

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО МЕЗООЛИГОТРОФНОМУ БОЛОТУ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ В ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД 2012-2013 ГГ.

Л.Э. Лапина, И.М. Успенский

Отдел математики Коми НЦ УрО РАН,
РФ, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая д.24; lapina@dm.komisc.ru

Резюме. Выполнен корреляционный анализ данных измерений за 2012 и 2013 гг. на мезоолиготрофном болоте в Республике Коми, полученных методом турбулентных пульсаций. Данные за вегетационный период сгруппированы по годам. За каждый год отдельно рассмотрены «дневные» и «ночные» значения. При анализе использованы 48 параметров, включая ветровые характеристики, горизонтальные потоки веществ и масштаб Монина-Обухова. Приведены результаты корреляционного анализа рядов концентраций парниковых газов, скоростей их изменения и вертикальных потоков с характеристиками среды. Корреляционные связи парниковых газов и таких характеристик среды, как температура почвы на двух глубинах, температура воздуха и объемная влажность, изучены помесечно. Показано, что эти зависимости нелинейны.

Ключевые слова. Республика Коми, парниковые газы, болото, корреляционный анализ.

CORRELATION ANALYSIS OF MICROMETEOROLOGICAL DATA ON THE MESOOLIGOTROPHIC BOG IN KOMI REPUBLIC OVER THE VEGETATION SEASONS OF 2012-2013

L. E. Lapina, I. M. Uspensky

Department of Mathematics, Komi Scientific Center of Russian Academy of Sciences
24, Communisticheskaya str., 167982, Syktyvkar, Russia; lapina@dm.komisc.ru

Summary. Correlation analysis of observational data of 2012 and 2013 on the mesooligotrophic bog in Komi Republic is conducted using the eddy covariance method. Vegetation period data are grouped by years. "Daytime" and "nighttime" data of each year are treated separately. Forty eight parameters are analyzed including wind characteristics, horizontal fluxes of substances and the Monin-Obukhov scale. Results of correlation analysis for concentrations of greenhouse gases, rates of their change and vertical fluxes vs. environment characteristics are presented. Correlation relationships of greenhouse gases' concentrations with such characteristics of the environment as soil temperature (at two depths), air temperature and volume humidity are investigated on the monthly basis. It is shown that those relationships are nonlinear.

Keywords. Komi Republic, greenhouse gases, peatland, correlation analysis.

Введение

Болота являются одним из наиболее существенных источников атмосферного метана. С ними связана значительная часть его глобальной эмиссии. Одним из возможных путей оценки и предсказания эмиссии метана болотами является математическое моделирование. Существует ряд работ этого направления, использующих простые модели, т.е. простые эмпирические соотношения (Михайлов и др., 2015; Schneider et al., 2016). К сожалению, эти модели привязаны к конкретному локальному объекту и их, как правило, невозможно использовать при переходе на региональный уровень.

Один из способов учета температурного фактора в эмиссии метана на региональном и глобальном уровнях предложен в работе (Глаголев и др., 2015). В ней показано, на основе данных работ разных авторов, что зависимость эта имеет нелинейный характер.

В работе (Сабреков и др., 2014) делается оценка регионального потока метана из болот Западной Сибири на основе широкого набора данных для различных типов болотных экосистем. Авторы предлагают использовать достаточно простую регрессионную зависимость для потока метана, где в качестве переменных рассматриваются температура почвы на глубине 45 см, уровень болотных вод и максимальное значение рН.

Обзор литературы, посвященной измерениям потоков углерода на болотах России, приведен в работе (Глаголев, 2010). Влияние факторов окружающей среды на эмиссию углерода с поверхности болот Западной Сибири изучалось, например, в работе (Головацкая, Дюкарев, 2012). Различные аспекты температурного режима болотистых почв изучалось в работах (Дюкарев, 2012; Дюкарев, 2014).

Анализируемые нами данные были получены сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН в 2012-2013 гг. на Усть-Пожегском болоте в Республике Коми. Измерения проводились с помощью метода турбулентных пульсаций (eddy covariance method), подробное описание которого можно найти, например, в работе (Бурба и др., 2016).

