

ЭМИССИЯ ЗАКИСИ АЗОТА НА НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НИЗИННОГО ТИПА

Т.Д. Ярмошук, младший научный сотрудник

В.А. Ракович, ведущий научный сотрудник

ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси»

г. Минск, Беларусь

М. Минке, дипломированный ландшафтный эколог

Институт агроклиматологии сон Тютена

А. Тиле, независимый консультант

г. Берлин, Германия

Ключевые слова: нарушенные торфяные месторождения, закись азота, цикл азота, денитрификация, камерно-статический метод.

Введение

Закись азота (N_2O) является третьим по значимости в отношении глобального потепления парниковым газом, его концентрация в атмосфере по состоянию на 2011 год составила 324 ppb [1]. Анализ кернов льда Гренландии и Антарктиды показал, что примерно до 1700 года концентрация N_2O в воздухе составляла 270 – 285 ppb [2, 3], а это значит, что с началом индустриальной эпохи концентрация N_2O в атмосфере Земли увеличилась примерно на 20% [1, 3]. В результате значительного времени пребывания в атмосфере до своего полного распада (более 100 лет) [4] и существенного парникового потенциала в расчете на одну молекулу, в 310 раз превосходящего потенциал углекислого газа [5], закись азота играет важную роль в формировании парникового эффекта. Вклад закиси азота в парниковый эффект оценивается в 5 – 6% от влияния всех парниковых газов [6]. Кроме того, закись азота играет значительную роль в разрушении стратосферного озонового слоя, защищающего поверхность Земли от вредных ультрафиолетовых солнечных лучей [4, 7].

До индустриальной эпохи количество фиксируемого азота бактериями примерно уравнивалось его освобождением из отмершего органического вещества и выделением в виде газообразных соединений в атмосферу [7]. Это обеспечивается взаимосвязанными бактериальными процессами, происходящими в торфяной залежи. Первым из них является аммонификация — микробиологическое преобразование азота органических соединений в ионы аммония или аммиак. Процесс разложения органического вещества протекает в аэробных условиях и сопровождается выделением CO_2 . В аэробных условиях аммоний подвергается процессу нитрификации — преобразованию аммиака в нитритный ион, а затем в нитратный. Первый этап осуществляется бактериями *Nitrosomonas* и др. и заключается в окислении аммиака до HNO_2 через гидроксилламин NH_2OH и гипонитриты (соли азотноватистой кислоты $HO-N=N-OH$) как промежуточные продукты. Второй этап

осуществляется бактериями *Nitrobacter* и др., при этом трехвалентный азот окисляется до пятивалентного [8]. В анаэробных условиях развиваются процессы денитрификации, в результате которых нитраты и нитриты с помощью бактерий денитрификаторов (*Pseudomonas*, *Micrococcus* и др.) восстанавливаются до N_2O или до газообразного молекулярного азота (восстановление закиси азота до молекулярного азота катализируется ферментом редуктазой закиси азота – рустицианином [9]). В итоге молекулярный азот после разнообразных биохимических преобразований вновь поступает в атмосферу.

На территории Беларуси осушено и передано сельскому хозяйству 1068,1 тыс. га торфяных почв [10], из них насчитывается около 290 тыс. га осушенных и практически неиспользуемых торфяных болот, 318,5 тыс. га составляют выработанные и разрабатываемые торфяные месторождения, 78,2 тыс. га относятся к неэффективно используемым сельскохозяйственным землям, эксплуатация которых для нужд сельского хозяйства в настоящее время нерентабельна. Около 250 тыс. га болот подверглись осушению лесомелиоративными системами [11]. Как следствие, в результате повышения аэрации торфяного профиля возросли процессы нитрификации и денитрификации, происходит массовое выделение в атмосферу N_2O и молекулярного азота, нитраты поступают в грунтовые воды, причем не только за счет применения азотных удобрений, но, главным образом, из органического вещества торфяных почв [12], подвергающегося ускоренной дегумификации [13]. Как следствие, отмечается истощение торфяных ресурсов и общий дисбаланс глобального азотного цикла.

Получаемые разными авторами данные количественной оценки годовой продукции соединений азота процессами бактериальной денитрификации и выделение N_2O в атмосферу сильно расходятся: от $(40 - 50) \times 10^6$ до $(350 - 400) \times 10^6$ т/год [7]. В то же время данных по оценке эмиссий закиси азота с белорусских торфяных месторождений практически не имеется. Поэтому полученные данные обладают научной новизной и представляют особую ценность при оценке вклада закиси азота в общий баланс эмиссий парниковых газов в атмосферу.

Целью нашей работы была оценка годового баланса эмиссий закиси азота с нарушенных (осушенных и повторно заболоченного) торфяных месторождений с различным уровнем залегания грунтовых вод, различным землепользованием исследуемой территории и составом произрастающей на ней растительности.

Полевые исследования оценки эмиссий закиси азота из торфяных месторождений в Беларуси начались в 2010 году и впервые проводились в рамках белорусско-немецко-британского проекта «Восстановление торфяников Беларуси и применение концепции их устойчивого управления – снижение воздействия на климат с эффектом для экономики и биоразнообразия» (ВМУ-№.II.C53).

Объекты и методы

В качестве объектов исследования выбраны торфяные месторождения низинного

типа Выгонощанское, кадастровый номер 144, и Берестовец, кадастровый номер 128.

Торфяное месторождение (т.м.) Выгонощанское расположено на территории Ивацевичского, Ляховичского и Ганцевичского районов (мониторинговые площадки V1–V4). По условиям геоморфологического залегания это месторождение относится к водораздельным торфяникам. На его базе в 1968 г. создан гидрологический заказник республиканского значения «Выгонощанское». Район расположения массива – зона активной разгрузки грунтовых вод. Здесь находятся крупные озера Выгоновское и Бобровичское. Детальная разведка торфяного месторождения Выгонощанское произведена в 1971 году [14], в настоящее время землепользователем исследуемой территории является СПК «Телеханы-Агро», специализирующийся на животноводстве и растениеводстве. Натурные измерения парниковых газов проводились на территории Ивацевичского района на окраинной низинной части водораздельного торфяного месторождения, недалеко от деревни Выгонощи, между двумя большими озерами: Выгоновское и Бобровичское. Осушенную часть участков торфяного месторождения окружали перекрытые дренажные каналы с высоким уровнем стояния грунтовых вод [11].

