

**Задорожная Тамара Николаевна**

кандидат географических наук доцент, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

**Tamara N. Zadorozhnaya**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Russian Air Force Military Educational and Scientific Centre «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»; 54A, Starih Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

**Закусилов Вадим Павлович**

кандидат географических наук, доцент доцент кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

**Vadim P. Zakusilov**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Hydrometeorological Support, Russian Air Force Military Educational and Scientific Centre «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»; 54A, Starih Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

e-mail: zakusilov04@yandex.ru

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

*Гедзенко Д.В., Задорожная Т.Н., Закусилов В.П.* Исследование асинхронных связей между термическим режимом приэкваториальной зоны Земного шара и Северного полушария // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. №1(44). С.90–95. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-90-95

**Please cite this article in English as:**

*Gedzenko D.V., Zadorozhnaya T.N., Zakusilov V.P.* Investigation of asynchronous relations between the thermal regime of the near-equatorial zone of the Earth and the Northern Hemisphere // Geographical bulletin. 2018. №1(44). P. 90–95. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-90-95

УДК 551.506.9: 550.424.6

**О.Э. Суховеева<sup>1</sup>, М.Г. Насыров<sup>2</sup>**  
**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА БАЛАНС**  
**УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОЛУПУСТЫНЯХ УЗБЕКИСТАНА\***

<sup>1</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Самаркандский государственный университет, Самарканд,  
Республика Узбекистан*

Обработаны данные микрометеорологических наблюдений, основанных на отношении Боуэна, и выявлены статистические закономерности изменения баланса углекислого газа в зависимости от условий окружающей среды. Использовались корреляционный, регрессионный, кластерный и факторный методы анализа. Определено, что полупустыни Узбекистана являются источником углекислого газа для атмосферы со средней интенсивностью его поступления  $3,06 \pm 1,12 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . Доказано, что интенсивность эмиссии углекислого газа прямо пропорциональна температурно-радиационным условиям, но обратно пропорциональна влажностному фактору, в частности, осадкам, которые меняют направление потока диоксида углерода с эмиссии на кратковременное поглощение. Рассчитано, что от погодно-климатических условий в полупустынях зависит не более 16% дисперсии

© Суховеева О.Э., Насыров М.Г., 2018

\*Работа выполнена в рамках темы фундаментальных научных исследований «Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли» № 01201352499 (0148-2014-0005)

потока CO<sub>2</sub>. Отмечена ключевая роль температуры в образовании парниковых газов в аридном климате.

Ключевые слова: полупустыни Узбекистана, баланс углекислого газа, отношение Боуэна.

O.E. Sukhoveeva<sup>1</sup>, M.G. Nasirov<sup>2</sup>

## THE EVALUATION OF METEOROLOGICAL CONDITIONS INFLUENCE ON CARBON DIOXIDE BALANCE IN UZBEKISTAN SEMIDESERTS

<sup>1</sup>*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Samarkand State University, Samarkand, Republic of Uzbekistan*

The paper analyzes micrometeorological observations data based on the Bowen ratio and reveals the statistical regularities of changes in the carbon dioxide balance depending on environmental conditions. The correlation, regression, cluster, and factor analysis methods were used. Uzbekistan semideserts are the source of carbon dioxide for the atmosphere. The flux is equal to  $3.06 \pm 1.12 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . It has been established that the intensity of carbon dioxide emission is proportional to the temperature and solar radiation conditions, and it is inversely proportional to the moisture factor, including precipitation that changes the direction of carbon dioxide flux from emission to a short-term absorption. It has been calculated that in the semideserts no more than 16% of CO<sub>2</sub> flux dispersion depends on climatic conditions. Temperature is considered to be the most important factor of greenhouse gases formation in an arid climate.

К e y w o r d s: Uzbekistan semideserts, carbon dioxide balance, Bowen ratio

doi 10.17072/2079-7877-2018-1-95-105

### Введение

Диоксид углерода, или углекислый газ (CO<sub>2</sub>), является одним из парниковых газов, участвующих в формировании современных изменений климата. Баланс CO<sub>2</sub> в экосистемах в основном складывается из поглощения, связанного с фотосинтезом, и выделения в результате дыхания.

На суше CO<sub>2</sub> выводится из атмосферы растениями и в виде органического вещества накапливается в почве. Органическое вещество почвы является третьим по величине, после литосферы и океана, пулом углерода, превышающим даже его пулы в атмосфере и живых организмах [15].

CO<sub>2</sub> образуется преимущественно вследствие автотрофного и гетеротрофного дыхания растений  $D_p$  и дыхания микроорганизмов  $D_m$  и животных. Дыхание экосистемы  $D_3$  (1) эквивалентно общей экосистемной эмиссии CO<sub>2</sub> и равно сумме надземного  $D_n$  и почвенного дыхания  $D_n$ . При этом дыхание почвы представляет собой сумму корневого  $D_k$  и микробного дыхания [17]:

$$D_3 = D_n + D_n = D_n + D_k + D_m. \quad (1)$$

Баланс CO<sub>2</sub> в экосистеме, или обмен CO<sub>2</sub> между экосистемой и атмосферой, характеризуется такими параметрами, как нетто-экосистемный обмен NEE (Net Ecosystem Exchange) или нетто-экосистемная продукция NEP (Net Productivity of a Community), и описывается уравнением сохранения массы (2)

$$NEE = GPP - Re, \quad (2)$$

где GPP – первичная брутто-продуктивность растительности (Gross Primary Production), Re – дыхание экосистемы, т.е. скорость окисления органических продуктов всей биотой [7].

