

Использование растений, почв и воды в целях охлаждения климата и увлажнения ландшафтов Земли

Справочная информация

За публикацию аналитических обзоров отвечает Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде; их целью является освещение проблем экологических изменений, представление новой научной темы или обсуждение текущей экологической проблемы. Широкие круги лиц получают возможность узнать, что происходит с меняющейся окружающей средой и каковы последствия повседневного выбора, а также поразмышлять о будущих направлениях политики. 25^е издание расширяет наше понимание общих взаимосвязей и последующего обмена энергией между растениями, почвой, а также грунтовыми водами и водой в атмосфере. В нем объясняется, как их использование поможет нам смягчить последствия изменения климата и в то же время создать устойчивую экосистему.

Аннотация

Продолжающееся уничтожение лесов, ухудшение состояния почв, последующая потеря запасов грунтовых вод и сокращение водоудержания ландшафта нарушают циркуляцию воды в атмосфере и через нее. Это нарушение вызывает серьезные изменения в уровне атмосферных осадков, которые могут привести к уменьшению количества осадков и увеличению числа засух во многих районах мира, повышению температур на региональном уровне и усугублению изменения климата. Подобные изменения оказывают влияние на местный климат, но их последствия могут распространиться и на отдаленные регионы. Понимание взаимосвязей и последующего обмена энергией между растениями, почвами, а также грунтовыми водами и водой в атмосфере поможет смягчить последствия изменения климата и создать более устойчивые экосистемы.

Введение

Растительность играет важную, но часто игнорируемую роль в регулировании климата. Представьте, каково стоять в летнюю жару на вспаханном бесплодном поле и в густом лесу. Разница очевидна. Известно, что, например, преобразование лесов в пахотные земли или городские районы приводит к серьезным изменениям, которые могут повлиять на климат.

Из солнечного излучения, достигающего поверхности поля с густой растительностью, только 1% используется для фотосинтеза и 5–10% нагревает воздух («поток явного тепла»). Более 70% излучения используется растениями в ходе испарения, когда вода из жидкого состояния преобразуется в водяной пар, что является очень энергозатратным процессом («скрытое тепло»)ⁱ (**Рисунок 1**). С учетом поверхности, не покрытой растительностью, и поверхности воды, около 50%



Авторство фото: Shutterstock.com



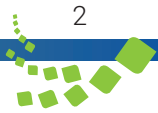
Рисунок 1. Распределение падающей солнечной энергии на растительность¹.

солнечной энергии, достигающей земли, используется для испарения и транспирации воды («суммарное испарение»ⁱⁱ)¹⁻⁴.

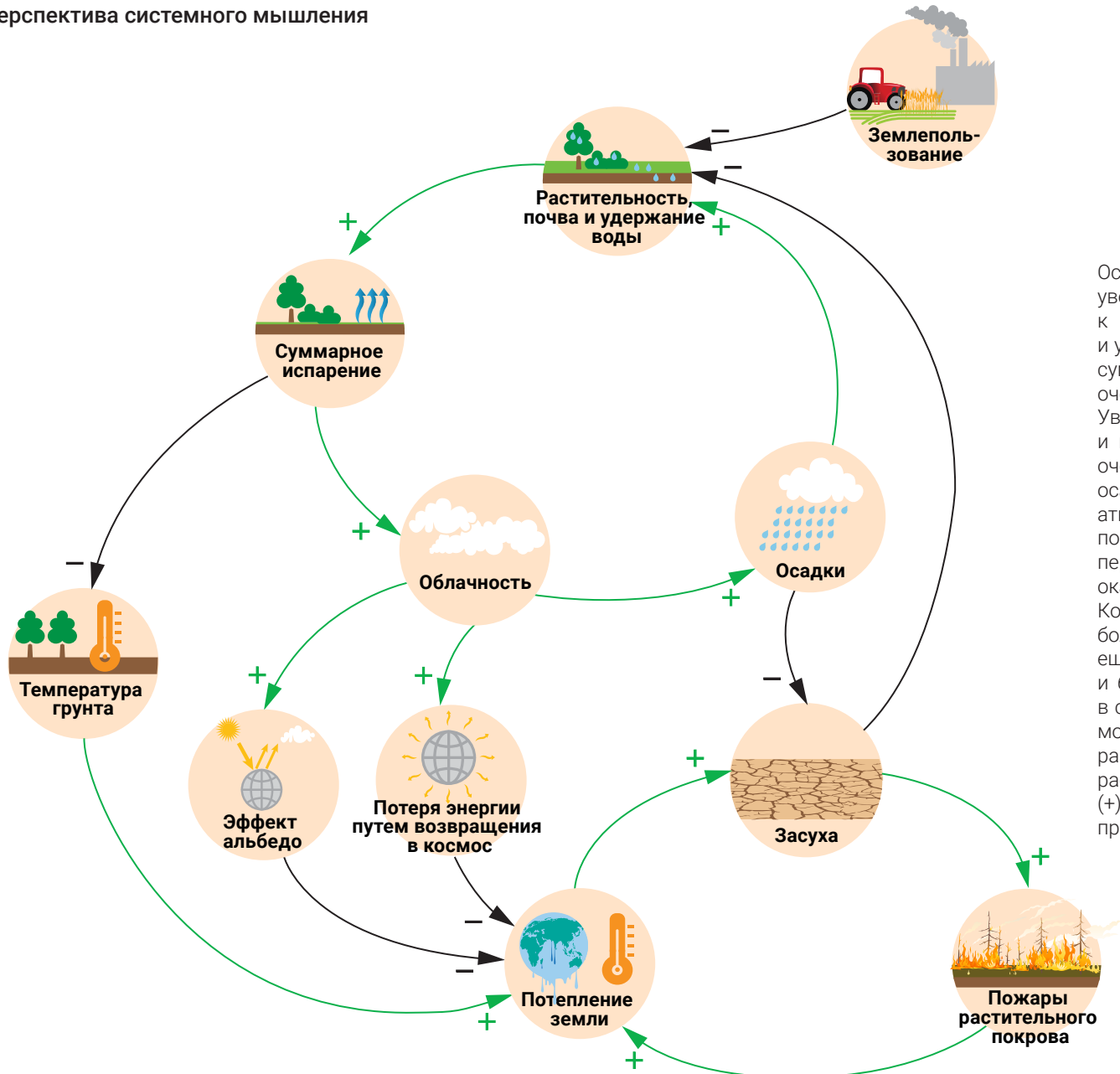
По мере того, как эти массы воздуха поднимаются в атмосферу, водяной пар конденсируется и выделяет количество энергии, равное тому, которое было использовано на земле, а часть ее рассеивается в космосе. Появившиеся в результате процесса облака будут отражать поступающее солнечное излучение и станут источником атмосферных осадков.

