

В редакцию журнала  
“Водные ресурсы”

12 февраля 2007 г.

Глубокоуважаемая редакция!

Наша статья “К проблеме круговорота воды: лесной биотический насос, закачивающий воду с океана на сушу” была отклонена решением редколлегии № 162. Нам была прислана не заверенная официально анонимная рецензия, в которой рецензент представляет статью несостоятельной в научном плане. Ознакомившись с рецензией, мы обнаружили, что ее содержанием являются научно безграмотные утверждения, несовместимые с профессиональной компетентностью в области естественной науки. Стиль написания рецензии неприемлем в научном общении: рецензент пытается скрыть свою неосведомленность в фундаментальных вопросах, которые должны были бы составлять основу его профессиональных знаний, за беспрецедентной развязностью стиля рецензии. Поскольку редколлегия научного журнала не может делать какие-либо выводы о пригодности или непригодности статьи для публикации на основании некомпетентных суждений, мы считаем необходимым дать ответ на замечания рецензента. Мы полагаем, что редколлегии следует обратить внимание на сложившуюся ситуацию.

Эта ситуация не может не вызывать у нас глубокой озабоченности, и мы хотели бы иметь официальные документы о статусе нашей статьи. Мы просим редколлегию прислать нам рецензию вторично, заверенную официальными лицами в том, что она верна.

С уважением,

Анастасия Макарьева

Виктор Горшков

Ответ на рецензию статьи А.М.Макарьевой и В.Г.Горшкова  
“К проблеме круговорота воды: лесной биотический насос,  
закачивающий воду с океана на сушу”,  
направленную для опубликования в журнал “Водные ресурсы”

Замечания по введению

1) Рецензент полагает, что пример с речным бассейном Нила опровергает наше утверждение о том, что “осадки, приносимые с океана, должны равномерно распределяться по речному бассейну”. Эту цитату из нашего введения рецензент выдернул из контекста, в котором явно указано, что такое распределение должно иметь место в экологических сообществах, имеющих максимальную продуктивность (т.е. в лесах). Как хорошо известно, территория, по которой протекает река Нил, является, кроме верховьев реки, большей частью пустыней, поэтому к ней это утверждение не относится. Замечание, сделанное рецензентом, свидетельствует либо о полном непонимании содержания статьи, либо о намеренной дискредитации наших результатов.

Согласно хорошо известному определению, “речной бассейн – площадь суши, с которой воды осадков стекают поверхностным или грунтовым стоком в какую-либо реку” (БСЭ, т. 36, стр. 448 (1955)). Это определение речного бассейна существует много столетий и не претерпело с середины прошлого века каких-либо изменений. Следовательно, речным бассейном Нила являются его истоки, где посредством осадков и формируется река. Территория Нила, где река течет по пустыне, не относится к речному бассейну. Равномерное распределение осадков по речному бассейну р. Нил, расположенному в верховьях реки и граничащего по водоразделу с бассейном р. Конго, содержатся в эмпирических данных, используемых в нашей статье. Все выводы и результаты нашей статьи мы основываем на эмпирических данных, которые очевидно учитывают все виды формирования осадков, включая те, которые перечислены в замечаниях рецензента. Подчеркнем, что в статье, как это неоднократно указывается, мы используем среднегодовые данные, усредненные по нескольким десятилетиям. Обеспеченность, отражающая гауссову кривую распределения осадков вокруг среднего значения, не обсуждается. «Экспоненциальное затухание осадков по мере продвижения с океана на сушу», соответствующее **по определению** однородности атмосферы, см. пункт 3) нашего ответа, действительно наблюдается не везде, и мы объясняем в статье почему.

2) Конечная фраза критики нашего введения в рецензии выглядит так: “Авторы не ориентируются и в механизмах формирования речного стока, вероятно, им не известно, что помимо дождевого питания рек существует еще снеговое, ледниковое и грунтовое, иначе они не утверждали бы, что влага с океанов должна компенсировать речной сток”. Это замечание рецензента демонстрирует, что он не понимает основной закон, на котором базируются гидрология и метеорология – закон сохранения вещества. Запас влаги, сосредоточенный во всех озерах, болотах и горных ледниках, может стечь через речной сток в океан за четыре года. Это цитируется на стр. 13, 14 нашей статьи. Грунтовой сток представляет собой часть стока речного бассейна в соответствии с приведенным выше определением.

Поэтому, если бы влага, поступающая с океанов, не должна была бы компенсировать речной сток, стекающий в океан, то это означало бы, что речной сток возникает на суше из ничего – все известные научные данные о возможном синтезе влаги на суше путем каких-либо химических реакций и возможном поступлении влаги из земных недр на суше показывают, что эти источники на много порядков меньше речного стока. Это неоднократно отмечалось в

гидрологической литературе, см., например, Львович (1974), ссылка на эту работу присутствует в нашей статье.

Со всей очевидностью гидролог, который не понимает фундаментальной основы гидрологии – закона сохранения вещества, не может быть рецензентом никакой научной статьи. Мы могли бы на этом закончить наш ответ. Но мы прокомментируем и остальные замечания рецензента.

3) Рецензент признает в начале рецензии, что в некоторых областях осадки на суше могут экспоненциально затухать с удалением от океана. Сток  $R$ , рассчитанный на единицу площади земной поверхности, пропорционален осадкам (этот факт неоднократно отмечался в гидрологической литературе, см. например, Львович, 1974 г. и ссылки в этой книге). Следовательно с экспоненциальным затуханием осадков сток  $R$  также затухает экспоненциально. Из закона сохранения вещества (которого не понимает рецензент, см. пункт 2) в нашем ответе) следует, что  $R(x) = -dF(x)/dx$ , где  $F(x)$  – поток влаги с океана на сушу через атмосферу,  $x$  – расстояние удаления от океана. (Полный поток влаги с океана на

сушу через единицу береговой границы  $F(0) = \int_0^L R(x)dx$ ,  $x = L$  – удаление, на котором сток

становится пренебрежимо малым) Экспоненциальное падение стока  $R(x)$  с расстоянием  $x$  означает пропорциональное изменение стока  $R(x)$  и потока  $F(x)$ , т.е.  $R(x) = -dF(x)/dx = +F(x)/l$ , где константа  $l$  имеет размерность длины. Только такое уравнение имеет экспоненциальное решение. Оно соответствует определению однородности среды: в любой точке  $x$  все процессы происходят так же, как и в любой другой точке, включая начало при  $x = 0$ . Величина  $l$  оценивается нами по эмпирическим данным. Мы не делаем никаких теоретических предсказаний величины  $l$ . Таким образом, в отношении водного режима атмосфера по определению однородна там, где наблюдается экспоненциальное падение осадков и стока, и не однородна там, где экспоненциальное падение не наблюдается. Поэтому весь абзац, содержащий “критику” величины  $l$  не имеет отношения к делу, демонстрируя лишь некомпетентность рецензента в рассматриваемом вопросе.

3) Критика в абзаце, связанном с Амазонкой, Конго и великими реками Сибири, основана на описанном в пункте 2) непонимании рецензентом закона сохранения вещества. Внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) не объясняет наблюдаемое распространение потоков влаги с океана на сушу вдоль экватора (а не перпендикулярно ему в соответствии с ВЗК). Эти потоки поддерживаются ветрами, дующими вдоль, а не перпендикулярно экватору, о которых в последнее время накоплено много эмпирических данных.

Осадки в бассейнах сибирских рек возрастают при продвижении вглубь континента, что не может быть объяснено без привлечения действия лесного биотического насоса. Это опять-таки подробно объяснено в тексте нашей статьи.

4) Следующий абзац рецензии с выделением жирным шрифтом названия «**Биотический насос атмосферной влаги**» содержит изложение ряда традиционных взглядов, которые оставались научно необоснованными и, как мы показываем в статье, неверны. Лес выделен по сравнению с травяными и кустарниковыми сообществами тем, что испаряющая поверхность листьев сплошного лесного покрова в несколько раз больше, чем у травостоя и кустарников, и на порядок величины больше, чем в открытом океане. Тому, что леса растут там, где “сложились благоприятные климатические условия”, не “приходит кому-то в голову”, как полагает рецензент, этому бездоказательно учат все население, начиная со средней школы. Наша статья представляет доказательство того, что именно растительность определяет водный режим суши, а не наоборот. Мы показываем, что изменение

растительного покрова может полностью изменить характер атмосферной циркуляции на суше, и вместе с ней водный режим.

5) Приложения содержат уравнения на масштабах порядка и больших высоты равномерноплотной атмосферы. В приложении нет никаких упоминаний о процессах на молекулярном уровне. В приложении доказано новое, не известное в метеорологии, утверждение, что испарение (поток водяного пара с земной поверхности в атмосферу) равен нулю, когда отрицательный вертикальный градиент температуры воздуха меньше критического значения 1,2 К/км. При отрицательном градиенте температуры воздуха, большем критического (1,2 К/км), возникает испарение и не учитываемая до сих пор сила испарения, имеющая осмотическую природу и определяющая циркуляцию атмосферного воздуха.