NEE измеряется с помощью приборов, расположенных на определенной высоте над растениями. Если потоки от атмосферы к растительности отрицательны, экосистема функционирует как сток CO<sub>2</sub>, и, соответственно, процесс ассимиляции доминирует над деструкцией, если же потоки к атмосфере положительны, экосистема функционирует как источник CO<sub>2</sub> для атмосферы [10].

Выделяют два главных метода измерения потока CO<sub>2</sub>: камерный и микрометеорологический [12]. Среди микрометеорологических методов на первом месте стоят приборы, работа которых основана на отношении Боуэна. В работе [11] отмечено, что метод Боуэна учитывает процессы взаимодействия в слое почва – атмосфера на более обширной территории, чем камерный метод.

Метод Боуэна основывается на оценке потоков тепла и изначально был применен для разделения доступной энергии на поверхности на потоки явного и скрытого тепла [8].

Поток тепла от почвы  $H$  определяется по формуле (3)

$$H = \rho C_p k_H \frac{\delta T}{\delta z}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $C_p$  – специфическое тепло воздуха,  $k_H$  – коэффициент диффузии,  $T$  – температура,  $z$  – высота по вертикали.

Поток скрытого тепла  $L_e$  определяется по формуле (4)

$$L_e = \frac{\lambda \rho \varepsilon k_V}{P} \cdot \frac{\delta e}{\delta z}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – скрытая теплота испарения,  $\varepsilon$  – отношение молекулярного веса воды к молекулярному весу сухого воздуха,  $e$  – давление водяного пара,  $P$  – атмосферное давление.

Другими словами, отношение Боуэна (5) представляет собой отношение потоков явного и скрытого тепла:

$$\beta = \frac{H}{L_e} = \frac{P C_p}{\lambda \varepsilon} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{(e_1 - e_2)}. \quad (5)$$

Поскольку первый множитель в правой части уравнения является психрометрической константой, отношение Боуэна фактически определяется через разницу температур и давлений водяного пара. Такой подход к оценке вертикального переноса от/к поверхности через градиент потока сходен с оценкой молекулярной диффузии и может быть определен как вертикальный концентрационный градиент [9].

Измерения такого рода позволяют расширить спектр современных знаний о процессах взаимодействия климатической и экологических систем. Полученные закономерности оформляются в виде моделей типа ПРАП (Почва – Растительность – Атмосфера – Перенос) или SVAT (Soil – Vegetation – Atmosphere – Transfer), предназначенных для формирования системы принятия экологически безопасных хозяйственных решений на основе оценки состояния экосистем и экосистемных услуг [4].

Цель данной работы – определение баланса  $\text{CO}_2$  в полупустынных экосистемах Узбекистана и роли метеорологических факторов в его формировании.

### Материалы и методы исследования

**Полевые измерения.** Измерения проводились на опытном участке близ города Карнаб (Qarnob) в западной части Узбекистана сотрудниками Самаркандского государственного университета в 1998–2001 гг. Географические координаты точки  $39^\circ 40'$  с.ш.  $65^\circ 46'$  в.д., высота над уровнем моря 460 м, рельеф равнинный.

Климат территории континентальный, и, согласно классификации Кеппена, местность относится к холодным аридным пустыням. Среднегодовая температура составляет  $17,0^\circ\text{C}$ , максимальные температуры наблюдаются в июле, минимальные – в январе. Годовая сумма осадков 182,6 мм, наиболее увлажнены зимние месяцы с ноября по март, тогда как в июне–августе нередко засушливые явления.

Почвенный покров представлен тяжело суглинистыми гипсоносными серо-бурыми почвами, растительный – преимущественно полынью раскидистой (*Artemisia diffusa*).

На протяжении исследования измерялись температура и влажность воздуха, температура и влажность почвы, солнечная и фотосинтетически активная радиация, теплообмен и поток тепла от почвы, количество осадков и испарение, а также поток  $\text{CO}_2$ .

Использовалась миниметеорологическая установка Bowen Ratio Energy Balance System (Model 023/ $\text{CO}_2$  Bowen ratio system, Campbell Scientific Inc. (CSI), Logan, UT, USA), закрепленная на треноге с вращающимися плечами. Образцы воздуха отбирались с высот 1,0 м и 2,0 м над уровнем почвы каждую секунду. Каждые 20 мин автоматически находилось и записывалось в базу данных среднее значение. Таким образом, за сутки по концентрации  $\text{CO}_2$  и всем метеорологическим параметрам формировались по 72 значения, которые в дальнейшем использовались для расчета среднесуточных [18].

Температура воздуха измерялась термистором. Давление водяного пара рассчитывалась по соотношению показателей гигрометра и температуры. Интенсивность солнечной радиации измерялась радиометром на высоте 2 м. Поток тепла от почвы оценивался с помощью платы на глубине 0,06 м. Температура почвы измерялась двумя термопарами на глубинах 0,02 и 0,04 м. Для измерения атмосферного давления использовался силиконовый сенсор. Сверху был установлен трехчашечный анемометр для определения скорости ветра и осадкомер.

Концентрация  $\text{CO}_2$  и паров воды измерялась портативным инфракрасным газоанализатором (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) на высотах 1,0 м и 2,0 м и переводилась из ppm в  $\text{г/м}^3 \cdot \text{ч}$ . По значению разности измерений на двух уровнях определялось направление потока  $\text{CO}_2$ : положительный поток,

т.е. направленный вверх, интерпретировался как эмиссия, отрицательный – направлен вниз и обозначает поглощение [14].

Общее количество измерений всех метеорологических параметров и потока CO<sub>2</sub> составляет 583 даты (суток) за период с марта по декабрь 1998–2001 гг.