Исследуемый участок т.м. Берестовец (мониторинговая площадка S) расположен на территории Березовского района на границе с Дрогичинским, предварительная разведка торфяного месторождения проводилась в 1965 году, а детальная разведка и осушение в 1975 и 1977 годах [14]. Исследуемый участок торфяного месторождения не был выработан, в настоящее время территория покрыта многолетними травами, экстенсивно используется совхозом «Песковский» в качестве сенокоса. Мониторинговая площадка S находится в непосредственной близости от Республиканского биологического заказника «Споровский», который имеет статус Рамсарских угодий.

Определение эмиссий N_2O осуществляли в трехкратной последовательности с применением камерно-статического метода [10, 15].

Работы по измерению закиси азота на территории т.м. Выгонощанское проводились с 05.04.2012 по 05.04.2013. На территории т.м. Берестовец работы по измерению эмиссий закиси азота были начаты 05.07.2012 и также продолжались ровно год. Разница в сроках начала и окончания измерений связана прежде всего с организационными моментами и поиском наиболее подходящей мониторинговой площадки как по геоморфологическим и физико-химическим показателям, так и с логистической точки зрения.

Рядом с каждой площадкой установлены колодцы для определения уровня грунтовых вод (УГВ) с автоматическими датчиками УГВ, которые непрерывно ежедневно измеряли колебания грунтовых вод в течение всего периода измерений N_2O [16].

Для отбора проб воздуха внутри камеры применяли стеклянные колбы вместимостью 60 мл, которые предварительно были провакуумированы (давление внутри вакуумированной колбы составляло около 4 мбар), и за счет отрицательного давления внутри колбы газ из воздушного пространства в камере поступал в колбу, которая затем закрыва-

лась вентилем [11]. Пробы газов отбирали через каждые 3 – 10 мин, на одно измерение потоков закиси азота использовали 4 – 5 колб. Таким образом, получали поток N_2O за определенный промежуток времени. Далее пробы газов анализировали на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2» («Хроматэк», Йошкар-Ола, Россия) с электронно-захватывающим детектором и пламенно-ионизационным детектором с азотом в качестве газа-носителя. Для калибровки использовались стандартизованные (производство Deuste Steininger GmbH, Германия) смеси газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) в азоте.

При определении потоков закиси азота использовали пакет «flux 0.2-1» [17] для открытого программного обеспечения R, который рассчитывает уровень обмена N_2O в зависимости от линейных изменений концентраций парниковых газов в воздушном пространстве камеры в течение времени экспозиции [17, 18].

Температуры воды и воздуха измерялись с применением электронных термометров Volcraft Der1R (Германия). Помимо этого, изменение температур непрерывно фиксировались двумя метеорологическими станциями фирмы Campbell Scientific Ltd (Германия), которые были установлены недалеко от места полевых измерений закиси азота. Также фиксировались значения температуры почвы на глубинах 2 и 5 см, температуры окружающей среды, атмосферного давления, атмосферных осадков, и каждые 30 минут данные записывались на устройстве ввода и хранения данных (CR Datalogger).

Глубину торфа торфяных месторождений определяли торфоотборочным буром ТБГ-66. Степень разложения определяли микроскопическим методом [19]. Для элементного анализа торфа и биомассы использовали анализатор CHNOS марки Vario EL III. Значения pH измеряли карманным pH-метром Hanna Combo HI 98130 в 1%-ном растворе KCl, калибровка pH-метра осуществлялась буферными растворами 7,01 и 4,01.

Геоботанические описания растительности были выполнены в соответствии со шкалами покрытия по Peet и др. [20].

Результаты. Все исследуемые мониторинговые площадки расположены в Полесской низменности, однако они имеют существенные геоморфологические и физико-химические различия торфа. В таблице 1 представлены результаты C/N анализа, значений pH, степени разложения торфа и зольности (рассматривается верхний слой торфа).

Из данных табл. 1 видно, что глубина торфяной залежи на мониторинговых площадках колеблется от 100 до 180 см, реакция среды торфа на всех площадках слабокислая, на т.м. Берестовец – ближе к среднекислой [21]. По наличию питательных веществ все исследуемые участки относятся к эвтрофным торфяным месторождениям. Зольность торфа т.м. Выгонощанское низкая (от 3 до 4%), на мониторинговой площадке т.м. Берестовец зольность гораздо выше (23,3%). Возможно, это связано с тем, что при прокладке мелиоративных каналов торф и подстилающие породы отгружались непосредственно на исследуемую территорию. Такой вывод был сделан исходя из того, что исследуемая мониторинговая площадка находится на расстоянии 110 м от магистрального канала и около

40 м от валовых. В то же время ближе к каналам зольность верхних 25 см составляла 91%, а уже на глубине 30–35 см зольность равнялась 20,92%. Отличительной чертой торфа на мониторинговой площадке т.м. Берестовец является более низкое содержание общего азота и общего углерода в сравнении со всеми мониторинговыми площадками т.м. Выгонощанское.

