditions and recurrent periods with low atmospheric turbulence the gap proportion in measured CO₂ fluxes at our experimental site during the entire period of measurements exceeded 40%. The model developed for the gap filling in long-term experimental data considers the *NEE* as a difference between Ecosystem Respiration (*RE*) and Gross Primary Production (*GPP*), i.e. key processes of ecosystem functioning, and their dependence on incoming solar radiation (*Q*), soil temperature (*T*), water vapor pressure deficit (*VPD*) and ground water level (*WL*). Applied for this purpose the balanced identification method is based on the search for the optimal ratio between the model simplicity and the data fitting accuracy — the ratio providing the minimum of the modeling error estimated by the cross validation method. The obtained numerical solutions are characterized by minimum necessary nonlinearity (curvature) that provides sufficient interpolation and extrapolation characteristics of the developed models. It is particularly important to fill the missing values in *NEE* measurements. Reviewing the temporary variability of *NEE* and key environmental factors allowed to reveal a statistically significant dependence of *GPP* on *Q*, *T*, and *VPD*, and *RE* — on *T* and *WL*, respectively. At the same time, the inaccuracy of applied method for simulation of the mean daily *NEE*, was less than 10%, and the error in *NEE* estimates by the method was higher than by the REddyProc model considering the influence on *NEE* of fewer number of environmental parameters. Analyzing the gap-filled time series of *NEE* allowed to derive the diurnal and inter-daily variability of *NEE* and to obtain cumulative CO₂ fluxes in the peat bog for selected summer-autumn period. It was shown, that the rate of CO₂ fixation by peat bog vegetation in August was significantly higher than the rate of ecosystem respiration, while since September due to strong decrease of *GPP* the peat bog was turned into a consistent source of CO₂ for the atmosphere.

Keywords: balanced identification method, eddy covariance method, peat bog, net ecosystem exchange of CO₂, ecosystem respiration, gross primary production

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 153–171 (Russian).

The model developing by A. Sokolov was supported by RSBF (grant 17-07-00027). Analysis of eddy covariance flux measurements provided by V. Mamkin was supported by the Russian Science Foundation (grant 14-14-00956).

© 2019 Alexander V. Sokolov, Vadim V. Mamkin, Vitaliy K. Avilov,
Denis L. Tarasov, Julia A. Kurbatova, Alexander V. Olchev

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

1. Введение

Растительность и атмосфера постоянно находятся в тесном взаимодействии, формируемом через сложную систему прямых и обратных связей [Будыко, 1971, 1974; Bonan et al., 1992; Brovkin et al., 2009]. Климатические условия в значительной степени определяют рост и развитие растительных сообществ. Растительность, в свою очередь, также влияет на климатическую систему, воздействуя на радиационный, тепловой, водный и углеродный баланс земной поверхности и атмосферы [Charin III et al., 2008]. Наблюдаемый на протяжении последних десятилетий рост глобальной температуры большинством исследователей связывается со стремительным ростом содержания парниковых газов, и прежде всего CO_2 в атмосфере [Grace, 2000; IPCC, 2013]. Растительность активно поглощает CO_2 из атмосферы, тем самым выполняя важную регулирующую функцию для климатической системы.

Для исследования процессов обмена парниковыми газами между земной поверхностью и атмосферой, а также для оценки их возможного влияния на климатическую систему в настоящее время используется широкий спектр методов, включающих как системы наземных и дистанционных наблюдений, так и математические модели разного пространственного и временного масштаба. Для проведения наземных наблюдений за потоками парниковых газов наиболее широкое распространение в настоящее время получили методы турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet et al., 2012; Burba, 2013] и экспозиционных камер [Norman et al., 1997; Janssens et al., 2001; Pumpanen et al., 2003; Молчанов, 2015]. Метод турбулентных пульсаций основан на непрерывных прямых высокочастотных измерениях турбулентных пульсаций компонент скорости ветра, температуры и концентрации парниковых газов в атмосферном пограничном слое и позволяет получить осредненные потоки парниковых газов для земной поверхности за различные интервалы времени (сутки, год и т. д.) с шагом по времени от 15 до 30 мин [Brom et al., 1996; Aubinet et al., 2012]. Камерный метод, в свою очередь, является более точечным и направлен преимущественно на исследование горизонтальной изменчивости атмосферных потоков в масштабе экосистемы [Кудеяров, Курганова, 2005; Olchev et al., 2013; Иванов и др., 2017]. Существующая сеть станций наблюдений за потоками парниковых газов охватывает широкий спектр наземных экосистем (лесные, болотные, травянистые) в различных географических регионах, в которых измерения потоков проводятся по единой методике и с использованием стандартного сертифицированного оборудования. Обязательными условиями для проведения репрезентативных наблюдений за потоками с помощью метода турбулентных пульсаций являются: горизонтальная однородность подстилающей поверхности и наличие хорошо выраженной турбулентности в приземном слое атмосферы. Значения потоков, получаемые при низких скоростях ветра и слабом турбулентном перемешивании и не удовлетворяющие критериям качества, установленным для данного метода, обычно отбрасываются. Некоторые пропуски в рядах данных могут быть связаны с перебоями в электропитании и с выпадением интенсивных атмосферных осадков, нарушающих нормальную работу измерительной аппаратуры.

Очевидно, что наличие пропусков в рядах измерений может значительно затруднить адекватное описание временной изменчивости потоков парниковых газов, а также усложнить процедуру вычисления интегральных значений потоков для различных масштабов осреднения по времени. Как следствие, начиная с первых шагов использования метода турбулентных пульсаций для определения потоков парниковых газов, возникла насущная необходимость развития репрезентативных методик для восстановления временных рядов наблюдений за атмосферными потоками. В настоящее время для заполнения пропусков в рядах наблюдений за потоками парниковых газов в полевых условиях применяются как достаточно простые подходы, основанные на временной интерполяции и регрессионном анализе, так и более сложные методы, использующие процесс-ориентированные модели переноса тепла, влаги и CO_2 в приземном слое воздуха [Falge et al., 2001; Moffat et al., 2007; Aubinet et al., 2012; Olchev et al., 2015; Mamkin et al., 2017]. Несмотря на развитие достаточно большого количества методик различного уровня сложности для заполнения пропусков в рядах наблюдений, задача получения репре-

зентативных непрерывных рядов данных по потокам при различных условиях внешней среды продолжает оставаться чрезвычайно актуальной. С одной стороны, это связано с тем, что используемые простые методики обычно не позволяют адекватно описать существующую многофакторную зависимость потоков парниковых газов от параметров внешней среды. С другой стороны, это обусловлено трудной применимостью более сложных моделей к решению данного класса задач из-за отсутствия необходимых входных модельных параметров, описывающих весь комплекс биофизических свойств растительного и почвенного покрова исследуемой наземной экосистемы.

В рамках данного исследования для заполнения пропусков в рядах данных по потокам CO_2 в атмосфере предлагается использовать метод сбалансированной идентификации «Простота модели против подгонки» (SvF, Simplicity versus Fitting), который основан на поиске компромисса между простотой модели и точностью повторения измерений на основе минимизации оценки погрешности, полученной методом перекрестного оценивания [Соколов, Волошинов, 2018]. Метод позволяет оценить в рамках выбранной параметризации многофакторные функциональные зависимости нетто CO_2 -обмена (*NEE*) от факторов внешней среды и использовать их для заполнения пропусков в рядах измерений и для получения непрерывных рядов данных по потокам CO_2 за различные интервалы времени.

В качестве основного модельного объекта в исследовании было выбрано олиготрофное верховое болото «Старосельский мох», расположенное в Тверской области в Центральном-лесном государственном природном биосферном заповеднике (ЦЛГПБЗ). Непрерывные наблюдения за потоками парниковых газов с использованием метода турбулентных пульсаций проводятся на данном болоте начиная с 2015 года. Важность данных исследований определяется необходимостью изучения различных экологических функций верховых болот в регионе, и прежде всего получения количественных оценок скорости поглощения болотами углерода из атмосферы и его накопления в торфяных отложениях. Также следует отметить и существенный дефицит экспериментальных данных по потокам CO_2 между болотными экосистемами бореальной зоны и атмосферой, а также отсутствие достоверных оценок их возможного влияния на климатическую систему.