*Статистический анализ.* Для проведения статистического анализа использовались пакеты программ Statistica 10 и Microsoft Excell. Для оценки взаимосвязей потока CO<sub>2</sub> с метеорологическими параметрами использовались методы описательной статистики. Были определены средние величины, стандартные отклонения и другие характеристики выборки; применялись корреляционный и регрессионный, а также многомерные – кластерный и факторный методы анализа.

Значимость коэффициентов корреляции определялась на основании двух критериев: коэффициент корреляции  $r > 0,20$ , уровень значимости  $p < 0,05$ .

Уравнение регрессии находилось методом пошагового исключения. В уравнение в качестве независимых переменных включались все измеренные метеовеличины, затем на каждом шаге удалялась одна из них до тех пор, пока все коэффициенты регрессии не становились значимыми ( $p < 0,05$ ). Для проверки эффективности полученного уравнения использовались коэффициенты Нэша-Сатклиффа (6) и Тейла (7), оценивающие соотношения между реальными и расчетными значениями, а также относительная ошибка (8).

Коэффициент эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа:

$$E_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{реал}} - X_{\text{модел}})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{\text{реал}} - X_{\text{сред}})^2}, \quad (6)$$

где  $X_{\text{реал}}$  – реальные, измеренные значения,  $X_{\text{модел}}$  – смоделированные, рассчитанные значения,  $X_{\text{сред}}$  – среднее многолетнее реальное значение. Значения коэффициента лежат в диапазоне  $(-\infty; 1]$ , и, соответственно, чем он ближе к 1, тем точнее воспроизводится реальный процесс [19].

Коэффициент несоответствия Тейла:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{реал}} - X_{\text{модел}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{реал}}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{модел}}^2}}, \quad (7)$$

где  $X_{\text{реал}}$  – реальные, измеренные значения,  $X_{\text{модел}}$  – смоделированные, рассчитанные значения. Чем ближе коэффициент к нулю, тем точнее моделирование [6].

Относительная ошибка:

$$E_R = \left| \frac{X_{\text{реал}} - X_{\text{модел}}}{X_{\text{реал}}} \right|, \quad (8)$$

где  $X_{\text{реал}}$  – реальные, измеренные значения,  $X_{\text{модел}}$  – смоделированные, рассчитанные значения. Относительная ошибка изменяется от 0 до 1, и чем ближе ее значение к нулю, тем точнее расчет.

При проведении многомерного факторного и кластерного анализов данные были нормированы (9) относительно стандартного отклонения для приведения их в единую систему измерений по схеме:

$$X_{\text{нормир}} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}, \quad (9)$$

где  $X_{\text{нормир}}$  – нормированное значение переменной,  $X_i$  – измеренное значение переменной,  $\bar{X}$  – среднее значение переменной,  $\sigma$  – стандартное отклонение переменной [3].

В процессе проведения факторного анализа переменные группировались на факторы согласно доле их дисперсии на основе собственных значений матрицы. Для максимизации изменчивости переменных использовался метод вращения исходных значений (варимакс). При определении оптимального количества факторов применялись критерии Кайзера (отбирались собственные значения выше 1) и критерии «каменистой осыпи» (определялось минимальное число факторов, при котором дальнейшее приращение описываемой дисперсии несущественно). Содержание выделенных факторов интерпретировалось на основе факторных нагрузок, представляющих собой корреляции между факторами и переменными [21]. Далее было рассчитано уравнение регрессии между потоком CO<sub>2</sub> и полученными факторами, оценка адекватности которого проходила по тем же критериям, что и для исходных метеопеременных.

При разделении переменных на кластеры использовалось евклидово (простое геометрическое) расстояние с целью получить древовидную иерархическую структуру. Для определения расстояния

между кластерами использовался метод Варда, основанный на минимизации внутрикластерной дисперсии [22].

### Результаты и их обсуждение

Среднее многолетнее значение баланса  $\text{CO}_2$  составляет  $3,06 \pm 1,12 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . Исходя из этого полупустыни Узбекистана являются источниками поступления углекислого газа в атмосферу.

Максимальное (наибольшая эмиссия) и минимальное (наибольшее поглощение) значения потока  $\text{CO}_2$  отмечены в первый год измерений (1998 г.) и составляют 14,25 и  $-16,59 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , соответственно. В последующие годы уменьшаются диапазоны между максимумом и минимумом, значения дисперсии и стандартного отклонения (табл. 1).

Таблица 1

Статистическая характеристика баланса  $\text{CO}_2$ 

Параметр	Год			
	1998	1999	2000	2001
Среднее	2,09	4,68	2,72	2,74
Стандартная ошибка	0,37	0,32	0,27	0,18
Медиана	1,32	4,59	2,55	2,65
Стандартное отклонение	4,72	3,27	2,96	2,47
Минимум	-16,59	-7,49	-4,09	-2,54
Максимум	14,25	11,76	10,59	8,00
Количество измерений	160	107	120	196

Корреляционный анализ указал на наличие слабых положительных зависимостей баланса  $\text{CO}_2$  от интенсивности солнечной радиации, теплообмена, температуры воздуха и отрицательных зависимостей от величины осадков, влажности почвы и относительной влажности воздуха (табл. 2). Корреляции с остальными метеопараметрами были несущественными.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции Пирсона баланса  $\text{CO}_2$  с метеорологическими параметрами ( $r > 0,20$ ,  $p < 0,05$ )

Параметр	Солнечная радиация	Теплообмен	Температура воздуха	Осадки	Относительная влажность воздуха	Влажность почвы
Коэффициенты корреляции	0,21	0,25	0,37	-0,23	-0,35	-0,26

Влага, как лимитирующий фактор в аридных районах, увеличивает интенсивность фотосинтеза, вследствие чего соотношение поглощения и эмиссии  $\text{CO}_2$  меняется в сторону депонирования. Одновременно с выпадением осадков снижается температура воздуха, о чем можно судить по противонаправленной динамике графиков этих переменных на рис. 1 и отрицательного значения коэффициента корреляции между ними ( $r = -0,28$ ,  $p = 0,00$ ). В эти периоды преимущественно идет фиксация  $\text{CO}_2$  с последующим образованием органического вещества растениями.