6) Оба утверждения рецензента, начинающиеся со слов “во-первых” и “во-вторых” при анализе нашей фразы на стр. 6, неверны. Условия, при которых испарение леса в несколько раз превосходит испарение с открытой водной поверхности, имеют место после дождя и перехвата влаги листьями, а также при открытых устьицах и максимальной транспирации листьев. Совпадение температуры поверхности океана и поверхности листьев также часто встречающееся явление. Таким образом, оба наши утверждения не противоречат имеющимся данным.

Полное испарение  $E$  с земной поверхности, включающее испарение почвы, испарение влаги, перехваченной листьями после дождя, и транспирацию листьев называют эвапотранспирацией. То, что именно эту величину мы понимаем под эвапотранспирацией, следует из введенных нами обозначений на стр. 2 и использования термина эвапотранспирации на стр. 7 и 8. Из этого также следует, что часть фразы второго абзаца на стр. 8: «составляющая основную часть испарения с поверхности почвы» является опечаткой, что очевидно при внимательном чтении статьи. Физическое испарение на лишенной растительности суше и при безоблачном небе определяется только потоком солнечной энергии, что называют испаряемостью только в русскоязычной метеорологической литературе. Реальное испарение, облачность и циркуляция воздушных масс определяется, как мы показали, характером растительности или ее отсутствием в пустынях. Все это учтено в тексте нашей статьи.

7) Наше утверждение об ураганах и смерчах на стр. 11 верно. Термин ураган используется в метеорологической литературе в двух значениях: 1) очень сильный ветер, скорость которого превышает 29 м/с. Над сушей может разрушать постройки, ломать деревья и т.п., над морем он вызывает огромные волны, иногда приводящие к гибели судов. 2) местное название тропических циклонов, БСЭ, т.44, стр.281 (1956), Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи, М., (1969). Ураганы (тропические циклоны) формируются над океанами и не подходят к покрытой большими массивами ненарушенного леса суше. Последнее время ураганы в первом значении стали часто появляться над территорией Западной Европы. Ураганов и смерчей над ненарушенным лесом практически не бывает. Смерчи возникают над океаном и на суше над обезлесенной и сильно нарушенной лесной территориями. Гидро- и аэродинамика ураганов и смерчей до сих пор не ясна. Не существует удовлетворительного объяснения ни структуры ураганов, ни скоростей ветра, наблюдаемых в них.

Анастасия Макарьева

Виктор Горшков

Директору  
Института водных проблем  
Российской Академии наук,  
члену редколлегии журнала  
“Водные ресурсы” РАН,  
чл.-корр. РАН  
Владимиру Ивановичу  
Данилову-Данильяну

12 февраля 2007 г.

Глубокоуважаемый Владимир Иванович!

Считаем необходимым поставить Вас в известность относительно ситуации, сложившейся с рассмотрением нашей статьи “К проблеме круговорота воды: лесной биотический насос, закачивающий воду с океана на сушу” (Макарьева А.М., Горшков В.Г.) в журнале “Водные ресурсы”, издаваемом Вашим институтом.

С уважением,

Макарьева А.М.

Горшков В.Г.

Приложения:

Рукопись статьи (29 с.)

Рецензия на статью (4 с.)

Письмо авторов в редакцию с ответом на рецензию (4 с.)

## РЕЦЕНЗИЯ

на статью А.М. Макарьевой и В.Г. Горшкова “К проблеме круговорота воды: лесной биотический насос, закачивающий воду с океана на сушу”

Рецензируемая работа посвящена проблеме круговорота воды на суше. Авторы исследуют характер распределения осадков над участками суши, покрытыми естественными лесами и лишенными лесной растительности (пустынями, степями, прериями, саваннами), по 9 континентальным разрезам. В соответствии с данными наблюдений получилось, что при отсутствии лесной растительности осадки экспоненциально затухали с удалением от океана, в то время как над лесными территориями подобного затухания не наблюдалось. Цель статьи – дать физическое обоснование этим эмпирическим фактам. Основной вывод, к которому приходят авторы и который красной нитью проходит через всю статью, состоит в том, что леса являются “биотическим насосом, закачивающим влагу с океана на сушу”.

Многие утверждения авторов и трактовка различных природных явлений в основном являются ошибочными, по-видимому, из-за отсутствия элементарных знаний в области климатологии, физики атмосферы и гидрологии, что и привело их к построению абсурдной теории.

Начнем с того, что исходные посылки авторов, излагаемые во **Введении**, неверны. Например, авторы безапелляционно утверждают следующее:

*“...компенсирующие речной сток осадки, приносимые с океана, должны равномерно распределяться по всей площади речного бассейна.*

*Пассивные геофизические потоки атмосферного транспорта испарившейся из океанов влаги на континенты экспоненциально затухают. Эмпирически определяемая длина затухания имеет порядок нескольких сотен километров, что намного меньше линейных размеров континентов. Поэтому геофизические потоки влаги с океанов на сушу не могут компенсировать равномерно распределенный по речному бассейну речной сток из глубины континентов. Это означает, что не существует геофизического объяснения наблюдаемого существования речных бассейнов на территориях материковых масштабов порядка миллионов квадратных километров.*

*Существование речных бассейнов основано на активном механизме (насосе), транспортирующем влагу вглубь континентов. Этот механизм создан на суше в процессе эволюции в виде леса...” (стр.2).*

Практически все эти утверждения некорректны. Так, неясно, почему авторы решили, что атмосферные осадки и речной сток должны быть равномерно распределены по речным бассейнам. Это в корне противоречит данным наблюдений (наглядным примером может служить бассейн Нила). Авторам, по-видимому, неизвестны механизмы формирования атмосферных осадков. Осадки могут не только выпадать из влажных

воздушных масс, сформировавшихся над океанами и переместившихся на сушу, но и формироваться над сушей за счет конвекции и на атмосферных фронтах. На выпадение осадков из воздушных масс оказывает влияние ряд факторов, в частности, близость воздушной массы к состоянию насыщения, наличие в воздухе ядер конденсации, орография. Поэтому далеко не везде может наблюдаться экспоненциальное затухание осадков по мере продвижения с океана на сушу. Авторы не ориентируются и в механизмах формирования речного стока, вероятно, им неизвестно, что помимо дождевого питания рек существует еще снеговое, ледниковое и грунтовое, иначе они не утверждали бы, что влага с океанов должна компенсировать речной сток.

В разделе “**Физические потоки влаги**” авторы опять же проявляют полное непонимание механизмов формирования осадков и стока. Исходной посылкой для последующих умозаключений является утверждение авторов об однородности атмосферы (*“В силу однородности атмосферы вероятность перехода атмосферной влаги в состояние речного стока не зависит от пройденного в атмосфере расстояния  $x$ ”*, стр. 3). Непонятно, на основании чего авторы решили, что атмосфера однородна. Более того, основная масса осадков выпадает именно вследствие ее неоднородности: бароклинности на фронтах в умеренной зоне и конвективной неустойчивости в ВЗК (внутритропическая зона конвергенции) и других областях в тропиках. Поэтому все дальнейшие выкладки, оценки расстояний  $l$  и пр. неверны. Кстати, фронты могут образовываться и в центре континентов (пример - летний максимум осадков в Центральной Сибири в зоне циклогенеза, там осадки снова растут после уменьшения над Казахстаном и Западной Сибирью). Отметим также, что выпадение осадков происходит (при наличии в атмосфере ядер конденсации), когда содержащийся в атмосфере водяной пар достигает состояния насыщения, что никак не связано с расстоянием от океана. Для достижения состояния насыщения нужно охлаждение воздушной массы (это возможно при поступлении на более холодную подстилающую поверхность или при восходящих движениях), что может происходить где угодно, независимо от удаленности от океана.

Непонимание авторами механизмов формирования осадков приводит их к ложному выводу, что *“объяснить наблюдаемое существование обширных хорошо увлажненных континентальных областей протяженностью в несколько тысяч километров (бассейн Амазонки, экваториальная Африка, Сибирь), на которых и до настоящего времени функционируют естественные леса можно только с привлечением отличного от пассивного геофизического механизма активного транспорта влаги с океана на сушу (биотического насоса – примечание рецензента)”*. К такому выводу опять же можно прийти лишь вследствие отсутствия элементарных знаний в соответствующих областях наук о Земле. Иначе авторам было бы понятно, что существование увлажненных областей

в “бассейне Амазонки и экваториальной Африке” связано с тропической циркуляцией атмосферы, в частности, с наличием уже упоминавшейся выше ВЗК. В Сибири же, где осадков выпадает гораздо меньше, чем в экваториальном поясе, лесные сообщества также оказываются обеспеченными влагой в вегетационный период, что обусловлено во многом циклонической деятельностью в летнее время и низкой испаряемостью.

