

УДК 551.588

EDN: ROQJRJ DOI: 10.31429/vestnik-21-3-70-83

Изменчивость потоков и концентрации климатически активных газов на опытных полях Краснодарского края

С. Б. Куклев¹✉, В. В. Пушкин¹, А. В. Погорелов², Е. Н. Киселёв²,
В. Л. Махонин³

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., д. 36, Москва, 117997, Россия

² Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В.С. Пустовойта,
ул. им. Филатова, 17, Краснодар, 350038, Россия

✉ Куклев Сергей Борисович; ORCID 0000-0003-4494-9878; SPIN 7717-9703; e-mail: kuklev@ocean.ru

Аннотация. В рамках программы «Карбонового полигона в Краснодарском крае» выполнены полевые исследования на территории опытного хозяйства «ВНИИМК» в хуторе Октябрьский Краснодарского края, направленные на получение данных об изменчивости потоков и концентрации климатически активных газов на полях с различными культурами. По результатам измерений получен временной ход исследуемых параметров. Проведено сопоставление этих данных с характеристиками соответствующих культур в различных фазах вегетации. Результаты представлены в графическом виде. Приведены методики полевых работ. С учетом полученного опыта даны рекомендации по организации подобных экспериментов.

Ключевые слова: Краснодарский край, карбоновый полигон, опытные поля, климатически активные газы, газоанализатор, биомасса.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы государственного задания № FMWE-2021-0013 при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания FMWE-2023-0001.

Цитирование: Куклев С. Б., Пушкин В. В., Погорелов А. В., Киселёв Е. Н., Махонин В. Л. Изменчивость потоков и концентрации климатически активных газов на опытных полях Краснодарского края // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21, № 3. С. 70–83. EDN: ROQJRJ. DOI: 10.31429/vestnik-21-3-70-83

Поступила 14 июня 2024 г. После доработки 24 июля 2024 г. Принято 15 августа 2024 г. Публикация 24 сентября 2024 г.

Вклад каждого соавтора в процесс написания статьи на разных этапах ее создания: идея/концепция работы (Куклев С.Б., Погорелов А.В.); проведение экспериментов (Пушкин В.В., Погорелов А.В., Киселев Е.Н., Махонин В.Л.); камеральная обработка данных (Пушкин В.В.), написание статьи (Куклев С.Б., Пушкин В.В.), внесение правок и утверждение окончательного варианта (Куклев С.Б., Пушкин В.В., Погорелов А.В., Киселев Е.Н., Махонин В.Л.). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2024. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Variability of Fluxes and Concentrations of Climatically Active Gases in Experimental Fields of Krasnodar Krai

S. B. Kuklev¹✉, V. V. Pushkin¹, A. V. Pogorelov², E. N. Kiselev², V. L. Makhonin³

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimosky, 36, Moscow, 117997, Russia

² Kuban State University, Stavropolskaya, 149, Krasnodar, 350040, Russia

³ V.S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatova, 17, Krasnodar, 350038, Russia

✉ Sergey B. Kuklev; ORCID 0000-0003-4494-9878; e-mail: kuklev@ocean.ru

Abstract. As part of the program “Carbon polygon in Krasnodar Krai” field studies were carried out at the experimental farm Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit in Oktyabrsky hamlet, Krasnodar Krai, aimed at obtaining data on variability of fluxes and concentrations of climatically active gases in fields of different crops. From the measured data, the temporal changes of the studied parameters were determined. These data were compared with the characteristics of the corresponding crops at different stages of vegetation. The results are presented graphically. The field work methods are described. In the light of the experience gained, recommendations are given for the organization of similar experiments. The results of the experiment revealed that the development of plants and their root system influences the formation of greenhouse gas fluxes near the soil surface. Carbon dioxide fluxes, which

were characterized by emission processes, increased with plant development. A peculiarity was found for the initial period after crop planting, when carbon dioxide emission slightly decreased, but subsequently increased again. Methane was predominantly taken up by soil in all fields during the whole measurement period. Peculiarities were revealed for the period closer to the middle of the growing season, when some increase in methane absorption was observed, which was probably related to soil moistening. The fluxes of gases are significantly influenced by meteorological conditions, in particular precipitation and associated soil moistening. Moist soil stimulates the activity of microorganisms involved in the biological decomposition of organic matter, which contributes to the increase in greenhouse gas fluxes. Despite the positive results of the experiment, a number of its limitations were revealed. Periodicity of measurements twice a month is clearly insufficient to reveal all features and regularities in variability of climatically active gases, their relationship with meteorological and biological parameters. To eliminate gaps in research, it is necessary to organize continuous measurements of fluxes and concentrations of greenhouse gases and meteorological parameters based on automated observation stations. The program of the experiment should be expanded to include studies of indicators that would characterize changes in photosynthesis in the process of plant growth.

Keywords: Krasnodar Territory, carbon test site, experimental fields, climate-active gases, gas analyzer, biomass.

Funding. The work was carried out within the framework of the topic of state assignment No. FMWE-2021-0013 with financial support within the framework of the topic of state assignment FMWE-2023-0001.

Cite as: Kuklev, S. B., Pushkin, V. V., Pogorelov, A. V., Kiselev, E. N., Makhonin, V. L., Variability of fluxes and concentrations of climatically active gases in experimental fields of Krasnodar Krai. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 70–83. DOI: 10.31429/vestnik-21-3-70-83

Received 14 June 2024. Revised 24 July 2024. Accepted 15 August 2024. Published 24 September 2024.

The contribution of each co-author to the process of writing the article at different stages of its creation: idea/concept of the work (Kuklev S.B., Pogorelov A.V.); conducting experiments (Pushkin V.V., Pogorelov A.V., Kiselev E.N., Makhonin V.L.); desk processing of data (Pushkin V.V.), writing the article (Kuklev S.B., Pushkin V.V.), making edits and approving the final version (Kuklev S.B., Pushkin V.V., Pogorelov A.V., Kiselev E.N., Makhonin V.L.). The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2024. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](#).