Цель данной работы состоит в том, чтобы на основе данных измерений выявить характер корреляционных связей концентрации ряда парниковых газов (углекислого газа, метана, водяного пара), их вертикальных турбулентных потоков, скорости их изменения и иных количественных характеристик окружающей среды. Основная часть статьи посвящена анализу данных в целом за сезон с разделением на «дневные» и «ночные» значения. Однако в конце статьи приводятся и результаты помесечного анализа корреляционных связей концентраций парниковых газов с температурой воздуха, температурой почвы на глубинах 25 и 15 см, а также влажностью почвы на глубине 15 см.

Принятые обозначения и сокращения:

- ФАР – фотосинтетически активная радиация ($\text{мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$);
 CH_4 – концентрация метана (ммоль м^{-3});
 CO_2 – концентрация углекислого газа (ммоль м^{-3});
 H_2O – концентрация водяного пара (ммоль м^{-3});
 $\text{H}_2\text{O} \times T$ – произведение концентрации водяного пара на температуру воздуха ($\text{ммоль м}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$);
 $\text{CH}_4 \times \text{CO}_2$ – произведение концентраций метана и углекислого газа;
 H_{s1}, H_{s2} – объёмная влажность почвы (soil) на глубинах 1 (25 см) и 2 (15 см) соответственно;
Humidity – относительная влажность;
КЕТ – кинетическая энергия турбулентности, которая считалась как сумма кинетических энергий для осреднённых соответствующих компонент вектора скорости (не пульсации);
КЕТР – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;
 L – масштаб длины Монина-Обухова;
 P – атмосферное давление;
rldownwell – нисходящий поток длинноволновой радиации у земной поверхности;
 T – температура воздуха ($^\circ\text{C}$);
 T_{s1}, T_{s2} – температура почвы на глубинах 1 (25 см) и 2 (15 см),
 u_* – динамическая скорость или скорость трения.
ЕС – eddy covariance метод (или метод турбулентных пульсаций).

Объектом исследования является мезоолиготрофное болото Медла-Пэв-Нюр ($61^\circ 56' \text{N}$, $50^\circ 13' \text{E}$). Это болото известно также как Усть-Пожегское, в иностранной литературе как Ust-Pojeg. Оно исследовалось в 2008-2009 гг. в рамках проекта «CARBO-North», в основном, камерным методом. Часть результатов опубликована в работах (Avagyan et al., 2015; Gažovič et al., 2010; Shneider et al., 2016). Метод измерений ЕС систематически стал применяться на этом объекте только с 2012 года. Краткие результаты анализа данных для августа 2012 года опубликованы в работе (Lapina et al., 2015). Более подробно, с разделением данных на «дневные» и «ночные», они опубликованы в работе (Лапина и др., 2015). Вопросы методики расчетов потоков парниковых газов и исследование влияния периода осреднения на оценку потоков рассмотрены в работе (Лапина, Успенский, 2015). Подробное описание объекта исследования было дано в работе (Лапина и др., 2015).

Измерения по метану были начаты с 14 июня 2012 года. В работе проанализированы данные с 15 июня по 20 октября 2012 года и с 16 апреля по 8 ноября 2013 года, когда был последний день со среднесуточной температурой выше 5°C (в 2013 году отсутствуют данные с 22 августа по 10 сентября). Внутри этих периодов были дни со среднесуточной температурой воздуха меньше 5°C , преимущественно в октябре. Имеющийся массив данных был дополнительно поделен на «дневные» ($\text{ФАР} > 20 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$) и «ночные». В ходе анализа использовались данные, осреднённые по получасовым временным интервалам. Анализ проводился отдельно для 2012 и 2013 годов.

В 2013 году вышел из строя измеритель, отвечавший за нисходящий поток коротковолновой радиации, поэтому данные по суммарной радиации стали некорректными и были исключены из рассмотрения в 2013 году. Из анализа данных были также исключены все данные за конкретный момент времени, если хотя бы одно из измерений было для него некорректным. В связи с этими причинами объем данных серьезно уменьшился по сравнению с максимально возможным. Итоговый объем проанализированного массива измерений представлен в табл. 1.