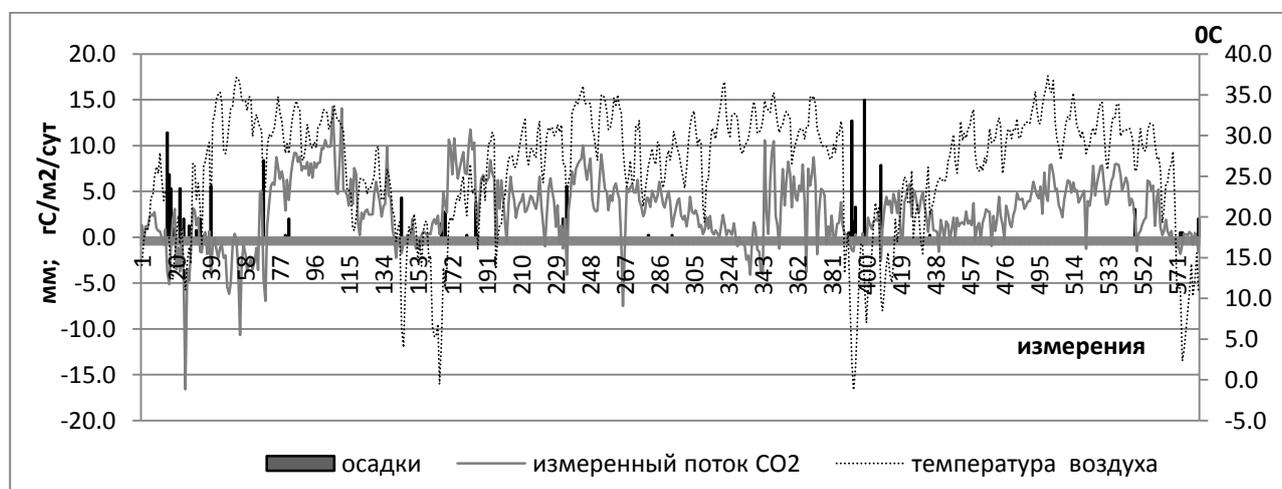


Рис. 1. Соотношение температуры воздуха (вспомогательная ось), количества осадков и баланса  $\text{CO}_2$  (основная ось)

Согласно результатам *регрессионного анализа* баланс  $\text{CO}_2$  прямо пропорционален температуре воздуха  $T$  и обратно пропорционален количеству осадков  $P$ . Полученное уравнение (10) характеризует 15,7% дисперсии описываемой величины и позволяет провести графический анализ для сопоставления измеренной и расчетной величин баланса  $\text{CO}_2$  (рис. 2):

$$Y = 0,16T - 0,40P - 1,10 \quad (R = 0,40, R^2 = 0,16, p < 0,05) \quad (10)$$

На графике заметно, что уравнение достаточно точно описывает эмиссию  $\text{CO}_2$ , наилучшим образом рассчитывая его величину в среднем диапазоне значений.

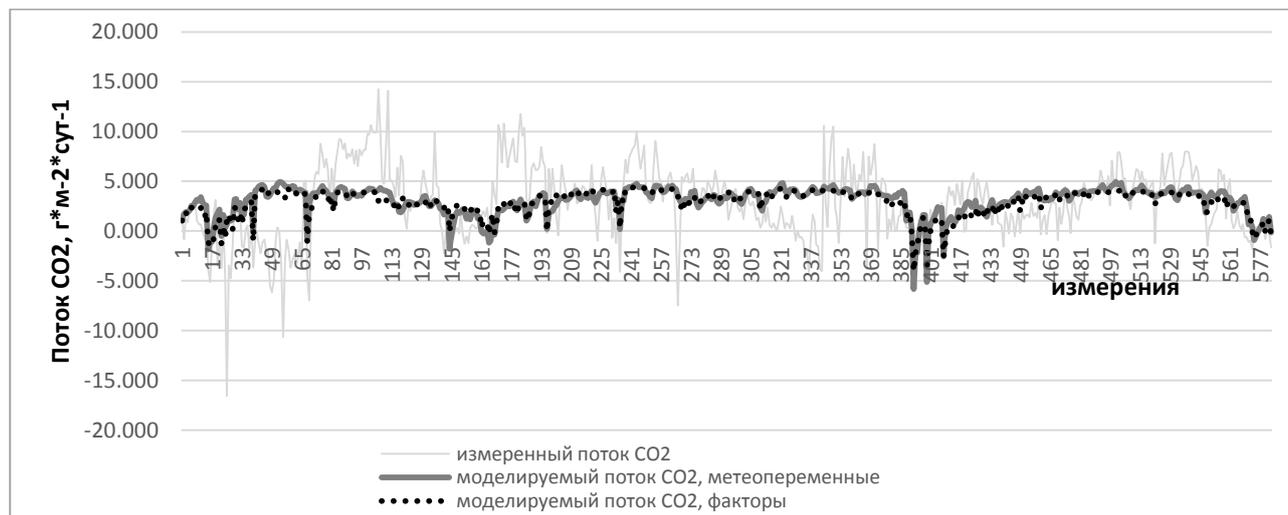


Рис. 2. Соотношение измеренного и смоделированного баланса  $\text{CO}_2$

По результатам *факторного анализа* переменные были разбиты на три фактора (табл. 3). Первый включал в себя преимущественно влажностные характеристики: испарение, влажность почвы, относительную влажность воздуха и температуру воздуха. Второй, радиационный, состоял из солнечной радиации, фотосинтетически активной радиации и теплообмена. Третий объединял поток тепла от почвы и осадки. В сумме выделенные факторы описывали 79% общей дисперсии метеовеличин: 33, 26 и 20% соответственно.