Введение

Современные климатические изменения и связанное с ними глобальное потепление вызывают озабоченность всего мирового сообщества. В сложившихся условиях становятся актуальными вопросы достоверной количественной оценки факторов, влияющих на изменение климата. Принято считать, что одним из таких факторов являются выбросы климатически активных (парниковых) газов, имеющих как естественное, так и антропогенное происхождение. В последнее время проблема приобрела не только научное, но и политико-экономическое значение, связанное с доверием международного сообщества к системам национального мониторинга парниковых газов, достоверности получаемых на их основе результатов.

В современных условиях система мониторинга парниковых газов на территории России находится в неудовлетворительном состоянии, что не позволяет получать достоверные интегральные по времени и пространству оценки парниковых газовых потоков [1]. Недостаточное количество стационарных мониторинговых станций связано с высокой стоимостью измерительного оборудования, с логистическими проблемами (большие пространства России, труднодоступность и отсутствие подъездных дорог к экспериментальным площадкам), с проблемами вандализма (необходимостью организации охраны дорогостоящего оборудования) и др. Крайне важно, чтобы исследованиями была охвачена вся российская территория, со всеми возможными источниками и стоками парниковых газов, включая участки суши с измененным биогеоценозом (например, сельхозугодия).

Проблема усугубляется отсутствием в России принятых стандартов измерений, системы инвентаризации источников и стоков, утвержденных методик расчетов эмиссий и секвестрирования парниковых газов. Стандартизация методов и гармонизации представления данных измерений множества исследователей, в конечном итоге, имеет определяющее значение для

Таблица 1. Координаты станций измерений на опытных полях ВНИИМК

Table 1. Coordinates of measurement stations on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit

Станция	Широта, град.	Долгота, град.	Станция	Широта, град.	Долгота, град.
Пшеница	45,18137	39,06498	Рапс яровой	45,18145	39,05523
Лен	45,18485	39,05914	Соя «Ирбис»	45,18164	39,06966
Рапс «Элвис»	45,18094	39,05509	Подсолнечник	45,16908	39,05749

решения задач масштабирования локальных изменений в глобальных моделях атмосферной циркуляции земной системы и преобразование результатов исследований в жизнеспособные стратегии смягчения последствий парникового эффекта. Зарубежными коллегами для решения проблемы стандартизации в свое время были предприняты значительные усилия [2]. Особого внимания заслуживают подробные обзоры и руководящие принципы, изложенные в Программе GRACEnet Министерства сельского хозяйства США [3] и в Программе GRA Глобального исследовательского альянса по сельскохозяйственным парниковым газам [4]. Предложенные в Программах GRACEnet и GRA принципы обеспечили методологическую платформу для координации зарубежных исследований и совместимости данных измерений.

Программы GRACEnet и GRA могут быть приняты за основу создания российского аналога стандартов. В обзорах Программ, а также статей по результатам исследований [5–7 и др.] указывается на тот факт, что конкретные методы измерения потока парниковых газов чрезвычайно разнообразны и возможны значительные методологические вариации практически на каждом этапе измерений. Это дает право полагать, что при создании стандартов России возможно использовать опыт иностранных коллег с учетом российской специфики вопросов организации и проведения экспериментов, локальных особенностей распределения источников и стоков парниковых газов, расположения участков с различными биогеоценозами, обеспечения измерительным оборудованием и др.

Решение задач исследований парниковых газов на территории России предполагается путем создания карбоновых полигонов. Карбоновый полигон в Краснодарском крае – один из первых пилотных проектов, реализация которого определена в рамках создания национальной системы мониторинга парниковых газов в экосистемах России, предусмотренной Указом Президента РФ №76 от 8.02.2021 г. Задачей проекта, прежде всего, является разработка и испытание технологий контроля углеродного баланса. Отработанные в ходе реализации пилотных проектов технологии и методы будут использованы на других полигонах, развертывание которых предполагается в ближайшем будущем по всей территории России. А полученные первичные данные измерений станут основой для разработки цифровой модели пространственного распределения и динамики изменения потоков климатически активных газов на российской территории.

В рамках реализации проекта «Карбоновый полигон в Краснодарском крае» Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН, г. Москва), совместно с Кубанским государственным университетом (КубГУ, г. Краснодар), Федеральным научным центром «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В.С. Пустовойта» (ВНИИМК, г. Краснодар) в период с апреля по сентябрь 2023 г. были организованы исследования потоков и концентрации парниковых газов на полях с различными сельскохозяйственными культурами. Для проведения экспериментов были выбраны опытные поля ВНИИМК (Краснодарский край, х. Октябрьский) с посевами пшеницы, сои, рапса озимого, рапса ярового, льна, подсолнечника (рис. 1). Координаты станций измерений представлены в табл. 1.

На каждой станции выполнялись измерения потоков метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2) у поверхности почвы, концентрации этих газов в приземном слое атмосферы. Производился отбор растений с корневой системой для дальнейшей фиксации параметров их

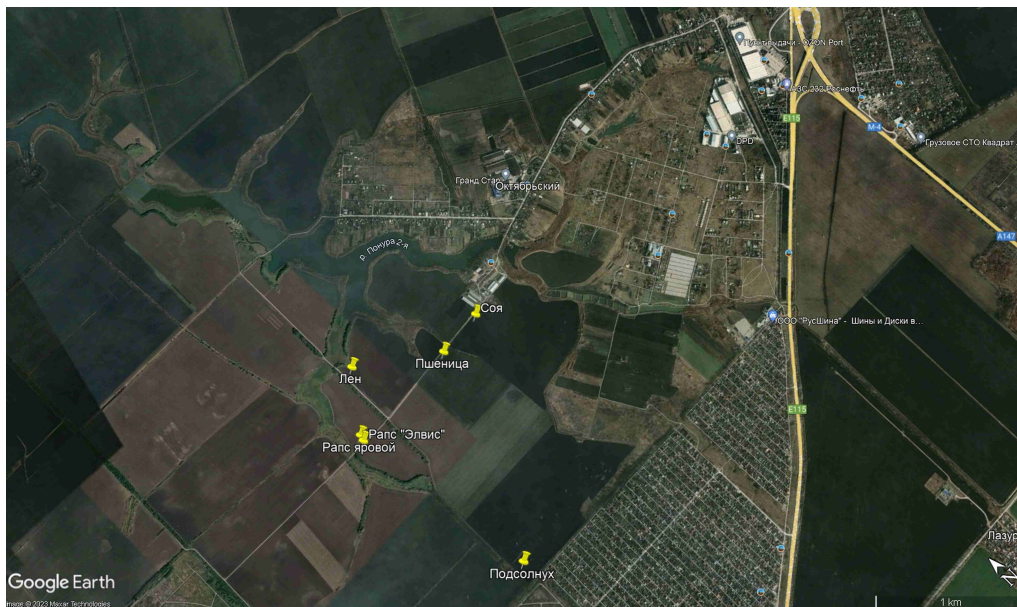


Рис. 1. Расположение станций наблюдений на опытных полях ВНИИМК (Краснодарский край, п. Октябрьский)

Fig. 1. Location of observation stations on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit (Krasnodar region, village Oktyabrsky)

роста и состояния в различных фазах вегетации. Фиксировались метеорологические условия проведения эксперимента.