2. Общая характеристика объекта исследований и использованных экспериментальных данных

2.1. Географическое положение и ландшафтные особенности болота «Старосельский мох»

Болотный массив «Старосельский мох» расположен в юго-восточной части ЦЛГПБЗ. Массив имеет неправильную форму [Olchev et al., 2017], которая определяется границами занятой болотом котловины [Минаева и др., 2007]. Площадь болотного массива составляет 4.2 км². Со всех сторон болото окружено старовозрастными еловыми лесами. Абсолютная высота его восточной границы — 250 м, к западу абсолютная высота постепенно повышается, достигая у западной границы 255–257.5 м. Таким образом, поверхность болота слабо наклонена на восток (угол наклона менее 1°). С востока болото резко ограничено моренной грядой с относительно крутыми склонами. С запада оно не имеет выраженных орографических границ и плавно переходит в заболоченный лесной массив. Поверхностный сток в болоте осуществляется через несколько небольших ручьев, принадлежащих двум основным речным бассейнам Восточно-Европейской равнины (притоки р. Межи принадлежат бассейну Балтийского моря, а притоки р. Тудьмы — к бассейну Каспийского моря).

Болото «Старосельский мох» принадлежит к олиготрофному (верховому) экологическому типу растительности [Минаева и др., 2007]. Состав болотных формаций характеризуется значительной неоднородностью. В пределах болота могут быть выделены следующие типы болот-

ных микроландшафтов: сосново-кустарничковый, сосново-пушицевый, сосново-сфагновый, пушицевый, сфагново-пушицевый, сфагново-кустарничковый облесенный сосной, грядово-мочажинные с олиготрофным типом растительности на грядах и в мочажинах [Минаева и др., 2007]. Мозаика микроландшафтов отличается значительной неоднородностью. Наибольшее распространение имеет сфагново-пушицевый тип микроландшафта. К нему относится вся центральная часть болота, где и установлена станция для непрерывных наблюдений за микроклиматическими параметрами и потоками тепла, H_2O и CO_2 между земной поверхностью и атмосферой методом турбулентных пульсаций.

2.2. Измерения микроклиматических параметров и турбулентных потоков методом турбулентных пульсаций

Станция для измерения метеорологических параметров и турбулентных потоков парниковых газов расположена в центральной части болотного массива (56.4727° с. ш., 33.0414° в. д., 240.3 м над у. м.). Непрерывные измерения потоков на станции проводятся начиная с 2015 года. Данные наблюдения являются продолжением пульсационных исследований потоков парниковых газов, проводившихся на данном болотном массиве в 1998–2000 годах. Измерительное оборудование установлено на металлической измерительной мачте высотой 3.5 м. Измерения высокочастотных пульсаций CO_2 и H_2O осуществляются с помощью ИК-газоанализатора открытого типа LI-7500A (LI-COR Inc., США). Для измерений пульсаций скорости ветра и температуры используется С-образный трехкомпонентный акустический анемометр CSAT3 (Campbell Sci. Inc., США). Измерения температуры и относительной влажности воздуха, а также атмосферного давления проводятся с помощью станции HMP155 (Vaisala Inc., Финляндия). Наблюдения за осадками осуществляются автоматическим осадкомером Young 52202 (R. M. Young Company, США), установленным на высоте 1 м. Потоки суммарной и отраженной коротковолновой солнечной радиации, а также нисходящие и восходящие потоки длинноволнового излучения измеряются 4-компонентным радиометром NR01 (Hukseflux Thermal Sensors, Нидерланды). Приходящая фотосинтетически активная радиация (ФАР) измеряется с помощью датчика ФАР LI-190SB (LI-COR Inc., США). Уровень и температура грунтовых вод определяются датчиком CS451 (Campbell Sci. Inc., США). Температура торфяной залежи измеряется на глубинах 5, 15, 50 и 100 см с помощью датчиков температуры почвы T109 (Campbell Sci. Inc., США). Измерения на каждой глубине проводятся в трех повторностях (один датчик установлен на гряде, один — на мочажине и один — между грядой и мочажинной соответственно). Поток тепла в почву измеряется с помощью трех самокалибрирующихся тепловых сенсоров HFP01SC (Hukseflux Thermal Sensors, Нидерланды), установленных на глубине 8.5 см. Измерения пульсаций составляющих скорости ветра, концентраций CO_2 и H_2O осуществляются с частотой 10 Гц. Расчет потоков выполняется последовательно для каждого 30-минутного интервала времени. Запись данных микроклиматических наблюдений проводится с помощью регистратора данных CR1000 (Campbell Sci. Inc., США) с шагом по времени 1 мин. Обработка пульсационных данных проводится с помощью стандартного программного обеспечения EddyPro (LI-COR Inc., USA). Она включает стандартизированную статистическую обработку данных, введение необходимых поправок и коррекций, а также отбраковку измерений, не удовлетворяющих установленным критериям качества [Aubinet et al., 2012].

Для решения поставленных в исследовании задач по параметризации функциональной зависимости NEE верхового болота от факторов внешней среды и ее использования для заполнения пропусков в рядах пульсационных измерений на исследуемом верховом болоте был выбран период времени с августа по ноябрь 2017 года. Проведенный статистический анализ данных наблюдений показал, что только 59 % данных измерений для выбранного периода, полностью удовлетворяют существующим критериям достоверности и качества измерений. Существенная часть данных измерений (41 %) соответствующим критериям не удовлетворяла и была отброшена. Большинство отбракованных значений потоков приходилось на периоды со слабовыра-

женной турбулентностью в приземном слое атмосферы, а также на периоды с атмосферными осадками.

3. Метод сбалансированной идентификации

Для построения многофакторных функциональных зависимостей NEE от факторов внешней среды и заполнения пропусков в рядах пульсационных наблюдений NEE на верховом болоте был использован метод сбалансированной (регуляризованной) идентификации «простота модели против подгонки» (SvF, Simplicity versus Fitting). Метод состоит в поиске компромисса между простотой модели и точностью повторения измерений на основе минимизации оценки погрешности, полученной методом перекрестного оценивания [Соколов, Волошинов, 2018]. Возникающие в процессе обратные задачи регуляризуются функционалом простоты модели [Тихонов, 1980], который определяется через кривизну входящих в постановку задачи функций. Можно считать, что решения поставленных задач обладают минимально необходимой нелинейностью (кривизной), следствием чего являются хорошие интерполяционные и экстраполяционные свойства построенных моделей, что особенно важно для восполнения недостающих данных.

Будем рассматривать величину NEE как функцию всех основных параметров внешней среды, определяющих радиационный, тепловой и влажностный режим исследуемой болотной экосистемы (приходящая солнечная радиация, температура, влажность воздуха, скорость ветра, уровень болотных вод и др.).

3.1. Восстановление NEE с помощью данных о приходящей солнечной радиации для короткого временного интервала

Рассмотрим на первом шаге упрощенный случай восстановления временного ряда данных по потокам CO_2 с помощью модели, основанной на зависимости NEE только от одного, отдельно взятого независимого параметра внешней среды, в качестве которого возьмем приходящую суммарную солнечную радиацию (Q). Выберем короткий тестовый четырехдневный интервал времени с 20 по 24 сентября 2017 года, для которого проведем процедуру восстановления непрерывного ряда наблюдений по NEE (рис. 1).

Обозначим множество измерений:

$$D: \{NEE_N, Q_N\}, \quad N \in K, \quad K \subset 1277..1468, \quad (1)$$

где K индексирует только те точки ряда, в которых имеются измерения NEE (120 из 192 точек).

Здесь и далее для измерений используются названия показателей с нижним индексом. Те же названия без нижнего индекса используются для обозначения переменных, соответствующих измеряемым показателям. Например, переменная NEE соответствует измерениям NEE_N .

Для описания зависимости NEE от Q выберем простую модель — дважды дифференцируемую функциональную зависимость:

$$\begin{cases} NEE = f(Q), \\ f(\cdot) \in C^2(Q^{\min}, Q^{\max}). \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим три варианта реализации модели (2): простую (Underfitted), сложную (Overfitted) и сбалансированную (Balanced). Для их построения (идентификации) и последующей оценки (верификации) разобьем последовательность измерений (1) на две выборки: обучающую (все измерения, кроме измерений 21.09.17, представленных на рис. 1 вне интервала, обозначенного вертикальными пунктирными линиями) и тестирующую (измерения 21.09.17, изображенные на рис. 1 внутри интервала, обозначенного вертикальными пунктирными линиями) выборки. Первую выборку будем использовать для идентификации модели, вторую — для ее верификации.