ⁱ Скрытое и явное тепло — это виды энергии, выделяемой или поглощаемой в атмосфере. Скрытое тепло связано с изменениями агрегатного состояния между жидкостями, газами и твердыми телами. Явное тепло связано с изменением температуры газа или объекта без изменения агрегатного состояния. (<https://climate.ncsu.edu/edu/Heat>)

ⁱⁱ Совокупные процессы испарения и транспирации воды с поверхности земли в атмосферу.



Перспектива системного мышления



Основные причинно-следственные связи в этой системе: увеличение использования земли человеком привело к сокращению растительного покрова, деградации почвы и уменьшению удержания воды, что непосредственно снижает суммарное испарение, повышая температуру почвы, что, в свою очередь, влияет на глобальное повышение температуры. Увеличение растительности на суше повысит плодородие почвы и подпитку грунтовых вод, увеличит испарение, что, в свою очередь, приведет к увеличению облачности и количества осадков. Увеличение облачного покрова вызывает увеличение атмосферного охлаждения за счет дополнительного отражения поступающего солнечного излучения, а также увеличения передачи энергии обратно в космос, что в совокупности оказывает регулирующее воздействие на потепление земли. Когда эта уравнивающая обратная связь ослабнет, более жаркая земля приведет к большому количеству засух, еще более усугубленных уменьшением количества осадков, и большому количеству пожаров, затрагивающих флору, что, в свою очередь, лишь повысит температуру земли. Эти циклы можно обратить вспять с помощью политики, способствующей разумному землепользованию, которое увеличивает растительный покров и улучшает удержание воды в почве. (+) Влияние происходит в том же направлении, (-) влияние происходит в противоположном направлении.

Почему этот вопрос важен?

Из приблизительно 120 000 км³ воды, которая ежегодно выпадает на поверхность земли в виде осадков, около 60% поступает из океана, а 40% — с суши (см. **Рисунок 2**)^{5,6}. 60–80% этой атмосферной влаги, получаемой с суши, поступает за счет испарения растениями^{2,7,8}, что свидетельствует о важной роли, которую играет растительность в поддержании цикла осадков, а также передаче энергии от земли в верхние слои атмосферы.

До недавнего времени считалось, что воздействие человека на водяной пар в атмосфере незначительно по сравнению с испарением из океанов. Однако, вопреки более ранним представлениям, воздействие, которое люди оказывают на атмосферный водяной пар, обусловлено серьезными антропогенными изменениями почвенного покрова, а не только промышленными выбросами. Такие изменения почвенного покрова действительно оказывают значительное влияние на циклы атмосферного водяного пара^{9–11}.

Почти половина мировых лесов была вырублена с начала ведения сельского хозяйства (большая часть вырубки произошла с 1950 года)^{12,13}, а территории стали полями

с гораздо более низким уровнем растительности. Какое влияние оказывают эти огромные антропогенные изменения почвенного покрова на потоки воды и энергии земли?

Основные выводы

Деревья служат генераторами водяного пара

Каждое дерево в лесу словно водонапорная башня, которая выкачивает воду из земли своими корнями, пропускает через ствол, ветви и листья, выбрасывая в виде водяного пара через поры в листьях в атмосферу. В обычный солнечный день одно дерево может выделять несколько сотен литров воды, охлаждая окружающую среду с мощностью 70 кВт*ч на 100 литров, что эквивалентно охлаждающему эффекту двух бытовых кондиционеров, работающих в течение 24 часов^{14,15}. Миллиарды деревьев создают гигантские реки воды в воздухе («летающие реки») — реки, которые образуют облака, проливающиеся дождем за сотни или даже тысячи километров (**Рисунок 3**)^{16,17}.

Суммарное испарение как источник осадков

В целом 40–60% дождя, выпадающего на землю, формируются за счет влаги, образующейся в результате испарений с суши, за которые отвечают деревья, и поднятия влаги в атмосферу ветром^{11,14,18–20}. В некоторых регионах мира на эту долю приходится 70% осадков¹¹. По мере удаления от моря показатели этого цикла только увеличиваются (**Рисунок 4**).

Тропические вечнозеленые широколиственные леса занимают лишь около 10% поверхности суши Земли, но на их долю приходится 22% мирового суммарного испарения²², что подчеркивает их важность для надрегионального водного цикла. Средние расстояния, которые влага, испарившаяся с суши, преодолевает в атмосфере до того, как выпасть в виде осадков обратно на сушу, составляет порядка 500–5000 км; обычный временной интервал составляет от 8 до 10 дней^{23,24}. Например, от влаги, испаряющейся с Евразийского континента, зависят 80% водных ресурсов Китая¹¹. Основным источником осадков в бассейне Конго является влага, испаряющаяся над Восточной Африкой, а влага бассейна Конго, в свою очередь, становится основным источником осадков в Сахеле¹¹. Состояние тропических лесов Западной Африки особенно важно для течения Нила²⁵. Это объясняет, почему осадки даже в бассейнах основных рек, включая