На основании всего вышесказанного очевидно, что следующий раздел рецензируемой статьи “**Биотический насос атмосферной влаги**” не имеет смысла, поскольку все непонятные авторам факты имеют вполне научное объяснение и не нуждаются в привлечении еще каких-либо мифических механизмов. Однако, уделим еще некоторое внимание этому разделу, изобилующему неверными утверждениями и умозаключениями, чтобы авторам было легче понять свои заблуждения. Так, авторы утверждают, что “*функционирование лесного сообщества должно быть направлено на поддержание влажности почвы на стационарном оптимальном для жизни уровне*” (и ему это удастся с помощью биотического насоса), в то же время существуют “*открытые системы типа саванн, степей...или кустарников, неспособных поддерживать высокое влагосодержание почвы*”. Почему авторы возлагают такую миссию (поддержание влажности почвы на оптимальном уровне) на лесное сообщество? И почему травяные и кустарниковые сообщества оказались столь уж неспособными? Удивительно, что такая простая мысль, что леса растут там, где сложились благоприятные климатические условия, обеспечивающие достаточное для их существования увлажнение почвы и количество энергии, не приходит авторам в голову. В случае же недостаточного увлажнения в фазу активного роста (при постоянстве и длительности засушливых периодов) леса просто не смогли бы выжить, травяные и кустарниковые сообщества в этих условиях (до определенных пределов) еще могут существовать, причем во время длительных засушливых периодов надземная фитомасса может отмирать, а с наступлением дождливого периода вновь возобновляться. При недостаточном количестве осадков степи переходят в полупустыни и пустыни. В высоких широтах, где увлажнение достаточно, а лимитирующим фактором является энергия, лесная зона сменяется тундрой. Таким образом распределение по земному шару геоботанических зон определяется климатическими условиями, а не “способностями” растений.

Далее авторы приводят “обоснование насоса” (Приложение). При этом используются уравнения на молекулярном уровне, которые ни с того ни с сего распространены на масштабы десятков и сотен километров, где действуют совершенно другие механизмы.

На стр. 6 авторы пишут: “*Естественный лес...может, при условии подвода энергии, поддерживающей постоянную температуру, испарять влагу в несколько раз*

*интенсивнее, чем открытая поверхность океана той же температуры.*” Во-первых, этого условия в природе нет! Во-вторых, утверждение насчет интенсивности испарения с леса и океана ни на чем не основано и противоречит имеющимся данным. Поскольку это утверждение авторов неверно, то и последующие их рассуждения также ошибочны.

Удивительно “открытие” авторов, что муссонная циркуляция, оказывается, обусловлена эвапотранспирацией “открытых систем типа саванн, степей или кустарников”.

Есть и путаница в терминологии. Так, на стр. 8 авторы пишут: *“эвапотранспирация, составляющая основную часть испарения с поверхности почвы”*. В действительности все наоборот, испарение с почвы является одной из составляющих эвапотранспирации. И вообще, по-видимому, речь здесь идет о потенциальном испарении (испаряемости), но этот термин незнаком авторам. Ошибочны рассуждения авторов по поводу того, что на одной и той же широте  $E = \text{const}$  (авторы почему-то решили, что на одной широте приходящая солнечная энергия постоянна, но это не так из-за различий в облачности). Неверно и то, что авторы считают, что *“эвапотранспирация нарастает по направлению к экватору в связи с увеличением потока солнечной энергии”*. Если авторы по-прежнему имеют в виду испаряемость, то она максимальна не на экваторе, а в субтропических пустынях, т.к. именно там максимальна солнечная радиация.

На стр. 11 авторы утверждают, что *“непрерывная круглогодичная тяга биотического насоса не допускает возникновения ураганов и смерчей над лесом”*. Это утверждение также является следствием некомпетентности авторов в рассматриваемых вопросах. В силу термодинамики ураганы (т.е. тропические циклоны) возникают только над океанами! А смерчи над лесами могут возникать и валить деревья.

Перечень ошибочных утверждений и умозаключений можно было бы продолжить и дальше, однако это уже не имеет смысла, поскольку очевидно, что авторы являются абсолютно некомпетентными в рассматриваемых ими вопросах. Это не позволило им интерпретировать рассматриваемые природные явления с научных позиций и корректно проанализировать используемые данные наблюдений, что и привело к построению ошибочной теории.

Подводя итог сказанному, можно сделать вывод о нецелесообразности публикации рецензируемой статьи в журнале “Водные ресурсы”, поскольку статья является несостоятельной в научном плане. Отметим, что ответы на занимающие авторов вопросы можно найти в учебниках для вузов по специальностям метеорология, климатология и гидрология.

Российская АКАДЕМИЯ НАУК ~~СОЮЗА СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК~~

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

199911 2СЖ-1, ул. Чудовская, 3  
Адрес: Москва, К-64, Садовое Черниговская, 13/3

135-54-04  
Телефон 297-60-06

«5» регистр 2006 г.

А.М. Макаровой, В.Г. Горшковой

Глубокоуважаемый Александр Михайлович и Виктор Георгиевич

Редакция журнала возвращает Вам статью «Крылья и круговороты воды и»

отклоненную от опубликования решением Редакционной коллегии № 162.

Приложение: 1 экз статьи, копии отзыва, документ, рисунки.

Зав. редакцией



УДК 556.1:556.5

## **К проблеме круговорота воды:**

### **лесной биотический насос, закачивающий влагу с океана на сушу**

А.М.Макарьева, В.Г.Горшков

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

#### Аннотация

Показано, что осадки в речном бассейне, покрытом ненарушенным лесом, не уменьшаются при любом удалении от берега океана. В обезлесенных территориях осадки экспоненциально затухают с проникновением вглубь континента. Сформулирован принцип распространения влаги из области с меньшим в область с большим испарением, которому дано физическое обоснование. С помощью этого принципа объяснено действие биотического лесного насоса, закачивающего влагу с океана на сушу на произвольное расстояние вглубь континента. На основании того же принципа дано объяснение устойчивой безводности пустынь, летних и зимних муссонов в саваннах, степях и прериях.

#### **1. Введение**

Вода составляет основу существования всех живых организмов на Земле. Суша имеет уклон в силу ее возвышения над океаном. Накопленная на суше влага стекает в океан в виде речного стока в направлении максимального уклона, определяемого структурой континентов. Накопление и сохранение влаги на суше сводится к проблеме

компенсации речного стока воды с суши в океан обратным потоком влаги с океана на сушу.

Локальная увлажненность суши, обеспечивающая максимальную продуктивность сообществ, должна быть одинаково высокой независимо от удаленности от океана. Потеря влаги в речной сток с единицы площади суши, определяемая локальным запасом влаги и уклоном местности, не должна зависеть от удаленности от океана. Это означает, что компенсирующие речной сток осадки, приносимые с океана, должны равномерно распределяться по всей площади речного бассейна.

Пассивные геофизические потоки атмосферного транспорта испарившейся из океанов влаги на континенты экспоненциально затухают. Эмпирически определяемая длина затухания имеет порядок нескольких сотен километров, что намного меньше линейных размеров континентов. Поэтому геофизические потоки влаги с океанов на сушу не могут компенсировать равномерно распределенный по речному бассейну речной сток из глубины континентов. Это означает, что не существует геофизического объяснения наблюдаемого существования речных бассейнов на территориях материковых масштабов порядка десятков миллионов квадратных километров.

Существование речных бассейнов основано на активном механизме (насосе), транспортирующем влагу вглубь континентов. Этот механизм создан на суше в процессе эволюции в виде леса — сплошного растительного покрова высоких деревьев, тесно взаимодействующих с другими организмами экологического сообщества. В этой статье мы исследуем физические и биологические принципы действия биотического насоса влаги с океанов на сушу и показываем, что только ненарушенный естественный лес, граничащий с океаном или морем по всей береговой линии, способен устойчиво

поддерживать влагу на оптимальном для жизни уровне в любых сколь угодно отдаленных от океана областях суши.

## 2. Пассивный физический транспорт влаги с океана на сушу

### 2.1 Физические потоки влаги

Рассмотрим геофизическую задачу атмосферного переноса влаги с океана на сушу в отсутствие биотического управления. По мере продвижения вглубь материка поток влаги с океана  $F$  (кг  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{м}^{-1}$   $\text{с}^{-1}$ ) через единицу длины земной поверхности уменьшается за счет той части осадков, которая уходит в сток. В силу однородности атмосферы вероятность перехода атмосферной влаги в состояние речного стока не зависит от пройденного в атмосфере расстояния  $x$ . Отсюда следует, что равное стоку уменьшение горизонтального потока влаги  $dF$  на длине  $dx$  пропорционально величине потока  $F$ :

$$R(x) \equiv \frac{dF}{dx} = -\frac{1}{l}F \quad \text{или} \quad F(x) = F(0)\exp\left\{-\frac{x}{l}\right\}, \quad (1)$$

где  $R(x)$  — локальная потеря влаги в сток (кг  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{м}^{-2}$   $\text{с}^{-1}$ ),  $l$  — среднее расстояние, пролетаемое молекулой водяного пара от места испарения до перехода в сток,  $F(0)$  — поток в точке отсчета. Длина  $l$  учитывает особенности локального испарения и осадков при формировании стока.