Сельскохозяйственные угодья Кубани играют важную роль в процессах эмиссии и поглощения климатических газов, прежде всего углекислого газа и метана. Эти процессы связаны с возделыванием почвы, использованием удобрений, ростом растений, развитием их корневой системы, что влияет на баланс газов в окружающем поля атмосферном воздухе. Выбранный период наблюдений позволил выявить изменчивость потоков парниковых газов на всех стадиях вегетации растений: от момента посева, роста растений и до их уборки.

В ходе эксперимента на опытных полях ВНИИМК было осуществлено 9 комплексных серий измерений с периодичностью ~ 15 дней (2 раза в месяц). За один цикл измерения производились не на всех станциях. В основном это было связано с различиями в периодах вегетации исследуемых сельскохозяйственных культур. По объективным причинам не удалось осуществить регулярные измерения на поле с подсолнечником. Результаты измерений на полях подсолнечника учитывались при общем анализе всех полученных данных измерений. График проведения эксперимента представлен в табл. 2.

1. Методика проведения экспериментов

В мировой практике исследований потоков парниковых газов наиболее широкое применение получили два метода: метод турбулентных пульсаций (англ. — *eddy covariance* [8] и метод экспозиционных камер (англ. — “static” или “non-steady-statenon-flow-through” chambers) [4,9]. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Метод турбулентных пульсаций с помощью стационарных вышек позволяет исследовать большие пространства от 1 до нескольких сотен Га (площадь зависит от высоты размещения оборудования) в непрерывном режиме с высокой частотой опроса датчиков измерений (до 2 кГц). По результатам измерений получают осредненные данные по всей площади исследований без учета возможных локальных особенностей распределения растительности и почвенного покрова. Исследовать локальные особенности позволяет метод экспозиционных камер, которые на экспериментальном участке

Таблица 2. График производства наземных измерений на опытных полях ВНИИМК

Table 2. Schedule of ground-based measurements on experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit

Дата	Посевы					
	Пшеница	Соя «Ирбис»	Рапс озимый «Элвис»	Рапс яровой	Лен	Подсол- нечник
26.04	+	-	-	-	+	-
12.05	+	-	+	+	+	-
07.06	+	+	+	+	+	-
21.06	+	+	+	+	+	-
06.07	+	+	+	+	+	+
20.07	+	+	+	+	+	-
03.08	-	+	-	-	+	+
08.09	-	+	-	-	-	+
22.09	-	-	-	-	-	+

Примечание: в таблице «+» означает измерения производились, «-» — измерения не производились

можно установить практически в любом количестве. Его особенностью являются дискретные данные измерений (максимально — несколько раз в сутки). Дискретность зависит от организационных возможностей участников эксперимента (количество точек измерений, их удаленность друг от друга, количество приборов измерения, участников эксперимента и пр.).

Оптимальным вариантом является одновременное использование двух методов исследований, когда методом измерений турбулентных пульсаций обеспечивается непрерывность наблюдений, а методом экспозиционных камер — учет локальных особенностей распределения различных растительности и почвенного покрова. Положительным примером подобной организации эксперимента являются исследования, выполненные на рекультивированном участке «Карбоновая ферма» Чеченского карбонового полигона [10]. По результатам эксперимента выявлено хорошее согласование данных измерений, полученных двумя различными методами, что подтверждает возможность и целесообразность их одновременного использования для задач исследования потоков парниковых газов.

Представленный в настоящей статье эксперимент также предполагал использование двух указанных методов исследований. Однако в процессе организации эксперимента на полях ВНИИМК не удалось решить проблему гарантированной сохранности оборудования стационарной вышки с пульсационным оборудованием. Поэтому эксперимент был ограничен только методом экспозиционных камер с дополнительным пространственным измерением содержания парниковых газов в атмосферном воздухе с помощью газоанализатора Sniffer4D (Soarability, Китай), интегрированного на БПЛА.

Точки для измерений на каждом из опытных полей выбирались с учетом легкой доступности к месту установки приборов, а также необходимости минимизировать ущерб посевам при передвижении по полю группы из нескольких человек-исследователей. Важным условием проведения эксперимента являлось выполнение цикла измерений в одних и тех же точках. К сожалению, устанавливать некие маркеры на поле для точного позиционирования приборов при каждом последующем измерении не представлялось возможным. За время проведения эксперимента по исследуемым полям с целью их обработки перемещалась сельскохозяйственная техника. Положение точек измерений на местности определялась по визуальным ориентирам и GPS приемником, входящим в состав используемого газоанализатора Li-7810 (Li-COR, США). Точность позиционирования при этом составляла около 5 м. Учитывая однородность посевов, пространственную изменчивость почвенного состава, схему сельскохозяйственной обработки полей, можно считать, что точности позиционирования точек измерений было достаточно для условий проведения эксперимента.