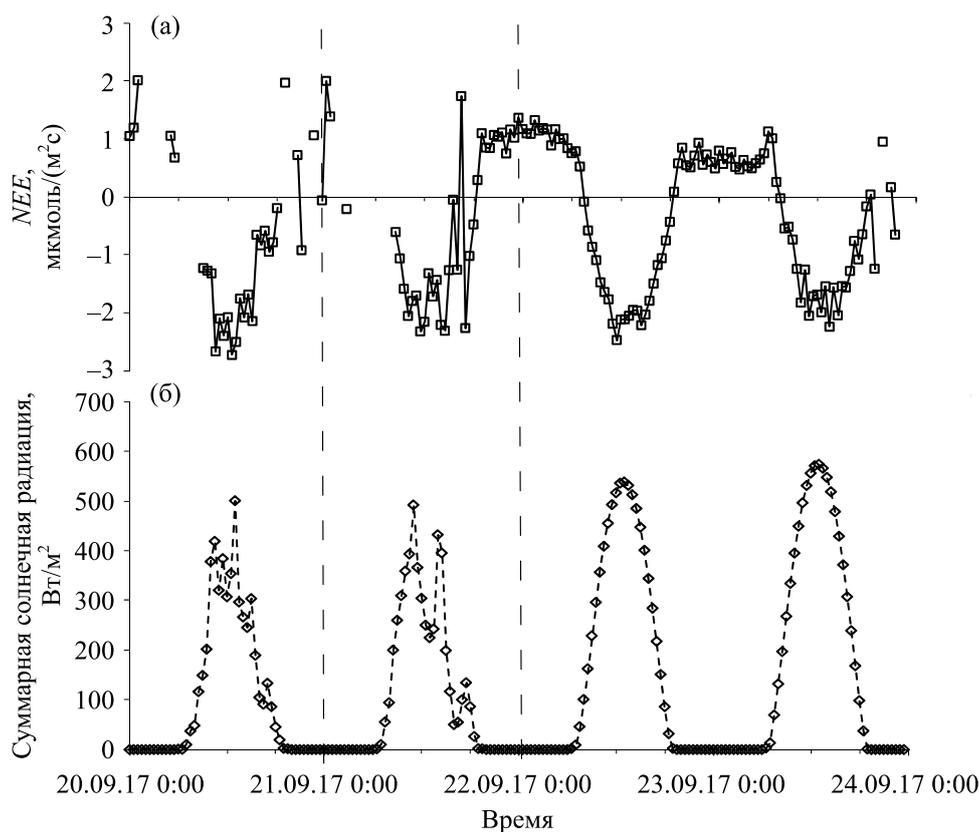


Рис. 1. Временная изменчивость нетто CO_2 -обмена (NEE) (а) и приходящей суммарной солнечной радиации (Q) (б) для выбранного интервала времени с 20 по 24 сентября 2017 г.

На рис. 2 приведены графики 3-х построенных моделей, описывающих зависимость NEE от Q . Прямая «Underfitted» является простейшим вариантом аппроксимации — прямой линией, проходящей слишком далеко от исходных измерений. Ее противоположностью является кривая «Overfitted» — слишком сложная модель, воспроизводящая практически точно всю дневную изменчивость NEE вместе с ошибками (переобученная модель). Наконец, кривая «Balanced» соответствует оптимальному балансу между близостью решения модели к измерениям и ее простотой. Она получена методом сбалансированной идентификации.

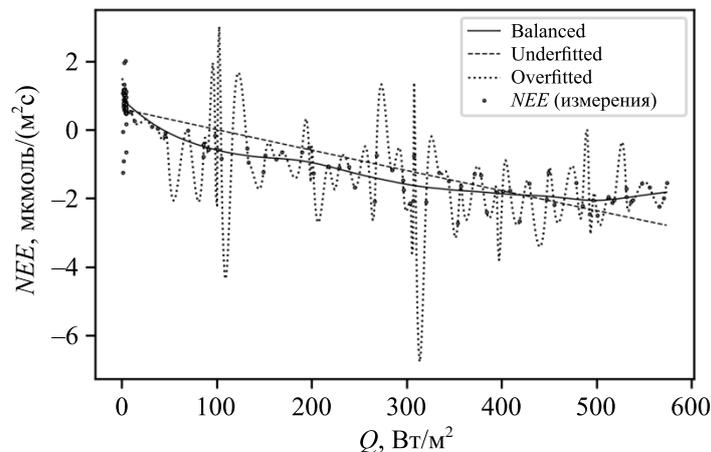


Рис. 2. Аппроксимация зависимости нетто CO_2 -обмена (NEE) от приходящей суммарной солнечной радиации (Q) моделями разной сложности

Результаты исследования прогностических свойств рассмотренных моделей представлены на рис. 3. На обучающей выборке измерений (дни, кроме 21.09.2017) наблюдается та же тенденция, что и на рис. 2, в том числе кривая «Overfitted» практически точно воспроизводит все измерения, кроме ночных сроков. Однако на тестирующей выборке (21.09.2017) наблюдается обратный результат — кривая «Underfitted» ведет себя хаотично и проходит далеко (по сравнению с двумя другими моделями) от измеренных значений

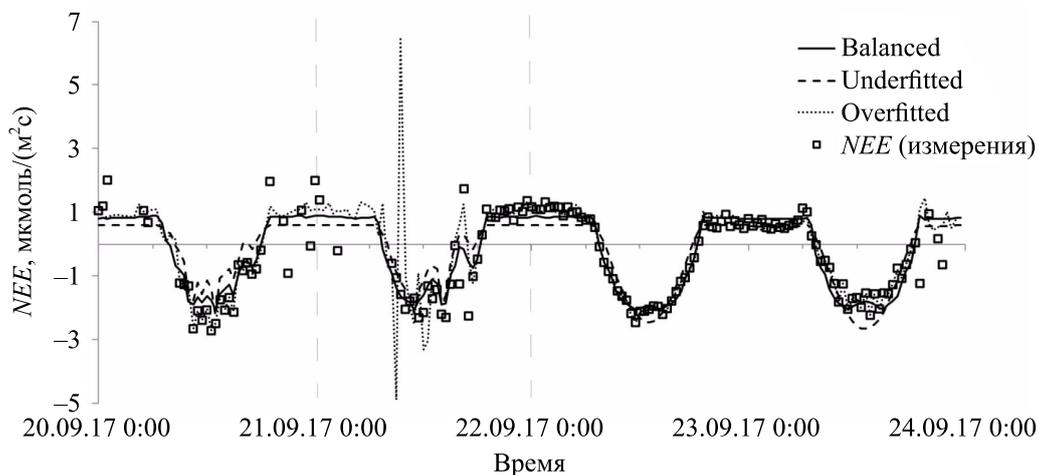


Рис. 3. Суточная динамика значений нетто CO_2 -обмена (NEE) на верховом болоте с 20.09 по 23.09.2017, полученных путем измерений и смоделированных с помощью моделей, разной степени сложности

Аналогичные выводы можно сделать и из численных результатов, приведенных в таблице 1: модель «Underfitted» слишком проста и недостаточно точна для описания рассмотренных измерений, модель «Overfitted» слишком сложна и неудовлетворительно работает на независимых данных, при этом лучшие прогностические свойства (минимальное среднеквадратичное отклонение на тестирующей выборке) демонстрирует модель «Balanced».

Таблица 1. Среднеквадратичная ошибка (mse) в % от дисперсии NEE

Тип модели	Обучающая выборка	Тестирующая выборка
Underfitted	34	52
Overfitted	16	117
Balanced	29	40

Рассмотренные модели являются результатом решения задачи сплайн-аппроксимации, состоящей в минимизации функционала:

$$F(f, K, \alpha) = \frac{1}{|K|} \sum_{k \in K} (NEE_k - f(Q_k))^2 + \alpha \int_{Q^{\min}}^{Q^{\max}} \left(\frac{d^2 f}{dQ^2} \right)^2 dQ \rightarrow \min_{f(\cdot)}, \quad (3)$$

$$f(\cdot) \in C^2(Q^{\min}, Q^{\max}),$$

где первое слагаемое — мера соответствия модели измерениям (сумма квадратов отклонений), второе — взвешенная (с весом $\alpha > 0$) мера сложности модели как мера кривизны функции $f(Q)$, интеграл квадрата второй производной.

Известно (см., например, [Роженко 2005]), что решение задачи сплайн-аппроксимации (3) при любом $\alpha > 0$ существует и единственно (при достаточно простых условиях на узлы аппроксимации) и представляет собой обычный кубический сплайн.