Таблица 1. Количество измерений для разных вариантов расчета

Год	В целом	«дневные»	«ночные»
2012	4851	1525	3326
2013	6388	3176	3212

Всего в работе проанализировано 48 переменных. По сравнению с набором, который анализировался для августа 2012 года (Лапина и др., 2015), из анализа были исключены все пары произведений величин, за исключением $H_2O \times T$ и $CH_4 \times CO_2$. Были добавлены масштаб длины Мони́на-Обухова (L), характеризующий устойчивость атмосферных процессов, кинетическая энергия турбулентных пульсаций (КЕТР) и горизонтальные потоки веществ. Масштаб длины Мони́на-Обухова вычислялся по следующей формуле (Ворожнин, 2012):

$$L = - \frac{\bar{T} \times u_*^3}{0.4g \times H_0}$$

\bar{T} – абсолютная температура (К); H_0 – вертикальный турбулентный поток температуры, К м/с; g – гравитационная постоянная (9.81 м/с²); u_* – скорость трения или динамическая скорость.

Результаты и обсуждения

Результаты расчета коэффициентов корреляции представлены в табл. 2 - 5. При корреляционном анализе данных принято проверять так называемую нулевую гипотезу о равенстве нулю коэффициента корреляции. При заданном уровне значимости она отвергается, если полученная оценка по модулю больше некоторого критического значения $r_{кр}$. Значение $r_{кр}$ зависит от общего числа данных. В нашем случае, ввиду большого числа данных, нулевая гипотеза – о равенстве нулю коэффициента корреляции – не отвергается на уровне значимости $\alpha = 0.05$, если модуль полученной оценки коэффициента корреляции меньше 0.05. Пустые клетки в табл. 2 - 5 означают, что модуль оценки коэффициента корреляции меньше этого значения, и в таком случае принята гипотеза о равенстве нулю.

Как следует из табл. 2 и 3, в 2012 и 2013 годах масштаб L не оказывал влияния на концентрации парниковых газов в вегетационный период.

Таблица 2. Оценки коэффициентов корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми характеристиками в течение вегетационного периода 2012 года

Пере- менная	CH ₄			CO ₂			H ₂ O		
	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь
<i>T</i>	0.10	0.42	0.10	-0.28	-0.19	-0.28	-0.24	0.08	-0.27
<i>u*</i>	-0.18	-0.24	-0.18	-0.07	-0.18	-0.07	-0.07	-0.17	-0.07
КЕТ	-0.17	-0.23	-0.16	-0.09	-0.20	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07
КЕТР	-0.10	-0.12	-0.10						
ФАР		0.09	-0.07	-0.13		-0.13	-0.12	-0.17	-0.10
<i>T</i> _{s1}	0.51	0.57	0.54	0.13	0.19		0.11	0,14	0.14
<i>T</i> _{s2}	0.39	0.42	0.43		-0.16			0.12	
<i>H</i> _{s1}	0.37	0.32	0.41	0.15	0.08	0.19	0.14		0.18
<i>H</i> _{s2}	-0.09			0.13	0.07	0.13	0.08	-0.1	0.11
<i>P</i>	0.26	0.20	0.3	0.18	0.12	0.23	0.12		0.18
CH ₄ *CO ₂	0.80	0.70	0.81	0.9	0.88	0.90	0.79	0.74	0.79
H ₂ O* <i>T</i>	0.38	0.42	0.39	0.41	0.32	0.47	0.45	0.64	0.48
<i>L</i>									
Humidity		-0.30		0.26	0.20	0.25	0.18	0.14	0.18

Таблица 3. Оценки коэффициентов корреляции между концентрациями парниковых газов и некоторыми характеристиками в течение вегетационного периода 2013 года