Таблица 1 – Физико-химические и геоморфологические характеристики торфа

Наименование	V1	V2	V3	V4	S
Координаты площадки	52°38'0.90" с.ш., 25°49'28.50" в.д.		52°37'51.96" с.ш., 25°50'21.96" в.д.		52°22'50.58" с.ш., 25°12'14.34" в.д.
Глубина торфяной залежи, см	150	150	100	100	180
pH торфа	5,21±0,10*	5,10±0,10	5,17±0,04	4,97±0,04	4,41±0,04
Зольность, %	3,06±0,16	3,06±0,16	4,17±0,14	4,17±0,14	23,29±2,64
Содержание углерода в торфе, %	40,35±0,23	40,75±0,66	40,64±0,50	41,91±0,19	37,98±2,32
Содержание азота в торфе, %	3,48±0,05	3,47±0,08	3,46±0,06	3,35±0,08	2,62±0,11
Соотношение C/N	11,59±0,17	11,86±0,45	12,02±0,38	12,53±0,32	14,51±0,99
Вид торфа	Осоковый	Осоковый	Тростниковый	Тростниковый	Тростниковый
Степень разложения торфа, %	30	30	35	35	40

*здесь и далее в таблице 1 ± – стандартное отклонение

Площадки V1–V2 представляют собой находящиеся под естественным восстановлением территории. Неэффективное функционирование расположенных рядом мелиоративных каналов обеспечило повторное заболачивание территории. Из растительных сообществ преобладают *Phalaris arundinacea* и *Bidens tripartita*, в незначительной степени присутствуют осоки *Carex lasiocarpa* и *Carex ovalis* – виды, типичные для переувлажненных территорий. Также присутствует мох брахитециум полевой (*Brachythecium campestre*), который обычно встречается в лесах. По наличию питательных веществ торфяное месторождение относится к эвтрофному. Реакция среды торфа слабокислая [21] (pH=5,1 – 5,2), зольность торфа невысокая (около 3 %). Площадки V2 и V1 по общетехническим свойствам образцов торфа практически идентичны. Это связано с близким расположением площадок относительно друг друга. В геоботаническом плане на площадке V2 отсутствуют такие виды, как *Potentilla anserina* и *Carex ovalis*. Отличительной чертой площадок являет-

ся то, что на V1 раз в год производилось кошение растительной биомассы, а на V2 – не производилось.

Примерно в двух километрах восточнее площадок V1–V2 расположены мониторинговые площадки V3 и V4. Обе площадки представляют собой торфяную залежь с пониженным уровнем грунтовых вод, территория используется для выпаса крупного рогатого скота. Несмотря на то, что площадки V3 и V4 расположены в метре друг от друга, они существенно отличаются по ботаническому составу растительности. Если на площадке V4 преобладают луговые травы, такие, как тимopheевка *Phleum pratense*, мятлики *Poa pratensis* и пырей *Elytrigia repens*, то площадка V3 имеет высокую степень покрытия мезофитом *Juncus effusus*, образующим плотные дернины, которые занимают 70–90 % площади установленных на мониторинговую площадку рамок. Помимо ситника на площадке присутствует пырей *Elytrigia repens* и разновидности мятликов (*Poa spp.*).

Исследуемая территория торфяного месторождения Берестовец (площадка S) представлена луговым разнотравьем. Доминирующими являются такие виды, как пырей *Elytrigia repens*, в незначительной степени присутствует персикария *Persicaria spp.* и мелколестник *Erigeron canadensis*. Территория используется в качестве сенокоса, поэтому, одновременно с работами совхоза по кошению территории нами было произведено кошение биомассы с последующим ее выносом (табл. 2).

Таблица 2. – Вынос углерода и азота из мониторинговых площадок путем кошения биомассы

Площадка, дата кошения	Абсолютно сухой вес биомассы, г/м ²	Количество углерода в биомассе, %	Количество азота в биомассе, %	Соотношение C/N	Пересчет на чистый азот по абсолютно сухому весу, г/м ²	Пересчет на чистый углерод по абсолютно сухому весу, г/м ²
V1.1 04.12.12	661,80	47,77±0,72*	1,51±0,04	31,64±0,86	9,99	316,13
V1.2 04.12.12	562,86	47,43±0,68	1,36±0,11	34,99±2,23	7,65	266,96
V1.3 04.12.12	596,53	47,90±0,87	1,65±0,08	29,07±1,29	9,84	285,74
V3.1 07.06.12	227,55	46,64	3,18	14,67	7,24	106,13
V3.2 07.06.12	283,27	46,65	3,22	14,48	9,12	132,15
V3.3 07.06.12	143,06	46,31	3,42	13,54	4,89	66,25
S1 23.08.12	341,22	44,00±0,08	2,20±2,21	20,10±1,99	7,51	150,14
S2 23.08.12	264,50	43,69±0,16	2,04±0,09	21,43±0,96	5,40	115,56
S3 23.08.12	209,39	44,11±4,47	2,20±0,06	20,03±0,45	4,61	92,36

* здесь и далее в таблице 2 ± – стандартное отклонение

Из таблицы 2 видно, что содержание азота в биомассе на мониторинговой площадке V3 выше, чем на других скашиваемых площадках. В то же время, вынос чистого азота с биомассой растений с площадки V3 в среднем составил $7,08 \text{ г/м}^2 N_{\text{общ}}$ на абсолютно сухой вес биомассы, с площадки V1 – $9,16 \text{ г/м}^2$ на абсолютно сухой вес биомассы, с площадки S – $5,84 \text{ г/м}^2$ на вес абсолютно сухой биомассы.

На рис. 1 представлены результаты полевых измерений закиси азота по всем мониторинговым площадкам, данные измерения залегания уровня грунтовых вод и атмосферных осадков, а также наиболее коррелирующих метеорологических показателей.

Рисунок 1а отражает динамику потоков N_2O в течение годовых измерений. Наиболее высокие эмиссии N_2O наблюдались на площадках V3–V4 и S в ноябре (около $0,9 \text{ мг } N_2O-N \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$). На площадках V1 и V2 некоторое увеличение эмиссий закиси азота наблюдалось в весенне-летний период.