Как известно, общности характеризуют долю дисперсии переменных, описываемую каждым фактором. Так, для испарения, теплообмена и солнечной радиации выделенные факторы объясняли более 90% дисперсии, для температуры, относительной влажности воздуха и влажности почвы – более 80%.

Таблица 3

Результаты факторного анализа метеопеременных

Переменная	Факторная нагрузка			Общность			$R^2_{\text{множестве}}$
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	
Солнечная радиация	0,03	0,90	0,32	0,00	0,10	0,91	0,98
Фотосинтетически активная радиация	0,18	0,69	-0,03	0,03	0,03	0,50	0,24
Осадки	-0,33	0,00	-0,68	0,11	0,56	0,56	0,39
Испарение	-0,91	-0,01	0,15	0,82	0,85	0,85	0,91
Влажность почвы	-0,90	-0,24	-0,06	0,82	0,82	0,88	0,81
Относительная влажность воздуха	-0,76	-0,28	-0,47	0,58	0,79	0,87	0,82
Поток тепла от почвы	-0,06	0,24	0,91	0,01	0,80	0,86	0,77
Теплообмен	0,44	0,82	0,06	0,20	0,20	0,87	0,98
Температура воздуха	0,63	0,44	0,42	0,39	0,57	0,76	0,81
Собственные значения матрицы	2,97	2,33	1,81	–	–	–	–
Доля описываемой фактором дисперсии переменных	0,33	0,26	0,20	–	–	–	–

Примечание. Серым выделены наиболее значимые ( $x > 0,50$ ) факторные нагрузки и общности.

Поскольку классический регрессионный анализ не выявил явных влияний погодно-климатический условий на баланс  $\text{CO}_2$  в полупустынях Узбекистана, решено было построить уравнение зависимости потока  $\text{CO}_2$  от факторизованных метеопеременных (11) на основе рассчитанных суточных значений каждого из трех факторов  $F_{1-3}$ :

$$Y = 2,91 + 0,95F_1 + 0,65F_2 + 0,61F_3 \quad (R=0,36, R^2=0,13, p<0,05). \quad (11)$$

На рис. 2 заметно, что результаты моделирования потока  $\text{CO}_2$  через стандартные метеопеременные и с помощью рассчитанных факторов принципиально не отличаются друг от друга.

Оценка эффективности моделирования на основе полученных регрессионных уравнений представлена в табл. 4. Корреляции между расчетными и измеренными величинами значимы, хотя относительная ошибка достаточно высока. Значения коэффициентов эффективности моделирования позволяют сделать вывод об удовлетворительном уровне соответствия реальных и смоделированных величин при использовании как метеопеременных, так и факторов: коэффициент Нэша-Сатклиффа в обоих случаях положителен, но не превышает желательное значение 0,5, коэффициент несоответствия Тейла лежит практически посередине диапазона между 0 и 1, хотя предпочтительнее его приближение к 0.

Таблица 4

Оценка эффективности построенного уравнения зависимости баланса  $\text{CO}_2$  от температуры воздуха и количества осадков

Значение критериев эффективности	Тип регрессии	
	с метеопеременными	с факторами
Коэффициент корреляции расчетных и измеренных значений	0,36 (p=0,000)	0,37 (p=0,000)
Коэффициент регрессии расчетных и измеренных значений	0,14 (p=0,000)	0,13 (p=0,000)
Коэффициент эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа	0,12	0,13
Коэффициент несоответствия Тейла	0,42	0,42
Средняя относительная ошибка	0,54	0,56

Кластерный анализ позволяет разбить исследуемые величины на связанные между собой иерархические совокупности. Все три метода кластерного анализа показали аналогичный результат, согласно которому все метеопараметры делятся на два кластера (рис. 3). При этом поток  $\text{CO}_2$  образует отдельную совокупность с такими переменными, как солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация, теплообмен, поток тепла от почвы и температура воздуха. Этот кластер решено было назвать температурно-радиационным. Второй кластер образован влажностными переменными: осадками, влажностью почвы, относительной влажностью воздуха и испарением. Таким образом, кластеризация дает четкое представление о тесных связях потока  $\text{CO}_2$  с температурными и радиационными условиями местности.