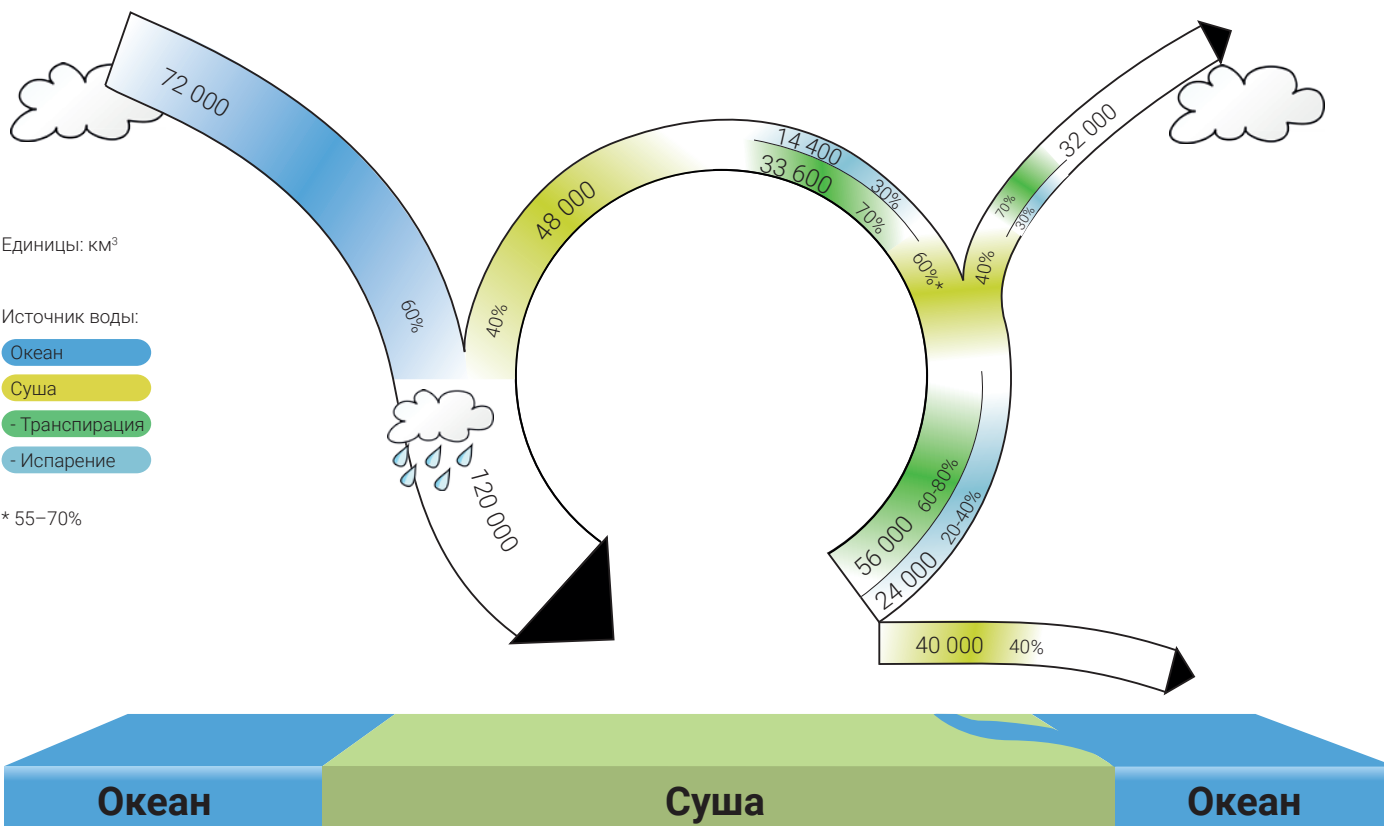


Рисунок 2. Мировые потоки воды. Из 120 000 км³ дождя, который выпадает на континенты, 72 000 км³ воды поступают из океана, а 48 000 км³ — с суши. Из этого количества 60–80% приходится на испарение растениями и 20–40% — на водные объекты и почвы. 32 000 км³ наземного испарения возвращается в океан через влажность воздуха; 40 000 км³ стекают в океаны через реки¹¹.

Графика: Стефан Шварцер, Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде/ГРИД-Женева

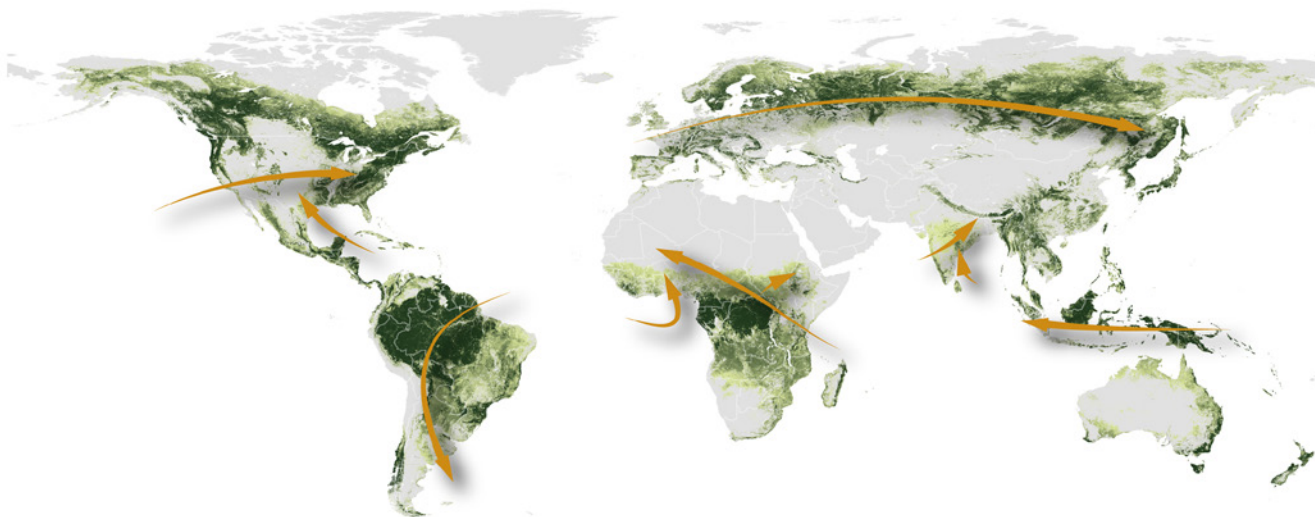


Рисунок 3. Летящие реки переносят водяной пар на большие расстояния, покрытые лесами, которые играют важную роль в создании этого пара, действуя как мощный водяной насос, поглощая и выделяя миллиарды литров воды в виде влаги.

Подготовлено на основе работы Pearce⁷². Перепечатано с разрешения Американской ассоциации содействия развитию науки.

Амазонку, Конго и Янцзы, подвержены в большей степени влиянию изменений землепользования за пределами территорий, нежели внутри них. Даже в нескольких речных бассейнах, которые охватывают лишь небольшое количество стран, потоки оказались серьезно затронуты землепользованием на других территориях²⁶.

Изменение землепользования и измененные тепловые потоки

Согласно моделям, локальный переход от лесов или пастбищ к пахотным землям сокращает годовое суммарное испарение с суши на 30–40%²⁷. В мировом масштабе изменение земного покрова с 1950 по 2000 годы привело к сокращению годового суммарного испарения с суши на 4–5% или 3,000–3,500 км³ и увеличению поверхностного стока воды на 6,8%^{27,28}. С другой стороны, ученые обнаружили, что увеличение растительности имеет охлаждающий эффект, который происходит за счет повышения эффективности вертикального движения тепла и водяного пара между земной поверхностью и атмосферой²⁹.