На рисунке 1б показана динамика колебаний УГВ и количество атмосферных осадков. Заметна общая сезонная динамика изменения УГВ по всем мониторинговым площадкам. На т.м. Выгонощанское отмечалось большее количество атмосферных осадков, что нашло свое отражение во влиянии на повышение уровня грунтовых вод, особенно это заметно в период таяния снега весной 2013 года. В целом, среднегодовой уровень грунтовых вод на т.м. Выгонощанское для площадок V1–V2 составил $-9,45 \text{ см}$, для площадок V3–V4 составил $-32,73 \text{ см}$, на т.м. Берестовец – $-50,73 \text{ см}$. При этом, средний уровень грунтовых вод т.м. Выгонощанское для площадок V1–V2 в летний период составил $-22,80 \text{ см}$, осенью поднялся до $-19,34 \text{ см}$, а зимой и весной (весна 2012 и 2013 года за период полевых измерений) в среднем находился на уровне $-1,82$ и $-1,93 \text{ см}$ соответственно. На площадках V3–V4 в летний период средний уровень грунтовых вод находился на уровне $-58,39 \text{ см}$, осенью поднялся до $-41,55 \text{ см}$, в зимний период средний УГВ составлял $-11,48 \text{ см}$, а весной (весна 2012 и 2013 года за период полевых измерений) опустился на уровень $-29,01 \text{ см}$. На торфяном месторождении Берестовец в летний период (лето 2012 и 2013 года за период полевых измерений) средний уровень грунтовых вод составил $-57,83 \text{ см}$, осенью – $69,42 \text{ см}$, в зимний период – $43,79 \text{ см}$, а весной – $31,52 \text{ см}$.

Рисунок 1в отражает тесную зависимость температуры почвы на глубине 2 и 5 см от температуры окружающей среды. Также заметна общая тенденция к наступлению оттепелей и заморозков на территории Полесской низменности по данным двух метеорологических станций.

Выполнив интерполяцию потоков закиси азота на весь год, мы рассчитали эмиссии N_2O в граммах азота с квадратного метра в год, также пересчитали эти значения на килограмм чистого N_2O с гектара в год и в тоннах CO_2 -эквивалента. Результаты расчетов представлены в табл.3.

Из табл. 3 видно, что наибольшие эмиссии закиси азота наблюдались на т.м. Берестовец. На площадках V3–V4 эмиссии N_2O находились на достаточно высоком уровне и

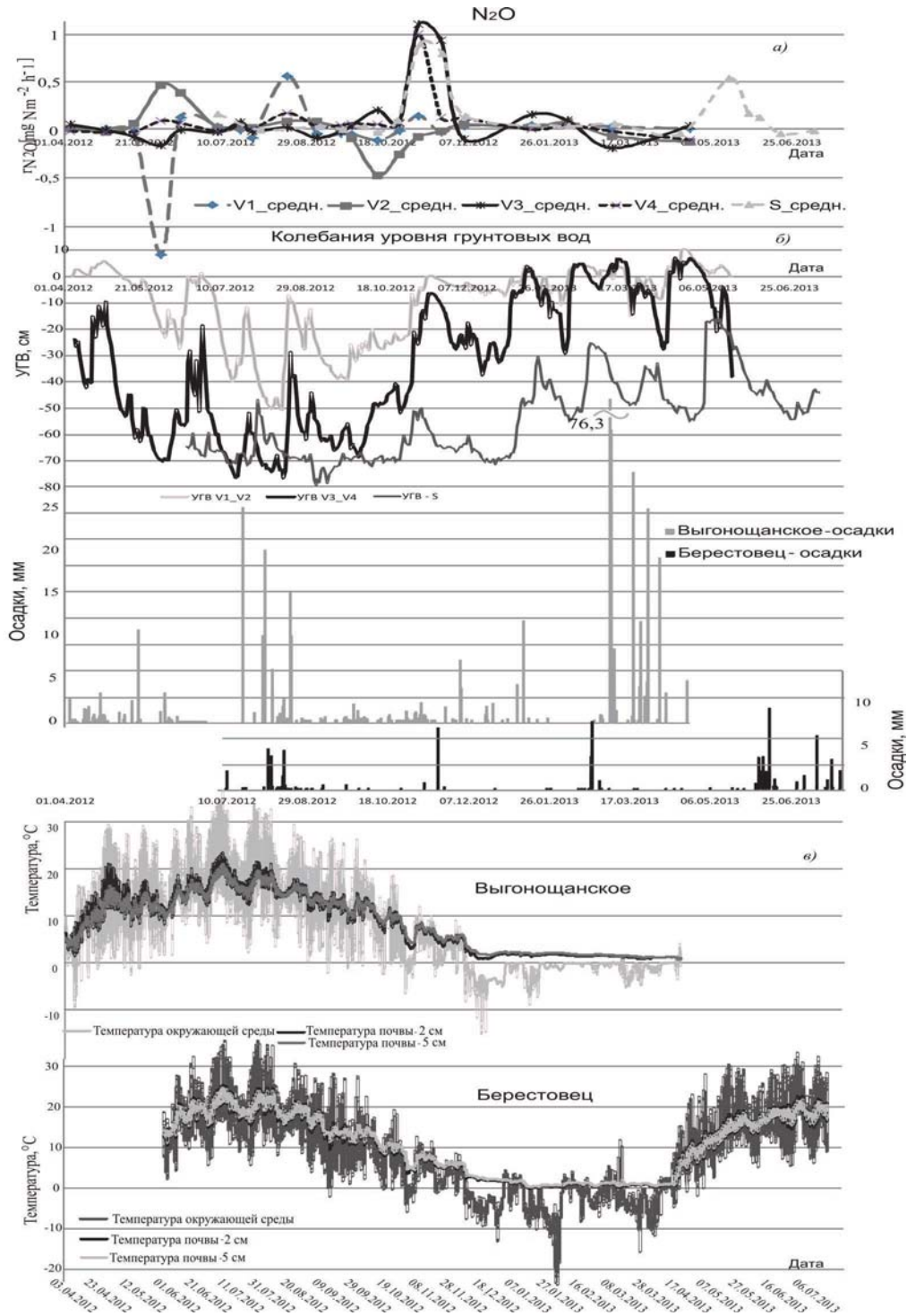


Рисунок 1 – Результаты полевых измерений закиси азота (а), уровня залегания грунтовых вод, атмосферных осадков (б) и температурных показателей (в)

имели значения около 2,6 т N₂O [CO₂-эквивалент], наименьшие эмиссии закиси азота наблюдались на площадке V2, мониторинговая площадка V1 была стоком закиси азота.