Поскольку часть  $E$  осадившейся влаги испаряется с поверхности суши, возвращаясь в атмосферу, осадки  $P$  всегда больше стока  $R$ :

$$P = E + R = kR, \quad k \geq 1. \quad (2)$$

Так, например, среднеглобальный сток составляет 35% осадков на суше [1], что дает среднее значение  $k \approx 3$ . Таким образом, можно переписать уравнение (1) в виде [2]

$$P(x) = P(0) \exp\left\{-\frac{x}{l}\right\} \quad \text{или} \quad \ln P(x) = \ln P(0) - \frac{x}{l}, \quad (3)$$

где  $P(0) = kF(0)/l$  — осадки в начале отсчета.

Длина  $l$  может быть определена по характеру экспоненциального затухания осадков  $P$  с расстоянием  $x$ , наблюдаемого на тех территориях, где биотический контроль круговорота воды слаб или отсутствует. К таким областям относятся в первую очередь пустыни, полностью лишенные растительного покрова, а также экосистемы с открытым пологом и/или низкорослой растительностью (саванны, травяные экосистемы, степи, полупустыни). Мы собрали данные для пяти обширных областей суши, удовлетворяющих этому критерию, т.е. не покрытых естественными лесами с замкнутым пологом, см. таблицу 1 и рис. 1. Четыре из пяти выбранных областей (№№ 1, 2, 4 и 5) соответствуют так называемым континентальным разрезам (terrestrial transects), предложенным Международной Геосферной Биосферной Программой (МГБП) для изучения эффектов градиента осадков при глобальных изменениях [3]. Направление отсчета расстояния  $x$  было выбрано совпадающим с преимущественным направлением атмосферного транспорта влаги вглубь материка. Для Аргентинского разреза МГБП, проходящего по центральной Аргентине, были выбраны две области с противоположными направлениями распространения атмосферной влаги, западным и северо-восточным на  $45^\circ$  ю.ш. и  $32^\circ$  ю.ш., соответственно [4-6]. Направление отсчета  $x$  в области 5 (среднеширотный североамериканский разрез МГБП) соответствует восточному направлению распространения вглубь материка воздушных масс Мексиканского залива, которые являются источником осадков в этой области.

Для каждой области по опубликованным метеорологическим данным был построен график зависимости осадков  $P$  от расстояния  $x$ , рис. 2а. Все исследованные области хорошо подчиняются экспоненциальному закону (3), таблица 1. Расстояние  $l$ ,

оцененное по параметру  $b$  линейной регрессии  $\ln P = a + b x$  как  $l = -1/b$ , см. (3), имеет порядок нескольких сотен километров (от 220 км на  $32^\circ$  ю.ш. в Аргентине до 870 км в Северной Америке), за исключением области 4а на  $45^\circ$  ю.ш. в Аргентине, где  $l = 93$  км, таблица 1. Такое быстрое падение осадков объясняется влиянием высоких горных массивов Анд, стоящих на пути западных ветров, несущих влагу с Тихого океана в заданную область [6]. На Гавайских островах высокие горы ( $> 4$  км над уровнем моря) также создают большой градиент осадков, которые меняются более, чем в десять раз на расстоянии порядка 100 км [7].

Полное количество осадков  $\Pi$  (кг  $\text{H}_2\text{O}$  год $^{-1}$ ), выпавших на всем протяжении распространения воздушных масс вглубь континента,  $0 \leq x \leq \infty$ , в области, имеющий поперечный размер  $D$  (для речного бассейна  $D$  имеет порядок длины береговой линии) составляет:

$$\Pi = D \int_0^{\infty} P(x) dx = P(0)lD. \quad (5)$$

Величина  $l$  представляет собой характерный масштаб, равный ширине прибрежной полосы, которая оказалась бы увлажненной приходящими с океана воздушными массами, если бы осадки распределялись по ней равномерно с плотностью  $P(0)$ . Для протяженных областей континентов с невысоким уклоном (области 1-3, 4б, 5) среднее значение  $l$  составляет 600 км, что намного меньше характерных размеров континентов. Таким образом, пассивный геофизический транспорт влаги на сушу мог бы обеспечить нормальное существование жизни только в прилегающей к океану полосе шириной порядка нескольких сот километров, в то время как внутренние части континентов неизменно оставались бы засушливыми. Поэтому объяснить наблюдаемое существование обширных хорошо увлажненных континентальных областей протяженностью в несколько тысяч километров (бассейн Амазонки, экваториальная

Африка, Сибирь), на которых и до настоящего времени функционируют естественные леса [8] можно только с привлечением отличного от пассивного геофизического механизма активного транспорта влаги с океана на сушу.

### **3. Биотический насос атмосферной влаги**

Обратимся к пространственному распределению осадков в покрытых естественным лесом речных бассейнах. Жизнь всего лесного сообщества зависит от влажности почвы. Поэтому функционирование лесного сообщества должно быть направлено на поддержание влажности почвы на стационарном оптимальном для жизни уровне. Высокая влажность почвы позволяет экологическому сообществу поддерживать стабильно высокую мощность функционирования даже при флуктуирующем режиме осадков.

Биотический насос лесных бассейнов основан на физическом принципе, согласно которому в условиях наблюдаемого отрицательного вертикального градиента температуры воздуха, равного  $6,5 \text{ K км}^{-1}$  испарение влаги с земной поверхности приводит к возникновению направленной вверх силы испарения, рис. 3. Эта сила приводит к тому, что приземные воздушные массы с наибольшим абсолютным содержанием влаги в атмосферном столбе поступают из областей с меньшим испарением в области с большим испарением, в том числе, когда области с меньшим испарением обладают меньшим влагосодержанием воздуха, чем области с большим испарением, см. Приложение. Естественный лес обладает большим листовым индексом (отношением площади поверхности листьев к площади проекции кроны на земную поверхность) и может, при условии подвода энергии, поддерживающей постоянную температуру, испарять влагу в несколько раз интенсивнее, чем открытая поверхность океана той же температуры. Поэтому, независимо от разности температур суши и

океана, влага с океана круглогодично поступает в речной бассейн, покрытый ненарушенным лесом, и круглогодично компенсирует речной сток, рис. 4а.

Так, например, эвапотранспирация естественных лесов в Амазонке, круглогодично поддерживающих высокое влагосодержание почвы  $W$  (кг  $H_2O$   $m^{-2}$ ) [9] лимитируется только солнечной энергией и увеличивается во время сухого сезона, когда солнечных дней больше [10], что предотвращает вынос атмосферной влаги в океан. В естественных лесах высоких широт сухие периоды во время вегетационного сезона также не приводят к уменьшению эвапотранспирации [11-12].

Напротив, эвапотранспирация открытых систем типа саванн, степей (grasslands) или кустарников (shrublands), неспособных поддерживать высокое влагосодержание почвы, резко падает во время сухого сезона [13-14], что приводит к выносу влаги с суши в океан (зимнему муссону), рис. 4в. Летом эвапотранспирация открытых систем саванн и степей превосходит испарение над океаном, что приводит к потоку влажного воздуха на сушу (летнему муссону и влажному сезону), рис. 4г. Однако скудная растительность саванн и степей в летний сезон дождей не может закачивать океанскую влагу на любое расстояние от береговой границы, и поток влаги экспоненциально затухает с проникновением вглубь континента, рис. 2а.

Изменение влагосодержания почвы  $dW/dt$  связано с плотностью осадков  $P$ , испарения  $E$  и стока  $R$  законом сохранения вещества,  $dW/dt = P - E - R$ . Стационарное ( $dW/dt = 0$ ,  $P - E = R$ ), высокое влагосодержание почвы  $W$  неизбежно приводит к появлению значительного стока, т.е. потерям влаги экосистемой. В областях с одинаковым уклоном и одинаковой увлажненностью почвы потеря влаги в сток с единицы площади,  $R$ , одинакова и не зависит от удаленности от океана. Поэтому для поддержания влажной почвы компенсирующие сток осадки  $P$  также не могут падать с

удаленностью от океана, т.е. условия  $W = \text{const}$  и  $R = \text{const}$  несовместимы с экспоненциальным падением  $P$  (5).

При достаточной увлажненности эвапотранспирация, составляющая основную часть испарения с поверхности почвы  $E$ , определяется солнечной энергией. Поэтому для увлажненных континентальных областей на одной и той же широте  $E = \text{constant}$ , а потому условие  $R = \text{constant}$  соответствует постоянству осадков при удалении от океана,  $P = E + R = \text{constant}$ . При меридиональной ориентации рассматриваемой области эвапотранспирация нарастает по направлению к экватору в связи с увеличением потока солнечной энергии. Поэтому для таких областей при постоянном стоке осадки также должны нарастать по направлению к экватору.