Изменения в структуре атмосферы в результате вырубки леса

Данные со спутника показывают, что леса оказывают большое влияние на формирование облаков не

только в тропиках, но и в зонах с умеренным климатом: исчезновение лесов может привести к значительному уменьшению локального облачного покрова и, следовательно, к снижению количества осадков³⁰. Моделирование показало, что обширная глобальная вырубка лесов с 1700 по 1850 год привела к уменьшению количества муссонных дождей над

Индийским субконтинентом и юго-восточным Китаем и связанному с этим ослаблению азиатской летней муссонной циркуляции³¹. В тропиках конвекция глубоких кучевых облаков значительно изменилась в результате ландшафтных преобразований (в основном превращения лесных массивов в посевные площади). Это не только влияет на количество осадков в местности, но и оказывает влияние на другие районы, расположенные на большом расстоянии, из-за процессов, известных под названием «дальние корреляционные связи». Подобные дальние корреляционные связи могут иметь воздействие в более высоких широтах, значительно изменяя погоду в этих регионах^{10,25,32,33}. Даже относительно небольшие нарушения земного покрова в тропиках могут привести к неблагоприятным последствиям в более высоких широтах^{34,35}, как, например, в случае с Амазонкой и северо-западом США³⁶. Исчезающие леса также могут привести к уменьшению количества осадков и увеличению продолжительности сезона засухи, как, например, было отмечено в штате Рондония в Бразилии³⁷ или Борнео, где было установлено, что в водоразделах с наиболее масштабной вырубкой лесов количество осадков уменьшилось на 15%³⁸. В Индии уменьшение количества осадков во время сезона муссонов удалось связать с уменьшением лесного покрова, так как последнее стало причиной снижения суммарного испарения и последующего уменьшения количества рециркулируемого компонента осадков³⁹. Это доказывает значительную связь между испарением воды и количеством осадков.

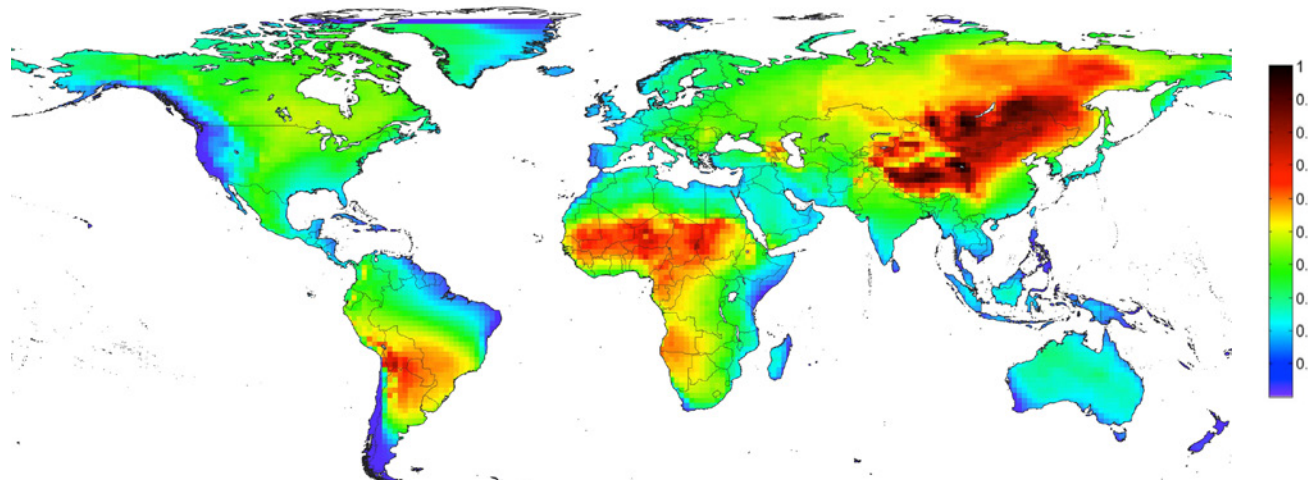


Рисунок 4. Средний коэффициент рециркуляции континентальных осадков (1999–2008 годы). Чем выше это число, тем больше образуется за счет суммарного испарения с суши^{11,21}.

Вторичное излучение оголенной почвы

Обычно более 50% солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, преобразуется путем суммарного испарения в скрытое тепло, которое, в свою очередь, поступает в атмосферу, влияя на цикл осадков и частично возвращаясь обратно в космос.

На оголенных поверхностях, например, на полях под парами, суходольных лугах (в летний сезон и после сбора сена), а также на бетонных или асфальтовых поверхностях почва будет поглощать больше поступающего солнечного излучения, нагреваться, производить явное тепло и излучать, пропорционально четвертой степени своей

абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана), тепловую энергию в атмосферу (**Рисунок 5, Рисунок 6**).

Разница в температуре поверхности между оголенными поверхностями и лесными массивами может, если основываться на примере Центральной Европы, достигать 20 °С в летнее время после полудня (**Рисунок 7**)⁴⁰. В Индонезии на острове Суматра разница температур между лесной территорией и поверхностью сплошной вырубki составила 10 °С, что можно объяснить охлаждающим эффектом леса за счет испарения, который превосходит коэффициент отражательной способности более темных поверхностей, покрытых лесной растительностью⁴¹.

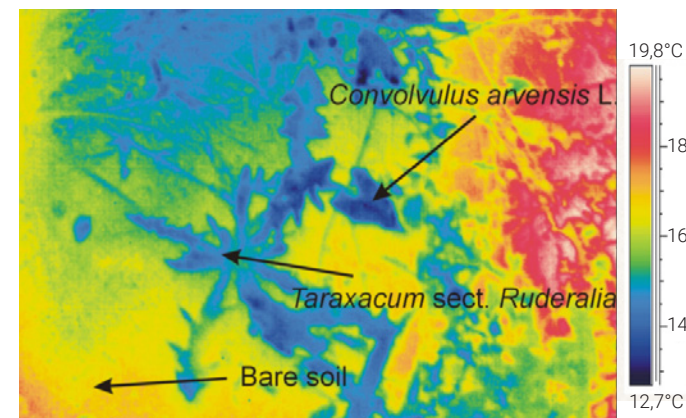
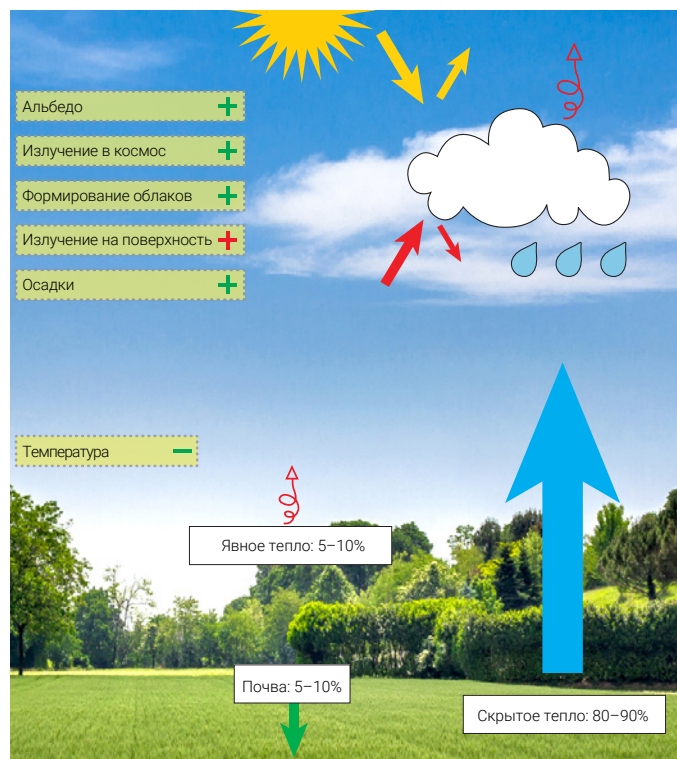