Таблица 3 – Сумма потоков закиси азота за год измерений

Название площадки	Эмиссии закиси азота		
	N ₂ O, г N м ⁻² год ⁻¹	N ₂ O, кг N га ⁻¹ год ⁻¹	N ₂ O [CO ₂ -эквивалент], т·га ⁻¹ год ⁻¹
V1	-0,03 ± 1,61*	-0,30	-0,15
V2	0,14 ± 1,65	1,40	0,68
V3	0,53 ± 1,48	5,30	2,58
V4	0,54 ± 0,67	5,40	2,63
S	1,01 ± 0,90	10,10	4,92

Таблица 3 – Сумма потоков закиси азота за год измерений

* здесь и далее в таблице 3 ± – стандартное отклонение

Примечание. Величина относительного потенциала глобального потепления, используемая для перевода N₂O в CO₂-экв, использовалась по данным [5].

По данным ведущих мировых исследователей [22], при измерениях закиси азота на осушенных торфяных месторождениях умеренной климатической зоны, были в среднем получены следующие результаты: эмиссии N₂O с осушенных торфяников, на которых произрастают многолетние травы, при недостатке питательных веществ, составили 4,3 кг N₂O –N / га·год [23, 24], при глубоком осушении и избытке питательных веществ эмиссии закиси азота в среднем составляли 8,2 кг N₂O–N / га·год [23, 25], при неглубоком осушении эмиссии N₂O в среднем составляли 1,6 кг N₂O–N / га·год [23, 26]. В то же время, эмиссии закиси азота с повторно заболоченных торфяных месторождений близки к нулю [24, 27]. Полученные нами результаты полевых измерений закиси азота достаточно точно коррелируют с мировым опытом в этой области исследований, разница в полученных результатах связана с различиями в общетехнических и физико-химических характеристиках торфа, различиях в сроках осушения и окультуривания и т.п.

В весенний период значительных колебаний потоков закиси азота не наблюдалось, на мониторинговой площадке V1 отмечено существенное поглощение N₂O в конце мая 2012 года. Существуют мнения, что объяснением сезонных колебаний закиси азота является смешивание весной N₂O-бедного стратосферного воздуха и N₂O-насыщенного тропосферного воздуха [28, 29]. Наши данные подтверждают это явление, однако, камерные методы позволяют измерять потоки газов прежде всего в приземном слое, в то время как гораздо более дорогие методики, к примеру, такие, как башни Эдди коварианс [30, 31] или авиационные исследования в смешанном слое [32, 33], могли бы зафиксировать переход закиси азота в стратосферу.

Помимо стратосферного переноса N₂O, в мировой практике имеется много экспери-

ментальных данных, подтверждающих поглощение микроорганизмами почвы, продуцирующими N_2O -редуктазу, атмосферной закиси азота [34, 35]. Данные [35] показывают, что из профиля почвы глубже 10 и 20 см выделялось соответственно в 1,4–3,6 и 3,5–4,4 раза больше $N-N_2O$, чем с поверхности почвы. Следовательно, значительное количество закиси азота не доходит до границы раздела почвы и атмосферы, подвергаясь биотической или абиотической реутилизации на глубине [35]. При этом следует отметить, что при увеличении значения кислотности существенно снижается активность N_2O -редуктазы, а это в свою очередь сопровождается ростом доли закиси азота в продуктах денитрификации [36], что мы и наблюдали после оценки годовых эмиссий закиси азота с торфяных месторождений.

Закись азота является конечным продуктом глобального цикла азота в биосфере [9]. И соответственно, на денитрифицирующую активность микроорганизмов оказывают влияние как факторы внешней среды, так и наличие продуктов аммонификации и нитрификации как среды для протекания процессов денитрификации.

В верхних слоях торфяных залежей низинного типа по данным [37] высоко содержание аммонифицирующих бактерий, которые активно осуществляют минерализацию органического азота. При этом, азотфиксирующая активность микроорганизмов существенно выше вблизи и на поверхности растений, чем в почвах без растений [38]. Это связано с тем, что существенное значение в круговороте азота имеет поглощение растениями азота из почвы через корневую систему. Этот поток оценивается в 1,2–3,5 ГтN/год [7, 39], при этом с опадом в торфяную залежь возвращается 72–94% азота [40]. Наиболее мощной корневой системой доминирующих видов мониторинговых площадок является корневая система канареечника тростникового, она проникает в почву на глубину 2,5–3,5 м [41], однако из-за переувлажнения корневой части на площадках V1–V2 высокой скорости образования закиси азота не отмечено. При этом, скорость усвоения азота корнями растений существенно зависит от температурного режима почвы: при температурах ниже 5–6°C поглощение соединений азота корнями растений резко уменьшается [42], соответственно и падает активность денитрифицирующих бактерий [36]. Из рисунка 1 видно, что во время, когда температура была ниже 5–6°C, потоки закиси азота оставались близкими к нулю.

