

АНТРОПОГЕННЫЕ НАРУШЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СУШИ И АТМОСФЕРЫ: ОЦЕНКИ МГЭИК

С.М. Семенов^{1), 2), 4)*}, *А.А. Гладильщикова*¹⁾, *Т.М. Дмитриева*³⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 206; **SergeySemenov1@yandex.ru*

²⁾ Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., дом 29

³⁾ Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Россия, 125993, Москва, ГСП-3, Нововаганьковский пер., д. 12

⁴⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

Реферат. Антропогенные изменения потоков парниковых газов с земной поверхности в атмосферу были одной из центральных тем научных докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с самого начала ее деятельности. Глубокое рассмотрение этого вопроса и сопряженных с ним проблем выполнено в специальном докладе МГЭИК «Изменение климата и суша», принятом в 2019 г. В числе прочего, в докладе установлено, что хозяйственная деятельность человека заметно нарушает взаимодействия суши и атмосферы в отношении потоков парниковых веществ и энергии, и это сказывается на глобальном климате. При этом некоторые последствия современных изменений глобального климата усиливают негативные антропогенные изменения окружающей среды неклиматической природы, что создает дополнительные риски продовольственной безопасности, деградации земель и опустынивания, создает дополнительные проблемы землепользованию. Однако возможны эффективные ответные меры, основанные на сочетании митигации и адаптации, а также оптимизации пути мирового социально-экономического развития.

Ключевые слова. Суша, атмосфера, парниковые газы, энергия, обмен, изменения климата, последствия, ответные меры, адаптация, митигация, хозяйственное развитие.

Введение

Разработанная мировым сообществом и принятая в 1992 г. на «Саммите Земли» в Рио-де-Жанейро «Рамочная конвенция ООН об изменении климата»¹⁾ (РКИК ООН, 1992) была ориентирована прежде всего на ограничение

¹⁾ Вступила в силу 21.03. 1994. Россия ратифицировала РКИК ООН в 1994 г.

антропогенных «индустриальных» выбросов диоксида углерода CO_2 , а именно, связанных со сжиганием ископаемого органического топлива и производством цемента. Это однонаправленные процессы – углерод освобождается из связанного состояния в ходе этих процессов и поступает в атмосферу в форме газообразного вещества CO_2 . Обратные процессы – целенаправленное улавливание CO_2 и депонирование его или продуктов его превращения при этом не рассматривались. Это же было характерно и для Киотского протокола (1997) – первого международного соглашения, конкретизирующего обязательств сторон по РКИК ООН по ограничению антропогенных эмиссий парниковых газов, и, в значительной мере, для Парижского соглашения (2015).

Однако, и в момент принятия РКИК ООН, и, в особенности, при дальнейших разработках проблемы, становилось все яснее, что есть и иные процессы антропогенных эмиссий парниковых газов с земной поверхности в атмосферу, и связанные с ними потоки могут быть существенны. Эти эмиссии возникают при землепользовании в том случае, когда деятельность человека меняет характер газообмена. Поясним, как это происходит на примере обмена CO_2 между экосистемами суши и атмосферой.

В некоторый начальный момент времени t мысленно покрасим все атомы углерода на суше в коричневый цвет, а все атомы углерода в составе атмосферного CO_2 – в синий. С течением времени, в ходе фотосинтеза часть атмосферного, «синего» CO_2 будет ассимилироваться наземными растениями, передаваться по пищевым цепям, попадать в почву вместе с отмирающей биомассой, выделяться в атмосферу в процессе разложения мортмассы – мертвого органического вещества. Будем считать, что в ходе этих процессов «цвет» атомов углерода не меняется, остается «синим». Так же и «коричневые» атомы углерода, находящиеся в начальный момент времени t в экосистемах суши, будут со временем частично выделяться в атмосферу в виде углекислого газа²⁾, а потом, возможно, снова поглощаться экосистемами суши и т.д. В этом случае также будем считать, что в ходе этих процессов «цвет» атомов углерода не меняется, остается «коричневым». Через определенный промежуток времени Δ , т.е. в момент времени $(t + \Delta)$, подсчитаем, сколько в атмосфере «коричневых» атомов углерода в составе CO_2 (т.е. тех, что в начальный момент времени t были в составе наземных экосистем). Обозначим их массу I_{ca} . Посчитаем также, сколько «синих» атомов углерода (т.е. тех, что в начальный момент времени t были в составе атмосферного CO_2) в момент времени $(t + \Delta)$ оказались в составе наземных экосистем. Обозначим их массу I_{ac} . Потоки I_{ac} и I_{ca} характеризуют массу углерода, перешедшую из атмосферы в наземные экосистемы и в обратном направлении за промежуток времени Δ , т.е. это – потоки массы (чаще всего оценка выполняется для $\Delta = 1$ год). Поток $I = (I_{ac} - I_{ca})$ – нетто-поток из атмосферы в экосистемы суши. Он

²⁾ Для простоты в этом иллюстративном примере не рассматриваются потоки метана CH_4 .

характеризует приращение содержания углерода в наземных экосистемах за счет газообмена с атмосферой (если $I < 0$, то фактически наблюдается убыль). Введенные величины и их оценки могут быть глобальными или же характеризовать определенную часть суши.

Хозяйственная деятельность человека может приводить к изменению потоков I_{ac} и I_{ca} и, следовательно, результирующего потока I . В качестве примеров можно привести изменение растительного покрова суши (например, облесение, восстановление лесов и сведение лесов, в англоязычной литературе – ARD, аббревиатура для afforestation, reforestation, deforestation), изменение технологий культивирования сельскохозяйственных культур, мероприятия по предотвращению лесных и степных пожаров и некоторые другие хозяйственные воздействия.

Заметим, что дело не сводится только к ограничению антропогенных потоков CO_2 с земной поверхности в атмосферу. Растениеводство и животноводство сопряжены с эмиссией в атмосферу также закиси азота N_2O и метана CH_4 (последний выделяется и при лесных пожарах). Это – парниковые газы, значительно более эффективные в аспекте усиления парникового эффекта, чем CO_2 , в расчете на единицу эмиттированной в атмосферу массы или же в расчете на одинаковое малое приращение содержания в атмосфере³⁾.

Поэтому, антропогенные возмущения глобальных циклов парниковых газов и возможности их ограничения, в том числе связанных с землепользованием, изменением в землепользовании и лесным хозяйством, оказались важным вопросом в повестке дня органов РКИК ООН. Это, в свою очередь, потребовало систематизации, анализа и обобщения соответствующей научной информации, что стало уже в цикле Второго оценочного доклада (1992-1996 гг.) одной из основных задач МГЭИК. Базовую информацию об истории этой международной научной организации и принципах ее деятельности можно найти в работе (Гладильщикова, Семенов, 2017).

Впоследствии рамки этой проблемы существенно расширились. Кроме антропогенных потоков парниковых газов между сушей и атмосферой большое значение приобрели потоки аэрозолей. Более того, наряду с антропогенными возмущениями биогеохимических взаимодействий между сушей и атмосферой была обнаружена значительная роль возмущений биофизических взаимодействий. Это относится, в том числе, к изменению альбедо суши вследствие изменений землепользования и свойств растительного покрова суши вообще.

Цель этой статьи:

- охарактеризовать усилия МГЭИК по разработке этих вопросов в целом;
- привести некоторые последние результаты развития этого направления, представленные в недавно принятом МГЭИК специальном докладе «Изменение климата и суша» (Climate Change and Land).

³⁾ Здесь подразумевается измерение содержания объемным отношением смеси.

Ранние обобщения

С самого начала работы МГЭИК парниковые газы, их глобальные бюджеты, концентрации, антропогенные эмиссии и стоки, а также, разумеется, их парниковые свойства, были одной из приоритетных областей для МГЭИК. Уже в первой половине 1990-х годов были изданы два дополнительных доклада (IPCC, 1992; IPCC, 1994), в которых затрагивались эти вопросы.

Доклад (IPCC, 1992) был дополнительным к Первому оценочному докладу МГЭИК, вышедшему в 1990 г. Необходимость в этом дополнительном докладе была связана с разработкой РКИК ООН, для чего требовалась сводка самых последних научных данных. В докладе была предпринята первая попытка охарактеризовать парниковые газы, их основные источники и стоки, наблюдаемые тренды их содержания в атмосфере и сценарии, описывающие будущие концентрации. Были рассмотрены такие базовые концепции, как радиационное воздействие и потенциал глобального потепления. Отметим, что уже в этой публикации были даны некоторые количественные оценки потоков парниковых газов между сушей и атмосферой, связанных с землепользованием.