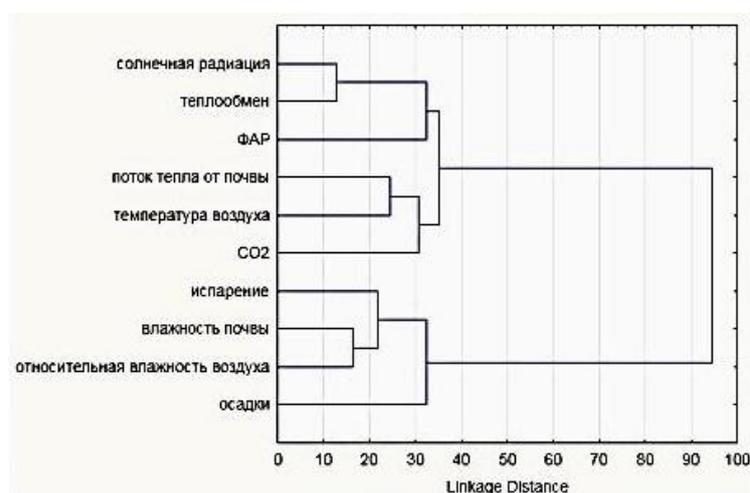


Рис. 3. Результаты кластерного анализа методом Варда

Данное исследование опирается на результаты микрометеорологических измерений атмосферных и почвенных параметров и потоков  $\text{CO}_2$  в полупустынных районах Узбекистана. Важность полевых измерений потоков парниковых газов отмечена в работе [2], поскольку они позволяют оценить обмен парниковых газов в системе почва–атмосфера, включающий в себя разнообразные процессы их продукции в почве, микробной реутилизации, сорбции, растворения, диффузии, эмиссии с поверхности почвы и поглощения из атмосферы.

Принцип измерений микрометеостанции, данные которой используются в работе, основывается на отношении Боуэна. По мнению [1], этот метод легко применим в полевых условиях, требует недорогого оборудования, полученные данные просты в обработке. Расчет потока газов базируется на радиационном балансе, потоке тепла в почву и отношении явного и скрытого тепла, при этом коэффициенты турбулентного обмена для тепла, водяного пара и других газов считаются подобными. Из недостатков можно отметить: 1) коэффициенты турбулентного обмена в реальности редко бывают подобными; 2) погрешности в измерении градиентов. Метод неприменим утром, вечером и ночью из-за необходимости деления на ноль вследствие отсутствия градиента.

Согласно результатам исследования полупустыни Узбекистана являются источником поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Вывод об эмиссионной активности полупустынь, регионов бедных растительностью и преимущественно представляющих собой оголенные пространства, как источника парниковых газов, подтверждается в работе [5], где отмечено, что почвы южных областей, теплый климат которых способствует усиленной минерализации органического вещества почв, теряют углерод.

В ходе анализа влияния внешних условий на поток  $\text{CO}_2$  была получена регрессионная модель его зависимости от температуры воздуха и количества осадков. Аналогичные зависимости используются в большинстве современных климатических и биохимических моделей [13; 16; 23–25].

Наблюдаются прямые корреляции интенсивности выделения экосистемой  $\text{CO}_2$  в атмосферу с температурой воздуха, но осадки, наоборот, способствуют снижению его поступления и даже поглощению. Об этом сигнализирует кривая потока  $\text{CO}_2$ , изменяющая свои значения на отрицательные (рис. 1). Таким образом, после выпадения осадков регион кратковременно становится стоком углерода. Вероятнее всего, это происходит в результате активизации процесса фотосинтеза, хотя возможно, что уменьшается дыхание почвы при сохранении того же уровня фотосинтеза или снижаются оба потока, но дыхание ослабляется более интенсивно. Аналогичные выводы о влиянии осадков на изменение показателя NEE с эмиссии на поглощение  $\text{CO}_2$  приведены в работе [20] на примере полупустынь Аризоны, США.

### Выводы

Полупустыни Узбекистана являются источником углекислого газа для атмосферы со средней интенсивностью его поступления  $3,06 \pm 1,12 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . Достоверно доказано, что осадки способствуют изменению значения баланса  $\text{CO}_2$  с эмиссии на кратковременное поглощение, вероятнее всего, вследствие активизации фотосинтеза.

Отмечена прямая корреляция баланса углекислого газа с температурой воздуха и обратная с количеством осадков, на основе которой построена регрессионная модель, наилучшим образом предсказывающая поток  $\text{CO}_2$  в среднем диапазоне его значений.

Метеоусловия полупустынь Узбекистана были разделены на три фактора, которые характеризуют тепловые, влажностные и радиационные условия местности. Использование измеренных метеовеличин или рассчитанных факторов в качестве независимых переменных не дает существенного различия в результатах регрессионного моделирования, которые показывают, что от погодных-климатических условий местности зависит не более 16% дисперсии потока  $\text{CO}_2$ . Метеорологические параметры полупустынь Узбекистана делятся на два кластера: температурно-радиационный, куда входит также баланс  $\text{CO}_2$ , и влажностной, что говорит о ключевой роли температуры в образовании парниковых газов в аридном климате.

### Библиографический список

1. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авиллов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций: краткое практическое руководство. М.: LI-COR Biosciences, РАН, Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, 2016. 223 с.
2. Задорожний А.Н., Семенов М.В., Ходжаева А.К., Семенов В.М. Почвенные процессы продукции, потребления и эмиссии парниковых газов // *Агрохимия*. 2010. №10. С. 75–92.
3. Камышова Г.Н., Корсак В.В., Фалькович А.С., Холуденева О.Ю. Математическое

моделирование в компонентах природы. Саратов: Изд-во СГАУ, 2012. 161 с.

4. *Ольчев А.В.* Потоки CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценка с применением математических моделей): автореф. ... д-ра биол. наук. М., 2015. 51 с.

5. *Романовская А.А., Карабань Р.Т.* Региональные особенности баланса углерода почв на кормовых угодьях России // Известия РАН. Сер. Географическая. 2008. №4. С. 96–104.

6. *Тэйл Г.* Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1977. 282 с.

7. *Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Курбатова Ю.А., Парфенова Е.И., Валентини Р., Верховец С.В., Ваганов Е.А., Шульце Е.Д.* Энерго-массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность // Известия РАН. Сер. Биологическая. 2014. №1. С. 65–75.

8. *Bowen I.S.* The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface // Physical Review Journals. 1926. V. 27. Is. 6. P. 779–787.

