

**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, Кудяров, 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 течении 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 2006-2010гг. 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. – *Carexlimosa*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).

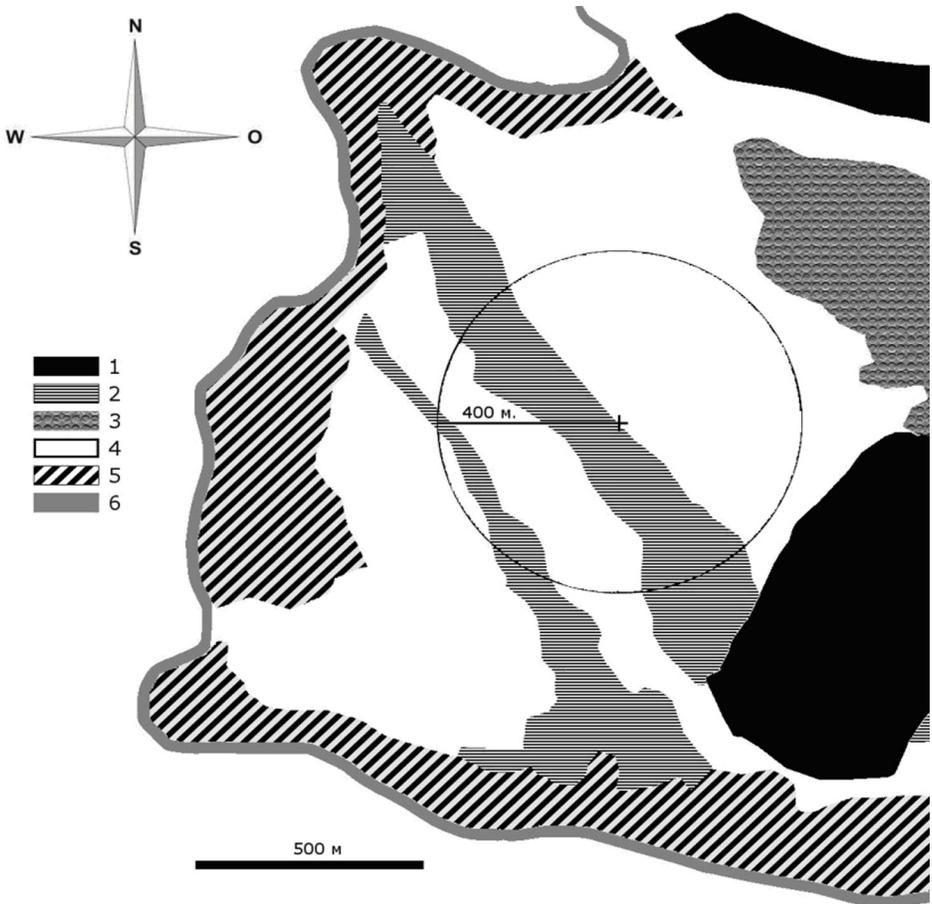


Рисунок 1 – Схема расположения измерительной системы на участке болота. 1 – минеральный лесной остров; 2 – мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь; 3 – олиготрофные сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества; 4 – мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества; 5 – окраинная топь;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

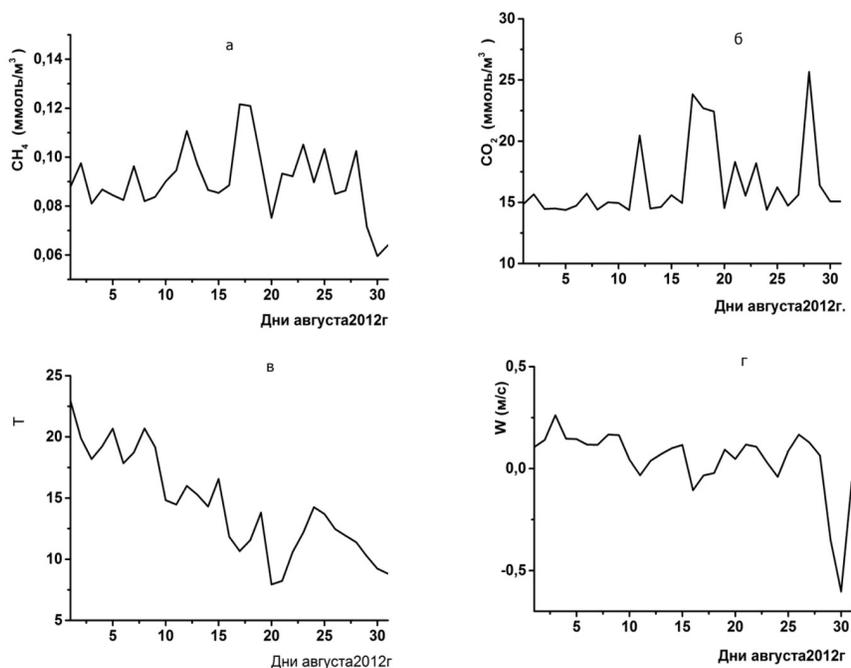


Рисунок 2 – Среднесуточные значения концентраций метана (а), углекислого газа (б), температуры воздуха (в) и вертикальной компоненты вектора скорости (г) по данным за август 2012 г.