Пере- менная	CH ₄			CO ₂			H ₂ O		
	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь
<i>T</i>	-0.15	-0.21	-0.07	-0.28	-0.25	-0.25	-0.06	0.18	-0.10
<i>u*</i>	-0.27	-0.24	-0.30	-0.30	-0.31	-0.26	-0.20	-0.18	-0.19
КЕТ	-0.19	-0.12	-0.28	-0.25	-0.20	-0.28	-0.18	-0.19	-0.2
КЕТР	-0.10	-0.18	-0.09	-0.10	-0.27	-0.05	-0.08	-0.22	-0.04
ФАР	-0.11	-0.14		-0.19	-0.19		-0.13	-0.13	
<i>T</i> _{s1}			0.14	0.14		0.24	0.29	0.39	0.29
<i>T</i> _{s2}		-0.12	0.15		-0.12	0.09	0.19	0.31	0.18
<i>H</i> _{s1}			0.15	0.12	0.24		0.23	0.31	0.24
<i>H</i> _{s2}	0.09	0.10	0.1		0.12				
<i>P</i>	0.12		0.18	0.14	0.12	0.19		-0.06	0.1
CH ₄ *CO ₂	0.88	0.92	0.83	0.76	0.80	0.76	0.52	0.50	0.58
H ₂ O* <i>T</i>	0.09		0.16	0.31	0.21	0.44	0.62	0.73	0.69
<i>L</i>									
Humidity	0.14	0.18	0.06	0.32	0.32	0.29	0.29	0.30	0.24

Наибольшая корреляция концентрации метана в 2012 году обнаружена с температурой почвы на глубине 25 см (как в целом, так и в дневное и ночное время по отдельности), а также с температурой почвы на глубине 15 см и влажностью почвы на глубине 25 см. Однако в 2013 году аналогичные парные корреляции оказались незначимыми.

В 2012 году в группе «дневных» значений также наблюдается средняя по силе положительная взаимосвязь с температурой воздуха, модуль которой становится меньше в 2013 году. В целом можно отметить, что для многих переменных оценки коэффициентов корреляции с концентрациями парниковых газов были различны по модулю и значимости в 2012 и 2013 году.

Наибольшие по модулю оценки коэффициента корреляции для концентрации углекислого газа в 2012 году наблюдались с температурой воздуха, параметром $H_2O \cdot T$ и нисходящим потоком длинноволновой радиации. В 2013 году в число параметров, наиболее сильно связанных с концентрацией углекислого газа, вошли те же переменные, что и в 2012 году, и – дополнительно – показатель u^* и относительная влажность.

Для концентрации водяного пара наибольшая оценка коэффициента корреляции оказалась с температурой воздуха, причем преимущественно за счет «ночных» наблюдений (в «дневное» время коэффициент корреляции значительно ниже). В 2013 году, однако, эта зависимость не была обнаружена; корреляция оказалась наибольшей с температурой почвы на обеих глубинах, влажностью почвы на глубине 25 см и относительной влажностью воздуха.

Далее, в табл. 4 и 5 приведены оценки коэффициентов корреляции между локальными производными концентраций парниковых газов по времени и некоторыми характеристиками в течение вегетационного периода в 2012 и в 2013 году соответственно.

Таблица 4. Оценки коэффициентов корреляции между локальными производными концентраций парниковых газов по времени и некоторыми характеристиками в течение вегетационного периода 2012 г.

Переменная	$\partial CH_4 / \partial t$			$\partial CO_2 / \partial t$			$\partial H_2O / \partial t$		
	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь
CH_4		-0.12			-0.24	0.06		-0.18	
CO_2		-0.25			-0.72		-0.20	-0.73	-0.09
H_2O		-0.29		0.14	-0.53	0.18	-0.08	-0.66	
dCH_4	1	1	1	0.14	0.11	0.15	0.09	0.17	0.09
dCO_2	0.15	0.11	0.15	1	1	1	0.35	0.8	0.28
dH_2O	0.09	0.17	0.09	0.35	0.8	0.28	1	1	1
T					0.16	-0.05		0.14	
dT		0.1		-0.13	-0.22	-0.11	-0.11	-0.08	-0.11
u^*					0.16			0.11	
КЕТ					0.12			0.07	
КЕТР		-0.09							
ФАР									
T_{s1}									
T_{s2}					0.15			0.10	
H_{s1}									
H_{s2}									
P									
$CH_4 \cdot CO_2$		-0.26			-0.64	0.064	-0.12	-0.62	-0.068
$H_2O \cdot T$		-0.15			-0.21	0.12	-0.13	-0.27	-0.08

Таблица 5. Оценки коэффициентов корреляции между локальными производными концентраций парниковых газов по времени и некоторыми характеристиками в течение вегетационного периода 2013 г.