Мы проанализировали данные по осадкам для трех обширных континентальных областей протяженностью около 2,5 тысяч километров, соответствующих остающимся на Земле областям, занятым естественными лесами [8]. Это бассейн реки Амазонки, экваториальная Африка и бассейн реки Енисея, рис. 1, области 6-8, приблизительно соответствующие континентальным разрезам Амазонки, Miombo Woodland и центрально-сибирскому разрезам МГБП [3]. Как видно из рис. 2б, распределение осадков в областях Амазонки и экваториальной Африки не зависит от удаленности от океана, составляя примерно  $2200 \text{ мм год}^{-1}$ , в то время как осадки в бассейне Енисея нарастают при продвижении вглубь материка, изменяясь от менее чем  $400 \text{ мм год}^{-1}$  в устье до  $800 \text{ мм год}^{-1}$  в верховьях.

Схожие осадки,  $P(0) = 790 \text{ мм год}^{-1}$ , наблюдаются на  $125^\circ$  в.д. в приближенной к океану части северо-восточного китайского континентального разреза (область 2), рис. 2а, которая удалена от Тихого океана всего на 400 км. Верховья же Енисея удалены от Тихого океана на четыре, а от Атлантического океана на шесть тысяч километров, представляя собой одну из наиболее удаленных от океанов областей планеты, рис. 1.

#### 4. Последствия сведения лесов

Проведенное рассмотрение позволяет количественно оценить изменение параметров круговорота воды на суше при широкомасштабном сведении естественных лесов. Обозначим как  $P_f(x) = P_f(0)$  постоянное распределение осадков на занятой естественным лесом территории речного бассейна, простирающейся вглубь материка на расстояние  $L$  и имеющей поперечный размер  $D$ . Полное количество осадков на данной территории равно  $\Pi_f = P_f(0)LD$ , причем произведение  $LD = S$  соответствует площади речного бассейна. Согласно (5) и результатам раздела 2.1, для лишённого естественного лесного покрытия территории  $\Pi_d = P_d(0)l_dD$ , где  $l_d \sim 700$  км. Таким образом, имеем:

$$\frac{\Pi_f}{\Pi_d} = \frac{P_f(0)L}{P_d(0)l_d} \quad (6)$$

Формула (6) показывает, что усредненное по всему речному бассейну количество осадков,  $\bar{P} = \Pi/S$ , при сведении лесов уменьшается с ростом линейной протяженности бассейна  $L$ . Например, для Амазонки  $L \approx 3 \times 10^3$  км, поэтому сведение лесов в бассейне Амазонки привело бы по меньшей мере к  $L/l_d \geq 4$  четырехкратному уменьшению среднего количества осадков в заданной области. Этот эффект, т.е. 75% уменьшение осадков, в несколько раз превосходит имеющиеся оценки, базирующиеся на глобальных циркуляционных моделях, не учитывающих существования биотического насоса влаги. Согласно этим моделям, при обезлесивании бассейна реки Амазонки среднее уменьшение осадков составило бы  $(\Pi_f - \Pi_d)/S = 270 \pm 60$  ( $\pm 1$  ст. ошибка,  $n = 22$ ) мм год<sup>-1</sup> [15], т.е. всего лишь 13% от современного среднего по бассейну значения в 2100 мм год<sup>-1</sup> [16].

Более того, уничтожение лесов и разрушение биотического насоса атмосферной влаги в прибрежной зоне влечет за собой уменьшение количества осадков  $P_d(0)$  по сравнению с исходным значением  $P_f(0)$ . Величину этого изменения можно оценить путем сравнения значений  $P(0)$ , наблюдаемых в прибрежных зонах, занятых обезлесенными и покрытыми лесом участками в схожих условиях атмосферной циркуляции. Хорошим примером является сравнение засушливой зоны северо-восточной Бразилии, так называемой области саatinga, лишенной сплошного лесного покрова и получающей около 800 мм осадков в год [17] с побережьем бассейна Амазонки, где  $P_f(0) > 2000$  мм год<sup>-1</sup>, что дает  $P_f(0)/P_d(0) > 2.5$ . Согласно формуле (6), это означает, что сведение лесов приведет не только к уменьшению длины проникновения осадков вглубь океана от  $L$  до  $l_d$ , т.е. отношения  $l_d/L$ , но и к уменьшению абсолютной величины потока влаги, проникающей на расстояние  $l_d$ , т.е. отношения  $P_d(0)/P_f(0)$ . Общий эффект от обезлесивания может, таким образом, выразиться в десятикратном и более уменьшении количества средних по бассейну осадков. При этом в континентальных областях уменьшение среднегодового количества осадков проявится наиболее сильно. Например, для  $x = 1200$  км (что приближенно соответствует удаленности города Манаус в бассейне реки Амазонки, Бразилия, от океана) осадки уменьшатся в

$$\frac{P_f(x)}{P_d(x)} = \frac{P_f(0)}{P_d(0)} \frac{1}{\exp(-x/l)} = \frac{2.5}{\exp(-1200/700)} = 14 \quad (7)$$

раз, а в Риу-Бранко ( $x \approx 2500$  км) – в 90 раз, т.е. внутренние части континента превратятся в пустыню. Полный речной сток из бассейна в океан, равный  $\int_0^L R(x)dx = \Pi/k$ , см. (2), претерпит такие же изменения, как и полные осадки в бассейне, см. (6).

Соотношение  $\Pi_f / \Pi_d \sim 10$ , формула (6), характеризует мощность биотического насоса, увеличивающего поток влаги через береговую границу бассейна более чем на порядок величины по сравнению со случаем отсутствия биотического контроля. Этот поток влаги предотвращает обезвоживание почвы в ненарушенном лесу при любых флуктуациях внешних условий, которые, как следует из этого соотношения, не превосходят 10% от мощности биотического насоса. Относительные флуктуации речного стока совпадают с флуктуациями биотического насоса, т.е. также не превосходят 10%, что предотвращает наводнения в речном бассейне. Следовательно, ненарушенный лес речного бассейна создает автономный круговорот воды, полностью не зависящий от окружающих внешних воздействий. Постоянство влажности почвы и речного стока предохраняет территорию ненарушенного леса от пожаров и наводнений. Непрерывная круглогодичная тяга биотического насоса не допускает возникновения ураганов и смерчей над лесом, включая поросшую лесом береговую границу.

## **5. Заключение**

В этой статье мы описали биотический насос атмосферной влаги, действующий на основе фундаментального физического принципа: горизонтальные потоки воздуха и влаги идут в область с большим испарением из области с меньшим испарением. Естественные лесные экосистемы, обладающие большим листовым индексом, позволяющим развить поток транспирации влаги, превышающий поток испарения над океаном, способны закачивать атмосферную влагу с океана в количествах, достаточных для обеспечения максимальной продуктивности, сохранения оптимальной влажности почвы и компенсации речного стока.

Биотический насос атмосферной влаги, а также описанные выше механизмы эффективного сохранения почвенной влаги работают в естественных ненарушенных лесах. Естественный лес представляет собой сплошной покров высоких деревьев, связанных с другими биологическими видами экологического сообщества с генетической программой, соответствующей конкретному речному бассейну определенного ландшафта и географического расположения. Травостой и кустарники саванн, степей и прерий, разреженный эксплуатируемый лес, искусственные насаждения, пастбища и обрабатываемые земли не способны организовать биотический насос влаги с океана на сушу. Растительный покров таких территорий не обладает способностью поддерживать постоянное оптимальное для жизни влагосодержание почвы. Водный режим в этих областях суши зависит от удаленности от океана и определяется случайными флуктуациями и сезонными изменениями осадков, приносимых с океана. Эти территории подвержены засухам, наводнениям и пожарам.

Подчеркнем, что современное широкое распространение саванн, в частности, в Африке, жестко связано с деятельностью человека в последние несколько десятков тысяч лет, см., например, [18]. Саванны представляют собой сукцессионную стадию перехода к лесному сообществу, которое происходит при прекращении искусственных возмущений типа пожаров или перевыпаса [19]. Длительное существование саванны с ее высокой скоростью эрозии почв [20] невозможно без чередования со стадией леса, во время которой почва восстанавливается. Поэтому возрастающее сегодня антропогенное давление на саванны, препятствующее такому переходу, приводит к постепенному превращению саванн в пустыни. То же относится к степям и прериям умеренной зоны.

Только естественные первичные леса, аборигенные для данной территории, способны обеспечить долгосрочное устойчивое функционирование биотического насоса влаги, так как именно их генетические свойства скоррелированы с геофизическими особенностями той местности, в которой они растут. Искусственные насаждения из экзотических деревьев с генетическими программами, не соответствующими данной местности, не способны неограниченно долго самоподдерживаться на чуждой им территории, не приводя к деградации условий окружающей среды. Вторичные леса, восстанавливающиеся после антропогенных нарушений или природных катастроф типа пожаров и ветровалов, находятся в процессе восстановления всех регулирующих окружающую среду функций, включая функцию биотического насоса, который поэтому в таких лесах сильно ослаблен.