Рисунок 6. Один и тот же участок редкой растительности, сфотографированный в инфракрасном спектре и в видимом спектре. Оголенная поверхность земли заметно теплее, чем поверхность, покрытая листьями и охлажденная испарениями⁹.

Рисунок 5. Испарение снижает температуру почвы и усиливает альbedo облаков, излучение в космос во время процесса конденсации, образование облаков и, следовательно, выпадение осадков. Удаление растительности повышает температуру на уровне земли, выделяет с увеличением температуры земли экспоненциально увеличивающуюся тепловую энергию, создает зоны высокого давления, которые препятствуют прохождению воздушных масс низкого давления (и, следовательно, влажных), уменьшают потенциал образования облаков и, в итоге, количество осадков.

Графика: Стефан Шварцер, Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде/ГРИД-Женева

Это подчеркивает тот факт, что локальные биофизические процессы, вызванные вырубкой лесов, могут серьезно повышать летнюю температуру во всех регионах мира⁴².

Историческая вырубka лесов действительно уменьшила поток скрытого тепла на суше и увеличила осязательное тепло земли^{43–47}. Вырубka лесов вызвала значительное потепление за десятилетие с 2003 по 2013 год, до 0,28 °С в среднем в тропических регионах и сильное потепление

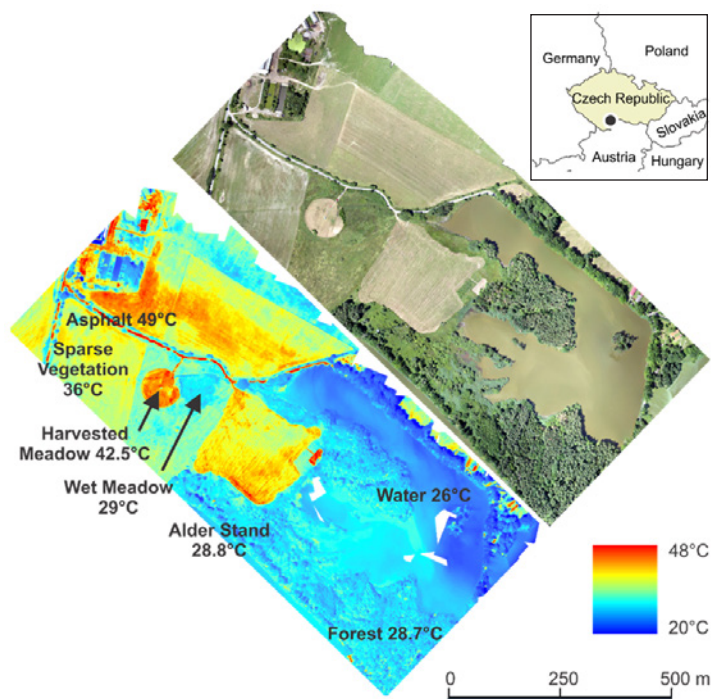


Рисунок 7. Распределение температуры поверхности на территории со смешанным ландшафтом^{14,40}.

до 0,32 °C в южных регионах с умеренным климатом⁴⁸. При нынешних темпах вырубки только одно уничтожение тропических лесов может повысить общемировую температуру на 1,5 °C к 2100 году без учета повышения температуры, вызванного другой деятельностью человека⁴⁹.

В период с 1950 по 2000 год температура поверхности во всем мире увеличилась на 0,3 °C из-за изменений земного покрова²⁷. Нарушения баланса энергии поверхности, вызванные изменением растительности с 2000 по 2015 год, привели к среднему увеличению температуры поверхности на 0,23 °C в тех регионах, где были отмечены изменения в растительном покрове⁵⁰. Средние показатели потепления из-за преобразований земной поверхности ответственны за 18-40% текущих тенденций глобального потепления из-за сокращения суммарного испарения и несмотря на увеличение альбедо поверхности^{42,51,52}.

Органические аэрозоли для образования облаков

Леса важны для формирования потоков энергии и образования осадков, однако, по-видимому, большие лесные массивы также являются биогеохимическими реакторами, в которых в результате биосферных и фотохимических процессов в атмосфере формируются ядра для образования облаков и осадков, тем самым поддерживая гидрологический цикл⁵³. Деревья производят летучие органические соединения и «высвобождают» микроорганизмы, такие как бактерии и споры грибов, пыльца и другой биологический мусор, которые обитают на листьях и переносятся по воздуху во время и после дождя в лесных экосистемах⁵⁴⁻⁵⁷. В атмосфере они составляют важную часть конденсации облаков и ледяных ядер, что, в свою очередь, влияет на образование облаков и выпадение осадков^{53,54,57-59}. Органические аэрозоли могут дополнительно повышать температуру замерзания за счет образования ядер льда. Без этого явления замерзание было бы возможно только при температуре облаков, равной -15°C или ниже; с помощью ледяных ядер процесс начинается при температурах около 0°C, что позволяет эффективно формировать облака и вызывать дождь на определенных территориях без дополнительных усилий⁵⁹⁻⁶².



Авторство фото: Shutterstock.com

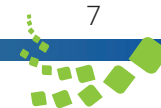


Авторство фото: Shutterstock.com

Океаны как двусторонний буфер

Треть антропогенных выбросов CO₂ и более 90% дополнительного антропогенного тепла, выбрасываемого в атмосферу, поглощаются океанами и накапливается в них. Обсуждая глобальное повышение температуры, важно понимать, что мы видим лишь ~10% от общего эффекта^{63,64}.