Пере- менная	$\partial \text{CH}_4 / \partial t$			$\partial \text{CO}_2 / \partial t$			$\partial \text{H}_2\text{O} / \partial t$		
	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь	в целом	день	ночь
CH ₄		-0.23	0.16		-0.39	0.08	-0.17	-0.35	-0.05
CO ₂	0.05		0.09		-0.50	0.12	-0.17	-0.53	
H ₂ O	0.09	0.13	0.07	0.19	-0.29	0.25		-0.46	0.08
dCH ₄	1	1	1	0.26	0.47	0.2		0.08	-0.05
dCO ₂	0.26	0.47	0.2	1	1	1	0.36	0.36	0.37
dH ₂ O		0.08	-0.05	0.36	0.36	0.37	1	1	1
T					0.08			0.1	
dT	-0.06		-0.05	-0.15	-0.25	-0.08	-0.1	-0.15	
u*		0.07			0.19	-0.05		0.11	
KET					0.12			0.06	
KETP		0.05			0.16			0.08	
ФАР				-0.06	0.1			0.075	
T _{s1}					-0.06				
T _{s2}									
H _{s1}									
H _{s2}									
P									
CH ₄ *CO ₂		-0.11	0.18		-0.43	0.14	-0.23	-0.47	-0.05
H ₂ O*T				0.64	-0.14	0.18		-0.21	0.07

Из табл. 4 и 5 следует, что коэффициенты корреляции между локальными производными концентраций парниковых газов и другими рассматриваемыми характеристиками существенно отличаются в «дневное» и «ночное время». Вызывает удивление факт отсутствия значимых коэффициентов корреляции с температурой и влажностью почвы, что может быть связано с существенно нелинейным характером поведения. Также из этих таблиц следует, что скорости изменения концентраций и углекислого газа и водяного пара оказались связанными с концентрациями самих газов.

По данным 2012 года скорость изменения концентрации углекислого газа оказалась сильно связанной со скоростью изменения концентрации водяного пара, особенно в дневное время. Она также связана с концентрациями всех газов и слабо связана с температурой воздуха и скоростью изменения температуры воздуха. Скорость изменения концентрации водяного пара в дневное время связана с концентрациями других рассматриваемых газов. В 2013 году картина в целом осталась такой же.

Из данных табл. 3, 4 и 5 видно, что температура почвы и влажность не имеют значимых корреляционных связей с концентрацией метана и скоростью изменений концентраций всех рассматриваемых газов. Вероятно, это связано с тем, что в разные месяцы могла иметь место разнонаправленность корреляционных связей. Поэтому проведен помесечный корреляционный анализ концен-

траций парниковых газов и температуры почвы, влажности и температуры воздуха. Результаты расчетов представлены графически на рис. 1.