Для измерений использовался газоанализатор Li-7810 (Li-COR, США) с почвенной камерой Smart Chamber. Прибором измерялись потоки у поверхности почвы метана и диоксида углерода, концентрации этих газов в окружающем атмосферном пространстве. Также прибором фиксировались сопутствующие параметры: температура воздуха, влажность и температура почвы, атмосферное давление, дата-время и географические координаты точки измерения. С помощью беспроводной сети через смартфон производилось подключение к Smart Chamber и осуществлялось непосредственное управление процессом сбора данных. Измерения проводились в трех повторностях с последующим осреднением. Далее файл с данными за весь день загружался на компьютер для расширенного анализа с помощью программного обеспечения SoilFluxPro. Результатом работы программы SoilFluxPro являются значения измеряемых параметров и потоков CO_2 (мкмоль/м²с) и CH_4 (нмоль/м²с). После проверки данных на корректность и присвоения стандартизованных имен точкам измерений массив помещался в базу данных «Carbon» (БД «Carbon»), созданную в ЮО ИО РАН для систематизации всех изысканий, которые производятся в рамках программы «Карбоновый полигон в Краснодарском крае». На фотографиях рис. 2 представлены примеры организации измерений на опытных полях ВНИИМК.

При проведении эксперимента предполагались пространственные измерения содержания парниковых газов в атмосферном воздухе с помощью газоанализатора Sniffer4D (Soarability, Китай), интегрированного на БПЛА. В силу объективных обстоятельств полеты БПЛА были запрещены, поэтому прибор использовался стационарно. Прибор работал в режиме непрерывных измерений. В дальнейшем при обработке данных программным комплексом «Sniffer4D Mapper» для анализа выбирался период измерений газоанализатора Li-7810.

Сравнение данных газоанализаторов Li-7810 и Sniffer4D показало некорректность работы последнего. Причина в том, что газовые датчики, установленные на Sniffer4D, требуют калибровки, отчет о которой производитель не предоставил. Предполагается в дальнейшем выполнить калибровку датчиков прибора на специальном оборудовании. После калибровки датчиков потребуется корректировка полученных прибором данных. В силу вышеуказанных обстоятельств результаты измерений Sniffer 4D в настоящей работе не приводятся.

На станциях измерений сотрудниками «ВНИИМК» производили отбор растений по стандартной методике с целью определения параметров, характеризующих их состояние в различные фазы вегетации. На месте определялась высота растений, в аналитической лаборатории — общая сухая масса в пересчете на 1 м², средняя оводненность, процент сухого вещества и др.

2. Результаты измерений

Предварительный анализ данных показал, что измерения в трех повторностях хорошо согласованы между собой. Поэтому для анализа представлены средние значения, полученные по трем повторностям для каждого поля. Результаты измерений потоков из почвы CO_2 и CH_4 в графическом виде представлены на рис. 3.

По оси X отложены дни измерений. Шкала включает в себя все 9 выходов в поле. Отсутствие значений за некоторые дни означает, что измерения на этом поле не проводились. В одних случаях это было связано с тем, что культура не была еще посеяна, в других — что ее уже убрали. На графиках отсутствуют результаты по полю подсолнечника, на котором по объективным причинам не удалось организовать регулярные наблюдения.

Прежде всего, отметим одну выявленную особенность. Как следует из результатов, представленных на рис. 3, эмиссия CO_2 20 июля на всех полях была значительно выше, чем в другие даты. Очевидно, это связано с тем, что накануне (19 июля), прошел сильный дождь. В течение суток выпало 35 мм осадков. В указанный период почва была очень влажная (рис. 3e).

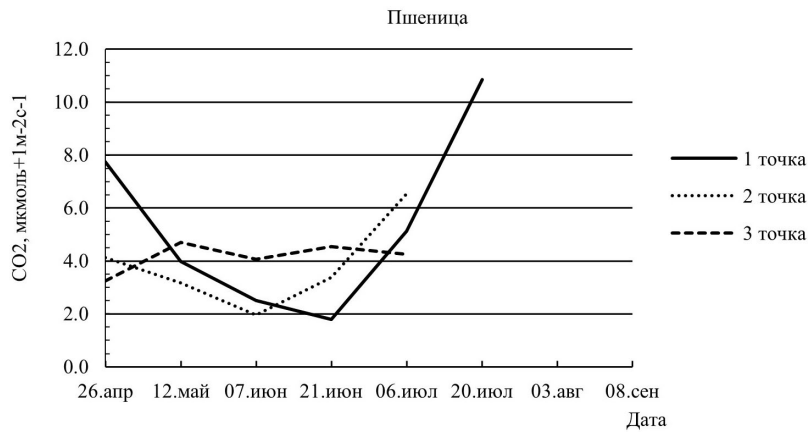
Полученному результату есть научное обоснование [11–15]. Влажность почвы существенно влияет на эмиссию диоксида углерода. Это связано с несколькими ключевыми факторами и процессами. Диоксид углерода в почве в основном образуется в результате биологического разложения органического вещества микроорганизмами — процесса, известного как минера-



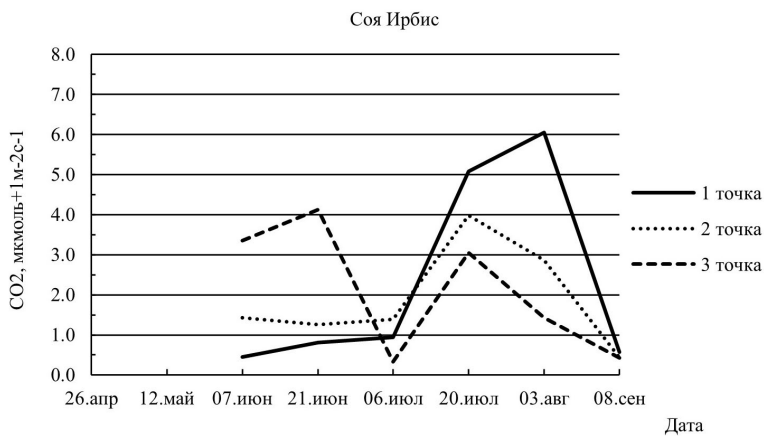
Рис. 2. Проведение экспериментов на опытных полях ВНИИМК: а) пшеница, б) соя «Ирбис», в) рапс озимый «Элвис», г) рапс яровой, д) лен, е) подсолнечник

Fig. 2. Conducting experiments on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoi: a) wheat, б) soybean "Irbis", в) winter rape "Elvis", г) spring rape, д) flax, е) sunflower