Буферное воздействие океанов на CO₂ также происходит в противоположном направлении: при извлечении CO₂ из атмосферы в целях уменьшения атмосферных концентраций CO₂ океаны будут повторно выделять CO₂ из-за вновь образовавшейся разницы давления газа, чтобы восстановить баланс концентрации CO₂ между атмосферой и океаном. Таким образом, быстрое уменьшение CO₂ в атмосфере за короткий период времени вряд ли возможно, даже если нам удастся а) остановить выбросы CO₂ и б) разработать органические или технические решения, позволяющие удерживать CO₂.



Какие выводы следует сделать при разработке политики?

Растительность, плодородные почвы и удержание воды должны быть признаны основными регуляторами водных, энергетических и углеродных циклов. Ниже приведены некоторые выводы, которые следует учесть в политике:

- Помните о **петлях положительной обратной связи**: как объяснялось выше, во время вырубki леса поверхность земли и климат становятся суше и теплее. Это приводит к возникновению условий, которые усугубляют риск лесных и растительных пожаров, которые выделяют дополнительные объемы CO₂ и становятся причиной еще более масштабного обезлесения, создавая тем самым порочный круг^{68,69}. Изменение климата, вырубka лесов, засуха, а также лесные пожары образуют тройной цикл усиливающих обратных связей (**Рисунок 8**).
- Учитывая дальнейшие корреляционные связи больших лесных экосистем, их следует рассматривать как обеспечивающие **мировые блага**. Механизм СВОД+, разработанный в рамках РКИКООН, мог бы, например, послужить моделью для признания и финансирования международных услуг в области водоснабжения и энергетики, предоставляемых этими лесами.
- Особо важные и **уязвимые лесные районы** должны быть защищены, управление ими должно осуществляться соответствующим образом.
- Чрезвычайно важно **остановить обезлесение** и приложить дополнительные усилия для **восстановления лесов** во всем мире.
- Сельскохозяйственные методы должны быть сосредоточены на **восстановлении почв**, поддержании круглогодичного растительного **почвенного покрова** и использовании методов **агролесоводства**ⁱⁱⁱ.



Авторство фото: Shutterstock.com

iii Агролесоводство — это интеграция деревьев или кустарников в сельскохозяйственные поля и пастбища.

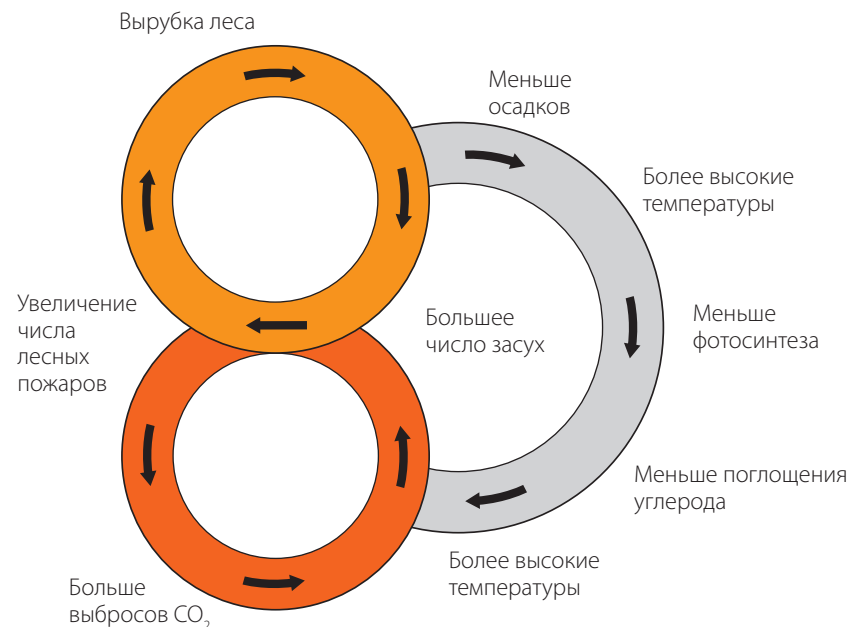


Рисунок 8. Из-за взаимосвязанного характера лесных пожаров, обезлесения, засухи и изменения климата, выделение одного из процессов не позволяет описать сложность взаимосвязанного целого⁶⁵⁻⁶⁷.

Заключение

Важно понимать, что углеродный, водный и энергетический циклы тесно связаны со всей территорией суши. Восстановление атмосферных и наземных циклов влажности в растительности, почвах и атмосфере имеет первостепенное значение для охлаждения планеты и обеспечения режима осадков во всем мире. Пересыхание земного ландшафта — цена неудачи.

Прекращение обезлесения, увеличение масштабов восстановления лесов и внедрение методов агролесомелиорации необходимы, чтобы избежать климатической катастрофы. Для понимания и использования основных закономерностей образования дождя необходим подход, основанный на системном мышлении. Для восстановления осадков в таких районах, как Сахель, потребуется нечто большее, чем просто посадка деревьев в регионе; это потребует (повторного) выращивания лесов на побережье, чтобы привлечь влажный воздух из океана на сушу⁷⁰.

В то же время повышение плодородия почвы, удержания воды и защиты почвы с помощью методов регенеративного органического движения (см. Аналитические обзоры ЮНЕП 010 и 013), например, обеспечение круглогодичного растительного покрова путем посадки покровных культур и подсева или внедрение агролесоводства, представляет собой еще один важный подход для поддержания водного и энергетического циклов. Поиск способов создания дополнительных органических материалов в почве является одним из ключей к успеху для обширных мировых территорий, которые возделываются в настоящее время.

Если говорить в общем, то нам необходима смена парадигмы, оценивающая гидрологические и климатические эффекты растительности в целом и лесов в частности, наряду с их потенциалом поглощения углерода. Влияние растительности, особенно древесного покрова, на климат в местном, региональном и континентальном масштабах дает преимущества, которые требуют более широкого признания^{14,32,71}.

Выражение признательности

Авторы

Стефан Шварцер, Программа ООН по окружающей среде/ГРИД-Женева и Женевский университет.

Рецензенты

Внешние

Дэвид Эллисон, Бернский университет
Проф. Дуглас Шейл, Вагенингенский университет
Лера Майлз, Всемирный центр мониторинга охраны окружающей среды Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП-ВЦМП)
Элеонора Милл, Университет штата Колорадо.

Рецензенты ЮНЕП

Анджелина Джампу, Барнаба Диксон, Габриэль Лаббейт, Джейн Муриити, Кайса Уусимаа, Магда Биесиада, Паскаль Педуцци, Рэйчел Коссе, Сэмюэль Опию, Тим Кристоферсен, Вирджиния Гитари, Ин Ван.