Второй из упомянутых дополнительных докладов (IPCC, 1994) был сфокусирован на следующих вопросах: CO_2 и глобальный цикл углерода, химические взаимодействия, в которых участвуют другие парниковые газы, роль аэрозолей, радиационное воздействие и индексы, его характеризующие. В докладе также проведена оценка сценариев будущих изменений содержания парниковых газов в атмосфере, связанных с антропогенными эмиссиями.

Впоследствии, во Втором оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 1996) во Вкладе Рабочей группы I эти обобщения были значительно расширены. Этим вопросам посвящена глава 2 «Радиационное воздействие, изменяющее климат». В ней дается основательная сводка данных, представленных в научных публикациях, о глобальном цикле CO_2 и углерода, его антропогенном возмущении и имеющихся неопределенностях, атмосферной химии основных парниковых газов (в том числе, метана CH_4 , закиси азота N_2O , озона O_3 в тропосфере и стратосфере), их времени жизни в атмосфере, наблюдаемых и ожидаемых изменениях содержания в атмосфере, их радиационном воздействии и потенциале глобального потепления. В табл. 1 (IPCC, 1996, p. 79) приведены представления того времени об антропогенном возмущении глобального цикла CO_2 : приведены оценки глобальных антропогенных эмиссий диоксида углерода от сжигания ископаемого органического топлива и производства цемента и от сектора землепользования, а также их дальнейшее распределение по резервуарам в океане и на суше. Отметим значительную неопределенность практически всех полученных оценок, кроме приведенных в первой и четвертой строках.

Здесь (и далее при подобных оценках) глобальные антропогенные выбросы диоксида углерода рассчитываются, исходя из данных об объемах соответствующих видов хозяйственной деятельности. Накопление CO_2 в

атмосфере рассчитывается, исходя из данных мониторинга атмосферных концентраций. Нетто-поглощение CO_2 из атмосферы океаном и наземными системами за счет лесовозобновления – результаты модельных расчетов, выполненных в соответствующих независимых исследованиях и приведенных в научных публикациях.

Таблица 1. Возмущение глобального бюджета CO_2 в атмосфере в 1980-1989 гг., Гт С год⁻¹
 Указанные ошибки соответствуют 90%-му доверительному интервалу
 Источник: (IPCC, 1996, p. 79), с изменениями

1	Эмиссии от сжигания ископаемого органического топлива и производства цемента	5.5 ± 0.5
2	Нетто-эмиссии от тропического землепользования	1.6 ± 1.0
3	Суммарно = (1) + (2)	7.1 ± 1.1
4	Накопление в атмосфере	3.3 ± 0.2
5	Поглощение океаном	2.0 ± 0.8
6	Поглощение из атмосферы в наземные системы за счет лесовозобновления в Северном полушарии	0.5 ± 0.5
7	Другие потоки CO_2 из атмосферы в наземные системы (за счет других стоков – «удобрение» растений CO_2 и азотом, климатические воздействия) = (3) – ((4) + (5) + (6))	1.3 ± 1.5

Поток, приведенный в таблице в строке 7, – весьма неточно определенное «дополнительное» поглощение CO_2 на суше. Оно получено просто арифметически, исходя из закона сохранения массы. Невязка баланса CO_2 в атмосфере «списывается» на сушу. Теоретически же оно приписывалось «удобрению» растений CO_2 и азотом или же климатическим воздействиям, т.е. действию обратной связи с климатом. Математические модели процессов в земной системе того времени этого эффекта не объясняли.

Дальнейшее развитие

Систематизация, обобщение и анализ данных о глобальных циклах парниковых газов и их антропогенных возмущениях было продолжено в цикле Третьего оценочного доклада МГЭИК (1996-2001 гг.).

В Третьем оценочном докладе в главе 3 «Цикл углерода и атмосферный углекислый газ» вклада Рабочей группы I «Научная основа» приведена фундаментальная сводка данных о содержании диоксида углерода в атмосфере в прошлом (в том числе, сотни тысяч лет назад), настоящем и будущем, о потоках углерода, связанных с CO_2 , в наземных системах и океане, об антропогенных источниках CO_2 . При этом рассматривались последствия различных сценариев антропогенных эмиссий диоксида углерода, в том числе возможности стабилизации его концентрации в атмосфере. Приведем на рис. 1 и 2 схематическое представление о содержании и потоках углерода в наземных системах и океане, связанных с естественными процессами (Prentice et al., 2001, p. 188).

На рис. 1 видно, что была предпринята серьезная попытка агрегировать имеющуюся информацию не только в отношении обмена CO_2 между наземными экосистемами и атмосферой, но и в отношении содержания углерода в почвенных резервуарах и потоков между ними. Эти данные неполны (многие потоки на схеме не оценены количественно), оценки их неопределенности не приведены. Кроме того, сравнение рис. 1 и 2 показывает, что, удивительным образом, океанические потоки углерода были известны в больших деталях, чем потоки в наземных системах.

В этом докладе приведена также весьма полная и детальная информация об естественных и антропогенных источниках и стоках парниковых газов, их концентрациях в атмосфере (наблюдаемые уровни и тренды), радиационном воздействии, наблюдаемых и ожидаемых изменениях глобального климата. В отношении антропогенных возмущений бюджета CO_2 в атмосфере там приведены следующие оценки для 1990-х годов (IPCC, 2001, р. 208) – см. табл. 2.

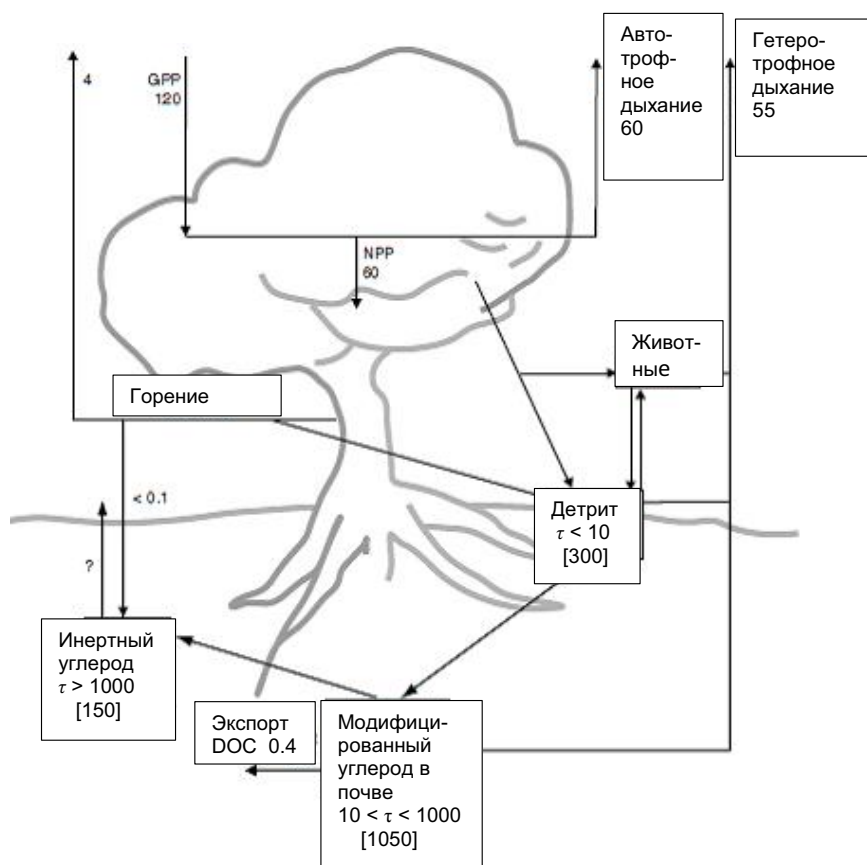


Рисунок 1. Глобальные оценки содержания и потоков углерода в наземных экосистемах, связанных с естественными процессами