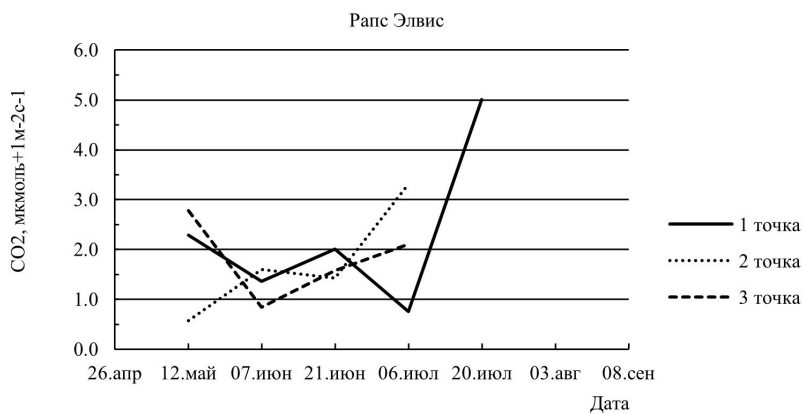
лизация. Этот процесс зависит от условий окружающей среды, включая влажность почвы. Влажная почва обеспечивает необходимую для размножения микроорганизмов среду, стимулирует их активность и, следовательно, увеличивает выделение CO_2 . Влажные условия также поддерживают процесс окисления органического углерода, которого в почве содержится значительное количество. Важно заметить, что хотя увлажнение почвы обычно увеличивает активность микроорганизмов и эмиссию CO_2 , существует определенная точка насыщения. При очень высоких уровнях влажности, когда большинство воздушных пор заменяется водой, это может вызвать дефицит кислорода, приводящий к замедлению микробной активности и, следовательно, к снижению эмиссии CO_2 . К сожалению, выбранный временной интервал измерений настоящего эксперимента не позволяет выявить все закономерности влияния влажности почвы на потоки парниковых газов.



а)



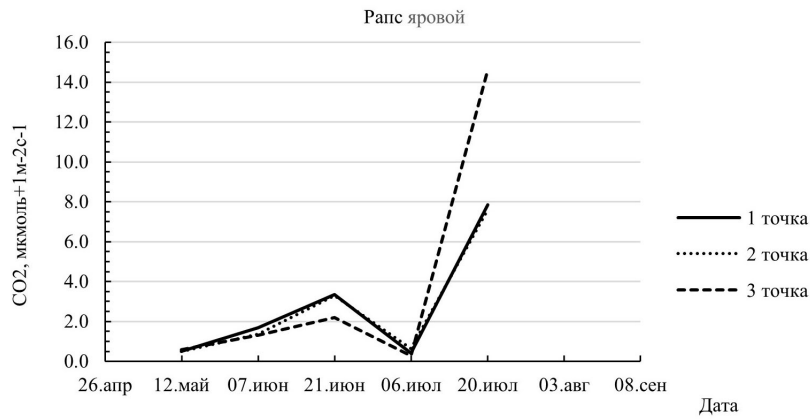
б)



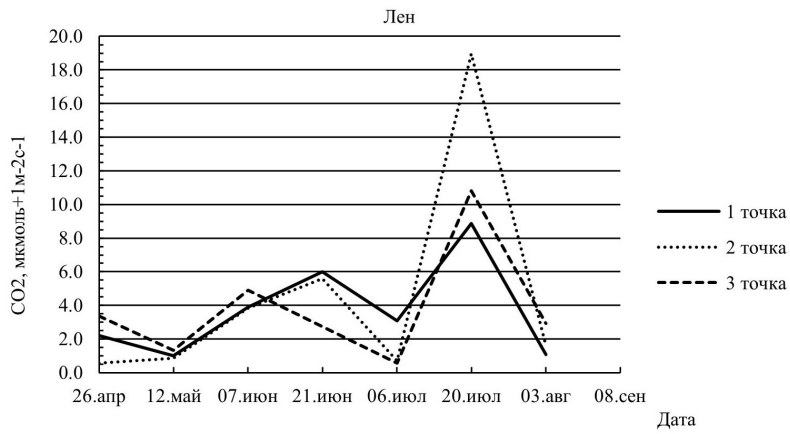
в)

Рис. 3. Изменчивость потоков CO₂, CH₄ за период проведения экспериментов на опытных полях ВНИИМК: а) пшеница, б) соя, в) рапс озимый «Элвис»

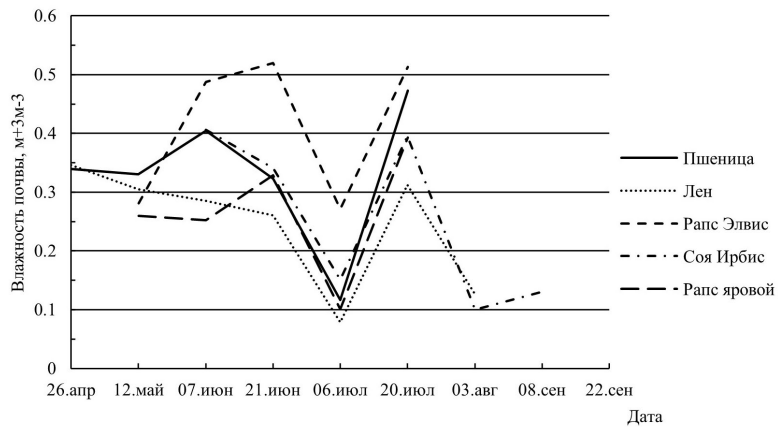
Fig. 3. Variability of CO₂, CH₄ during the period of experiments on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoi: а) wheat, б) soybean, в) winter rapeseed "Elvis"



г)