Нормальное функционирование лесного биотического насоса речного бассейна возможно, если лесной покров непосредственно выходит на береговую границу с океаном или отстоит от океана на расстояние, много меньшее длины затухания  $l$  (1) геофизических потоков влаги с океана на сушу. Два крупнейших тропических речных бассейна Амазонки и Конго обладают лесным покровом дождевых лесов, непосредственно граничащих с береговой линией. Бассейны северных рек России, Канады и Аляски имеют лесной покров тайги, простирающийся до крайних северных пределов, где граничат с сильно заболоченными пространствами, выходящими на берег океана. Уничтожение лесного покрова на береговой полосе шириной порядка длины затухания  $l \sim 600$  км обрывает действие биотического насоса атмосферной влаги с океана. Лесной покров в глубине континента теряет способность компенсировать речной сток. Влага почвы стекает в океан, речной бассейн перестает существовать и леса засыхают. Пресная влага почвы, болот, горных ледников и озер всей суши сосредоточена в основном в озерах и имеет объем порядка  $1,5 \times 10^{14} \text{ м}^3$  [21] при полном

речном стоке с суши, равным  $0,37 \times 10^{14} \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$  [1]. Следовательно, весь запас влаги на суше стекает в океан за четыре года. Поэтому полное уничтожение лесного биотического насоса, т.е. сплошного покрова ненарушенного леса, переводит любой речной бассейн в пустыню за время порядка нескольких лет.

На Австралийском континенте покрытый лесом речной бассейн, совпадающий по площади с речным бассейном Амазонки, прекратил существование около 50-100 тысяч лет назад. Примерно в это же время Австралию начали осваивать люди. Существует множество косвенных доказательств того, что лесной покров Австралии был уничтожен аборигенами, см. обсуждение в работе [22]. Приведенное в нашей работе рассмотрение объясняет механизм этого уничтожения. После того, как появившиеся на материке люди в ходе хозяйственной деятельности или в результате пожаров уничтожили лесной покров по всему периметру Австралии на узкой береговой полосе порядка длины затухания  $l$ , биотический насос, снабжавший водой внутренние части материка, оказался отрезанным от воды. В результате стока и испарения влаги почва высохла, и леса прекратили свое существование даже в отсутствие антропогенной активности и пожаров внутри континента. Кратковременность перехода в пустыню не оставила об этом процессе никаких следов в палеоданных. Практически все пустыни мира имеют непосредственный выход на берега океанов или внутренних морей. Поскольку береговая зона является предпочтительными при выборе людьми их поселений, появление всех протяженных пустынь на Земле является следствием деятельности человека.

Практика эксплуатации и вырубki лесов, ответственная за современную рекордную скорость прямого уничтожения лесов во всем мире [8], зародилась в Западной Европе, все области которой удалены от береговой границы океана и внутренних морей на расстояния, меньшие длины  $l \sim 600 \text{ км}$  затухания геофизических

потоков влаги с океана на сушу. Поэтому полное уничтожение естественных лесов в Западной Европе, заканчивающееся сейчас в Швеции и Финляндии, не привело к полному опустыниванию этих территорий, что до сих пор создает иллюзию возможности экспортировать практику уничтожения лесов в другие области планеты, для которых она является губительной. Отметим, что и в Западной Европе участились катастрофические наводнения, засухи и пожары, главным образом, за счет уничтожения оставшихся естественных лесов в горных районах. Эта практика уничтожения горных лесов, увеличивающих осадки в горах, привела также к резкому сокращению горных ледников, которое ошибочно приписывается предполагаемому глобальному потеплению, вызванному ростом атмосферного CO<sub>2</sub>.

Искусственные водохранилища, создаваемые в речных бассейнах с уничтожением естественных лесов на больших площадях, ликвидируют управляющее действие транспирации этих лесов, ослабляют действие биотического лесного насоса и, следовательно, уменьшают речной сток и осадки.

Изложенные результаты намечают возможную стратегию восстановления необходимого для жизни людей водного режима суши, который может привести к обводнению пустынь и засушливых территорий. Как мы продемонстрировали, ликвидация лесного покрова в крупнейших речных бассейнах мира за времена порядка нескольких лет приведет к уменьшению речного стока на порядок величины, возникновению засух, наводнений и пожаров, частичному опустыниванию в прибрежной полосе и полному — внутри континентов, см. формулы (5) и (6). Экономические потери от этого на много порядков величины превысят экономические выгоды от вырубki лесов. Поэтому целесообразно срочно пересмотреть лесную политику во всем мире. Прежде всего, необходимо немедленно прекратить освоение оставшихся ненарушенных лесов на всех территориях речных бассейнов, а не только на

расстоянии нескольких километров вдоль крупных рек, и, в особенности, на территориях выхода лесов на берега океана и внутренних морей. Далее необходимо начать планомерное восстановление аборигенного лесного покрова на территориях, прилегающих к естественным лесам. Только на этих территориях восстановленные леса смогут устойчиво поддерживать водный режим и в дальнейшем самостоятельно расширять речной бассейн.

Площади участков естественных нарушений имеют в ненарушенных лесах порядок 10% [23-24]. Именно этот порядок величины составляют и эксплуатируемые человеком территории (пахотные земли, пастбища и плантации разреженного древостоя) на всей суше в настоящее время. Поэтому состояние, при котором естественный лесной покров будет восстановлен на большей части не используемых в настоящее время засушливых территорий, будет столь же устойчивым, как и естественные леса, существующие уже миллионы лет. Экологически грамотное человечество будущего навсегда получит в свое распоряжение неограниченные водные ресурсы восстановленных речных бассейнов.

**Благодарности.** В работе использованы данные, относящиеся к Проекту Общественная Модель Климатической Системы (Community Climate System Model project), осуществляемому Директоратом Наук о Земле Национального Научного Фонда и Бюро Биологических и Экологических Исследований Департамента Энергии США. Данные распространяются Университетом Нью Гэмпшира (University of New Hampshire, EOS-WEBSTER Earth Science Information Partner (ESIP)) на сайте <http://eos-webster.sr.unh.edu>. Авторы признательны Мартину Ходнетту и Антонио Нобре за обсуждения.

## Приложение

Давление воздуха  $p_a$  в аэростатическом равновесии определяется известной формулой

$$p_a(z) = p_a(0) \exp \left\{ - \int_0^z \frac{dz'}{h_a} \right\}, \quad h_a \equiv RT/M_a g, \quad R = 8,3 \text{ Дж К}^{-1} \text{ моль}^{-1}, \quad M_a = 29 \text{ г моль}^{-1}, \quad g = 9,8 \text{ м}$$

$\text{с}^{-1}$ ,  $T$  — температура воздуха на высоте  $z$ ,  $h_a$  — высота равномерноплотной атмосферы, приближенно равная 8 км.

Парциальное давление насыщенного водяного пара  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  определяется формулой Клапейрона-Клаузиуса, которая может быть записана в виде

$$p_{\text{H}_2\text{O}}(z) = p_{\text{H}_2\text{O}}(0) \exp \left\{ - \int_0^z \frac{dz'}{h_{\text{H}_2\text{O}}} \right\}, \quad h_{\text{H}_2\text{O}} \equiv T^2 G^{-1} T_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}, \quad G \equiv -dT/dz, \quad T_{\text{H}_2\text{O}} \equiv Q_{\text{H}_2\text{O}}/R = 5300$$

$\text{К}$ ,  $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 44 \text{ кДж моль}^{-1}$  — молярная скрытая теплота испарения. Пары воды находятся в аэростатическом равновесии при условии  $h_{\text{H}_2\text{O}} = h_w = RT/M_w g$ ,  $M_w = 18 \text{ г моль}^{-1}$ . Это условие фиксирует градиент температуры  $G = G_{\text{H}_2\text{O}} = 1,2 \text{ К км}^{-1}$ . При  $G \leq G_{\text{H}_2\text{O}}$  пары воды находятся в аэростатическом равновесии, потоки влаги из гидросферы и почвы в атмосферу отсутствуют.