9. *Bowen ratio instrumentation.* Instruction manual. Campbell Scientific, 2005. 36 p.

10. *O'Dell D., Sauer T.J., Hicks B.B., Lambert D.M., Smith D.R., Bruns W., Basson A., Marake M.V., Walker F., Wilcox M.D. Jr., Eash N.S.* Bowen ratio energy balance measurement of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fluxes of no-till and conventional tillage agriculture in Lesotho // Open Journal of Soil Science. 2014. №4. P. 87–97.

11. *Dugas W.A.* Micrometeorological and chamber measurements of CO<sub>2</sub> flux from bare soil // Agricultural and Forest Meteorology. 1993. №67. P.115–128.

12. *Follett R., Mooney S., Morgan J., Paustian K., Allen Jr. L.H., Archibeque S., Baker, J.M., Del Grosso S.J., Derner J., Dijkstra F., Franzluebbers A.J., Janzen H., Kurkalova L.A., McCarl B.A., Ogle S., Parton W.J., Peterson J.M., Rice C.W., Robertson G.P.* Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in agriculture: challenges and opportunities. Ames: Council for Agricultural Science and Technology (CAST), 2011. 105 p.

13. *Golubyatnikov L.L., Svirezhev Yu.M.* Life-cycle model of terrestrial carbon exchange // Ecological Modelling. 2008. V. 213. P. 202–208.

14. *Held A.A., Steduto P., Orgaz F., Matista A., Hsiao T.C.* Bowen ratio/energy balance technique for estimating crop net CO<sub>2</sub> assimilation, and comparison with a canopy chamber // Theoretical and Applied Climatology. 1990. №42. P. 203–213.

15. *Houghton R.A.* Balancing the global carbon budget // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2007. №35. P. 313–347.

16. *Jain A., Yang X., Kheshgi H., McGuire A.D., Post W., Kicklighter D.* Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors // Global Biogeochemistry Cycles. 2009. V. 23. GB4028.

17. *Luo Y., Zhou X.* Soil respiration and the environment. Burlington: Academ. Press, 2006. 316 p.

18. *McGinn S.M., King K.M.* Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO<sub>2</sub> fluxes above alfalfa and maize // Agricultural and Forest Meteorology. 1990. №49. P. 331–349.

19. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles // Journal of hydrology. 1970. V. 10. №3. P. 282–290.

20. *Scott R.L., Hamerlynck E.P., Jenerette G.D., Moran M.S., Barron-Gafford G.A.* Carbon dioxide exchange in a semidesert grassland through drought-induced vegetation change // Journal of geophysical research. 2010. V. 115. Is. G3. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JG001348/epdf> (дата обращения: 20.07.2017).

21. StatSoft. (а) Электронный учебник по статистике. М.: StatSoft, 2012. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения: 20.07.2017).

22. StatSoft. (б) Электронный учебник по статистике. М.: StatSoft, 2012. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html> (дата обращения: 20.07.2017).

23. *Thornton P.E., Lamarque J.F., Rosenbloom N.A., Mahowald N.M.* Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO<sub>2</sub> fertilization and climate variability // Global Biogeochemistry Cycles. 2007. V. 21. GB4018.

24. *Wania R., Meissner K.J., M. Eby M., Arora V.K., Ross I., Weaver A.J.* Carbon-nitrogen feedbacks in the UVic ESCM // Geoscientific Model Development. 2012. V. 5. P. 1137–1160.

25. *Zaehle S., Friend A.D.* Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates // Global Biogeochemistry Cycles. 2010. V. 24. GB1005.