При различных значениях α решения задачи (3) обладают разным соотношением «отклонение от измерений / сложность модели»:

- при $\alpha \rightarrow 0$ второе слагаемое стремится к 0, и задача сводится к задаче сплайн-интерполяции: поиск функции минимальной кривизны, проходящей через заданные точки (см. рис. 2, кривая «Overfitted», дневные точки);
- при $\alpha \rightarrow \infty$ второе слагаемое подавляет первое, и задача сводится к поиску прямой (линии нулевой кривизны) с минимальной суммой квадратов отклонений от измерений (см. рис. 2, кривая «Underfitted»), т. е. к методу линейной регрессии;
- при выборе оптимального сбалансированного значения веса α (кривая «Balanced» на рис. 2) решается задача поиска α , обеспечивающего минимальную оценку погрешности (моделирования измерений NEE) на основе процедуры перекрестного оценивания (cross-validation).

Для процедуры перекрестного оценивания в рассматриваемом случае множество индексов измерений K разбивается на набор непересекающихся подмножеств, соответствующих различным суткам (48 измерений в сутки):

$$K = \bigcup_{i \in I} K_i, \quad K_i \cap K_j = \emptyset, \quad i \neq j, \quad i \in K, \quad j \in K. \tag{4}$$

Такой размер подмножеств определяется постановкой задачи — необходимостью восстановления непрерывных рядов данных по потокам для временных интервалов около суток.

Зададим некоторое α . Удалим из множества K подмножество K_i . Найдем минимум критерия (3) на оставшемся наборе данных $K \setminus K_i$ (обучающая выборка). Обозначим соответствующее решение как

$$f_{K \setminus K_i}^\alpha = \mathop{\text{Arg}} \min_f \{F(f, K \setminus K_i, \alpha)\}. \tag{5}$$

Для найденного $f_{K \setminus K_i}^\alpha$ определим квадрат отклонения решения от измерений для $k \in K_i$ (на «контрольной» выборке) как

$$\sum_{k \in K_i} (NEE_k - f_{K \setminus K_i}^\alpha(Q_k))^2.$$

Повторяя эту процедуру для всех подмножеств $K_i, i \in I$, и суммируя полученные результаты, получим для заданного α перекрестную оценку погрешности:

$$\sigma^\alpha = \sqrt{\frac{1}{|K|} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (NEE_k - f_{K \setminus K_i}^\alpha(Q_k))^2},$$

минимизация которой по α

$$\alpha^* = \mathop{\text{Arg}} \min_\alpha \sqrt{\frac{1}{|K|} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (NEE_k - f_{K \setminus K_i}^\alpha(Q_k))^2} \tag{6}$$

приводит к выбору веса, соответствующего модели с оптимальным соотношением «близость к данным / простота».

Для завершения задачи осталось для найденного оптимального α^* найти оптимальное решение $f_K^{\alpha^*}(Q)$ (решение задачи (3) для α^*) и подсчитать (минимальное, перекрестное) отклонение от измерений, которое будем называть погрешностью моделирования измерений:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{|K|} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (NEE_k - f_{K \setminus K_i}^{\alpha^*}(Q_k))^2}. \tag{7}$$

3.2. Задача восстановления NEE как функции совокупности нескольких параметров внешней среды

Воспользуемся рассмотренной методикой для восстановления временной изменчивости NEE для всей совокупности внешних независимых параметров. Будем рассматривать NEE как разность экосистемного дыхания (RE) и валовой первичной продукции или брутто-фотосинтеза (GPP) болотной экосистемы. На основе анализа изменчивости значений NEE , RE и GPP , а также параметров внешней среды в период с августа по ноябрь 2017 года нами было выбрано 4 наиболее значимых внешних параметра, влияющих на NEE : Q , температура почвы (T), дефицит упругости водяного пара (VPD), уровень болотных вод (WL).

Обозначим множество измерений:

$$D: \{NEE_N, Q_N, T_N, VPD_N, WL_N\}, \quad N \in K, \quad K \subset 1..3605, \quad (8)$$

где NEE_N — нетто CO_2 -обмен в момент времени N ; Q_N, T_N, VPD_N, WL_N — значения параметров Q, T, VPD и WL в точке ряда измерений с номером N .

Будем считать, что внешние параметры (Q, T, VPD и WL) измеряются непрерывно и, в отличие от NEE , не содержат пропусков. Индекс K соответствует только тем точкам ряда, в которых имеются измерения NEE (2150 из 3605 точек).

Общая система уравнений предлагаемой модели в этом случае может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} NEE = RE(WL, T) - GPP(Q, T) \cdot H(VPD), \\ GPP(\cdot) \in C^2([Q^{\min}, Q^{\max}] \times [T^{\min}, T^{\max}]), \\ H(\cdot) \in C^2(VPD^{\min}, VPD^{\max}), \\ RE(\cdot) \in C^2([WL^{\min}, WL^{\max}] \times [T^{\min}, T^{\max}]), \\ GPP(\cdot) \geq 0, \\ H(\cdot) \geq 0, \\ RE(\cdot) \geq 0, \\ \forall T \in [T^{\min}, T^{\max}]: GPP(0, T) = 0, \\ H(0) = 1, \\ H(\cdot) \leq 1. \end{array} \right. \quad (9)$$

Модель (9) представляет собой параметризацию, рассматривающую NEE как разность RE и GPP , и зависимость этих величин от четырех ключевых внешних параметров, характеризующих радиационный, тепловой и водный режим болотной экосистемы. Все функции, входящие в (9), предполагаются неотрицательными, дважды дифференцируемыми. В качестве основных параметров внешней среды, определяющих RE , рассматриваются WL и T . GPP предполагается зависящей от трех основных факторов: Q, T и VPD . Эта зависимость может быть представлена как $GPP(Q, T) \cdot H(VPD)$, где $H(VPD)$ — безразмерный поправочный множитель, определяющий зависимость GPP от VPD .

Последние три уравнения в (9) несколько сужают постановку задачи (убирают излишнюю свободу выбора): присваивают GPP нулевое значение при нулевой радиации Q и фиксируют значение функции H , равное 1 при нулевом VPD (что соответствует 100 % относительной влажности).

Для поиска сбалансированного решения модели (9) используется функционал:

$$\begin{aligned}
 F(RE, GPP, H, K, \alpha) = & \frac{1}{|K|} \sum_{k \in K} (NEE_k - RE(WL_k, T_k) + GPP(Q_k, T_k) \cdot H(VPD_k))^2 + \\
 & + \int_{T^{\min}}^{T^{\max}} \int_{WL^{\min}}^{WL^{\max}} \left[\alpha_1^2 \left(\frac{\partial^2 RE}{\partial WL^2} \right)^2 + 2\alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{\partial^2 RE}{\partial WL \partial T} \right)^2 + \alpha_2^2 \left(\frac{\partial^2 RE}{\partial T^2} \right)^2 \right] \partial WL dT + \\
 & + \int_{T^{\min}}^{T^{\max}} \int_{Q^{\min}}^{Q^{\max}} \left[\alpha_3^2 \left(\frac{\partial^2 GPP}{\partial Q^2} \right)^2 + 2\alpha_3 \alpha_4 \left(\frac{\partial^2 GPP}{\partial Q \partial T} \right)^2 + \alpha_4^2 \left(\frac{\partial^2 GPP}{\partial T^2} \right)^2 \right] \partial Q dT + \\
 & + \alpha_5 \int_{VPD^{\min}}^{VPD^{\max}} \left(\frac{d^2 H}{d VPD^2} \right)^2 d VPD,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где первое слагаемое — мера соответствия модели измерениям (среднеквадратичное отклонение), второе — взвешенная (с весами α_1, α_2) мера сложности функции RE , третье — взвешенная (с весами α_3, α_4) мера сложности функции GPP и четвертое — взвешенная (с весом α_5) мера сложности функции H .

Процедура построения «сбалансированного» решения аналогична процедуре, использованной выше (множество измерений (1), модель (2) и критерий (3) заменяются на (8), (9) и (10) соответственно). В этом случае задача состоит в поиске пяти параметров α , обеспечивающих минимальную оценку погрешности моделирования σ^* , полученную перекрестным оцениванием.

Поставленные выше двухуровневые оптимизационные задачи не имеют аналитического решения. Для построения аппроксимирующих разностных моделей искомые непрерывные функции заменяются на сеточные, а их производные и интегралы — на разностные аналоги. Для их численного решения (основанного на решении большого числа задач математического программирования) требуются специальное программное обеспечение и значительные вычислительные ресурсы. Численные модели, построенные в рамках исследования, были реализованы на языке программирования Python, а для решения оптимизационных задач использовались сервисы оптимизации в среде распределенных вычислений Everest [Sukhoroslov, 2015]. Технические детали решения подобного класса задач подробно изложены в работе Афанасьева и др. [Afanasyev et al., 2017].