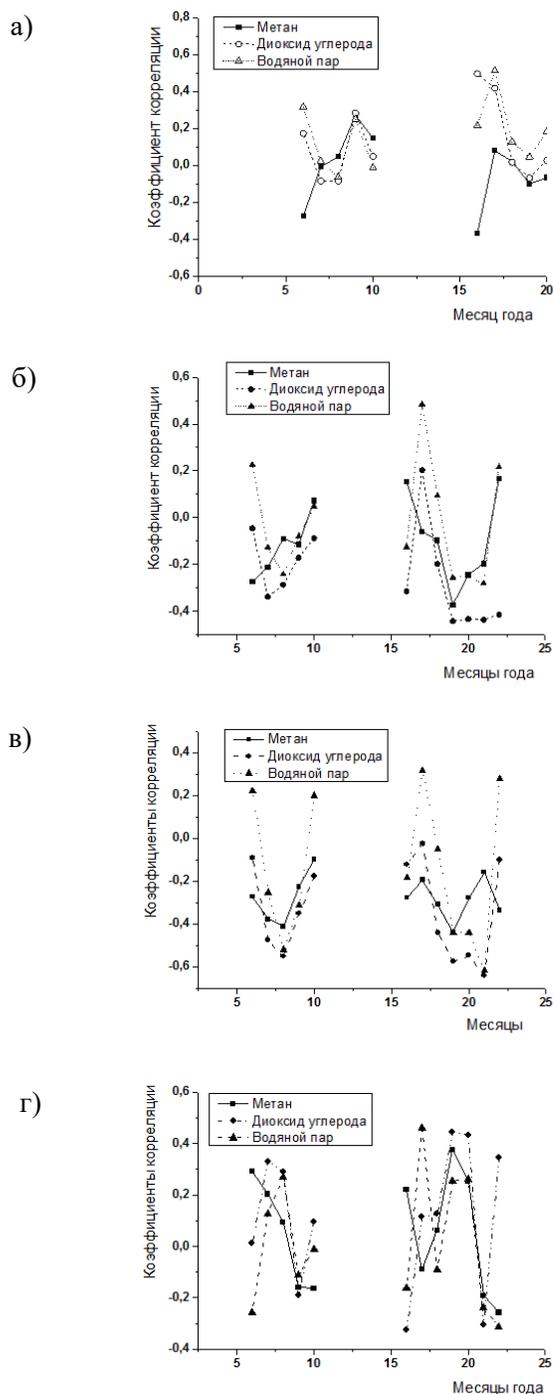


Рисунок 1. Коэффициенты корреляции между концентрациями парниковых газов и температурой почвы на глубине 25 см (а), на глубине 15 см (б), температурой воздуха (в), а также влажностью почвы на глубине 15 см (г)

Аналогичный анализ корреляционных связей был проведен и для вертикальных потоков.

Для вертикального потока метана наиболее существенные по модулю коэффициенты корреляции по данным за 2012 год выявлены с вертикальной компонентой ветра (-0.311), КЕТР (0.237), u_* (0.241), с горизонтальными потоками метана (0.7 и 0.64 по осям x и y соответственно).

В дневное время наиболее существенные корреляционные связи наблюдаются с вертикальными потоками тепла (0.269), углекислого газа (0.360), со скоростью изменения компонент скорости ветра (-0.192, -0.229, -0.356 по осям x , y , z соответственно), КЕТР (-0.458), горизонтальными потоками метана, углекислого газа и тепла. В ночное время наиболее существенные корреляционные связи наблюдаются с компонентами скорости ветра, КЕТ, КЕТР, u_* .

В 2013 году для вертикального потока метана наибольшая значимость корреляции обнаружена с вертикальным потоком углекислого газа (0.294), КЕТР (0.368), горизонтальными потоками метана (0.465 и -0.525 по осям x и y соответственно). В дневное время есть относительно слабая связь с температурой воздуха (0.166), вертикальным потоком водяного пара (0.215), температурой почвы на различных глубинах (0.167 – с T_{s1} ; 0.147 – с T_{s2}) и с КЕТР (-0.208), а в ночное время – с вертикальной компонентой скорости ветра (-0.208), вертикальным потоком углекислого газа (0.402) и u_* (0.304), КЕТР (0.508).

Для вертикального потока углекислого газа, помимо уже отмеченного, по данным 2012 года получены следующие значимые связи: с вертикальной компонентой скорости ветра (-0.169), вертикальным потоком тепла (0.254), вертикальным потоком водяного пара (-0.768), КЕТР (0.226), горизонтальными потоками как углекислого газа, так и водяного пара.

Для «дневных» наблюдений 2012 года наибольшие по модулю оценки коэффициентов корреляции вертикального потока углекислого газа получены со скоростью изменения концентрации углекислого газа и водяного пара, со скоростью изменения компонент вектора скорости ветра, с нисходящими потоками коротковолновой и длинноволновой радиации, температурой почвы на обеих глубинах, КЕТР (-0.827), u_* (-0.260), с горизонтальными потоками углекислого газа и водяного пара.

В ночное время 2012 года вертикальный поток углекислого газа оказался существенно связан с потоком тепла (0.319), u_* (0.264), с горизонтальными потоками углекислого газа и водяного пара, КЕТР (0.238).

Аналогичный анализ был проведен для данных 2013 года. В целом для 2013 г. наиболее существенные связи обнаружены с КЕТР (0.3), относительно слабые связи отмечены с температурой воздуха (-0.115) и относительной влажностью воздуха (0.15). В дневное время значимые связи были выявлены с температурой воздуха (-0.228), вертикальным потоком тепла (-0.237), вертикальным потоком водяного пара (-0.281), относительной влажностью (0.145), нисходящим потоком коротковолновой и длинноволновой радиации (около -0.25), температурой и влажностью почвы (около 0.2), ФАР (-0.274), горизонтальными потоками углекислого газа.