Содержание приведено в квадратных скобках в Гт С. Потоки приведены в Гт С год⁻¹. Время жизни углерода τ в различных почвенных резервуарах приведено в годах. GPP – общая первичная продукция; NPP – чистая первичная продукция; DOC – растворенные органические вещества. Источник: (Prentice et al., 2001, р. 188), с изменениями

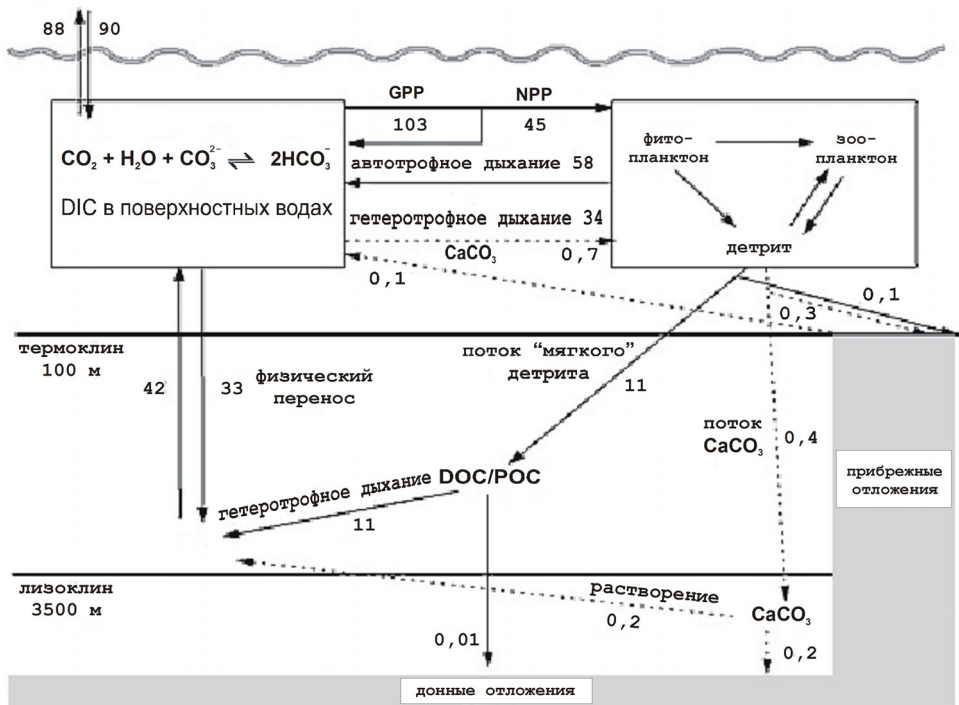


Рисунок 2. Глобальные оценки потоков углерода в океане, связанных с естественными процессами

Потоки приведены в Гт С год⁻¹. GPP – общая первичная продукция; NPP – чистая первичная продукция; DOC – растворенные органические вещества; DIC – растворенные неорганические вещества; POC – органические частицы. Источник: (Prentice et al., 2001, p. 188)

Таблица 2. Глобальный бюджет CO₂ в атмосфере в 1990-е годы, Гт С год⁻¹
Источник: (IPCC, 2001, p. 208), с изменениями

Название потока	Значение, Гт С год ⁻¹
Антропогенная эмиссия от сжигания ископаемого органического топлива и производства цемента	6.4 ± 0.4
Накопление в атмосфере	3.2 ± 0.1
Нетто-поток из атмосферы в океан	1.7 ± 0.5
Нетто-поток из атмосферы в наземные системы	1.4 ± 0.7

Отметим, однако, что авторы этого доклада не представили последний поток в виде двух – ассоциированного с изменением в землепользовании и остаточным стоком. Это было сделано в специальном докладе «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство» (IPCC, 2000). Он был существенно более ориентирован на практические нужды международного переговорного процесса по климату, чем Третий оценочный доклад МГЭИК, который был в значительной мере сводкой фундаментального знания по проблеме (во всяком случае Вклад Рабочей группы I «Научная основа», (IPCC, 2000)).

В докладе (IPCC, 2000) приводятся оценки содержания (stocks) углерода в океане, наземной растительности и мертвом органическом веществе, а также в атмосфере. При этом оценки были детализированы – даны оценки содержания углерода в верхнем метровом слое почвы для разных биомов: тропические леса, умеренные леса, северные леса, тропические саванны, луга умеренной зоны, пустыни и полупустыни, тундра, водноболотные угодья, сельскохозяйственные земли. Приведены глобальные оценки потоков углерода (Гт С год^{-1}), соответствующие десятилетнему периоду 1989-1998 гг., между атмосферой и океаном, атмосферой и наземными системами, а также антропогенной эмиссии углерода в атмосферу в составе CO_2 , связанной со сжиганием ископаемого органического топлива и производством цемента. Годовая антропогенная «индустриальная» эмиссии CO_2 составляет 6.3 Гт С. В атмосфере накапливается 3.3 Гт, а 2.3 Гт поглощается из атмосферы океаном. Сушей поглощается 0.7 Гт за счет естественных процессов. Вся эта информация была суммирована в докладе в виде очень простой и доступной для неспециалистов схемы, которая воспроизведена на рис. 3.

Однако, как указано в докладе со ссылками на базовые публикации (Houghton, 1999; Houghton, Hackler, Lawrence, 1999), существует еще поток углерода с земной поверхности в атмосферу, обусловленный изменением в землепользовании, который был оценен в $1.6 \pm 0.8 \text{ Гт С год}^{-1}$. Таким образом, суша поглощает из атмосферы не 0.7 ± 1.0 , а $2.3 \pm 1.3 \text{ Гт С год}^{-1}$, но остается не совсем ясно, за счет каких процессов происходит это дополнительное поглощение. Эта проблема, возникшая еще во Втором оценочном докладе МГЭИК (см. табл. 1), оставалась неразрешенной.

В этом докладе также проведено сопоставление компонентов глобального бюджета CO_2 в 1980-1989 гг. и 1989-1998 гг. Результаты приведены в табл. 3. Можно видеть, что никакие достоверные тренды за десятилетие при сравнении двух столбцов табл. 3 обнаружить не удастся, кроме положительного тренда в «индустриальной» эмиссии стран, которые не включены в Приложение I к Киотскому протоколу – от 1.6 ± 0.3 до $2.5 \pm 0.4 \text{ Гт С год}^{-1}$.

Таблица 3. Сравнение глобального бюджета CO_2 в 1980 - 1989 гг. и 1989 - 1998 гг., Гт С год^{-1}

Источник: (IPCC, 2000, p. 32), с изменениями

	1980 - 1989 гг.	1989 - 1998 гг.
(1) Эмиссии, связанные со сжиганием ископаемого топлива и производством цемента	5.5 ± 0.5	6.3 ± 0.6
(2) Накоплено в атмосфере	3.3 ± 0.2	3.3 ± 0.2
(3) Поглощено океаном	2.0 ± 0.8	2.3 ± 0.8
(4) Нетто-поток из атмосферы в наземные системы = (1) – [(2) + (3)]	0.2 ± 1.0	0.7 ± 1.0
(5) Эмиссия, связанная с изменением типа и способов землепользования	1.7 ± 0.8	1.6 ± 0.8
(6) Остаточное поглощение наземными системами = (4) + (5)	1.9 ± 1.3	2.3 ± 1.3