Согласно [37], при колебании уровня грунтовых вод торфяных почв резко меняется гидротермический и воздушный режим среды обитания микроорганизмов и происходит существенная перестройка количественного состава нитрификаторов. Также по мере снижения концентрации кислорода в почвенном воздухе денитрифицирующая активность возрастает, приближаясь к максимальному уровню при содержании кислорода около 0,5% [37]. На незаболоченных территориях процесс денитрификации объясняется наличием анаэробных микрозон или возникновением локального анаэробнозиса вследствие быстрого уменьшения кислорода при интенсивном разложении органического вещества [43]. Исходя из данных среднегодового залегания уровня грунтовых вод по всем мониторинговым

площадкам, на всех исследуемых территориях нитрифицирующие микроорганизмы должны быть представлены бедно. Однако, проанализировав рисунок 1б, заметно существенное понижение уровня грунтовых вод в летний период. Так, на т.м. Берестовец в летний период грунтовые воды находились на уровне -70 – -80 см, на площадках V3–V4 уровень грунтовых вод находился в пределах -60 – -70 см. На площадках V1–V2 в летний период наблюдались перепады УГВ от 0 до -50. Таким образом, из всех территорий, мониторинговая площадка на т.м. Берестовец согласно данным [37] должна быть наиболее богата нитрифицирующими бактериями. Площадки V3–V4 по наличию нитрификаторов беднее, на площадках V1–V2 содержание нитрифицирующих микроорганизмов лимитируется резкими перепадами уровня грунтовых вод на фоне общей гидрологической переувлажненности. Однако, в летний период существенных эмиссий N_2O с торфяных месторождений с пониженным уровнем залегания грунтовых вод не наблюдалось. Более высокие эмиссии замечены на площадках V1–V2, на которых наблюдались перепады УГВ. Возможно, это связано с увеличением содержания почвенной влаги, и при достижении наиболее благоприятных условий для денитрифицирующих микроорганизмов наблюдались выбросы закиси азота. При этом, изучение соотношения окиси и закиси азота в продуктах денитрификации показало, что при большей влажности увеличивается эмиссия N_2O , а при меньшей – NO [44]. Переменное высушивание/переувлажнение почвы, как и наблюдалось на площадках V1–V2, стимулирует эмиссию как NO , так и N_2O [44]. Помимо этого, авторами [45] отмечены наиболее высокие эмиссии N_2O на осушенных участках торфяного месторождения в ноябре и декабре – в период наиболее существенных перепадов УГВ (от -10 до -40 см).

Согласно [37], уровень ферментативной активности торфяных почв с преобладанием осоки в ботаническом составе по ряду показателей выше, чем в тростниковом торфе. Так, в осоковом торфе более высоко процентное содержание общей биомассы грибов и бактерий, а также представителей различных трофических групп микрофлоры в расчете на органическое вещество, что обеспечивает их более высокую доступность микроорганизмам [37], и поэтому эмиссии закиси азота с площадок с преобладанием осокового торфа должны быть выше, чем площадок с преобладанием тростникового торфа. О существенных различиях активности микробиологических процессов торфяников разного ботанического состава можно судить по данным об интенсивности разрушения целлюлозы, дыхании почвы, ее способности к нитрификации и т.п. По ботаническому составу торф на мониторинговых площадках V1–V2 осоковый, а на площадках V3–V4 и S – тростниковый, поэтому с этой позиции на мониторинговых площадках V1–V2 эмиссии закиси азота могли быть гораздо выше, однако в более значительной степени на обратный результат повлияла степень переувлажненности торфяной залежи.

Окультуривание торфяных месторождений низинного типа вызывает существенное увеличение количества нитрифицирующих микроорганизмов, которое зависит как от срока окультуренности, так и от мощности торфяной залежи. Окультуривание маломощных тор-

фяных месторождений, по сравнению со средне- и высокомоощными, приводит к значительному увеличению численности и активности микроорганизмов [37]. В маломощных торфяных залежах значительно выше общая численность микроорганизмов, использующих минеральный азот, актиномицетов, нитрифицирующих бактерий, т. е. той части микрофлоры, которая активно осуществляет биологическую минерализацию азотсодержащих органических соединений торфа [37]. С этой точки зрения из всех мониторинговых площадок самыми маломощными являются площадки V3–V4, а самой мощной – площадка S. Следовательно, наиболее активно процессы аммонификации и нитрификации должны протекать на площадках V3–V4. На площадке S эти процессы скорее всего замедляются, в то же время происходят дополнительные потери азота вследствие его поступления в грунтовые воды.

При увеличении срока сельскохозяйственного освоения наблюдается изменение соотношения между гуминовыми и фульвокислотами, накопленные гумусовые вещества и битумы подвергаются разрушению, наблюдается снижение как валовых запасов азота, так и его легкогидролизруемой фракции [46]. В целом, количество органического вещества снижается, происходит деградация торфяной залежи. К примеру, если в почве, используемой в культуре 20 лет, численность нитрифицирующих микроорганизмов была в 7 раз больше, чем в целинной, то в почве, находящейся в культуре 35 лет, – только в 1,7 раза [37]. А это означает, что количество нитратов при использовании почвы более 35 лет резко сокращается. Детальная разведка обоих торфяных месторождений производилась в 70-х гг. прошлого столетия, поэтому, с точки зрения окультуренности существенных различий в численности аммонифицирующих и нитрифицирующих бактерий нет. Однако, площадки V3–V4 в настоящее время используются для выпаса крупного рогатого скота, а площадка S используется в качестве сенокоса, таким образом с этих территорий регулярно производится вынос питательных веществ с биомассой растений (табл. 2), а площадки V1–V2 выбыли из эксплуатации и питательные вещества остаются на поверхности торфяной залежи. В то же время имитационное кошение биомассы на площадке V1 в зимний период существенного влияния на цикл азота не оказало. Это связано со снижением содержания азота и углерода в растениях осенью за счет сокращения белковых тел вследствие разрушения азотсодержащих соединений (хлорофилла, нуклеиновых кислот и др.) [47], благодаря понижению соотношения C:N осенью увеличивается скорость разложения растительных остатков [40]. Более низкое содержание азота в растительной биомассе мониторинговой площадки V1 подтверждают данные таблицы 2, однако в пересчете на абсолютно сухой вес биомассы вынос общего азота оказался существенным. Возможно, для количественной оценки потоков закиси азота при условии кошения биомассы с последующим ее удалением, требуется более длительная интенсивная эксплуатация торфяного месторождения.