Группа ЮНЕП, ответственная за аналитические обзоры

Александр Калдас, Сандор Фригик, Одри Ринглер, Эстер Катю, Эрик Лицца, Паскиль Мучезия.

Под впечатлением от выступления Уолтера Джена

Отказ от ответственности

Используемые обозначения и презентации не подразумевают выражение какого-либо мнения со стороны ЮНЕП или сотрудничающих агентств относительно правового статуса какой-либо страны, территории, города или района властей или делимитации их границ или рубежей.

© Авторство карт, фотографий и иллюстраций указано отдельно.

Контактные данные

unep-foresight@un.org



Для просмотра онлайн новых и предыдущих выпусков аналитических обзоров ЮНЕП перейдите по адресу:

<https://wesr.unep.org/foresight>

Раннее предупреждение, новые проблемы и перспективы

Библиография

- Pokorny, J. et al. Рассеивание солнечной энергии и контроль температуры водой и растениями. *International Journal of Water* 5, 311 (2010 г.).
- Jasechko, S. et al. Испарение как главный источник потоков воды с суши. *Nature* 496, стр. 347–350 (2013 г.).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. Глобальный энергетический бюджет Земли. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, стр. 311–324 (2009 г.).
- Wang, K. & Dickinson, R. E. Обзор мирового суммарного испарения с суши: наблюдение, моделирование, климатология и изменчивость климата: МИРОВОЕ СУММАРНОЕ ИСПАРЕНИЕ С СУШИ. *Reviews of Geophysics* 50, (2012 г.).
- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. Леса с подветренной стороны: управление рециркуляцией влаги для обеспечения природной устойчивости. *Unasylva* 70, 13 (2019 г.).
- Schneider, U. et al. Оценка гидрологического цикла суши с использованием недавно скорректированной климатологии осадков от глобального центра климатологии осадков (ГЦКО). *Atmosphere* 8, 52 (2017 г.).
- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Транспирация в глобальном круговороте воды. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, стр. 115–117 (2014 г.).
- Wei, Z. et al. Пересмотр вклада транспирации в глобальное суммарное испарение с поверхности земли: пересмотр глобального разделения суммарного испарения. *Geophysical Research Letters* 44, стр. 2792–2801 (2017 г.).
- Kravcik, M., Pokorny, J., Kohutiar, J., Kovacik, M. & Toth, E. Вода для восстановления климата — новая водная парадигма. 94 (2007 г.).
- Mahmood, R. et al. Изменение почвенного покрова и их биогеофизическое воздействие на климат: ИЗМЕНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ИХ БИОГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КЛИМАТ. *International Journal of Climatology* 34, стр. 929–953 (2014 г.).
- van der Ent, R. J., Savenije, H. N. G., Schaefli, B. & Steele-Dunne, S. C. Происхождение и судьба атмосферной влаги над континентами. *Water Resources Research* 46, (2010 г.).
- Crowther, T. W. et al. Обтобразование плотности деревьев в глобальном масштабе. *Nature* 525, стр. 201–205 (2015 г.).
- FAO. Состояние мировых лесов в 2012 году. (Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2012 г.).
- Ellison, D. et al. Деревья, леса и вода: свежие идеи для жаркого мира. *Global Environmental Change* 43, стр. 51–61 (2017 г.).
- Pokorny, J. Что может дерево? (2012 г.).
- Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kröpp, J. Воздушные и поверхностные реки: влияние подветренной стороны на доступность воды в результате изменений в землепользовании в Амазонии. *Hydrological Earth Syst. Sci.* 22, стр. 911–927 (2018 г.).
- Nobre, A. D. Будущий климат Амазонии. 42 (2014 г.).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Рециркуляция осадков в бассейне Амазонки. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, стр. 861–880 (1994 г.).
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. Открытие невидимой воды: рециркуляция влаги как экосистемная услуга. *PLOS ONE* 11, e0151993 (2016 г.).
- Staal, A. et al. Каскады лесных осадков защищают от засухи всю территорию Амазонии. *Nature Climate Change* 8, стр. 539–543 (2018 г.).
- van der Ent, R. J. Новый взгляд на гидрологический цикл на континентах. (2014 г.).
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenije, H. N. G. Контрастные роли перехвата и транспирации в гидрологическом цикле — Часть 1. Временные характеристики на суше. *Earth System Dynamics* 5, стр. 441–469 (2014 г.).
- van der Ent, R. J. & Savenije, H. N. G. Продолжительность и временные масштабы рециркуляции атмосферной влаги. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, стр. 1853–1863 (2011 г.).
- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. Пересмотренное время нахождения воды в атмосфере. *Hydrological Earth Syst. Sci.* 21, стр. 779–790 (2017 г.).
- Gebrehiwot, S. G. et al. Воды бассейна Нила и тропические леса Западной Африки: пересоммисивная граница. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, e1317 (2019 г.).
- Wang-Erlandsson, L. et al. Удаленное землепользование влияет на речные потоки через атмосферные дальние корреляционные связи. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, стр. 4311–4328 (2018 г.).
- Sterling, S. M., Duchame, A. & Polcher, J. Влияние глобального изменения растительного покрова на круговорот воды на суше. *Nature Climate Change* 3, стр. 385–390 (2013 г.).
- Gordon, L. J. et al. Антропогенная модификация глобальных потоков водяного пара с поверхности суши. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, стр. 7612–7617 (2005 г.).
- Chen, C. et al. Биофизические последствия озеленения Земли в значительной степени контролируются аэродинамическим сопротивлением. *Sci. Adv.* 6, eabb1981 (2020 г.).
- Teuling, A. J. et al. Данные наблюдений свидетельствуют об усилении облачного покрова над лесами Западной Европы. *Nature Communications* 8, (2017 г.).
- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. Изменение в азиатском муссонном климате в период с 1700 по 1850 год, вызванное доиндустриальным культивированием. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, стр. 9586–9589 (2009 г.).
- Pielke, R. A. Влияние пространственного распределения растительности и почв на прогнозирование кучевых конвективных осадков. *Reviews of Geophysics* 39, стр. 151–177 (2001 г.).
- Sheil, D. & Muryyaro, D. Как леса привлекают дождь: проверка новой гипотезы. *BioScience* 59, стр. 341–347 (2009 г.).
- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Смоделированное воздействие исторических изменений почвенного покрова на глобальный климат в условиях северной зоны. *Climate Dynamics* 16, стр. 93–105 (2000 г.).
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Чувствительность общей модели циркуляции к глобальным изменениям индекса площади листьев. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, стр. 7393–7408 (1996 г.).
- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. Смоделированные изменения на северо-западе США. Климат в ответ на обезлесение Амазонки. *Journal of Climate* 26, стр. 9115–9136 (2013 г.).
- Soe, M. T. et al. Леса Амазонки и умеренный региональный климат северда — ключ к будущему. *Tropical Conservation Science* 10, 194008291772067 (2017 г.).