## References

1. Burba, G.G., Kurbatova, Ju.A., Kuricheva, O.A., Avilov, V.K. and Mamkin, V.V., (2016), *Metod turbulentnyh pul'sacij. Kratkoe prakticheskoe rukovodstvo*. Moscow, Russia.
2. Zadorozhnyj, A.N., Semenov, M.V., Hodzhaeva, A.K. and Semenov, V.M., (2010), Pochvennye processy produkcii, potreblenija i jemissii parnikovyh gazov. *Agrohimiya*. No. 10, pp. 75–92.
3. Kamyshova, G.N., Korsak, V.V., Fal'kovich, A.S. and Holudeneva, O.Ju., (2012), *Matematicheskoe modelirovanie v komponentah prirody*. Saratov. Russia.
4. Ol'chev A.V. (2015), *Potoki CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>O v lesnyh jekosistemah v uslovijah izmenjajushhegosja klimata (ocenka s primeneniem matematicheskikh modelej)*, Abstract of D.Sc. dissertation, Biology, Moscow, Russia.
5. Romanovskaja, A.A. and Karaban', R.T. (2008), Regional'nye osobennosti balansa ugleroda pochv na kormovyh ugod'jah Rossii. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija Geograficheskaja*. No. 4, pp. 96–104.
6. Tjejl, G., (1977), *Jekonomicheskie prognozy i prinjatje reshenij*. Moscow, Russia.
7. Chebakova, N.M., Vygodskaja, N.N., Arnet, A., Belelli Markezini, L., Kurbatova, Ju.A., Parfenova, E.I., Valentini, R., Verhovec, S.V., Vaganov, E.A. and Shul'ce, E.D., (2014), Jenergo-massobmen i produktivnost' osnovnyh jekosistem Sibiri (po rezul'tatam izmerenij metodom turbulentnyh pul'sacij). 2. Uglernyj obmen i produktivnost' . *Izvestija RAN. Serija Biologicheskaja*. No. 1, pp. 65–75.
8. Bowen, I.S. (1926), The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review Journals*. V. 27. Is. 6, pp. 779–787.
9. *Bowen ratio instrumentation*. Instruction manual. 2005. Campbell Scientific.
10. O'Dell, D., Sauer, T.J., Hicks, B.B., Lambert, D.M., Smith, D.R., Bruns, W., Basson, A., Marake, M.V., Walker, F., Wilcox, M.D. Jr. and Eash, N.S., (2014), Bowen ratio energy balance measurement of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fluxes of no-till and conventional tillage agriculture in Lesotho. *Open Journal of Soil Science*. No 4, pp. 87–97.
11. Dugas, W.A. (1993), Micrometeorological and chamber measurements of CO<sub>2</sub> flux from bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*. No. 67, pp.115–128.
12. Follett, R., Mooney, S., Morgan, J., Paustian, K., Allen, Jr. L.H., Archibeque, S., Baker, J.M., Del Grosso, S.J., Derner, J., Dijkstra, F., Franzluebbbers, A.J., Janzen, H., Kurkalova, L.A., McCarl, B.A., Ogle, S., Parton, W.J., Peterson, J.M., Rice, C.W. and Robertson, G.P., (2011), *Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in agriculture: challenges and opportunities*. Ames.
13. Golubyatnikov, L.L. and Svirezhev, Yu.M., (2008), Life-cycle model of terrestrial carbon exchange. *Ecological Modelling*. V. 213, pp. 202–208.
14. Held, A.A., Steduto, P., Orgaz, F., Matista, A. and Hsiao, T.C., (1990), Bowen ratio/energy balance technique for estimating crop net CO<sub>2</sub> assimilation, and comparison with a canopy chamber . *Theoretical and Applied Climatology*. No. 42, pp. 203–213.
15. Houghton, R.A. (2007), Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. No. 35, pp. 313–347.
16. Jain, A., Yang, X., Kheshgi, H., McGuire, A.D., Post, W. and Kicklighter, D., (2009), Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors . *Global Biogeochemistry Cycles*. V. 23. GB4028.
17. Luo, Y. and Zhou, X., (2006), *Soil respiration and the environment*. Burlington.
18. McGinn, S.M. and King, K.M., (1990), Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO<sub>2</sub> fluxes above alfalfa and maize. *Agricultural and Forest Meteorology*. No. 49, pp. 331–349.
19. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970), River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles .*Journal of hydrology*. V. 10. No 3, pp. 282–290.
20. Scott, R.L., Hamerlynck, E.P., Jenerette, G.D., Moran, M.S. and Barron-Gafford, G.A., (2010), Carbon dioxide exchange in a semidesert grassland through drought-induced vegetation change . *Journal of geophysical research*. V. 115. Is. G3. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JG001348/epdf> (accessed 20.07.2017)/
21. StatSoft. (a), 2012. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (accessed 20.07.2017).
22. StatSoft. (б), 2012. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html> (accessed 20.07.2017).
23. Thornton, P.E., Lamarque, J.F., Rosenbloom, N.A. and Mahowald, N.M., (2007), Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO<sub>2</sub> fertilization and climate variability . *Global Biogeochemistry Cycles*. V. 21. GB4018.

24. Wania, R., Meissner, K.J., M. Eby, M., Arora, V.K., Ross, I. and Weaver, A.J., (2012), Carbon-nitrogen feedbacks in the UVic ESCM. *Geoscientific Model Development*. V. 5, pp. 1137–1160.

25. Zaehle, S. and Friend, A.D., (2010), Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. *Global Biogeochemistry Cycles*. V. 24. GB1005.

Поступила в редакцию: 08.08.2017

### Сведения об авторах

#### Суховеева Ольга Эдуардовна

младший научный сотрудник  
лаборатории антропогенных изменений  
климатической системы,  
Институт географии РАН;  
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер.,  
д. 29

e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

### About the authors

#### Olga Sukhoveeva

Junior Researcher, Laboratory for Anthropogenic  
Changes in the Climate System, Institute of  
Geography of the Russian Academy of Sciences;  
29, Staromonetny st., Moscow, 119017, Russia

#### Насыров Мухтор Гаффарович

доктор биологических наук, профессор  
начальник отдела международных связей,  
Самаркандский государственный университет;  
140104, Республика Узбекистан, г. Самарканд,  
Университетский бул., 15

#### Mukhtor Nasirov

Doctor of Biological Sciences, Professor,  
Vice-Rector of International Relations department,  
Samarkand State University;  
15, University boul., Samarkand, 15140104,  
Uzbekistan

### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Суховеева О.Э., Насыров М.Г. Оценка влияния метеорологических условий на баланс углекислого газа в полупустынях Узбекистана // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. №1(44). С.95–105. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-95-105

### Please cite this article in English as:

Sukhoveeva O.E., Nasirov M.G. The evaluation of meteorological conditions influence on carbon dioxide balance in Uzbekistan semideserts // Geographical bulletin. 2018. №1(44). P. 95–105. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-95-105

УДК 551.509.54

Б.А. Сивков, Н.А. Калинин

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КРИТЕРИЕВ ИНДЕКСОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ШКВАЛАХ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ\*

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

В работе рассматриваются индексы неустойчивости атмосферы и их значения, при которых наблюдаются шквалы разной силы. По данным реанализа модели CFS были рассчитаны индексы CAPE, CIN, LI, TT, K и SWEAT за период 2000–2016 гг. для территории Пермского края. На основе полученных данных были определены предельные величины индексов, а также скорректированы критические значения, при превышении которых возможны шквалы. Исследование показало, что для всех индексов необходимо снизить (для индекса LI повысить) эти критические значения. Построены карты распределения индексов неустойчивости по Пермскому краю.

К л ю ч е в ы е с л о в а : шквалы, индексы неустойчивости, конвекция, реанализ, модель CFS.