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Зависимость NEE, GPP и RE от факторов внешней среды

В ходе поиска неизвестных величин оптимально сбалансированной модели (10) были получены статистически достоверные зависимости функций RE, GPP и H от Q, T, VPD и WL (рис. 4–6). Найденные оценки погрешности определения NEE приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оценки погрешностей построенной численной модели

Погрешность	мкмоль $CO_2/(m^2c)$	% от дисперсии NEE
Дисперсия NEE	1.47	–
Погрешность моделирования измерений σ^*	0.50	34.0
Среднеквадратичное отклонение (mse)	0.46	31.0
Погрешность моделирования среднесуточных данных (для дней с количеством измерений ≥ 10)	0.14	9.5

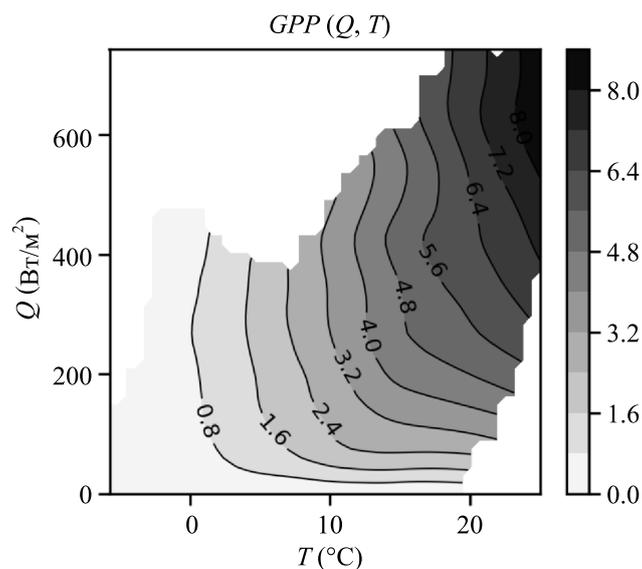


Рис. 4. Зависимость валовой первичной продукции (GPP) от температуры почвы (T) и приходящей суммарной солнечной радиации (Q)

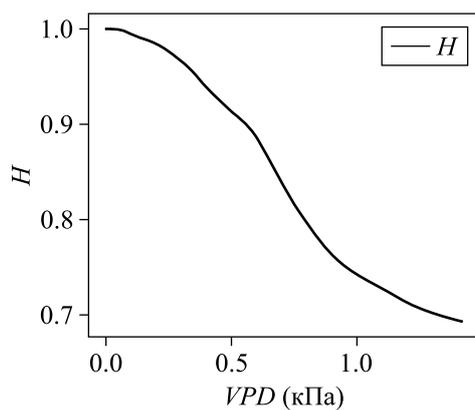


Рис. 5. Зависимость безразмерного поправочного множителя H от дефицита упругости водяного пара VPD

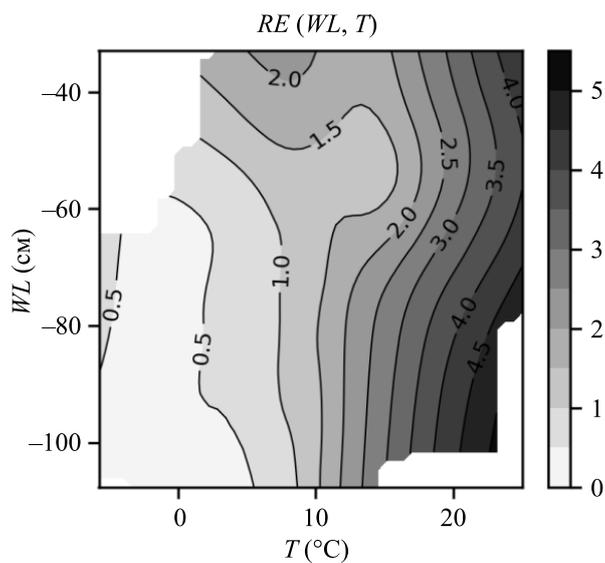


Рис. 6. Зависимость экосистемного дыхания (RE) от уровня болотных вод (WL) и температуры почвы (T)

Для полученных в рамках рассматриваемой параметризации (9) зависимостей NEE , RE и GPP от факторов внешней среды можно выделить следующие основные закономерности:

- GPP устойчиво увеличивается с ростом T и Q . При этом при T менее $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость GPP от Q проявляется достаточно слабо. Также необходимо отметить и слабую чувствительность GPP к изменению T при малых значениях Q .
- GPP устойчиво снижается при увеличении VPD .
- RE растет при уменьшении WL и увеличении температуры почвы T .

Выявленная в ходе исследования устойчивая зависимость GPP болотной растительности от T и Q отмечается в исследованиях многих авторов [Leppala et al., 2008; Kurbatova et al., 2009; Olchev et al., 2013; Молчанов, Ольчев, 2016]. При этом описание зависимости GPP болотных растительных сообществ от VPD в воздухе в литературе практически отсутствует. Связь GPP и VPD обусловлена тесной зависимостью скорости фотосинтеза растений от устьичной проводимости, изменчивость которой в значительной степени определяется в том числе и VPD [Jarvis, 1976]. Данные измерений показывают, что на верховых болотах травянистая и кустарничковая растительность вносит определяющий вклад в изменение NEE , GPP и RE болотной экосистемы, и при оптимальных условиях освещения в большинстве случаев их вклад существенно превышает вклад в потоки CO_2 сфагнового мха [Olchev et al., 2013].

Устойчивая зависимость RE болотных экосистем от T также отмечается в результатах проведенных ранее экспериментальных исследований [Lafleur et al., 2006; Молчанов, Ольчев, 2016]. При этом в исследовании Лефлера с соавт., проведенном на верховом болоте вблизи Оттавы в Канаде [Lafleur et al., 2006], в отличие от результатов, полученных в рамках данного исследования, отмечается отсутствие статистически значимой зависимости RE от WL . Данную закономерность можно связать с наблюдаемыми на исследуемом Лефлером с соавт. верховом болоте достаточно засушливыми условиями на протяжении всего периода наблюдений, при которых WL изменялась в довольно незначительных пределах, тем самым не оказывая существенного влияния на RE . Согласно исследованиям, проведенным Молчановым [Молчанов, 2015], при резко засушливых условиях можно ожидать резкого снижения RE болота как за счет иссушения сфагноума и верхнего слоя торфа, так и из-за снижения водообеспеченности травянистой растительности. Кроме того, снижение RE может наблюдаться и при избыточной обводненности верхнего слоя торфа, обусловленной высоким залеганием болотных вод.

Полученные оценки погрешностей моделирования, в том числе погрешности моделирования среднесуточных данных, составляющей менее 10%, свидетельствуют о возможности использования предлагаемого подхода для заполнения пропусков в рядах данных по потокам CO_2 .

4.2. Временная изменчивость NEE

Восстановленные с помощью метода сбалансированной идентификации непрерывные ряды данных по NEE позволили получить информацию о временной изменчивости потоков CO_2 для разных масштабов осреднения по времени, а также оценить величины интегральных (накопленных) потоков CO_2 для болотной экосистемы за весь выбранный временной интервал с 24 августа по 7 ноября 2017 года. Для проверки предложенного алгоритма в работе была использована также и альтернативная методика заполнения пропусков в рядах измерений, основанная на модели REddyProc [Reichstein et al., 2005; Wutzler et al., 2018]. REddyProc, так же как и разработанная модель, рассматривает NEE как разность RE и GPP , однако при описании временной изменчивости NEE учитывает существенно меньшее количество внешних факторов, рассматривая зависимость RE только от температуры, а GPP — от приходящей суммарной солнечной радиации и упругости водяного пара в воздухе.

Сравнение внутрисуточной изменчивости NEE , восстановленного с помощью метода сбалансированной идентификации и модели REddyProc для всего периода наблюдений, показывает их достаточно хорошее соответствие, в том числе и для ночных интервалов времени,

на которые приходится максимальное количество пропусков в экспериментальных данных (рис. 7). Коэффициент детерминации (r^2) между значениями NEE , полученными с помощью разных подходов к заполнению пропусков во временных рядах, несмотря на различия в выбранных алгоритмах расчетов и количества входных параметров, превышает 0.90 при $p < 0.05$ (рис. 9, а).