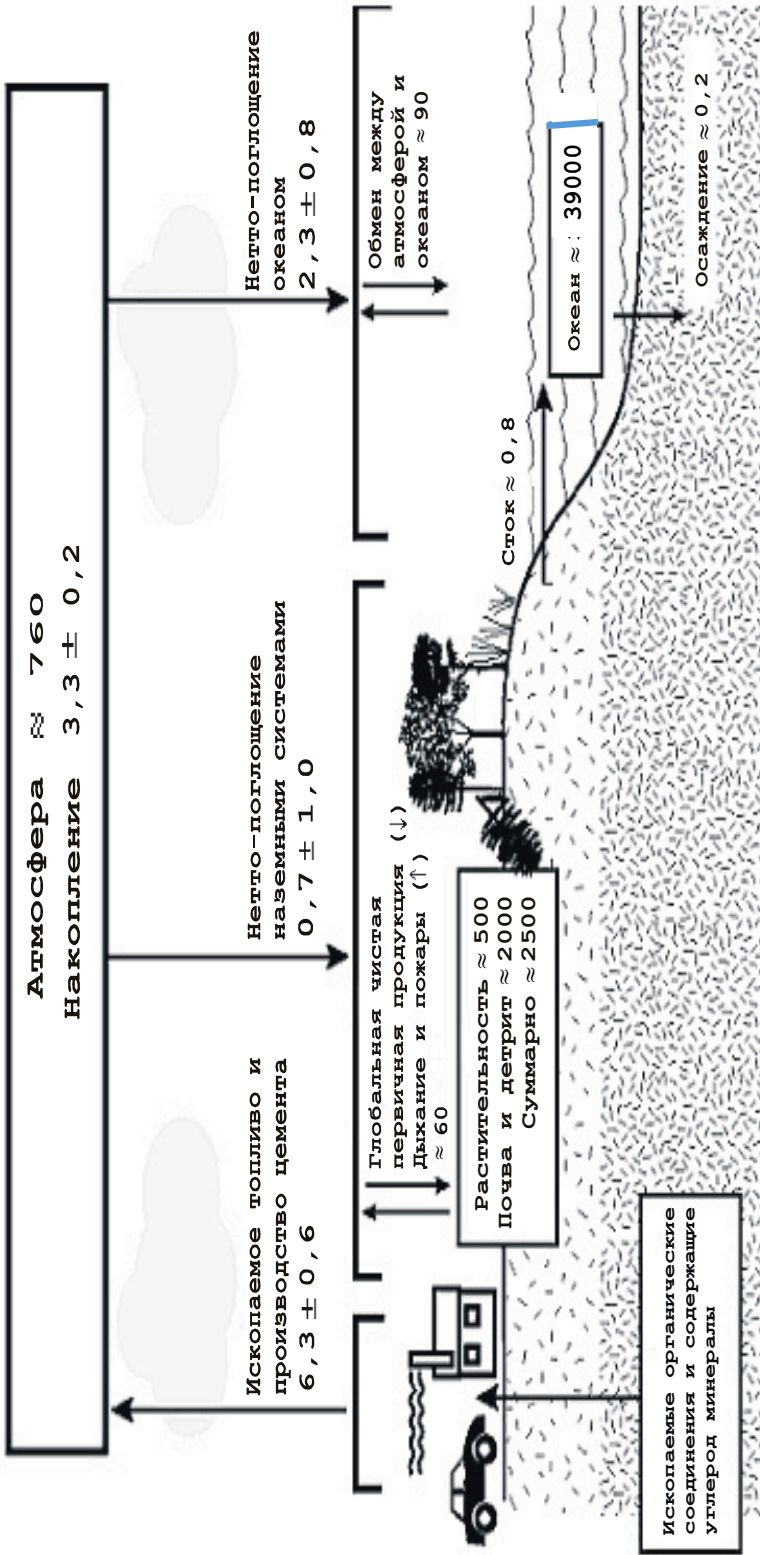


Рисунок 3. Глобальные запасы углерода (Гт С) в природных резервуарах и потоки CO_2 (Гт С год^{-1}) между ними, (IPCC, 2000, р. 30):
Средние значения за период 1989-1998 гг

В этом докладе рассматриваются и некоторые другие вопросы, относящиеся к потокам парниковых газов между сушей и атмосферой и их антропогенным возмущениям. Оценка того, как деятельность человека влияет на обмен углеродом между сушей и атмосферой, корректный учет изменений соответствующих потоков, существенно зависит от тех наземных систем, для которых выполняется эта оценка. Этот вопрос, казалось бы, чисто теоретический, оказался весьма практически значимым. Статьи 3.3 и 3.4 Киотского протокола указывают на то, что оценки должны выполняться для земель, где имела место деятельность человека в период времени с 1990 г. Важно иметь по возможности четкие определения того, что такое «лес» и какой смысл вкладывается в понятия «обезлесение», «облесение» и «восстановление леса». В докладе предпринят серьезный анализ возможных подходов к этим определениям, в том числе рассмотрены подходы МГЭИК и ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций).

В докладе также предложена важная для практики концептуальная схема учета антропогенных потоков углерода между сушей и атмосферой, связанных с землепользованием, изменением в землепользовании и лесным хозяйством (ЗИЗЛХ) – см. рис. 4. Предложено два основных подхода – учет на основе площади и учет на основе вида деятельности.

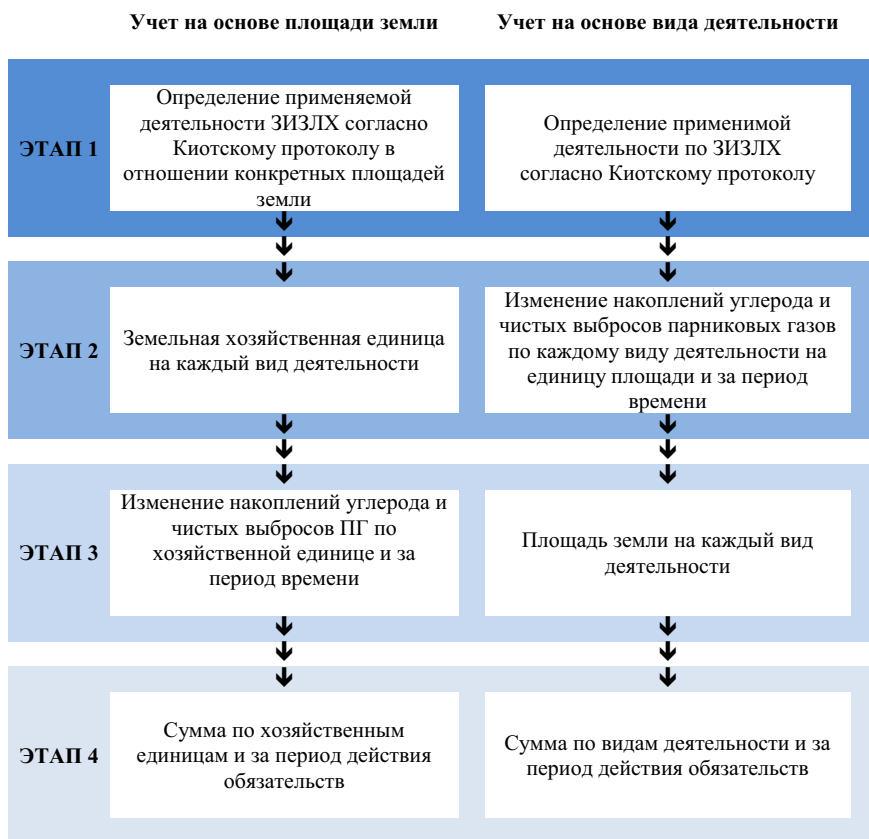


Рисунок 4. Концептуальная схема учета антропогенных потоков углерода между сушей и атмосферой, связанных с землепользованием, изменением в землепользовании и лесным хозяйством (IPCC, 2000)

Специальный доклад МГЭИК «Изменение климата и суша»

Со времени издания специального доклада МГЭИК «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство» прошло 20 лет. В этот период направление, связанное с изучением антропогенных возмущений потоков парниковых газов между сушей и атмосферой, развивалось МГЭИК преимущественно в практическом плане. Наиболее заметными явлениями стали создание методической базы оценки соответствующих потоков для использования при ежегодной национальной инвентаризации антропогенных выбросов парниковых газов странами-участницами РКИК ООН (МГЭИК, 2006; IPCC, 2019a). Однако одновременно пополнялась и совокупность научных представлений об антропогенных нарушениях взаимодействий наземных систем и атмосферы, возникали новые вопросы. Это стимулировало принятие решения МГЭИК подготовить в цикле Шестого оценочного доклада «Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении землями, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах» (An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems). Его краткое название «Изменение климата и суша» (Climate Change and Land). Подготовка этого доклада была начата в 2016 г. Он был принят МГЭИК на 50-й пленарной сессии в августе 2019 г.