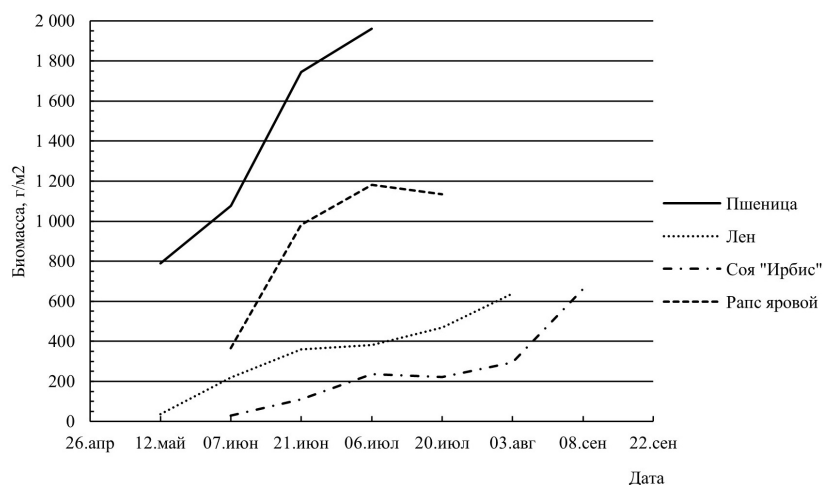
д)



е)

Рис. 3. Изменчивость потоков CO_2 , CH_4 и влажности почвы (е) за период проведения экспериментов на опытных полях ВНИИМК: г) рапс яровой, д) лен

Fig. 3. Variability of CO_2 , CH_4 and soil moisture fluxes (e) during the period of experiments on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit: г) rapeseed spring, д) flax

Рис. 4. Общая сухая масса растений (в пересчете на м²)Fig. 4. Total dry mass of plants (in terms of m²)

Потоки CH₄ на протяжении всего периода измерений изменялись весьма незначительно, всегда оставаясь в отрицательной области значений. В данном случае это означает процесс поглощения метана из атмосферы. При этом ближе к середине периода вегетации (для каждой культуры свой период вегетации) наблюдалось увеличение поглощения метана. На двух культурах, таких как Рапс Элвис и Соя Ирбис, в середине вегетационного периода поток метана в некоторых точках измерений менялся с поглощения на слабое выделение. Но в последующем также преобладал процесс поглощения. Несколько иначе повел себя поток метана на поле со льном. На протяжении всей вегетации поглощение метана на льняном поле увеличивалось.

На общем фоне роста потоков CO₂ отмечается начальный период после посадки культур, когда эмиссия углекислого газа несколько сокращается. Далее, по мере роста культур (рис. 4), развития их корневой системы потоки диоксида углерода возрастают. Выделяются также отмеченные ранее особенности потоков в засушливый и дождливый периоды.

Выявленные закономерности временной изменчивости потоков метана и углекислого газа носят общий характер и не зависят от вида культуры. На общем фоне можно выделить поля с пшеницей и льном, которые отличаются повышенными значениями потоков по сравнению с другими полями. На рис. 5 представлены графики осредненных за весь период наблюдений потоков CO₂ и CH₄ по полям с различными культурами. Из представленных результатов видно, что, потоки CO₂, например, на поле пшеницы больше остальных в 1,5–3 раза, а потоки CH₄ — в 2–4 раза.

По результатам измерений выявлены особенности изменчивости концентрации CO₂ и CH₄ в атмосферном воздухе. Прежде всего, отметим синхронность изменений концентраций для всех исследуемых культур. Поэтому для анализа в настоящей работе представлены осредненные по всем полям концентрации газов (рис. 6) с трендовыми составляющими. Для сравнения на рис. 6 также приведены средние по всем полям потоки.

В трендовых составляющих за исследуемый период выявлен рост концентраций, как диоксида углерода, так и метана. При этом для потоков метана характерен рост процессов поглощения, который должен приводить к снижению его содержания в атмосферном воздухе. Однако этого не наблюдается. Для диоксида углерода потоки за весь период наблюдений остаются практически неизменными (наблюдается несущественный рост эмиссии). На основании этого можно сделать вывод, что на масштабах сезонной изменчивости потоки газов из почвы не оказывают существенного влияния на их концентрацию в прилегающем атмосферном воздухе. Сезонная изменчивость концентрации парниковых газов определяется атмосферными процессами, масштаб которых существенно превышает размеры опытных полей.