Анализ временной изменчивости NEE показывает, что днем верховое болото активно поглощает CO_2 из атмосферы — NEE в зависимости от погодных условий в полуденное время изменяется от -2 до -6 мкмоль $CO_2/(m^2 \text{ с})$. Ночная эмиссия CO_2 с поверхности болота в этот период составляет $1-3$ мкмоль $CO_2/(m^2 \text{ с})$. В осенние месяцы наблюдается устойчивое снижение дневных и ночных значений потоков. В ноябре полуденные значения NEE по абсолютному значению не превышают -1 мкмоль $CO_2/(m^2 \text{ с})$, а ночные значения NEE — 1.5 мкмоль $CO_2/(m^2 \cdot \text{с})$ соответственно.

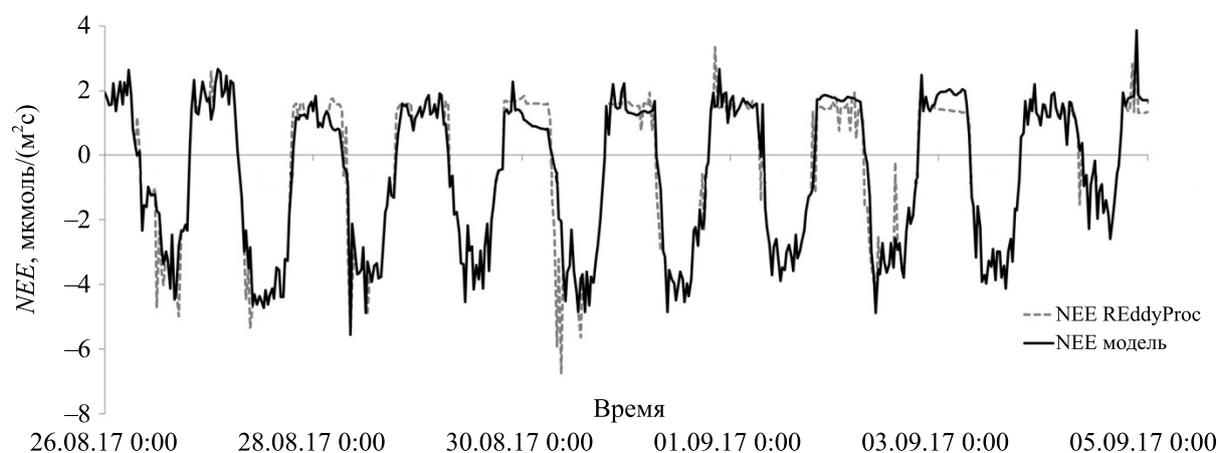


Рис. 7. Временная изменчивость нетто CO_2 -обмена (NEE) на верховом болоте после заполнения пропусков в рядах экспериментальных данных с помощью разработанного модельного алгоритма и программы REdDyProc [Reichstein et al., 2005] для интервала времени с 26.08 по 05.09.2017

Достаточно хорошее взаимное соответствие методов сбалансированной идентификации и REdDyProc проявляется и при сравнении восстановленных разными методами среднесуточных значений NEE (рис. 8, а, рис. 9, а). Коэффициент детерминации между среднесуточными значениями NEE , полученными с использованием метода сбалансированной идентификации и модели REdDyProc, составляет 0.932 ($p < 0.05$). При этом следует отметить, что среднесуточные значения NEE , восстановленные с помощью метода сбалансированной идентификации, несколько ниже значений, полученных после применения модели REdDyProc (тангенс угла наклона линейной функции на диаграмме рассеяния составляет 0.89) (рис. 9, б). Данная закономерность может быть связана главным образом с учетом в методе сбалансированной идентификации большего количества внешних факторов, влияющих на величину NEE , GPP и RE . Выявленные различия проявляются и при рассмотрении временной изменчивости накопленных (интегрированных) значений NEE в разные моменты исследуемого периода (рис. 8, б). В конце августа и первую неделю сентября исследуемая болотная экосистема активно поглощает CO_2 из атмосферы. NEE в этот период в зависимости от погодных условий изменяется от -0.3 до -1.2 гС/ $(m^2 \cdot \text{день})$. При этом использование модели REdDyProc для этого периода дает более высокие оценки суточных значений NEE , чем метод сбалансированной идентификации. Начиная с середины сентября, динамика накопленных значений NEE , полученных обоими методами, несколько выравнивается. Экосистема в этот период работает преимущественно как источник CO_2 для атмосферы. Устойчивое превышение RE над GPP наблюдается начиная с первой недели октября. При этом важно отметить достаточно хорошее соответствие скоростей изменения среднесуточных значений NEE , полученных методом сбалансированной идентификации и мо-

делью REddyProc, что может быть обусловлено определяющим влиянием на величину NEE для выбранного интервала времени значений температуры воздуха и приходящей солнечной радиации, т. е. тех величин, которые входят в качестве базовых в обе рассматриваемые модели. В ноябре отрицательных суточных значений NEE не наблюдается, и болото является устойчивым источником CO_2 для атмосферы.

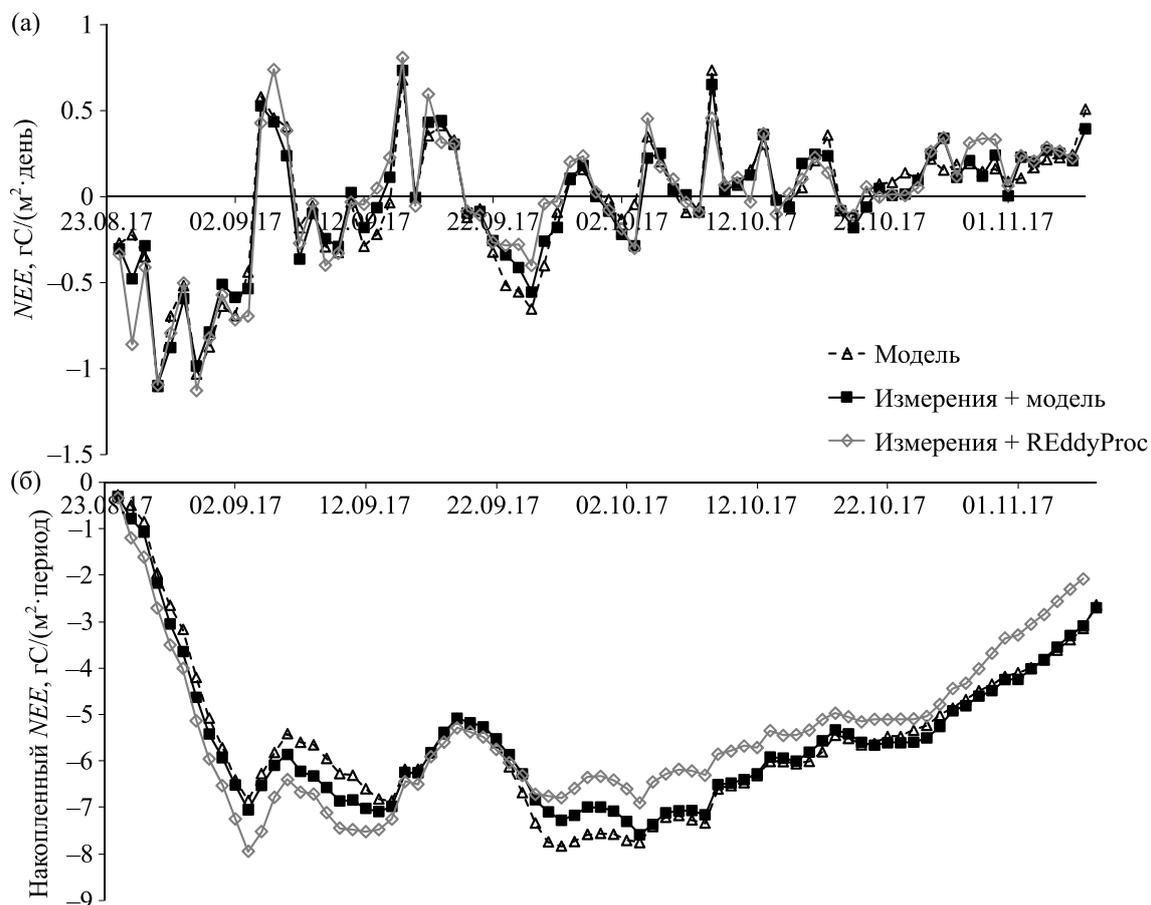


Рис. 8. Временная изменчивость (а) суточных значений нетто CO_2 -обмена (NEE) и (б) накопленных значений NEE за исследуемый интервал времени на верховом болоте после заполнения пропусков в данных по потокам с использованием метода сбалансированной идентификации (модель) и модели REddyProc