- McAlpine, C. A. et al. Утрата лесов и климат Борнео. *Environmental Research Letters* 13, 044009 (2018 г.).
- Paul, S. et al. Снижение осадков в период индийского летнего сезона муссонов из-за изменений в землепользовании. *Scientific Reports* 6, (2016 г.).
- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková — Procházková, A. Суточная динамика температуры площади изучения различных типов почвенного покрова в культурном ландшафте умеренного климата: последствия для местного климата. *Ecological Engineering* 54, стр. 145–154 (2013 г.).
- Sabajo, C. R. et al. Распространение масличной пальмы и других товарных культур вызывает повышение температуры поверхности земли в провинции Джаббэ в Индонезии. *Biogeosciences* 14, стр. 4619–4635 (2017 г.).
- Alkama, R. & Cescaati, A. Биофизические климатические последствия недавних изменений в глобальном лесном покрове. *Science* 351, стр. 600–604 (2016 г.).
- Volnoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. Влияние преобразования растительного покрова на климат поверхности. 36 (2002 г.).
- Brovkin, V. et al. Биогеофизические эффекты исторических изменений почвенного покрова, моделируемые шестью моделями земной системы промежуточной сложности. *Climate Dynamics* 26, стр. 587–600 (2006 г.).
- Pitman, A. J. et al. Неопределенности в реагировании климата на прошлые изменения почвенного покрова: первые результаты сопоставительного исследования LUCID. *Geophysical Research Letters* 36, (2009 г.).
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. Биогеофизическая и биогеохимическая реакция климата на историческое антропогенное изменение почвенного покрова: КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА. *Geophysical Research Letters* 37, (2010 г.).
- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. Влияние изменения почвенного покрова на атмосферную циркуляцию. *Climate Dynamics* 17, стр. 467–477 (2001 г.).
- Li, Y. et al. Потенциальные и фактические последствия обезлесения и лесопосадки для температуры поверхности земли: ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ПЛОЩАДИ ЛЕСОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, стр. 14 372–14 386 (2016 г.).
- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. Т. Недооценивается ли влияние землепользования на потепление в климатической политике? *Environmental Research Letters* 12, 094016 (2017 г.).
- Duveiller, G., Hoeker, J. & Cescaati, A. Влияние изменения растительности на энергетический баланс поверхности Земли. *Nature Communications* 9, (2018 г.).
- Bar-Wess, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. Воздействие климата и реакция на идеальные изменения поверхностного открытого и явного тепла. *Environmental Research Letters* 6, (2011 г.).
- Woloszyn, M. & Harris, N. Тропические леса и изменение климата: новейшая наука. *World Resources Institute* 14 (2018 г.).
- Poehli, U. et al. Вавеси тропических лесов как биогенные ядра облаков и осадки в Амазонии. *Science* 329, стр. 1513–1516 (2010 г.).
- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. У постоянных последствий сильных дождей для концентрации ледяных ядер и осадков биофизической причине. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, стр. 2313–2326 (2015 г.).
- Womers, R. M. et al. Характеристика колоний бактерий в воздухе на возвышенности и их способность выступать в качестве ядер атмосферного льда. *Applied and Environmental Microbiology* 75, стр. 5121–5130 (2009 г.).
- Conan, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Vitr, K. E. Осадки приводят к созданию атмосферных частиц, образующих лед в прибрежном климате Южной Норвегии. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, стр. 11065–11073 (2017 г.).
- Joung, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. Образование биоаэрозоля каплями дождя на почве. *Nature Communications* 8, (2017 г.).
- Després, Viviane R. et al. Первые биологические аэрозольные частицы в атмосфере: обзор. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 15998 (2012 г.).
- Morris, C. E. et al. Биоциркуляция: цикл обратной связи, объединяющий историю Земли, динамику экосистем и землепользование с помощью биологических ядер льда в атмосфере. *Global Change Biology* 20, стр. 341–351 (2014 г.).
- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. Повсеместное распространение биологических ядер льда во время оледенения. *Science* 319, стр. 1214–1214 (2008 г.).
- Lazaridis, M. Бактерии как ядра конденсации облаков (CCN) в атмосфере. *Atmosphere* 10, стр. 786 (2019 г.).
- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. Обтобразование обратной связи осадков для выявления потенциальной чувствительности осадков к биологическим аэрозолям. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, стр. 1109–1118 (2017 г.).
- Cheng, L. et al. Рекордное потепление океана продолжилось в 2019 году. *Advances in Atmospheric Sciences* 37, стр. 137–142 (2020 г.).
- Pörtner, H.-O. et al. Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата. Краткий отчет для директивных органов. (2019 г.).
- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. Влияние вырубки тропических лесов на глобальный гидроклимат: многомодельный анализ. *Journal of Climate* 22, стр. 1124–1141 (2009 г.).
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. Управление климатом в условиях изменчивости пожаров в тропиках и субтропиках: УПРАВЛЕНИЕ КЛИМАТОМ ПРИ ПОЖАРАХ. *Global Biogeochem. Cycles* 22, n/a/n/a (2008 г.).
- Zhao, M. & Running, S. W. Вызванное засухой сокращение глобального чистого наземного первичного производства с 2000 по 2009 год. *Science* 329, стр. 940–943 (2010 г.).
- Управление рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий для содействия адаптации к изменению климата: Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.
- Международный союз научно-исследовательских лесных организаций. Мировые проблемы пожаров в условиях глобального потепления. (2018 г.).
- Ellison, D. & Speranza, C. I. От океанских до прибрежных вод и обратно: содействие устойчивости деревьев, кустарников и лесных ландшафтов в Сахеле. *Science of The Total Environment* 739, 140002 (2020 г.).
- Lemordant, L., Gentile, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. Критическое влияние физиологии растительности на континентальный гидрологический цикл в ответ на повышение уровня CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, стр. 4093–4098 (2018 г.).
- Pearce, F. Спорная российская теория утверждает, что леса создают не только дождь, но и ветер. *Science | AAAS* <https://www.sciencemag.org/news/2020/06/controversial-russian-theory-claims-forests-dont-just-make-rain-they-make-wind> (2020).