При  $G > G_{\text{H}_2\text{O}}$  пары воды не находятся в аэростатическом равновесии. Возникает направленная вверх сила испарения, равная разности  $f = -(dp_{\text{H}_2\text{O}}/dz + p_{\text{H}_2\text{O}}/h_w) = (\beta - \beta_0)\rho_a \gamma g$ , где  $\beta \equiv h_a/h_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\beta_0 \equiv h_a/h_w = 0,62$ ,  $\rho_a$  — плотность воздуха,  $\gamma$  — относительное влагосодержание в воздухе при наблюдаемой величине  $G = G_{ob} = 6,5 \text{ К км}^{-1}$ ,  $h_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2$  км,  $\beta \approx 3,5$ , рис. 3. Сила  $f$  вызывает подъем водяных паров и воздуха вверх со скоростью  $w = E / \rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $E$  — испарение,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} \equiv \gamma \rho_a$  — плотность водяных паров, среднеглобальная скорость

$\bar{w} = \bar{E} / \bar{\rho}_a = 2,5 \text{ мм с}^{-1}$ ,  $\bar{E} = 1 \text{ м год}^{-1}$ ,  $\bar{\gamma} = 2 \cdot 10^{-2}$ . Конденсация водяных паров и осадки влаги компенсируются испарением с земной поверхности. Подъем воздушных масс вызывает приток внизу воздуха из областей с меньшим испарением. Подъем притекающего воздуха вызывает конденсацию и осадки содержащейся в нем влаги, испарившейся в области с меньшим испарением. С прекращением испарения скорость  $w$  обращается в ноль. Скорость  $u$  горизонтального притока воздуха связана с разностью скоростей подъема  $w$  воздушных масс в областях с большим и меньшим испарением условием непрерывности (сохранения вещества):  $u = wL/h_{\text{H}_2\text{O}}$ , где  $L$  — линейный размер области с большим испарением. Величина скорости  $u$  определяется условием совпадения мощности подъема воздушных масс под воздействием силы испарения и мощности диссипации горизонтального потока воздушных масс под воздействием трения о земную поверхность, которое соответствует соотношению  $(\beta - \beta_0)\gamma g \sim u^2/l$ ,  $l$  — вертикальный размер области максимально быстрого изменения скорости  $u$  по высоте  $z$ , имеющий порядок высоты лесного покрова. При  $\gamma \sim 2 \cdot 10^{-2}$ ,  $l \sim 50 \text{ м}$  скорость  $u \sim \sqrt{\beta\gamma_s g l} \sim 6 \text{ м с}^{-1}$ . При  $w > \bar{w}$  лесной биотический насос может закачивать влагу с океана на расстояние  $L > u h_{\text{H}_2\text{O}} / \bar{w} \approx 4000 \text{ км}$ .

Горшков В.Г.

Макарьева А.М.

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

## Литература

- [1] Dai A., Trenberth K.E. Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations // *Journal of Hydrometeorology*. 2002. V. 3. P. 660-687.
- [2] Savenije H.H.G. New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use change in the Sahel // *Journal of Hydrology*. 1995. V. 167. P. 57-78.
- [3] Canadell J.G., Steffen W.L., White P.S. IGBP/GCTE terrestrial transects: Dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change - Introduction // *Journal of Vegetation Science*. 2002. V. 13. P. 297-300.
- [4] Cabido M., Gonzalez C., Acosta A., Diaz S. Vegetation changes along a precipitation gradient in central Argentina // *Vegetatio*. 1993. V. 109. P. 5-14.
- [5] Zhou J., Lau K.-M. Does a monsoon climate exist over South America? // *Journal of Climate*. 1998. V. 11. P. 1020-1040.
- [6] Austin A.T., Sala O.E. Carbon and nitrogen dynamics across a natural precipitation gradient in Patagonia, Argentina // *Journal of Vegetation Science*. 2002. V. 13. P. 351-360.
- [7] Austin A.T., Vitousek P.M. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawai'i // *Journal of Ecology*. 2000. V. 88. P.129-138.
- [8] Брайант Д., Нильсен Д., Тангли Л. Последние неосвоенные леса: экологические и экономические системы, балансирующие на грани. Вашингтон: Институт мировых ресурсов. 1997. 43 с.
- [9] Hodnett M.G., Oyama M.D., Tomasella J., Marques Filho A. de O. Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. Amazonian deforestation and climate (eds J.H.C. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts, R.L. Victoria). Chichester: John Wiley & Sons, P. 57-77.

- [10] da Rocha H.R., Goulden M.L., Miller S.D., Menton M.C., Pinto L.D.V.O., de Freitas H.C., Silva Figueira A.M.E. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia // *Ecological Applications*. 2004. V. 14(Suppl). P. S22–S32.
- [11] Goulden M.L., Daube B.C., Fan S.-M., Sutton D.J., Bazzaz A., Munger J.W., Wofsy S.C. Physiological response of a black spruce forest to weather // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102D. P. 28987-28996.
- [12] Tchebakova N.M., Kolle O., Zolotoukhine D., Arneth A., Styles J.M., Vygodskaya N.N., Schulze E.-D., Shibistova O., Lloyd J. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapor fluxes above a *Pinus sylvestris* forest in the Siberian middle taiga // *Tellus B*. 2002. V. 54. P. 537-551.
- [13] Hutley L.B., O'Grady A.P., Eamus D. Monsoonal influences on evapotranspiration of savanna vegetation of northern Australia // *Oecologia*. 2001. V. 126. P. 434-443.
- [14] Kurc S.A., Small E.E. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico // *Water Resources Research*. 2004. V. 40. W09305.
- [15] McGuffie K., Henderson-Sellers A. Forty years of numerical climate modelling // *International Journal of Climatology*. 2001. V. 21. P. 1067-1109.
- [16] Marengo J.A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin // *Theoretical and Applied Climatology*. 2004. V. 78. P. 79-96.
- [17] Oyama M.D., Nobre C.A. Climatic consequences of a large-scale desertification in Northeast Brazil: A GCM simulation study // *Journal of Climate*. 2004. V. 17. P. 3203-3213.
- [18] Tutin C.E.G., White L.J.T., Mackanga-Missandzou A. The use by rain forest mammals of natural forest fragments in an equatorial African Savanna // *Conservation Biology*. 1997. V. 11. P. 1190-1203.

- [19] Van de Koppel J., Prins H.H.T. The importance of herbivore interactions for the dynamics of African savanna woodlands: an hypothesis // *Journal of Tropical Ecology*. 1998. V. 14. P. 565-576.
- [20] Lal R. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Advances in soil science* (eds R. Lal, B.A. Stewart). Volume 11. Soil degradation. New York: Springer-Verlag, P. 129-172.
- [21] Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. Москва: Мысль, 1970, 375 с.
- [22] Bowman D.M.J.S. The Australian summer monsoon: a biogeographic perspective // *Australian Geographic Studies*. 2002. V. 40. P. 261-277.
- [23] Coley P.D., Barone J.A. Herbivory and plant defenses in tropical forests // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1996. V. 27. P. 305-335.
- [24] Szarzynski J., Anhof D. Micrometeorological conditions and canopy energy exchanges of a neotropical rain forest (Surumoni-Crane Project, Venezuela) // *Plant Ecology*. 2001. V. 153. P. 231-239.
- [25] McGuire A.D., Prentice I.C., Ramankutty N., Reichenau T., Schloss A., Tian H., Williams L.J., Wittenberg U. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land-use effects with four process-based ecosystem models // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. P. 183-206.

Таблица 1. Зависимость осадков  $P$  (мм год<sup>-1</sup>) от расстояния  $x$  (км) от источника влаги на лишенных лесного покрова территориях и в естественных лесах (данные рис. 2)

Область				
№	Название	Положение $x = 0$	Положение	$x_{\max}$ , км
			$x = x_{\max}$	
<b>Обезлесенные области</b>				
1	Северная Австралия	11°24'ю.ш. 130°25'в.д.	25°ю.ш. 137°в.д.	1400
2	Северо-восточный Китай	42°с.ш. 125°в.д.	42°с.ш. 107°в.д.	1500
3	Западная Африка	10°с.ш. 5°в.д.	25°с.ш. 5°в.д.	1650
4а	Аргентина, 45° ю.ш.	44°51'ю.ш. 71°43'з.д.	45°27'ю.ш. 69°50'з.д.	150
4б	Аргентина, 31° ю.ш.	31°20'ю.ш. 65°20'з.д.	31°40'ю.ш. 68°20'з.д.	360
5	Северная Америка, 40° с.ш.	39°47'с.ш. 96°43'з.д.	41°14'с.ш. 105°34'з.д.	750
<b>Естественные леса</b>				
6	Бассейн Амазонки	0°ю.ш. 50°з.д.	5°ю.ш. 75°з.д.	2800
7	Бассейн Конго	0°ю.ш. 9°з.д.	0°ю.ш. 30°з.д.	2300
8	Бассейн Енисея	73°30'с.ш. 80°30'в.д.	50.5°с.ш. 95.5°в.д.	2800

Параметры линейной регрессии $\ln P = a - bx$					
№	$a \pm 1$ ст.ош.	$(b \pm 1$ ст.ош.) $\times 10^3$	$r^2$	$P(0) \equiv e^a$ , мм год <sup>-1</sup>	$l \equiv 1/b$ , км
<b>Обезлесенные области</b>					
1	7.37±0.05	1.54±0.06	0.96	1600	<b>650</b>
2	6.67±0.08	1.24±0.10	0.96	790	<b>800</b>
3	7.28±0.09	2.46±0.09	0.99	1450	<b>400</b>
4а	6.36±0.17	10.8±2.0	0.90	580	<b>93</b>
4б	6.35±0.12	4.57±0.59	0.91	570	<b>220</b>
5	6.69±0.04	1.15±0.08	0.93	800	<b>870</b>
<b>Естественные леса</b>					
6	7.76±0.04	-0.045±0.024	0.13	2300	-22×10 <sup>3</sup>
7	7.56±0.17	-0.10±0.12	0.05	1900	-10×10 <sup>3</sup>
8	6.06±0.17	-0.10±0.10	0.05	430	-10×10 <sup>3</sup>

## Подписи к рисункам

Рис. 1. География областей, в которых проанализирована зависимость осадков  $P$  от расстояния  $x$  вглубь материка. Цифры около стрелок соответствуют названиям областей, указанным в Таблице 1. Начало и конец стрелок соответствуют  $x = 0$  и  $x = x_{\max}$ , соответственно.