Это обширный научный доклад посвящен взаимодействиям суши и атмосферы, их антропогенным нарушениям, связанным с ними изменениям климата, их влиянию на природные и хозяйственные системы, которое складывается при участии социально-экономических факторов и ответных стратегий. Доклад состоит из семи глав:

1. Структура и контекст (Framing and context);
2. Взаимодействия суши и атмосферы (Land-climate interactions);
3. Опустынивание (Desertification);
4. Деградация земель (Land degradation);
5. Продовольственная безопасность (Food security);
6. Взаимосвязи между опустыниванием, деградацией земель, продовольственной безопасностью и потоками парниковых газов: синергии, отрицательные взаимосвязи и возможности комплексного реагирования (Interlinkages between desertification, land degradation, food security and GHG fluxes: synergies, trade-offs and integrated response options);
7. Управление рисками и принятие решений в отношении устойчивого развития (Risk management and decision making in relation to sustainable development).

Ниже мы коснемся лишь некоторых выводов и заключений этого доклада, которые касаются антропогенных возмущений взаимодействия суши и атмосферы. Они относятся к следующим вопросам:

- каковы современные оценки антропогенных возмущений потоков парниковых газов в земной системе;
- в чем причины различий оценок антропогенных эмиссий CO_2 , связанных с сельским хозяйством, лесным хозяйством и другими видами землепользования, получаемых с помощью разных методов расчетов;
- как изменения поверхности суши влияют на потоки энергии между земной поверхностью и атмосферой;
- каков масштаб влияния пожаров и хозяйственного использования торфяников в возмущении потоков парниковых газов с земной поверхности в атмосферу (вопрос, весьма существенный для России);
- возможно ли устойчивое землепользование в условиях изменяющегося климата;
- не возникают ли отрицательные взаимосвязи (некоторого рода «конкуренция») между целями активного биогенного ограничения и уменьшения содержания CO_2 в атмосфере и обеспечения продовольственной безопасности?

При этом будет использоваться «Резюме для политиков» и основной текст, принятые на 50-й пленарной сессии МГЭИК (IPCC, 2019b). Основные выводы и заключения этого доклада, в соответствии с правилами МГЭИК, снабжены оценками их достоверности. Соответствующие методологические разъяснения можно найти в работе (Семенов, Инсаров, Мендес, 2019).

Изменения глобального климата и поверхность суши

В индустриальный период (условно – с 1850 г.) наблюдаемое глобальное потепление проявилось на суше значительно сильнее, чем на Земном шаре в целом – увеличение средней температуры поверхности суши примерно вдвое превосходит рост глобального среднего для земной поверхности в целом. Это сказалось на природных и хозяйственных системах во многих районах мира.

В том числе, наблюдаются сдвиги климатических зон, включая расширение аридной зоны и сокращение полярной. Изменение климата, в том числе в отношении экстремальных погодных явлений, способствовало деградации земель и опустыниванию. Продуктивность растениеводства в последние десятилетия реагировала на изменение климата неоднозначно: в низких широтах наблюдалось сокращение (например, для кукурузы и пшеницы), а в умеренных – рост (для кукурузы, пшеницы и сахарной свеклы). При этом увеличение содержания CO_2 в атмосфере ведет для некоторых зерновых сельскохозяйственных растений к увеличению урожая, но снижает питательные свойства зерна.

Спутниковые наблюдения показывают наличие и «зеленения», и «коричневения» растительного покрова, причем первое наблюдается в значительно более широком масштабе, чем второе. Зеленение приписывается таким факторам, как удлинение вегетационного периода, «удобрение» CO_2 и атмосферные выпадения соединений азота, управление землями.

Многие важные ресурсы, необходимые людям, находятся в наземных системах. Это, прежде всего, продовольствие, вода, энергия, экосистемные услуги. Велики культурная ценность последних для человека и связанные с

ними нематериальные полезности. Деятельностью человека затронуты около 70% свободной ото льда площади суши. На примерно четверти поверхности суши, свободной ото льда, наблюдается деградация земель, вызванная деятельностью человека. В 2015 г. от 360 до 620 млн человек проживали в местностях, в которых проявлялось опустынивание с 1980-х годов до 2000-х. Явления опустынивания будут развиваться при глобальном потеплении, причем в большей степени – в Азии и Африке.

В целом глобальное потепление и сопутствующие ему изменения климата приводят и будут приводить в будущем к возрастанию рисков, связанных с нехваткой воды на засушливых землях, эрозией почв, ущербом растительности, пожарами в естественных экосистемах, деградацией многолетней мерзлоты, снижением урожаев зерновых в тропической зоне, неустойчивостью поставок продовольствия. При этом в некоторых регионах увеличатся риски для средств к существованию населения, инфраструктуры, систем производства продовольствия, здоровья людей и экосистем, биоразнообразия, а в других – возникнут ранее не существовавшие риски. Особенно следует отметить риски, связанные с экстремальными погодными явлениями, в том числе волнами жары и экстремальными осадками.

В условиях продолжающегося потепления будет продолжаться движение границ растительных зон к северу (в горах – к большим высотам). В северных лесах усилятся негативные последствия засух, пожаров и вспышек массового размножения насекомых-вредителей. Существующие в настоящее время умеренные риски нехватки воды на засушливых землях, эрозии почв, потерь растительности, ущерба от пожаров в природных системах, таяния многолетней мерзлоты, деградации берегов и снижения урожая зерновых в тропиках усилятся при продолжающемся потеплении.

Землепользование и потоки парниковых газов между сушей и атмосферой

Хозяйственная деятельность при землепользовании приводит к существенным изменениям состояния поверхности суши, включая растительный покров. Последствия этих изменений для климатической системы Земли весьма существенны. Изначально они проявляются, прежде всего, в возмущении потоков вещества и энергии между сушей и атмосферой, что впоследствии ведет к изменению глобального климата.

Данные, доступные с 1961 г. (<http://www.fao.org/faostat/>), показывают, что рост глобального потребления продовольствия, фуража, волокна, древесины и энергии в расчете на душу населения обусловил беспрецедентное увеличение потребления воды для нужд сельского хозяйства – до 70% всего водопотребления. Предложение мяса и растительных масел в расчете на душу населения примерно удвоилось, а предложение продовольствия в целом, измеренное в калориях на душу населения, увеличилось примерно на треть. При этом увеличивались как площадь земель, используемых для культивирования, так и продуктивность.

Столь масштабное расширение хозяйственной деятельности существенно затронуло биогеохимические взаимодействия суши и атмосферы – обмен парниковыми газами, водой и аэрозолями. Для глобального климата особенно существенны антропогенные нарушения обмена парниковыми газами. Деятельность человека в секторе «Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования» (Agriculture, Forestry and Other Land Use – AFOLU) в последнее время связана с эмиссиями парниковых газов, составляющих значительные части общей суммы их антропогенных эмиссий в атмосферу. В 2007-2016 гг. они составляли для CO_2 13%, для CH_4 44% и для N_2O 82%, что в CO_2 -эквиваленте дает 23% антропогенных нетто-эмиссий парниковых газов.

В табл. 4 (Le Quéré et al., 2018; IPCC, 2019b) приведены современные оценки МГЭИК потоков CO_2 между сушей, атмосферой и океаном. Хотя в оригинальных таблицах значения приведены в Гт CO_2 год⁻¹, мы приводим также значения в Гт С год⁻¹ для удобства сравнения с аналогичными данными табл. 1-3. При конвертации единиц массы употребляется соотношение CO_2 : С = 3.664. Как видно из данных табл. 4, во-первых, аккуратный учет источников и стоков CO_2 , проведенный в работе (Le Quéré et al., 2018), позволил значительно сократить невязку баланса, и, таким образом, «проблема неизвестного стока» уходит в прошлое. Во-вторых, эти данные показывают, что суша пока является глобальным стоком CO_2 , несмотря на масштабную деятельность человечества в секторе «Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования» (AFOLU).

Таблица 4. Бюджет CO_2 в атмосфере и суммарный поток из наземных систем в атмосферу в 2008-2017 гг.