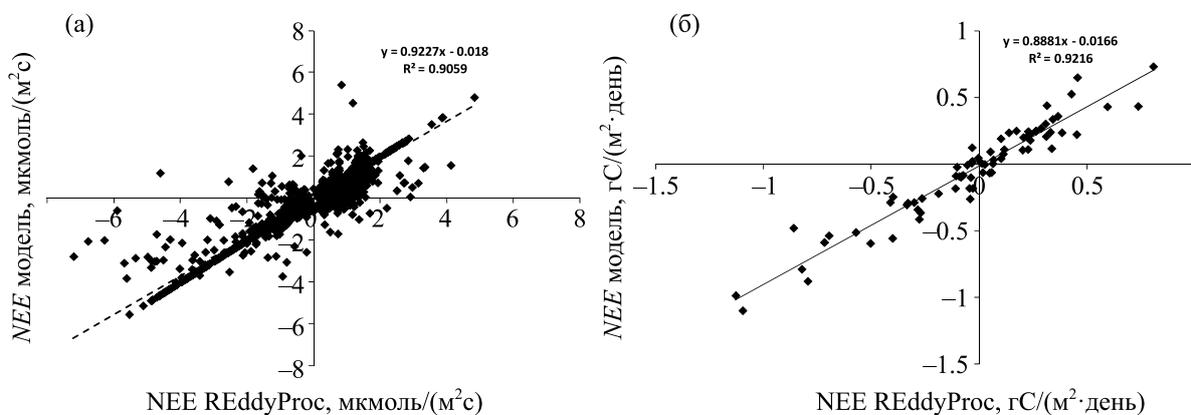


Рис. 9. Диаграммы рассеяния между 30-минутными (а) и суточными значениями нетто CO_2 -обмена (NEE) после процедуры заполнения пропусков в данных с использованием метода сбалансированной идентификации (модель) и модели REddyProc

Суммируя результаты сравнения, можно утверждать, что реализованный в предложенном подходе алгоритм, позволяющий учитывать влияния на *NEE* большего числа факторов внешней среды по сравнению с REddyProc, позволяет более точно описать динамику *NEE* за выбранный интервал времени на исследуемом верховом болоте. Можно ожидать, что более высокая точность прогнозирования проявляется прежде всего при условиях, при которых значения неучтенных в REddyProc внешних факторов сильно отличаются от средних величин, и оказывает значительное лимитирующее или усиливающее влияние на скорости фотосинтеза и дыхания болотной экосистемы.

5. Заключение

На основе анализа результатов пульсационных измерений потоков CO_2 на верховом сфагновом болоте «Старосельский мох» в Тверской области с помощью метода сбалансированной идентификации были получены данные о функциональной зависимости основных составляющих нетто CO_2 -обмена (*GPP*, *RE* и *NEE*) от ключевых параметров внешней среды и построена модель *NEE* болотной экосистемы, использованная в дальнейшем для заполнения пропусков в рядах измерений *NEE* на исследуемом болоте в период с августа по ноябрь 2017 года. Построенная модель рассматривает *NEE* как разность *RE* и *GPP* и учитывает зависимость этих параметров от 4 наиболее значимых для данной экосистемы факторов внешней среды (приходящей солнечной радиации, температуры почвы, дефицита упругости водяного пара в воздухе, уровня болотных вод). С помощью восстановленных данных по потокам CO_2 была оценена временная изменчивость *NEE* и рассчитаны интегральные значения потоков для разных масштабов осреднения по времени. Погрешность восстановления среднесуточных значений *NEE* не превышает 10 %. На основании восстановленных временных рядов было показано, что в августе верховое болото активно поглощает CO_2 из атмосферы — *NEE* изменяется в зависимости от погодных условий от -0.3 до -1.2 гС/(м² день). В осенние месяцы верховое болото постепенно превращается в источник CO_2 для атмосферы, *NEE* варьирует в диапазоне от -0.6 до 0.7 гС/(м² день).

Для проверки разработанного модельного алгоритма восстановленные ряды данных по потокам CO_2 были сопоставлены с временными рядами, полученными с помощью модели REddyProc, которая используется в настоящее время в качестве основного инструмента для восстановления данных пульсационных измерений на станциях международной сети наблюдений за потоками тепла, водяного пара и CO_2 методом турбулентных пульсаций. Хорошее соответствие значений *NEE*, полученных с помощью двух альтернативных подходов за весь выбранный временной интервал, в целом может служить хорошим индикатором достоверности полученных оценок потоков CO_2 у земной поверхности. Выявленные различия между подходами являются следствием не только различий в модельных построениях, но также достаточно сложной системы взаимодействий, существующих в болотных экосистемах, а также нелинейных связей между потоками CO_2 и факторами внешней среды. Это требует проведения дальнейших комплексных экспериментальных и модельных исследований в болотных экосистемах с акцентом на более детальный анализ пространственно-временной изменчивости потоков и на выявление причинно-следственных связей. Понимание механизмов этого взаимодействия, выделение ключевых факторов, определяющих временную и пространственную изменчивость CO_2 -обмена в болотных экосистемах, является залогом получения более эффективных и точных алгоритмов их описания, а также более надежной оценки составляющих углеродного баланса болотных экосистем. Подобная информация очень важна при решении различных экологических и общегеографических задач, в том числе для расчета скоростей торфонакопления в болотах, а также для оценки вклада болот в потоки парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой и определения их дальнейшего влияния на погодные и климатические условия в локальном и региональном масштабе.

Список литературы (References)

- Будыко М. И.* Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 470 с.
Budyko M. I. Klimat i zhizn [Climate and life]. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. — 470 p. (in Russian).
- Будыко М. И.* Изменения климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.
Budyko M. I. Izmeneniya klimata [Climate change]. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. — 280 p. (in Russian).
- Глухова Т. В., Вомперский С. Э., Ковалев А. Г.* Эмиссия CO₂ с поверхности олиготрофных болот южно-таежной зоны европейской территории России с учетом микрорельефа // Почвоведение. — 2014. — № 1. — С. 48–57.
Glukhova T. V., Vomperskiy S. E., Kovalev A. G. Emissiya CO₂ s poverkhnosti oligotrofnykh bolot yuzhno-tayezhnoy zony evropeyskoy territorii Rossii s uchetom mikrorelyefa [Emissions of CO₂ from the surface of oligotrophic bogs in the southern taiga zone of the European part of Russia, taking into the micro terrain] // Pedology. — 2014. — No. 1. — P. 48–57 (in Russian).
- Кудеяров В. Н., Курганова И. Н.* Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, моделирование, общие оценки // Почвоведение. — 2005. — № 9. — С. 1112–1121.
Kudeyarov V. N., Kurganova I. N. Dykhaniye pochv Rossii: analiz bazy dannykh. mnogoletniy monitoring. modelirovaniye. obshchiye otsenki [Russia's Soil Breath: database analysis, long-term monitoring, modeling, general assessments] // Pedology. — 2005. — No. 9. — P. 1112–1121 (in Russian).
- Иванов Д. Г., Авилов В. К., Курбатова Ю. А.* Поток CO₂ на верховом болоте в южнотаежной зоне европейской части России в летний период // Сибирский экологический журнал. — 2017. — № 2. — С. 109–118.
Ivanov D. G., Avilov V. K., Kurbatova J. A. CO₂ fluxes on the South taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. — 2017. — Vol. 10, Issue 2. — P. 97–104. (Original Russian paper: *Ivanov D. G., Avilov V. K., Kurbatova J. A.* Potoki CO₂ na verkhovom bolote v yuzhnotayezhnoy zone evropeyskoy chasti Rossii v letniy period // Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. — 2017. — No. 2. — P. 109–118.)
- Минаева Т. Ю., Глушков И. В., Носова М. Б., Стародубцева О. А., Кураева Е. Н., Волкова Е. М.* Очерк болот Центрально-Лесного заповедника // Комплексные исследования в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике их прошлое, настоящее и будущее: материалы совещания // Труды Центрально-Лесного заповедника — Т. 4. — Тула: Изд-во Гриф и К°, 2007. — С. 267–296.
Minayeva T. J., Glushkov I. V., Nosova M. B., Starodubtseva O. A., Kurayeva E. N., Volkova E. M. Ocherk bolot Tsentralno-Lesnogo zapovednika [Essay on the bogs of the Central Forest Reserve] // Trudy Tsentralno-Lesnogo zapovednika "Kompleksnyye issledovaniya v Tsentralno-Lesnom gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike ikh proshloye. nastoyashcheye i budushcheye: materialy soveshchaniya" [Proc. Of the Central Forest Reserve "Comprehensive research in the Central Forest State Biosphere Reserve on their past, present and future: Proc. Of the meeting"]. — Tula: Grif i K° Publ., 2007. — Vol. 4. — P. 267–296 (in Russian).
- Молчанов А. Г.* Газообмен сфагнома при различных уровнях поверхностных грунтовых вод // Экология. — 2015. — № 3. — С. 182–188.
Molchanov A. G. Gas exchange in sphagnum mosses at different near-surface groundwater levels // Russian Journal of Ecology. — 2015. — Vol. 46, Issue 3. — P. 230–235. (Original Russian paper: *Molchanov A. G.* Gasoobmen sфагнома pri raslichnix urovniah gruntovix vod // Ekologiya. — 2015. — No. 3. — P. 182–188.)
- Молчанов А. Г., Ольчев А. В.* Модель газообмена CO₂ сфагнового верхового болота // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 369–377.
Molchanov A. G., Olchev A. V. Model gasoobmena CO₂ sфагнового verhovogo bolota [Model of CO₂ exchange in a sphagnum peat bog] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8, No. 2. — P. 369–377 (in Russian).
- Роженко А. И.* Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации. — Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2005. — 244 с.
Rozhenko A. I. Theory and Algorithms of Variational Spline-approximation [Teoriya i algoritmy variatsionnoy splayn-approksimatsii]. — Novosibirsk: ICM&MG SB RAS Publ., 2005. — 244 p. (in Russian).
- Соколов А. В., Волошинов В. В.* Выбор математической модели: баланс между сложностью и близостью к измерениям // International Journal of Open Information Technologies. — 2018. — Т. 6, № 9. — С. 33–41. — URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/612>