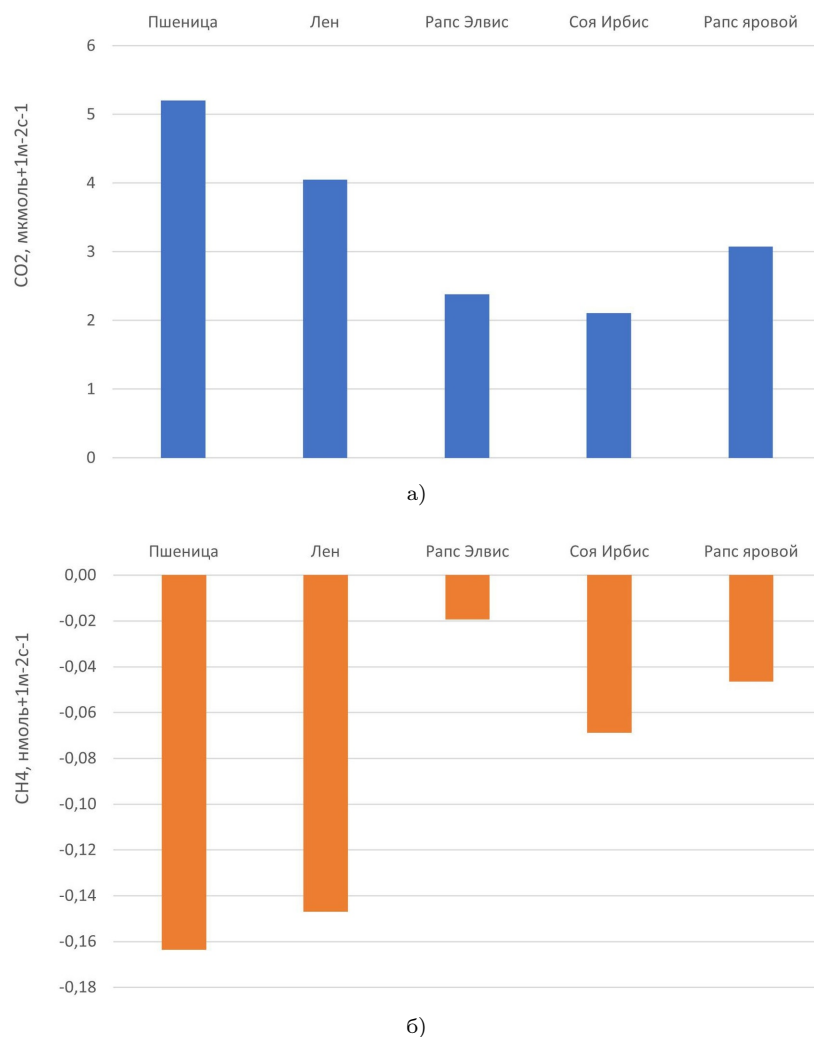


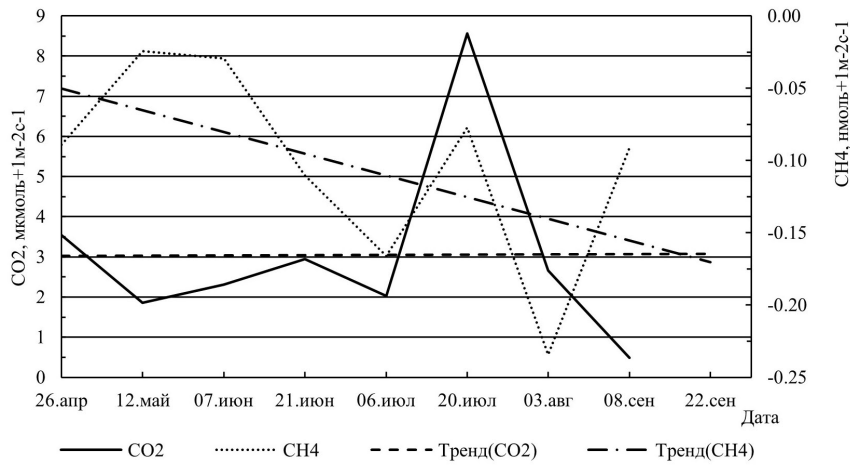
Рис. 5. Осредненные за весь период наблюдений потоки CO₂ (а) и CH₄ (б)

Fig. 5. CO₂ (a) and CH₄ (b) fluxes averaged over the entire observation period

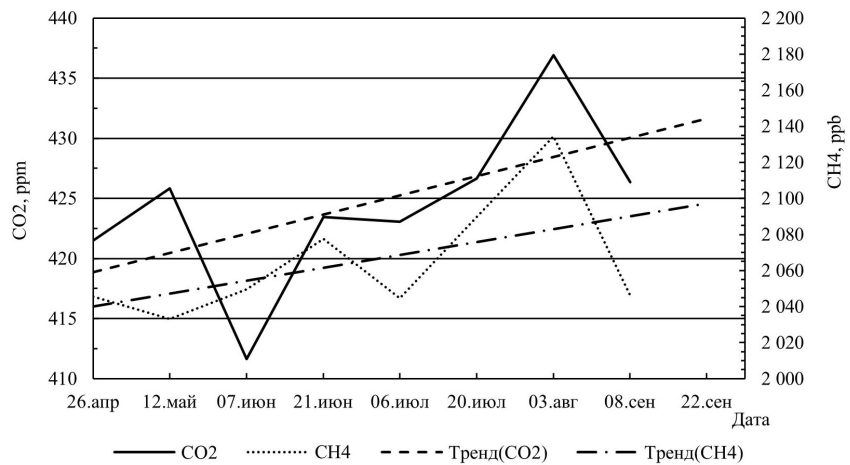
Заклучение

За период с мая по сентябрь 2023 г. выполнен цикл экспериментов на опытных полях ВНИИМК (х. Октябрьский, Краснодарский край), который позволил выявить ряд особенностей временной изменчивости потоков у поверхности почвы и концентраций парниковых газов за вегетационный период различных сельскохозяйственных культур. Помимо измерений потоков и концентраций диоксида углерода и метана фиксировались сопутствующие метеорологические параметры. Производился отбор растений с их корневой системой по стандартной методике с целью определения параметров, характеризующих их состояние в различные фазы вегетации. Выполнен совместный анализ всех полученных материалов эксперимента. По результатам эксперимента сделаны следующие основные выводы.

Развитие растений, их корневой системы оказывает влияние на формирование потоков парниковых газов у поверхности почвы. Потоки CO₂, для которых были характерны процессы эмиссии, возрастали по мере развития растений. Особенность выявлена для начального периода после посадки культур, когда эмиссия CO₂ несколько сократилась, но в дальнейшем снова возрастала. Потоки CH₄ на протяжении всего периода развития растений всегда оставались в отрицательной области, что означает процесс поглощения из атмосферы. Особенности



а)



б)

Рис. 6. Средние по всем полям потоки (а) и концентрации (б) метана и диоксида углерода за весь период наблюдения

Fig. 6. Average fluxes (a) and concentrations (b) of methane and carbon dioxide for the entire observation period

выявлены для периода ближе к середине вегетации, когда наблюдалось некоторое увеличение поглощения метана, что, по всей видимости, было связано с увлажнением почвы.

На потоки газов существенное влияние оказывают метеорологические условия, в частности осадки и связанное с ними увлажнение почвы. В засушливый период потоки газов снижаются. Влажная почва стимулирует активность микроорганизмов, участвующих в биологическом разложении органического вещества, что способствует росту потоков парниковых газов.

Потоки у поверхности почвы локально оказывают влияние на концентрацию газов в атмосферном воздухе. Полученные результаты свидетельствуют, что значения потоков и концентрации изменяются в противофазе. При этом в масштабах сезонной изменчивости (трендовые составляющие) потоки парниковых газов на их концентрацию в воздухе существенного влияния не оказывают. Сезонная изменчивость концентрации связана с атмосферными процессами, масштаб которых существенно превышает размеры опытных полей.

Несмотря на положительные результаты эксперимента, выявлен ряд его недостатков. Прежде всего, отметим, что измерений 2 раза в месяц явно недостаточно для выявления всех особенностей и закономерностей изменчивости климатически активных газов, их связей с метеорологическими и биологическими параметрами. Для устранения пробелов в исследованиях необходима организация непрерывных измерений потоков и концентрации парниковых газов, метеорологических параметров на базе автоматизированных станций наблюдений. Программу эксперимента необходимо расширить на исследования показателей, которые бы характеризовали изменение фотосинтеза в процессе роста растений. В программу необходимо включить химический и микробиологический анализ почвы в точках измерения газообмена.