Источник: (Le Quéré et al., 2018; IPCC, 2019b), с изменениями

Название потока	2008 - 2017 гг.	
	Гт CO_2 год ⁻¹	Гт С год ⁻¹
Эмиссии, связанные со сжиганием ископаемого топлива и производством цемента	34.0 ± 1.8	9.3 ± 0.5
Эмиссии, связанные с сельским хозяйством, лесным хозяйством и другими видами землепользования (AFOLU)	5.5 ± 2.6	1.5 ± 0.7
Накоплено в атмосфере	17.2 ± 0.07	4.7 ± 0.0
Сток из атмосферы в океан	8.8 ± 1.8	2.4 ± 0.5
Сток из атмосферы в наземные системы	11.7 ± 2.6	3.2 ± 0.7
Невязка баланса	1.8	0.5
<i>Суммарный поток из наземных систем в атмосферу</i>	-6.2 ± 3.7	-1.7 ± 1.0

Необходимо отметить, что существуют определенные различия в оценках антропогенных эмиссий CO_2 из наземных экосистем в атмосферу в секторе AFOLU, основанных на инвентаризации парниковых газов странами-участницами РКИК ООН и на результатах глобального моделирования. Причины различий – концептуальные и методологические. Эти оценки близки для изменений в землепользовании, относящихся к лесам (например, обезлесива-

ние, облесение), но различаются для управляемых лесов в целом. Причина различий состоит в том, что при инвентаризациях категория «управляемые леса» понимается значительно шире, чем при глобальном моделировании. В управляемых лесах при инвентаризациях ответ экосистем на антропогенное нарушение может рассматриваться как антропогенный процесс. При глобальном моделировании он, напротив, считается естественным процессом. Это порождает иногда существенные различия в оценках. Например, для 2005-2014 гг. глобальная оценка нетто-эмиссий, полученная при национальных инвентаризациях, была 0.1 ± 1.0 Гт CO_2 год⁻¹, а глобальное моделирование показало значение 5.1 ± 2.6 Гт CO_2 год⁻¹.

Глобальные циклы метана CH_4 и закиси азота N_2O – следующих по значимости парниковых газов, в составе антропогенных эмиссий – существенно проще, чем для CO_2 . Однако изучать источники и стоки этих парниковых газов стали несколько позже, и количественных данных об их глобальных потоках сравнительно меньше. В докладе (IPCC, 2019b) приведены следующие оценки.

Глобальные уровни содержания метана CH_4 в атмосфере устойчиво росли с середины 1980х годов. Это в значительной мере объяснялось антропогенными эмиссиями в сельском хозяйстве (рисоводство и животноводство). В 1999-2006 гг. темпы роста уровней метана резко замедлились, и существенный рост возобновился только в 2007 г. В 2007-2016 гг. антропогенные эмиссии метана, связанные с сектором AFOLU, были 162 ± 49 Мт CH_4 год⁻¹ (4.5 ± 1.4 Гт CO_2 -экв год⁻¹). Среди специалистов пока нет единой точки зрения в отношении причин замедления роста глобальных уровней метана в 1999-2006 гг. Есть предположение, что возобновившийся рост концентраций метана в последние годы связан с активизацией его биогенных источников. Но другие исследования это не подтверждают. Гипотеза о том, что изменение содержания гидроксила в тропосфере в последние десятилетия (это основной фактор химического стока метана) является ведущей причиной изменчивости содержания CH_4 в нижней атмосфере, также пока не подтверждена.

Антропогенные эмиссии закиси азота N_2O , связанные с сектором AFOLU, объясняются, в основном, увеличением масштабов применения азотных удобрений и увеличением масштабов скотоводства, что сопровождается ростом поступления навоза как на управляемые пастбища, так и на естественные. В 2007-2016 г. Глобальная эмиссия N_2O составляла

$$8.3 \pm 2.5 \text{ Мт } \text{N}_2\text{O} \text{ год}^{-1} (2.3 \pm 0.7 \text{ Гт } \text{CO}_2\text{-экв } \text{год}^{-1}).$$

Землепользование и потоки энергии между сушей и атмосферой

Хозяйственная деятельность человека способна заметно изменять не только потоки парниковых газов между атмосферой и сушей, но и поток энергии между ними. Изменение свойств поверхности суши может приводить как к изменению свойств суши поглощать/отражать коротковолновое (солнечное) излучение, так и к изменению нерадиационных потоков тепла между сушей и атмосферой.

Изменение свойств поверхности суши человеком связано, прежде всего, с изменением типа землепользования. Исторически наиболее распространенным изменением было сведение лесов с целью расширения сельскохозяйственных земель. В снежных условиях альbedo покрытых снегом обезлесенных участков суши больше, чем у лесопокрытых участков. Этот эффект в бореальной зоне, где зимой имеются снежные условия, способствует охлаждению климата. Однако превращение участка леса в участок сельскохозяйственных угодий приводит к выделению в атмосферу CO_2 в силу соотношения содержания углерода, связанного на единице площади, присущего этим типам экосистем. Это способствует потеплению климата. Исторически в глобальном масштабе результирующий эффект незначителен. Отметим, что при опустынивании ситуация аналогичная – утрата растительности обогащает атмосферу CO_2 , что способствует потеплению, а увеличение альbedo при этом способствует похолоданию.

Описанные два эффекта представляют, так сказать, дальноедействие, когда региональное и даже локальное нарушение поверхности суши оказывают влияние в том числе на глобальную температуру. Однако, следует отметить, что такие изменения могут оказывать влияние также на осадки на сотни километров от того места, где произошло нарушение.

Взаимодействие изменения климата и поверхности суши характеризуется региональными обратными связями, в которых участвуют как радиационный перенос тепла, так и нерадиационный. Так, в северных регионах, где граница леса движется к северу, зимой региональный климат в среднем теплеет вследствие уменьшения регионального альbedo. Однако летом усиленная эвапотранспирация древесных растений способствует похолоданию.

В тропических регионах в условиях повышения нормы осадков более интенсивный рост растений и связанная с ним усиленная эвапотранспирация ограничивает потепление. Более сухие условия на поверхности суши способствуют силе проявления волн жары при потеплении климата, а более влажные оказывают противоположное воздействие.

Пожары в наземных системах

Среди широкомасштабных нарушений состояния поверхности суши выделяются пожары в наземных системах. Они оказывают многообразные негативные воздействия на хозяйственные и природные системы, являются часто угрозой здоровью и жизни людей, а также существенно нарушают взаимодействие поверхности суши и атмосферы. В специальном докладе «Изменение климата и суша» этому вопросу посвящен отдельный «бюкс» – межглавный раздел (Sukumar et al., 2019), который мы здесь кратко представим. Его название «Межглавный раздел 3: Пожары и изменение климата» (Cross-Chapter Box 3: Fire and Climate Change).

Пожары, вызванные естественными причинами, например, молниями, всегда наблюдались в наземных системах. В настоящее время основной причиной пожаров в наземных системах является поведение людей, в то время как естественные факторы, в том числе молнии, играют значительно мень-

шую роль. Ежегодно пожары наблюдаются на 3% поверхности суши. Они вносят заметный вклад в поступление парниковых газов и органического аэрозоля с поверхности суши в атмосферу. В XX веке сгорало биомассы в среднем меньше, чем в иные периоды последних двух тысячелетий, но в последние десятилетия наблюдается увеличение. Существенно возросла в последнее время площадь, пройденная лесными пожарами, в бореальных лесах Северной Америки и Северной Евразии – в Сибири. Экстремальные погодные явления, такие как засухи, в особенности в периоды Эль-Ниньо, играют основную роль в усилении пожаров в наземных системах экваториальной Азии.

Пожары в природных системах приводят к дополнительным эмиссиям CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , органического аэрозоля, а также неметановых летучих органических соединений. Оценка эмиссий CO_2 для 1997-2016 гг. – $2.2 \text{ Гт С год}^{-1}$. Лесные пожары не обязательно приводят к обогащению атмосферы CO_2 в масштабе десятилетий. При восстановлении растительности выделенный при пожаре углекислый газ может быть вновь связан в наземных системах. Для сельскохозяйственных угодий и пастбищ это может произойти и за несколько лет. Нетто-эмиссии с поверхности суши в атмосферу от пожаров, применяемых для перевода лесопокрытых территорий в сельскохозяйственные угодья, а также от пожаров на торфяниках являются, безусловно, положительными. Для последних десятилетий они оцениваются как $0.4 \text{ Гт С год}^{-1}$.

В принципе, пожары могут приводить к изменению типа биома. Например, изменение режима пожаров может вызвать переход лесной экосистемы в иное состояние, например, в луговую экосистему, которая будет содержать существенно меньше углерода в расчете на единицу площади. Одно из негативных последствий пожаров в наземных системах – эрозия почв вследствие действия ветра и воды, приводящая к последующей деградации земли.