По данным [37], нитрификация в сильно разложившемся торфе проходит несколько

медленнее, чем в среднеразложившемся. Это связано с тем, что с ростом степени разложения возрастает выход фенолосодержащих гуминовых веществ и водорастворимых фульвокислот, которые тормозят деятельность микроорганизмов [47]. С учетом этого, на мониторинговых площадках нитрификация должна увеличиваться в направлении $S > V3 - V4 > V1 - V2$, что подтверждает полученные нами данные по увеличению выделения N_2O в том же направлении.

Проанализировав результаты табл. 3 и данные рис. 1, можно сделать следующие **выводы**. Суммарные средние эмиссии N_2O с осушенных торфяных месторождений, находящихся под многолетними травами выше, чем с выбывшего из эксплуатации и находящегося под естественным заболачиванием торфяного месторождения. Наибольшие эмиссии закиси азота наблюдались на торфяном месторождении с наиболее глубоким уровнем залегания грунтовых вод; отмечается увеличение эмиссий закиси азота в ноябре в условиях частых колебаний влажности торфяной почвы и умеренно высоких температурах почвы и окружающей среды (около 10 °C).

Результаты исследования закиси азота с торфяных месторождений с различными физико-химическими и геоморфологическими характеристиками позволяют оценить вклад N_2O в общий круговорот парниковых газов от природных источников в условиях Беларуси. Полученные результаты не противоречат результатам мировых исследователей и пополняют научную базу в этой области исследований.

Работы по определению эмиссий закиси азота в полевых условиях осуществлялись в рамках белорусско-немецко-британского проекта «Восстановление торфяников Беларуси и применение концепции их устойчивого управления – снижение воздействия на климат с эффектом для экономики и биоразнообразия», осуществляющего деятельность при финансовой поддержке Федерального министерства охраны природы ФРГ, Германского банка развития (KfW), «Центра международной миграции и развития» (CIM, Германия). Научная и практическая работа проекта осуществлялась в ходе международного сотрудничества организаций, таких, как «Британское Королевское общество по охране птиц» (RSPB, Англия), «Фонд имени Михаеля Зуккова» (Германия), ГА «Ахова птушак Бацькаўшчыны», при поддержке Программы развития Организации Объединенных Наций в Беларуси (ПРООН) и Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Библиографический список

1. МГЭИК, 2013 г.: Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Т.Д. Стокера и др. // Швейцария, 2013. – 28 с.
2. Stauffer, B., Neftel, A. What have we learned from the ice cores about the atmospheric changes in the concentrations of nitrous oxide and other trace species // The changing atmosphere / Eds F.S.Rowland, I.S.Isaken. Chichester, 1988. P.63–77.
3. World Meteorological Organization / A specialized agency of the United Nations – BMO-№ 934 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.wmo.int/qaw/>. - Date of access: 18.04.2014.

4. Голубятников, Л.Л., Мохов, И.И., Елисеев, А.В. Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 255–270.
5. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing / Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2007. P. 129–234.
6. Кудеяров, В.Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота // Почвоведение. 1999. № 8. С. 988–998.
7. Добровольский, В. В. Основы биогеохимии. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 400 с.
8. Орлов, Д.С. Химия почв: Учебник /Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова.— М.: Высш. шк., 2005. — 558 с.
9. Степанов, А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. - М.: ГЕОС, 2011.-192с.
10. Бамбалов, Н.Н. Роль болот в биосфере / Н.Н. Бамбалов, В.А. Ракович. – Мн.: Бел. наука, 2005. – 285 с.
11. Ярмошук, Т.Д., Ракович, В.А., Минке, М., Тиле, А. Эмиссии метана на торфяном месторождении низинного типа «Выгонощанское» при различном уровне грунтовых вод / Природопользование №24, Минск, 2013. С. 43 – 51.
12. Зименко, Т. Г. Деятельность микроорганизмов и минерализации органического вещества в торфяных почвах с разным уровнем грунтовых вод.—Изв. АН СССР. Сер. биол., 1972, № 6. – С. 846— 854.
13. Умаров, М.М., Кураков, А.В., Степанов, А.Л. Микробиологическая трансформация азота в почве. - М.: ГЕОС, 2007. – 138 с.
14. Кадастровый справочник «Торфяной фонд Белорусской ССР» – Минск, 1979.
15. Drösler, M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis/ Technischen Universität München.- München. – 2005. – 182 p.
16. Тановицкая, Н.И., Ратникова, О.Н., Навоша Ю.Ю. Создание автоматизированной системы наблюдения за гидрологическим режимом на болоте Ельня / Природопользование №23, Минск, - 2013. С. 56–62.
17. Jurasinski, G., Koebsch, F. Flux: flux rate calculation from dynamic closed chamber measurements. R package version 0.1-4, Rostock, 2011. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://cran.r-project.org/web/packages/flux>. - Date of access: 14.03.2014.
18. Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH₄ and CO₂ / M. Hahn-Schöfl, D. Zak, M. Minke, J. Gelbrecht, J. Augustin, A. Freibauer // *Biogeosciences*, №8, 2011. P. 1539–1550.
19. Пьявченко, Н.И. Степень разложения торфа и методы ее определения / Н.И. Пьявченко // – Красноярск, 1963. – 56 с.
20. A flexible, multipurpose method for recording vegetation composition and structure / R.K. Peet, T.R. Wentworth, P.S. White // *Castanea*, №63, 1998. P. 262-274.
21. Пьявченко, Н. И. Использование заболоченных земель в сельском хозяйстве / Издательство академии наук СССР. М., 1954. – 60 с.
22. IPCC 2014, 2013 – Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland. – 354 p.
23. Drösler, M., Adelman, W., Augustin, J., Bergman, L., Beyer, C., Chojnicki, B., Förster, Ch., Freibauer, A., Giebels, M., Görlitz, S., Höper, H., Kantelhardt, J., Liebersbach, H., Hahn-Schöfl, M., Minke, M., Petschow, U., Pfadenhauer, J., Schaller, L., Schägner, Ph., Sommer, M., Thuille, A. & Wehrhan, M. Klimaschutz durch Moorschutz. Schlussbericht des BMBF-Vorhabens: Klimaschutz - Moornutzungsstrategien 2006–2010. – Klimazwei, 2013. – 191 p.
24. Kasimir-Klemetsson Å., Weslien P. & Klemetsson L. Methane and nitrous oxide fluxes from a farmed Swedish Histosol. *European Journal of Soil Science*, vol. 60, 2009. – P. 321–331.