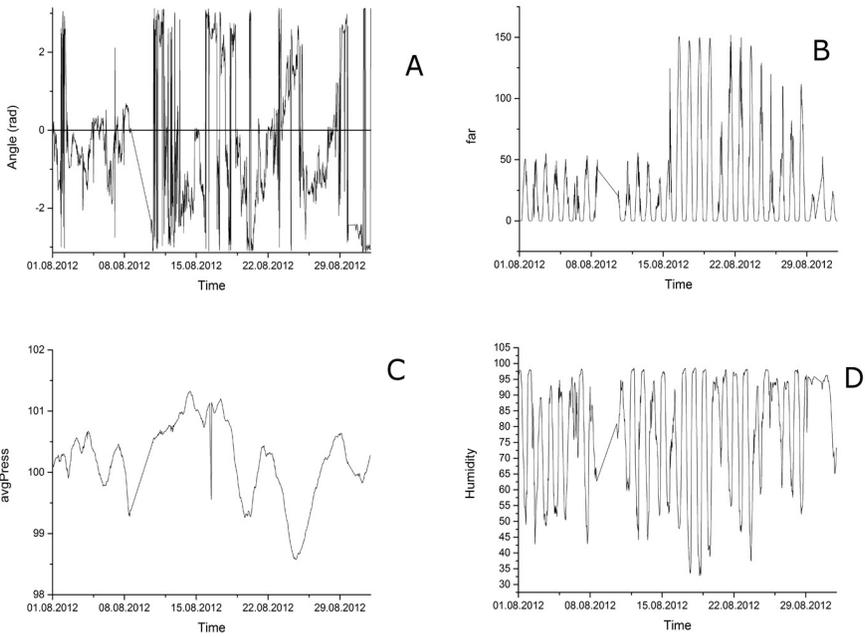


Рисунок 3 – Угол ветра (A), ФАР(B), атмосферное давление P(C) и относительная влажность (D) в августе 2012 г.

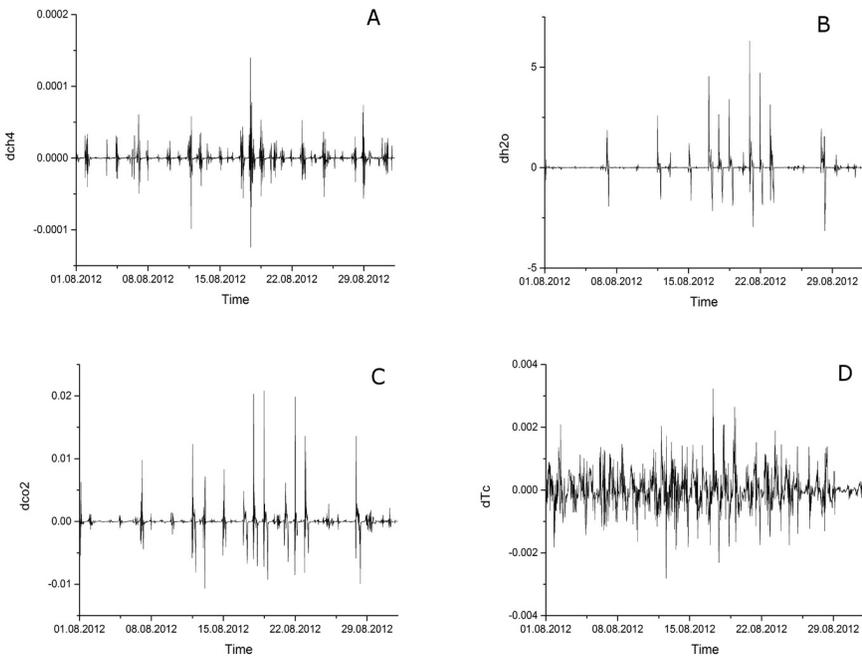


Рисунок 4 – Локальные производные по времени концентраций метана (A), водяного пара (B), диоксида углерода (C) и температуры воздуха (D).