Для «ночных» данных 2013 года наибольшие расчетные коэффициенты корреляции получены с вертикальным потоком тепла (-0.225), с вертикальным потоком метана (0.402), с вертикальным потоком водяного пара (0.192), u_* (0.194), КЕТР (0.374), с горизонтальными потоками углекислого газа и водяного пара.

Для вертикального потока водяного пара получено следующее. Наибольшие по модулю расчетные коэффициенты корреляции в 2012 году при анализе в целом отмечены с температурой воздуха (0.12), с вертикальным потоком углекислого газа (0.768), относительной влажностью (-0.155), со всеми видами нисходящих потоков радиации (примерно 0.17), с u_* (-0,214) и КЕТР (-0,179), с горизонтальными потоками углекислого газа и водяного пара.

В дневное время в 2012 г. наиболее сильные связи были выявлены с температурой воздуха (0.314), со скоростью изменения вертикальной компоненты скорости ветра (0.185), относительной влажностью (-0.317), нисходящими потоками коротковолновой и длинноволновой радиации (примерно 0.39), температурой почвы на обеих глубинах (0.236 и 0.292 на глубинах 1 и 2 соответственно), влажностью почвы (причем связь разнонаправленная: с H_{s1} коэффициент корреляции равен 0.150, а с H_{s2} равен (-0,182)), ФАР (0.127), КЕТР (0.234) и с горизонтальными потоками водяного пара.

В ночное время в 2012 г., кроме уже отмеченной связи с вертикальным потоком углекислого газа, также была выявлена связь с u_* (-0.223), КЕТР (-0.187) и с горизонтальными потоками водяного пара.

По данным 2013 года для вертикального потока водяного пара значимые коэффициенты корреляции получены с такими характеристиками, как температура воздуха (0.338), нисходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации (около 0.38), ФАР (0.451), u_* (0.218).

В дневное время в 2013 г. значимые связи наблюдались с температурой воздуха (0.397), с нисходящими потоками коротковолновой и длинноволновой радиации (около 0.42), температурой и влажностью почвы (T_{s1} -0,14, T_{s2} 0,28, H_{s1} 0,13, H_{s2} 0,11), ФАР (0.127), u_* (0.305), КЕТР (0.274), с горизонтальными потоками водяного пара.

В ночное время в 2013 г. значимые связи наблюдались со скоростью изменения концентрации водяного пара (-0.277), КЕТР (-0.177) и с горизонтальными потоками водяного пара (0.753 и -0.402 по осям x и y соответственно) соответственно.

В ходе корреляционного анализа не удалось выявить значимых линейных связей между производными концентраций парниковых газов по времени и какими-либо из рассматриваемых характеристиками окружающей среды. Следовательно, в данном масштабе времени концентрации парниковых газов не могут быть описаны дифференциальными уравнениями с постоянными по времени коэффициентами.

Это может быть связано с тем, что в разные периоды вегетационного периода тот или иной параметр среды может быть лимитирующим, или не быть им. Данные, получаемые методом ЕС, позволяют провести даже посу-

точно корреляционный анализ, но для этого сначала надо выбрать небольшой круг параметров, оказывающих влияние на динамику. Кроме того, полученные результаты, представленные в табл. 3, 4 и 5 говорят о необходимости более подробного изучения связей между концентрациями парниковых газов и такими характеристиками, как температура и влажность почвы, температура воздуха.

Результаты помесячного корреляционного анализа между концентрациями газов и вышеуказанными характеристиками среды представлены на рис. 1. Из него четко видно, что от месяца к месяцу оценки серьезно варьируют, и становится понятным почему оказались незначимыми оценки коэффициентов корреляции между концентрацией метана и температурой почвы в 2013 году. Незначимость оценки, полученной на длительном интервале времени, не означает отсутствие связей на более коротких масштабах времени. Также из этого рисунка следует, что связь между параметрами нелинейная.