25. Augustin, J., Merbach, W., Käding, H., Schmidt, W. & Schalitz, G. Lachgas- und Methanemission aus degradierten Niedermoorstandorten Nordostdeutschlands unter dem Einfluß unterschiedlicher Bewirtschaftung. In: Von den Ressourcen zum Recycling, ed. Alfred-Wegener-Stiftung, Germany: Ernst & Sohn., Berlin, 1996. – P. 131–139.
26. Jacobs, C.M.J., Moors, E.J. & van der Bolt F.J.E. Invloed van waterbeheer op gekoppelde broeikasgasemissies in het veenweidegebied by ROC Zegveld. Alterra-rapport 840. Alterra, Wageningen, The Netherlands, 2003 (in Dutch). – 93 p.
27. Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärtsch, S., Dubovik, D., Liashchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A. & Joosten, H. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, № 674, 2011. – P. 67–89.
28. Liao, T., Camp, C.D., Yung, Y.L. The seasonal cycle of N₂O // *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L17108, 2004.
29. Morgan, C. G., M. Allen, M. C. Liang, R.-L. Shia, G. A. Blake, Yung Y. L. Isotopic fractionation of nitrous oxide in the stratosphere: Comparison between model and observations, *J.Geophys.Res.*, 109, 2004.– D04305, doi:10.1029/2003JD003402.
30. Ольчев, А.В., Курбатова, Ю.А., Варлагин, А.В., Выгодская, Н.Н. Оценка вертикальной адвекции при измерении потоков CO₂ над лесом с помощью метода вихревой ковариации // Третья международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007: Тезисы докладов. – Пущино, 2007. С. – 56-57.
31. Глаголев, М.В., Суворов, Г.Г. Эмиссия метана болотными почвами средней тайги западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) / Доклады по экологическому почвоведению. 2007, № 2, вып.6. – С. 90–162.
32. Ваганов, Е.А., Ведрова, Э.Ф., Верховец, С.В., Ефремов, С.П., Ефремова, Т.Т., Круглов, В.Б., Онучин, А.А., Сухинин, А.И., Шибистова, О.Б. Леса и ботоа Сибири в глобальном цикле углерода // *Сибирский экологический журнал*, 4, 2005. – С. 631–649.
33. Biraud, S. C., Torn, M. S., Smith, J. R., Sweeney, C., Riley, W. J., Tans, P. P. A multi-year record of airborne CO₂ observations in the US Southern Great Plains // *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2013. – P. 751–763.
34. Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.-L., Bernoux, M. Soils, a sink for N₂O. A review // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. № 1. P. 1–17.
35. Семенов, М. В., Кравченко, И. К., Семенов, В. М., Кузнецова, Т. В., Дулов, Л. Е., Удальцов, С. Н., Степанов, А. Л. Потоки диоксида углерода, метана и закиси азота в почвах катены правобережья р. Ока (Московская область) *Почвоведение*, № 5, 2010. – С. 582–590.
36. Костина, Н.В., Степанов, А.Л., Умаров, М.М. Влияние экологических факторов на восстановление закиси азота в почвах разных типов // *Почвоведение*. – 1995. - №6. – С. 725–731.
37. Зименко, Т. Г., Самсонова, А. С., Мисник А. Г., Гаврилкина, Н. В., Филипшанова, Л. И. Микробные ценозы торфяных почв и их функционирование.— Мн.: Наука и техника, 1983.— 181 с.
38. Почвенные организмы как компоненты биогеоценоза / под ред. академика Е. Н. Мишустина // Издательство «Наука», 1984 г. – 244 с.
39. Elzen, M., Beusen, A., Rotmans, J. Modelling global biogeochemical cycles an integrated assessment approach // RIVM report 461502007. Bilthoven, the Netherlands: RIVM. 1995. – 104 p.
40. Козловская, Л. С., Медведева, В. М., Пьявченко, Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования / Л., «Наука», 1978. – 176 с.
41. Андреев Н.Г. Луговое и полевое кормопроизводство. 3-е изд. перераб. и доп. -М.: Агропромиздат, 1989. – 540с.
42. Рябчиков, А.М. Круговорот вещества в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1980. – 272 с.

43. Степанов, А.Л., Манучарова, Н.А., Полянская Л.М. Продуцирование закиси азота бактериями в почвенных агрегатах // Почвоведение. – 1997. - №8. – С. 973-976.
44. Davidson, E.A. Soil responses to climate change // NATO ASI ser. - 1994. - Vol. I. №23. – P. 155–168.
45. Frank, S., Tiemeyer, B., Gelbrecht, J., Freibauer, A. High soil solution carbon and nitrogen concentrations in a drained Atlantic bog are reduced to natural levels by 10 years of rewetting / Biogeochemistry, vol. 11. – 2014. – P. 2309 – 2324.
46. Инишева, Л.И., Аристархова, В.Е., Порохина, Е.В., Боровкова, А.Ф. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2007. – 185 с.
47. Раковский, В.Е., Пигулевская, Л.В. Химия и генезис торфа. М., «Недра», 1978. – 231 с.

Summary

T.Yarmoshuk, V. Rakovich, M. Minke, A.Thiele

EMISSION OF NITROUS OXIDE ON DAMAGED LOW PEAT LAND

Data on emission of nitrogen oxide (N₂O) at the drained fen peat deposits Vygonoshchanskoye and Berestovets are presented. Annual balances of fluxes N₂O are defined, influences of such factors, as seasonal prevalence, fluctuations of groundwater tables, soil and environment temperature, mowing plant biomass, soil moisture, precipitation and other are considered.

Поступила 16.09.2014