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 анализа 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 весомых 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 растений 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 деления 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, КЕТ, 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.

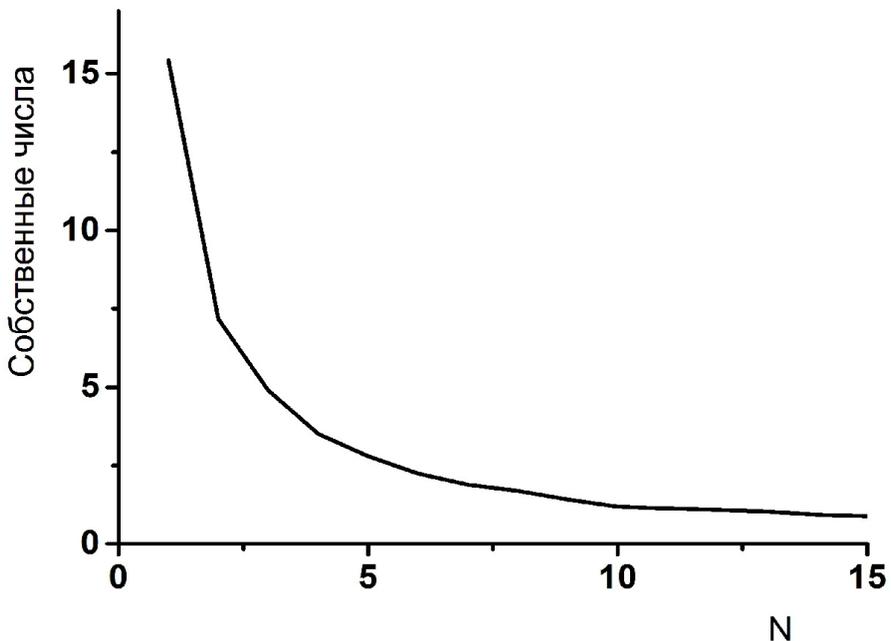


Рисунок 5 – Собственные числа корреляционной матрицы по данным за 6 августа 2012 г.

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

дый день августа 2012 г. По принципу Кэттела 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			
	CH₄	CO₂	H₂O
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
ФАР	-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			
	CH₄	CO₂	H₂O
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
ФАР	-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			
	CH₄	CO₂	H₂O
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
ФАР	-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.

Переменная	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 августа 2012 г.

Показатели	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 одноминутному 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 CH₄	0	0	0	0	1	2
Локальная производная по времени CO₂	0	0	1	2	2	5
Локальная производная по времени H₂O	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 CO₂ 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 ФАР ≥ 20 мкмоль·м⁻²·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 ₂ O		
	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
H ₂ O·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

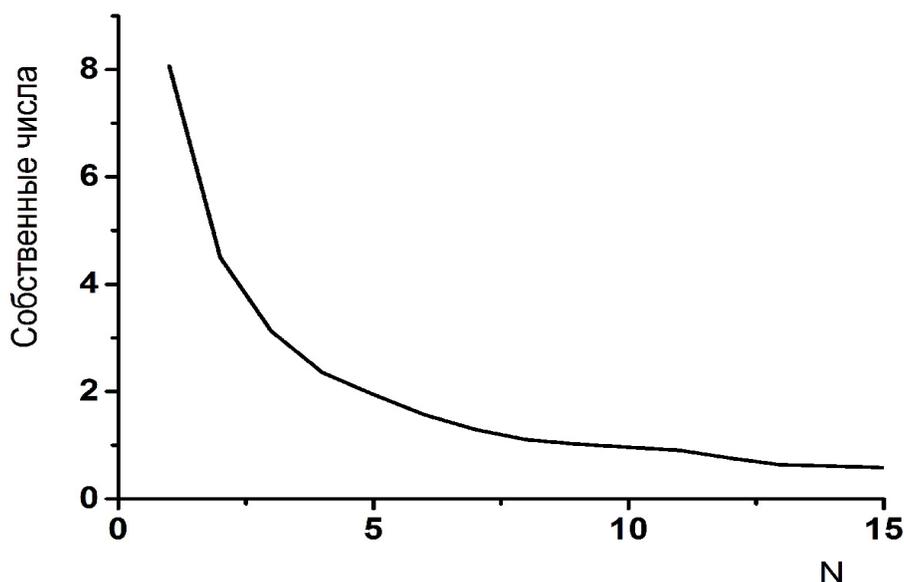


Рисунок 6 – Собственные числа корреляционной матрицы, построенной сразу по всему месяцу с использованием 30-минутных осредненных данных.

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 Бакчарайском 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.