- Sokolov A. V., Voloshinov V. V.* Vybor matematicheskoy modeli: balans mezhdru slozhnostyu i blizostyu k izmereniyam [Choice of mathematical model: balance between complexity and proximity to measurements] // International Journal of Open Information Technologies. — 2018. — Vol. 6, No. 9. — С. 33–41 (in Russian).
- Тихонов А. Н.* О математических методах автоматизации обработки наблюдений // Проблемы вычислительной математики. — М.: Изд-во МГУ, 1980. — С. 3–17.
- Tikhonov A. N.* O matematicheskikh metodakh avtomatizatsii obrabotki nablyudeniy [Mathematical methods for automating the processing of observations] // Problems of Computational Mathematics. — 1980. — Moscow: MSU Publ. — P. 3–17 (in Russian).
- Arneth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O. B., Lloyd J., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D.* Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog. II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // Tellus. — 2002. — B54. — P. 514–530.
- Afanasyev A. P., Sokolov A. V., Voloshinov V. V.* Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: Collection of Scientific Papers of the XIX International Conference DAMDID / RCDL'2017. — Moscow, October 10–13, 2017. — P. 132–140 (eds.). *Kalinichenko L. A., etc.* — Moscow: FRC CSC RAS, 2017. — URL: http://damdid2017.frccsc.ru/files/DAMDID_RCDL_2017_Proceedings.pdf
- Aubinet M., Vesala T., Papale D.* Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. — Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2012.
- Bonan G. B., Pollard D., Thompson S. L.* Effects of boreal forest vegetation on global climate // Nature. — 1992. — Vol. 359. — P. 716–718.
- Brovkin V., Raddatz T., Reick C. H., Claussen M., Gayler V.* Global biogeophysical interactions between forest and climate // Geophysical Research Letters. — 2009. — Vol. 36. — L07405.
- Burba G.* Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. — Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences, 2013.
- Chapin F. S. III, Randerson J. T., McGuire A. D., Foley J. A., Field C. B.* Changing feedbacks in the climate–biosphere system // Front. Ecol. Environ. — 2008. — No. 6. — P. 313–320.
- Grace J.* The Carbon Cycle // The Encyclopedia of Biodiversity. — 2000. — No. 1. — P. 609–628.
- Ibrom A., Schütz C., Tworek T., Morgenstern K., Oltchev A., Falk M., Constantin J., Gravenhorst G.* Eddy-correlation measurements of fluxes of CO₂ and H₂O above a spruce forest // J. Phys. Chem. Earth. — 1996. — Vol. 21 (5-6). — P. 409–414.
- IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.
- Janssens I. A., Lankreijer H., Matteucci G., Kowalski A. S., Buchmann N., Epron D., Pilegaard K., Kutsch W., Longdoz B., Grünwald T., Montagnani L., Dore S., Rebmann C., Moors E. J., Grelle A., Rannik Ü., Morgenstern K., Oltchev A., Clement R., Guomundsson J., Minerbi S., Berbigier P., Ibrom A., Moncrieff J., Aubinet M., Bernhofer C., Jensen N. O., Vesala T., Granier A., Schulze E.-D., Lindroth A., Dolman A. J., Jarvis P. G., Ceulemans R., Valentini R.* Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests // J. Global Change Biology. — 2001. — Vol. 7 (3). — P. 269–279.
- Jarvis P. J.* The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field // Phil. Trans. Royal Soc. — 1976. — B273. — P. 593–610.
- Kurbatova J., Arneth A., Vygodskaya N. N., Kolle O., Varlagin A. V., Milyukova I. M., Tchebakova N. M., Schulze E.-D., Lloyd J.* Comparative ecosystem–atmosphere exchange of energy and mass in European Russian and central Siberian bog. I. Interseasonal and interannual variability of energy and latent heat fluxes during the snow free period // Tellus. — 2002. — B54. — P. 497–513.

- Kurbatova J., Li Ch., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A.* Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bog // *Environmental Research Letters*. — 2009. — Vol. 4. — 045022.
- Lafleur P. M., Moore T. R., Roulet N. T., Frohking S.* Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on Peat temperature but not water table // *Ecosystems*. — 2005. — Vol. 8 (6). — P. 619–629.
- Leppala M., Kukko-oja K., Laine J., Tuittila E-S.* Seasonal dynamics of CO₂ exchange during primary succession of boreal mires as controlled by phenology of plants // *Ecoscience*. — 2008. — Vol. 15, No. 4. — P. 360–471.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A.* Changes in net ecosystem exchange of CO₂, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis // *Environmental Research Letters*. — 2016. — Vol. 11 (12). — 125012
- Norman J. M., Kucharik C. J., Gower S. T., Baldocchi D. D., Crill P. M., Rayment M., Savage K., Striegl R. G.* A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes // *J. Geophys. Res.* — 1997. — Vol. 102D, No. 28. — P. 771–777.
- Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E.* Growing season variability of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia // *Environmental Research Letters*. — 2013. — Vol. 8 (3). — P. 035051.
- Olchev A., Ibrom A., Panferov O., Gushchina D., Kreilein H., Popov V., Propastin P., June T., Rauf A., Gravenhorst G., Knohl A.* Response of CO₂ and H₂O fluxes in a mountainous tropical rainforest in equatorial Indonesia to El Niño events // *Biogeosciences*. — 2015. — Vol. 12. — P. 6655–6667.
- Olchev A., Novenko E., Popov V., Pampura T., Meili M.* Evidence of temperature and precipitation change over the past 100 years in a high-resolution pollen record from the boreal forest of Central European Russia // *The Holocene*. — 2017. — Vol. 27 (5). — P. 740–751.
- Pumpanen J., Ilvesniemi H., Peramaki M., Hari P.* Seasonal patterns of soil CO₂ efflux and soil air CO₂ concentration in a Scots pine forest: comparison of two chamber techniques // *Global Change Biol.* — 2003. — No. 7. — P. 371–382.
- Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grünwald T., Harránková K., Ilvesniemi, H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., Valentini R.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm // *Global Change Biol.* — 2005. — Vol. 11 (9). — P. 1424–1439.
- Sukhoroslov O., Volkov S., Afanasiev A.* A Web-Based Platform for Publication and Distributed Execution of Computing Applications // *Parallel and Distributed Computing: Proc. 14th International Symposium on IEEE*. — Cambridge, USA, 2015. — P. 175–184.
- Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M.* Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc // *Biogeosciences*. — 2018. — Vol. 15. — P. 5015–5030.