Заключение

Оценки корреляционных связей концентрациями парниковых газов (CO_2 , CH_4 и H_2O) с различными характеристиками окружающей среды по данным измерений 2012 - 2013 гг. на Усть-Пожегском болоте в Республике Коми показали, что в разных случаях заметную роль играют следующие факторы: температура воздуха, температура и объемная влажность почвы на глубинах 15 и 25 см, переменные $\text{CH}_4 \times \text{CO}_2$ и $\text{H}_2\text{O} \times T$, а также динамическая скорость. Корреляционные связи между изученными переменными не являются универсальными для 2012 и 2013 годов.

Не удалось выявить значимых линейных связей между производными концентраций парниковых газов и характеристиками среды. Это, в частности, означает, изменение во времени этих концентраций не описывается системой дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Однако, скорости изменения концентраций углекислого газа и водяного пара оказались связанными нелинейно с концентрациями самих газов.

Полученные результаты, по-видимому, свидетельствуют о том, что вертикальные потоки парниковых газов сложно описать как функцию одной переменной, и, скорее всего, они являются функцией нескольких переменных.

Благодарность

Авторы благодарят д.б.н. Загирова С. В. и к.б.н. Михайлова О. А. (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) за предоставленные данные измерений.

Список литературы

Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В., 2016. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. – Москва, РАН, ИПЭЭ, 224 с.

Ворожнин В.С., Маркелов Ю.И., Давыдов В.Б., Тетерин А.Ф., Поддубный В.А. 2012. Определение метеорологических параметров в модели рассеивания от автомагистрали. – Вестник Нижневарттовского государственного университета, № 1, с. 15-20.

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, № 1, с. 1 - 53.

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Терентьева И.Е., Максюттов Ш.Ш. 2015. Температурный фактор продукции метана в модели WeMEM. – Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири. Материалы Третьей международной научно-практической конференции, 27 сентября – 3 октября 2015 г., Томск, с. 64-67.

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. 2012. Влияние факторов среды на эмиссию CO_2 с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири. – Почвоведение, № 6, с. 658-667.

Дюкарев Е.А. 2012. Амплитуда суточного хода температуры торфяной почвы. – Вестник Томского госуниверситета, № 365, с. 201-205.

Дюкарев Е.А. 2014. Прогноз глубины промерзания почвы с помощью простейшей регрессионной модели. – Вестник Томского государственного университета, № 387, с. 266-270.

Лапина Л.Э., Михайлов О.А., Успенский И.М. 2015. Факторный анализ микрометеорологических данных по мезоолиготрофному болоту в Республике Коми. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, № 2, с. 59-79.

Лапина Л.Э., Успенский И. М. 2015. Оценки потоков парниковых газов на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр в августе 2012 г. – Успехи современной науки и образования, № 4, с. 44-55.

Лапина Л.Э., Михайлов О.А., Успенский И.М. 2016. Оценка максимальных потоков метана в вегетационный период 2012 и 2013 годов на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр (Республика Коми). – Труды Международной конференции ENVIROMIS-2016, Томск, с. 254-256.

Михайлов О.А., Мигловец М.Н., Загирова С.В. 2015. Вертикальные потоки метана на мезоолиготрофном болоте таежной зоны Европейского Северо-Востока России. – Сибирский экологический журнал, № 3, с. 452-460.

Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Мачида Т., Максюттов Ш.Ш. 2014. Эмиссия метана из болотных комплексов тайги Западной Сибири. – Почвоведение, № 1, с. 58-70.

Avagyan A., Runkle B.R.K., Hennings N., Haupt H., Virtanen T., Kutzbach L. 2015. Dissolved organic matter dynamics during the spring snowmelt at a boreal river valley mire complex in Northwest Russia. Hydrological processes, Wileyonlinelibrary. com. DOI:10.1002/hyp.10710

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

Lapina L.E., Uspensky I.M., Mikhaylov O.A. 2015. The Factor analysis of Meso-Oligotrophic Peatland Medla-Pev-Nijur Data. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp. 688-693.

Schneider J., Fjungkust H., Wolf U., Schreiber P., Gažovic M., Miglovets M., Mikhaylov O., Greenwald D., Erasmi S., Wilmking M., Kutzbach L. 2016. Russian boreal peatlands dominate the natural European methane budget. *Environmental Research Letters*, January 2016, DOI: 10.1088/1748-9326/11/1/014004

Статья поступила в редакцию: 18.08.2016

После переработки: 06.10.2016