При дальнейшем глобальном потеплении риск лесных пожаров будет возрастать, в особенности в Северной Америке, Южной Америке, Средиземноморье, Северной Африке, Южной Африке, Центральной Азии и Австралии. В докладе приведена глобальная карта-схема, представляющая переход различных регионов мира из категории с низкой пожарной опасностью в предрасположенные к пожарам в 1971-2000 гг. и в условиях разных сценариев RCP⁴⁾ в 2017-2100 гг.

Торфяники

Еще один специальный вопрос, о котором стоит упомянуть отдельно, – торфяники, которые являются существенными резервуарами углерода и источниками эмиссии метана CH_4 с земной поверхности в атмосферу. Торфя-

⁴⁾ RCP – representative concentration pathways, репрезентативные траектории концентраций – РТК: ход концентраций парниковых газов, соответствующий различным представлениям о мировом экономическом развитии в будущем и соответствующих антропогенных эмиссиях парниковых газов в атмосферу (IPCC, 2014, p. 57).

ник – увлажненная экосистема, в которой происходит образование и накопление торфа – остатков мертвого частично разложившегося органического вещества. Они рассматриваются в разделе «Метан» главы 2 «Взаимодействия суши и климата» данного доклада (IPCC, 2019b).

Торфяники, широко распространенные на всех континентах, кроме Антарктиды, но, в основном, в Северном полушарии, вносят существенный вклад в глобальную эмиссию метана с поверхности суши в атмосферу. Те, что находятся от 40 до 70° с.ш., выделяют в атмосферу в год примерно 48 Мт CH_4 , что составляет примерно 10% от суммарной годовой эмиссии. Глобальная эмиссия метана с поверхности суши в атмосферу меняется год от года, поскольку это процесс, зависимый от климата.

Человек в ходе хозяйственной деятельности, в основном, во внетропической зоне Северного полушария, занимался и осушением, и восстановлением (обводнением) торфяников. Восстановление торфяников и их хозяйственное использование меняют потоки метана между земной поверхностью и атмосферой. При хозяйственном использовании торфяных почв, обычно, они из источника метана превращаются в его сток. При восстановлении торфяников эмиссия CO_2 в атмосферу уменьшается, а эмиссия метана, обычно, возрастает. Осушенные торфяники заметно выделяют метан при атмосферных осадках или же из дренажных кювет (Drösler et al., 2013; Sirin et al., 2012), причем на определенной площади эмиссия метана из дренажных кювет может быть сравнима с эмиссией из неосушенного торфяника.

Эмиссия метана из тропических торфяников известна со значительной неопределенностью, что оказывает влияние на оценки глобальных эмиссий, которые вследствие этого также весьма неопределенны. Эмиссия из дренажных кювет на торфяниках, преобразуемых с хозяйственными целями, также изучена слабо, что не дает возможности дать обобщенные оценки.

Зависимость рисков, связанных с изменением климата, от неклиматических факторов и ответных мер

Риски, связанные с изменением климата, не могут быть оценены, исходя лишь из данных об изменении климатических параметров. Эти риски зависят также от неклиматических факторов. Среди них – характер изменений народонаселения, производства, потребления, технологического развития и землепользования. Поскольку прогноз состояния социально-экономических систем на несколько десятков лет вперед не реалистичен, то для характеристики их будущего состояния в XXI веке в докладе употребляются специальные сценарии – общие пути социально-экономического развития, в англоязычном оригинале – shared socio-economic pathways (SSPs). Они характеризуются следующими параметрами: темп роста народонаселения, доход на душу населения, степень неравенства, эмиссии парниковых газов при производстве продовольствия, правила землепользования и адаптационная способность.

От этих параметров существенно зависит степень проявления рисков, возникающих при дальнейшем глобальном потеплении. Даже в примерно рав-

ных уровнях потепления климата пути развития, «связанные с большими запросами на продовольствие, фураж и воду, с большим производством и потреблением ресурсов и ограниченным технологическим уровнем получения урожаев, ведут к более высоким рискам нехватки воды на засушливых землях, деградации земель и низкой продовольственной безопасности» (IPCC, 2019b).

Уязвимость природных и социально-экономических систем к наблюдаемому и ожидаемому изменению глобального климата зависит не только от пути мирового социально экономического развития, но и от целевых мер адаптации систем к изменению климата и смягчения антропогенного воздействия на климат (митигация, *англ.* mitigation). Эти меры могут одновременно способствовать противостоянию опустыниванию и деградации земель, а также способствовать продовольственной безопасности (однако в некоторых случаях для этого существуют определенные препятствия). Примерами могут служить устойчивое производство продовольствия, устойчивое управление лесами и почвенным углеродом, охрана природы и восстановление земель, сокращение обезлесивания и потерь пищевых продуктов. Различные ответные меры могут давать результаты на разных временных интервалах – от нескольких лет до десятилетий. При этом их эффективность будет, вообще говоря, зависеть от местных условий. Следует особо отметить, что меры по накоплению углерода в растительности и почве имеют свои ограничения по продолжительности. Это касается практически всех разновидностей таких мер: облесение и восстановление лесов, накопление углерода в предметах из древесины, управление углеродом на минеральных почвах и др. В экосистемах после достижения зрелого состояния (равновесия) нетто-поглощение прекращается. Лишь торфяники способны накапливать углерод столетиями.

Большая часть таких мер не требует дополнительной конверсии земель, и их осуществление совместимо с целями устойчивого развития. Однако некоторые из мер все же требуют существенных дополнительных земель для своего осуществления. Так, широкое применение таких мер, как облесение и биоэнергетические сельскохозяйственные культуры в масштабах порядка нескольких миллионов кв. км способно увеличить риски опустынивания, деградации земель, для продовольственной безопасности и устойчивого развития. Это характерно и для биоэнергетики в целом. Производство и использование биомассы для нужд энергетики весьма привлекательно, поскольку при ее сжигании выделяется столько же CO_2 , сколько поглотилось при росте тех растений, чья биомасса используется. Таким образом, обогащения атмосферы CO_2 не происходит. Однако есть и отрицательные последствия для состояния земель, продовольственной безопасности и других целей устойчивого развития. Использование для целей биоэнергетики остатков сельскохозяйственных растений и органических отходов помогает снизить потребность в конверсии земель для получения биотоплива, но удаление растительных остатков постепенно приводит к деградации сельскохозяйственных земель.

Меры противодействия опустыниванию и обращения вспять этого процесса, с одной стороны, способствуют сохранению биоразнообразия, предот-

вращению пыльных бурь и движения дюн (что уменьшает эрозию почв и ущерб здоровью людей), а с другой стороны – уменьшают поток CO₂ с земной поверхности в атмосферу. Вообще, устойчивое управление ландшафтами способно облегчить неблагоприятные эффекты.

Заключение

Как более ранние оценки докладов МГЭИК, так и специальный доклад 2019 г. «Изменение климата и суша» (Climate Change and Land) показывают, что:

– хозяйственная деятельность человека заметно нарушает взаимодействия суши и атмосферы в отношении потоков парниковых веществ и энергии, и это сказывается на глобальном климате;

– некоторые последствия современных изменений глобального климата усиливают негативные антропогенные изменения окружающей среды неклиматической природы, что создает дополнительные риски продовольственной безопасности, деградации земель и опустынивания, создает дополнительные проблемы для землепользования;

– возможны эффективные ответные меры, основанные на сочетании митигации и адаптации, а также оптимизации пути мирового социально-экономического развития.

В целом, вывод доклада (IPCC, 2019b) в отношении возможности достижения целей устойчивого развития (GA UN, 2015) в условиях современного изменения климата оптимистичен: «Устойчивое землепользование, включая устойчивое управление лесами, может предотвратить и уменьшить деградацию земель, поддерживать их продуктивность и в ряде случаев обращать вспять негативные воздействия изменения климата, приводящие к деградации земель. Оно может также способствовать митигации и адаптации. Сокращение и обращение вспять деградации земель в масштабах от индивидуальных хозяйств до целых водосборов может предоставить экономически эффективные, немедленные и долгосрочные выгоды для местных общин и поддержать достижение Целей Устойчивого Развития с сопутствующими положительными последствиями для адаптации и митигации».