Рис. 2. Зависимость осадков  $P$  (мм год<sup>-1</sup>) от расстояния  $x$  (км) до источника атмосферной влаги (берега океана) на лишенных лесного покрова территориях (а) и на территориях, покрытых естественными лесами (б). Нумерация и название областей соответствует Таблице 1. Параметры линейных регрессий приведены в Таблице 1. Использованные метеорологические данные соответствуют мировой базе данных месячных осадков Carbon Cycle Model Linkage-CCMLP [25], привязанных к географической сетке размером  $0.5 \times 0.5$  градусов, период времени 1950-1995 г.г.

Рис. 3. Давление водяного пара и сила испарения в земной атмосфере. (а) Парциальное давление насыщенного водяного пара  $p_{\text{H}_2\text{O}}(z)$  и вес насыщенного водяного пара  $W_a(z) \equiv \int_z^{\infty} \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}(z')}{h_w(z')} dz'$ ,  $h_w(z) \equiv RT(z)/(M_w g)$ , в атмосферном столбе над высотой  $z$  при  $G_{ob} = 6,5$  К км<sup>-1</sup>. Парциальное давление водяного пара у поверхности принято равным  $p_{\text{H}_2\text{O}}(0) = 20$  мбар. (б) Направленная вверх сила испарения  $f$ , равная разности отрицательного градиента давления сжатого водяного пара  $f^{\uparrow}(z) \equiv -dp_{\text{H}_2\text{O}}(z)/dz$  и веса паров воды в единице объема  $f^{\downarrow} \equiv p_{\text{H}_2\text{O}}(z)/h_w$ :  $f = f^{\uparrow} - f^{\downarrow}$ . Сила испарения в сотни раз превосходит характерные силы горизонтального барометрического градиента, имеющие порядок  $0,01$  мбар км<sup>-1</sup>.

Рис. 4. Физический принцип, согласно которому воздух в приземном слое распространяется из области с меньшим испарением в область с большим испарением, позволяет объяснить наблюдаемые особенности циркуляции земной атмосферы. Испарение изображено черной стрелкой; величина (сила) испарения пропорциональна толщине стрелки. Приземные и восходящие потоки воздуха, содержащие влагу, изображены полными стрелками; компенсирующие потоки сухого воздуха, обедненного влагой после произошедших осадков, обозначены пунктирными стрелками.

(а) Биотический насос атмосферной влаги: регулируемое транспирацией деревьями испарение над пологом естественного леса всегда превосходит испарение над океаном так, чтобы обеспечить поток влажного воздуха с океана на сушу, в точности компенсирующий речной сток во всем речном бассейне.

(б) Пустыни: испарение на суше близко к нулю, воздух в приземном слое круглогодично поступает с суши на океан.

(в) Зимние муссоны: испарение над океаном больше, чем над сушей, так как океан теплее суши; приземный воздушный поток поступает с суши на океан.

(г) Летние муссоны: испарение над сушей больше, чем над океаном, так как поверхность суши прогрелась больше, чем океан; приземный влажный воздух поступает с океана на сушу.

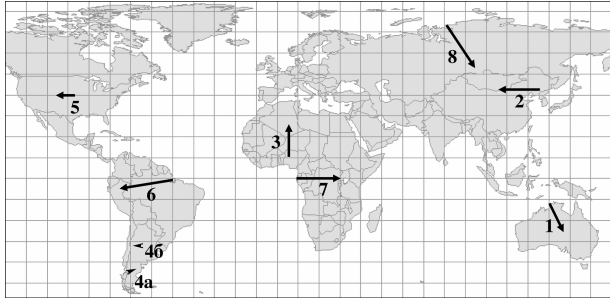


Рис. 1

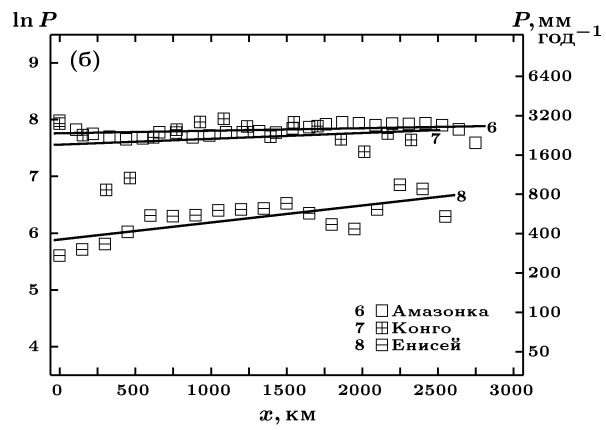
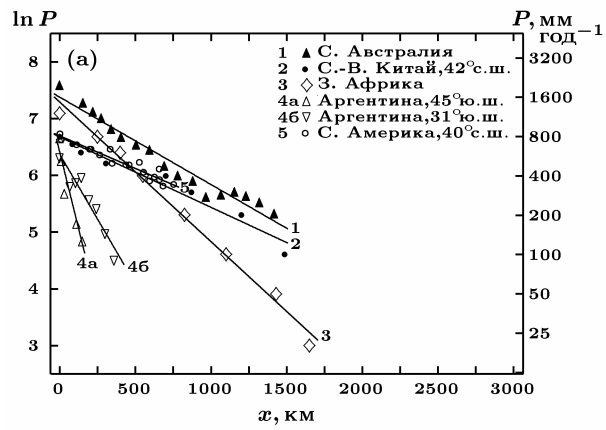


Рис. 2

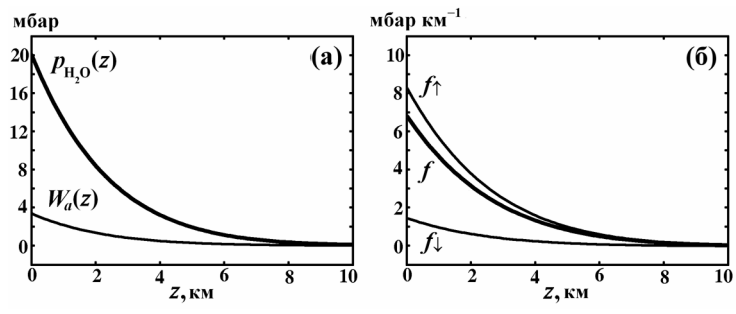


Рис. 3

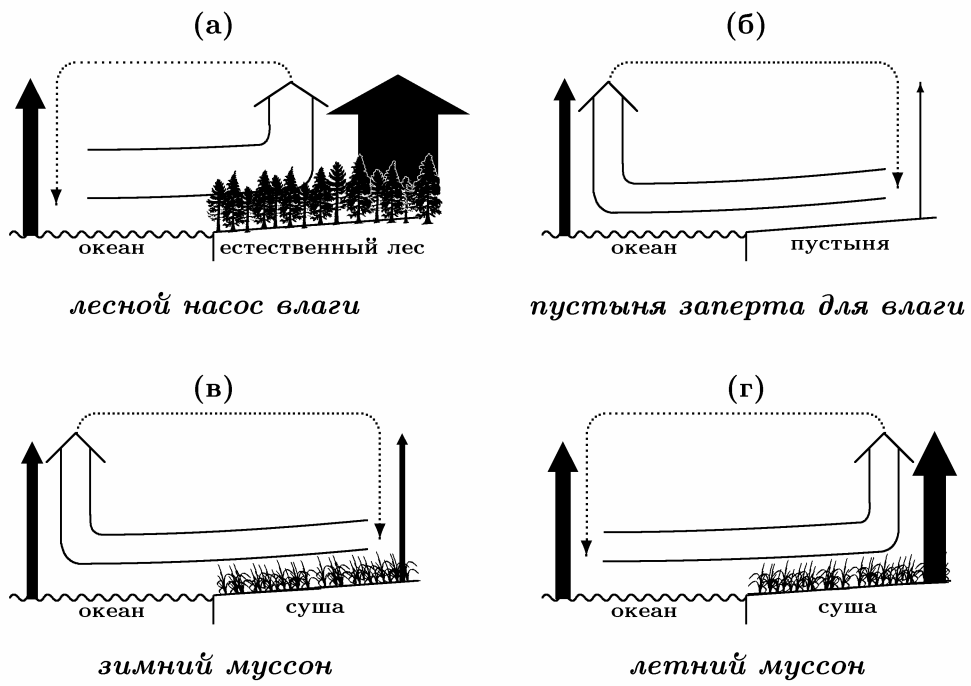


Рис. 4

## Сведения об авторах

Макарьева Анастасия Михайловна, научный сотрудник Отделения теоретической физики Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова Роща, ПИЯФ РАН, тел. (813) 7146096

E-mail: elba@infopro.spb.su

Горшков Виктор Георгиевич, ведущий научный сотрудник Отделения теоретической физики Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова Роща, ПИЯФ РАН, тел. (813) 7146096

E-mail: vigorshk@thd.pnpi.spb.ru