Литература [References]

1. Алферов, А.М., Блинов, В.Г., Гитарский, М.Л., Грабар, В.А., Замолодчиков, Д.Г., Зинченко, А.В., Иванова, Н.П., Ивахов, В.М., Карабань, Р.Т., Карелин, Д.В., Калюжный, И.Л., Кашин, Ф.В., Конюшков, Д.Е., Коротков, В.Н., Кровотынцев, В.А., Лавров, С.А., Марунич, А.С., Парамонова, Н.Н., Романовская, А.А., Трунов, А.А., Шилкин, А.В., Юзбеков, А.К., *Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах*. Саратов, Амирит, 2017. [Alferov, A.M., Blinov, V.G., Gityarsky, M.L., Grabar, V.A., Zamolodchikov, D.G., Zinchenko, A.V., Ivanova, N.P., Ivakhov, V.M., Karaban, R.T., Karelin, D.V., Kalyuzhny, I.L., Kashin, F.V., Konyushkov, D.E., Korotkov, V.N., Krovotyntsev, V.A., Lavrov, S.A., Marunich, A.S., Paramonova, N.N., Romanovskaya, A.A., Trunov, A.A., Shilkin, A.V., Yuzbekov, A.K., *Monitoring of greenhouse gas flows in natural ecosystems*. Saratov, Amirit, 2017. (in Russian)]
2. Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, № 16 (4), p. 1058, DOI: [10.1029/2001GB001811](https://doi.org/10.1029/2001GB001811)
3. Parkin, T.B., Venterea, R.T., Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. *Sampling Protocols*, 2010, vol. 3-1, pp. 3–39. URL: <http://www.ars.usda.gov/research/GRACEnet>
4. Klein, C., Harvey, M., *Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines*. Ministry for Primary Industries, Wellington, UK, 2015.
5. Dyer, L., Oelbermann, M., and Echarte, L., Soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions during the growing season from temperate maize-soybean intercrops. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2012, vol. 175, pp. 394–400. DOI: [10.1002/jpln.201100167](https://doi.org/10.1002/jpln.201100167)
6. Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Glob. Change Biol.*, 2019, vol. 25, pp. 2530–2543. DOI: [10.1111/gcb.14644](https://doi.org/10.1111/gcb.14644)
7. Wang, Y., Saikawa, E., Avramov, A., Hill, N.S., Agricultural Greenhouse Gas Fluxes Under Different Cover Crop Systems. *Front. Clim.*, 2022, vol. 3, art. 742320. DOI: [10.3389/fclim.2021.742320](https://doi.org/10.3389/fclim.2021.742320)
8. Бурба, Г.Г., Курбатова, Ю.А., Авиллов, В.К., Мамкин, В.В., *Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство*. Москва, ИППЭ им. Северцова РАН, 2016. [Burba, G.G., Kurbatova, Yu.A., Avilov, V.K., Mamkin, V.V., *Turbulent pulsation method. A short practical guide*. Moskva, IPPE im. Severcova RAN, 2016. (in Russian)]
9. Collier, S.M., Ruark, M.D.G., Oates, L.G., Jokela, W.E., Dell, C.J., Measurement of greenhouse gas flux from agricultural soils using static chambers. *J. Vis. Exp.*, 2014, vol. 90, pp. 1–8. DOI: [10.3791/52110](https://doi.org/10.3791/52110)
10. Сатосина, Е.М., Мамадиев, Н.А., Махмудова, Л.Ш., Керимов, И.А., Курбатова, Ю.А., Ольчев, А.В., Карбоновый полигон чеченской республики: IV. Пилотные измерения потоков парниковых газов. *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, 2023, т. 8, № 2, с. 53–62. [Satosina, E.M., Mamadiev, N.A., Makhmudova, L.Sh., Kerimov, I.A., Kurbatova, Yu.A., Olchev, A.V., Carbon test site of the Chechen Republic: IV. Pilot measurements of greenhouse gas fluxes. *Groznenskiy estestvennonauchnyy byulleten*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 53–62. (in Russian)] DOI: [10.25744/genb.2023.97.15.008](https://doi.org/10.25744/genb.2023.97.15.008)
11. Franzluebbers, A.J., Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil Tillage Res.*, 2005, vol. 83, pp. 120–47. DOI: [10.1016/j.still.2005.02.012](https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.012)
12. Steenwerth, K., Belina, K. M., Cover crops and cultivation: impacts on soil n dynamics and microbiological function in a mediterranean vineyard agroecosystem. *Appl. Soil Ecol.*, 2008, vol. 40, pp. 370–380. DOI: [10.1016/j.apsoil.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.06.004)
13. Васенев, В.И., Тембо, А., Самарджич, М., Васенев, В.И., Рыжков, О.В., Морев, Д.В., Васенев, И.И., Анализ основных факторов, влияющих на почвенную эмиссию углекислого газа черноземами

- Стрелецкой степи. *Научное обозрение. Биологические науки*, 2015, № 1, с. 158–159. [Vasenev, V.I., Tembo, A., Samardzhich, M., Vasenev, V.I., Ryzhkov, O.V., Morev, D.V., Vasenev, I.I., Analysis of the main factors influencing on soil carbon dioxide emissions from chernozems of the Streletskaya steppe. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 2015, no. 1, pp. 158–159. (in Russian)]
14. Camarotto, C., Dal Ferro, N., Piccoli, I., Polese, R., Furlan, L., Chiarini, F., Morari F., Conservation agriculture and cover crop practices to regulate water, carbon and nitrogen cycles in the low-lying Venetian plain. *Catena*, 2018, vol. 167, pp. 236–249. DOI: [10.1016/j.catena.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.006)
 15. Федоров, Ю.А., Сухоруков, В.В., Трубник, Р.Г., Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы. *Антропогенная трансформация природной среды*, 2021, т. 7, № 1, с. 6–34. [Fedorov, Yu.A., Sukhorukov, V.V., Trubnik, R.G., Analytical review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. *Antropogennaya transformaciya prirodnoy sredy*, 2021, vol. 7, № 1, pp. 6–34. (in Russian)] DOI: [10.17072/2410-8553-2021-1-6-34](https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34)