Список литературы

Гладильщикова А.А., Семенов С.М. 2017. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК): цикл Шестого оценочного доклада. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 13-25. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-13-25.

Киотский протокол. 1997. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Электронный ресурс. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml.

МГЭИК 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. – Подготовлено Программой МГЭИК по

национальным кадастрам парниковых газов / Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (редакторы). – Опубликовано: ИГЕС, Япония. – Электронный ресурс. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html/>.

МГЭИК 2007. Руководящие принципы по национальным кадастрам парниковых газов МГЭИК, 2006 г. в 5-ти томах. – Хаяма. Институт глобальных стратегий окружающей среды. – Электронный ресурс. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.

Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015, 32 с. – Электронный ресурс. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

РКИК ООН, 1992. Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата организация объединенных наций. 1992. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705, 30 с. – Электронный ресурс. URL: http://www.un.org/ru/docu-ments/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.

Семенов С.М., Инсаров Г.Э., Мендес К.Л. 2019. Характеристика неопределенностей в оценках межправительственной группы экспертов по изменению климата. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 76-94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96.

Drösler M., Verchot L.V., Freibauer A., Pan G. 2013. Drained inland organic soils. Suppl. to 40 2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent. Wetl., pp. 1-79. <http://www.ipcc-41 nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>.

GA UN 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. – Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. A/RES/70/1.

Houghton R.A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. – *Tellus*, vol. 50B, pp. 298-313.

Houghton R.A. Hackler J.L., Lawrence K.T. 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. – *Science*, vol. 285, pp. 574-578.

IPCC 1992. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 p.

IPCC 1994. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios/ J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E.F. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, editors. – Cambridge University Press, 572 p.

IPCC 2000. Land Use, Land-use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., et al., editors. – Cambridge University Press, 375 p.

IPCC 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.

IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

IPCC 2019b. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Prentice I.C., Farquhar G.D., Fasham M.J.R., Goulden M.L., Heimann M., Jaramillo V.J., Khashgi H.S., Le Quéré C., Scholes R.J., Wallace D.W.R. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 183-238.

Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arneeth A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L. P., Ciais P., Doney S. C., Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Johannessen T., Jones C.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Landschützer P., Lefèvre N., Lienert S., Liu Z., Lombardozzi D., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E. M.S., Nakaoka S., Neill C., Olsen A., Ono T., Patra P., Peregon A., Peters W., Peylin P., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rocher M., Rödenbeck C., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Steinhoff T., Sutton A., Tans P. P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F. N., van der Laan-Luijkx I. T., van der Werf G.R., Viovy N., Walker A. P., Wiltshire A. J., Wright R., Zaehle S., Zheng B. 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data* 10 2141–2194 <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.

Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. 2012. About Meaning of Methane Emission From Drainage Channels. – Doosigik, No. 2, pp.1-10.

Sukumar R., Arneth A., Kurz W., Sirin A., Verchot L. 2019. Cross-Chapter Box 3: Fire and Climate Change. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Статья поступила в редакцию: 05.09.2019 г.

После переработки: 16.10.2019 г.

ANTHROPOGENIC DISTURBANCES OF THE LAND-ATMOSPHERE INTERACTIONS: IPCC ASSESSMENTS

S.M. Semenov^{1), 2), 4)*}, A.A. Gladilshchikova²⁾, T.M. Dmitrieva³⁾

¹⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow Russian Federation; *SergeySemenov1@yandex.ru

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

³⁾ Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
12, Novovagan'kovskiy lane, 125992, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ National Research University Higher School of Economics,
20, Miasnitskaya str., 101000, Moscow, Russian Federation

Abstract. Anthropogenic changes in greenhouse gas fluxes from the earth's surface to the atmosphere have been a central theme of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) scientific reports since its inception. The IPCC special report Climate Change and Land, adopted in 2019, provides an in-depth consideration of this issue and its challenges. Among other things, the report found that human economic activity significantly interferes with the interactions of land and atmosphere with respect to greenhouse substance and energy fluxes, and this affects the global climate. At the same time, some of the consequences of modern changes in the global climate exacerbate the negative anthropogenic changes in the environment of non-climatic nature, which creates additional risks to food security, of land degradation and desertification, creates additional problems to land use. However, effective response measures based on a combination of mitigation and adaptation, as well as on the optimization of pathways of global socio-economic development, exist.

Keywords. Land, atmosphere, greenhouse gases, energy, exchange, climate change, impacts, response, adaptation, mitigation, economic development.

References

Gladil'shchikova A.A., Semenov S.M. 2017. Mezhpriavitel'stvennaya gruppa ekspertov po izmeneniyu klimata (MGEIK): cikl Shestogo ocenochnoogo doklada [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Six Assessment Report Cycle]. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 13-25. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-13-25.

Kiotskij protokol, 1997. *Kiotskij protokol k Ramochnoj konvencii Organizacii Ob"edinennyh Nacij ob izmenenii klimata* [Kyoto Protocol to the United Nations framework Convention on climate change]. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml.

MGEIK 2006. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovyykh gazov MGEIK, 2006 g. Podgotovleno Programmoy MGEIK po*

natsional'nym kadastram parnikovykh gazov [IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006 Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventories Program] Iggleston K.H.S., Buendia L., Miva K., Ngara T. i Tanabe K. (redaktery). – IGES, Yaponiya. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.

MGEIK 2007. *Rukovodyashchie principy po nacional'nym kadastram parnikovykh gazov MGEIK, 2006 g. v 5-ti tomah* [IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories, 2006, in 5 volumes]. Hayama: Institut global'nyh strategij okruzhayushchej sredy. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.

Parizhskoe soglasenie. Organizaciya Ob"edinennyh Nacij [Paris Agreement. United Nations]. 2015, 32 p. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

RKIK OON, 1992. *Ramochnaya Konvenciya Organizacii Ob"edinennyh Nacij ob izmenenii klimata. Organizaciya Ob"edinennyh Nacij* [United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations]. 1992. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705, 30 p. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.

Semenov S.M., Insarov G.E., Mendes K.L. 2019. Harakteristika neopredelennos-tej v ocenkah Mezhpriavitel'svennoj Gruppy Ekspertov po Izmeneniyu Klimata. [Characterization of uncertainties in assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change]. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 76-94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96.

Drösler M., Verchot L.V., Freibauer A., Pan G. 2013. Drained inland organic soils. Suppl. to 40 2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent. Wetl., pp. 1–79. <http://www.ipcc-41 nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>.

GA UN, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. A/RES/70/1.

Houghton R.A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990. – *Tellus*, vol. 50B, pp. 298-313.

Houghton R.A. Hackler J.L., Lawrence K.T. 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. – *Science*, vol. 285, pp. 574-578.

IPCC 1992. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC/Scientific Assessment*, J.T. Houghton, B. A. Callander and S.K. Varney (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 p.

IPCC 1994. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E.F. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, editors). – Cambridge University Press, 572 p.

IPCC 2000. Land Use, Land-use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Watson R. T., Noble I. R., Bolin B., et al., editors). – Cambridge University Press, 375 p.

IPCC 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.

IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

IPCC 2019b. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Prentice I.C., Farquhar G.D., Fasham M.J.R., Goulden M.L., Heimann M., Jaramillo V.J., Khashgi H.S., Le Quéré C., Scholes R.J., Wallace D.W.R. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 183-238.

Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arneeth A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L. P., Ciais P., Doney S. C., Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Johannessen T., Jones C.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Landschützer P., Lefèvre N., Lienert S., Liu Z., Lombardozzi D., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E. M.S., Nakaoka S., Neill C., Olsen A., Ono T., Patra P., Peregón A., Peters W., Peylin P., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rocher M., Rödenbeck C., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Steinhoff T., Sutton A., Tans P. P., Tian H., Tilbrook B., Tubiel-

lo F. N., van der Laan-Luijkx I. T., van der Werf G.R., Viovy N., Walker A. P., Wiltshire A. J., Wright R., Zaehle S., Zheng B. 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data* 10 2141–2194 <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018> 2018.

Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. 2012. About Meaning of Methane Emission From Drainage Channels. – *Doosigik*, No. 2, pp.1–10.

Sukumar R., Arneth A., Kurz W., Sirin A., Verchot L. 2019. Cross-Chapter Box 3: Fire and Climate Change. *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.