



А Т Л А Н Т Ы Д Е Р Ж А Т

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ КОНТИНЕНТА

Лишь на одной трети суши сохранилась нетронутая дикая природа. Всё остальное — возделываемые земли, пастбища, подвергаемый систематическим рубкам лес, дороги, города и промышленные территории. В дальнейшем, с развитием экономики и ростом мирового населения, могут быть освоены и последние бастионы естественной биоты. И тогда ещё уцелевшие девственные леса превратятся в лесоплантации, а осушенные болота — в сельскохозяйственные угодья. На это, по сути, нацелен и новый Лесной кодекс РФ. Дикую же природу, как считают некоторые, достаточно сохранить в заповедниках. Однако подобное отношение к естественным, и в первую очередь лесным, экосистемам не учитывает их важнейшую функцию, связанную

с сохранением запасов пресной воды. Ведь всё, что накоплено в озёрах, горных ледниках и болотах на всех пяти континентах, не превышает речного стока в океан всего за четыре года. Почему же тогда не иссякают реки? И не может ли случиться однажды, что вся пресная вода стечёт в море и больше её не будет? Вопросы такого рода нередко занимают пытливых детей, хотя у умудрённых взрослых обычно заранее готов ответ: потому что на суше идут дожди, а вода, испаряясь с земной поверхности, поднимается вверх, образуя облака, и снова выпадает в осадки. Но ведь испаряется вода на суше, а реки текут в океан. Вода же, испарившаяся в океане, в пустыню, например, не приходит. А верховья седьмой по величине реки мира Енисея удалены от океана на



Фото Д. Зыкова.

Жизнь на суше обязана прежде всего растениям, которые могут произрастать только во влажной почве, и эта влажность должна поддерживаться в течение всего сезона активной жизни растений. Но суша, как известно, возвышается над океаном, имея больший или меньший уклон, а потому, подчиняясь неизбежным законам физики, почвенная влага стекает с выше расположенных горизонтов, собираясь в ручейки, ручьи, малые и большие реки, и попадает в конце концов в океан. Объём ежегодного стока составляет около 43 000 км³. Подсчитано, что за 4 года в океан должна была бы стечь вся вода суши, накопленная в озёрах, ледниках и болотах, если бы она не пополнялась благодаря атмосферным осадкам. Часть осадков формируется над самой сушей за счёт испарения с её поверхности, а примерно 1/3, или, точнее, 35 см из 100 см, выпадающих за год осадков (при распределении по всей поверхности суши) приходится на испарение океана. Иными словами, если бы океанская влага не проливалась на сушу дождём и не выпадала снегом, она бы полностью высохла менее чем за 10 лет.

Конечно, то, что называется кухней погоды — перемещение атмосферных фронтов, рождение гроз, формирование циклонов и т.д., — область очень сложных и не до конца изученных явлений, плохо поддающихся математической формализации и моделированию. Однако нельзя не обратить внимание на связь процессов переноса на сушу океанской влаги с лесными массивами. Механизм такого переноса, основанный на действии известных физических законов, получил название *лесной биотический насос атмосферной влаги*. Но чтобы разобраться в существе этого механизма, нам придётся остановиться чуть подробнее на процессе транспирации — испарении воды листовой поверхностью растений.

Транспирация — некий аналог кровообращения у животных. Она состоит в непрерывном движении поступающей из почвы воды и растворённых в ней веществ через корневую систему растений и далее по ствольным сосудам ксилемы (проводящей ткани растений) к листьям. При этом вода движется от корней к листьям по так называемому градиенту водного потенциала, убывающему по мере возрастания концентрации растворённых в ней солей и других веществ, чему способствует избирательная проницаемость клеточных мембран. Скорость движения воды по ствольным сосудам достаточно велика и составляет у травянистых растений около

Н Е Б О И. РЕЙФ ЛЬНОГО ВЛАГООБОРОТА

такое расстояние, куда никакая океанская влага сама по себе проникнуть не в состоянии. Так что убедительное на первый взгляд объяснение круговорота пресной воды напоминает историю барона Мюнхаузена, вытащившего себя за волосы из болота. Чтобы реки текли, не пересыхая, необходим постоянно действующий механизм, который бы закачивал воду из океана в любые, самые удалённые места суши. Природу этого механизма попытались исследовать сотрудники Санкт-Петербургского института ядерной физики РАН доктор физико-математических наук В. Г. Горшков и кандидат физико-математических наук А. М. Макарьева. Они назвали его «лесной биотический насос атмосферной влаги». Ниже приводится изложение этой концепции.

1 м/ч, а у высоких деревьев — до 8 м/ч. Сосуды ксилемы представляют собой трубки с узким просветом, диаметр которого колеблется от 0,01 до 0,2 мм. Чтобы поднять воду по таким трубкам к вершине большого дерева, необходимо давление порядка 4000 кПа. Но даже по самым тончайшим сосудам под действием одних лишь капиллярных сил вода не может подняться выше 3 м, тогда как высота некоторых деревьев достигает 50 и даже 100 м (как у калифорнийской секвойи или австралийского эвкалипта).

Объяснить этот феномен позволяет теория сцепления, или когезии. Согласно этой теории, подъем воды от корней обусловлен её испарением в листьях, которое приводит к обеднению листовых клеток водой, а следовательно, к повышению концентрации растворённых в ней веществ и соответственно к понижению водного потенциала. Поэтому вода из ксилемного сока с более высоким водным потенциалом устремляется в клетки листа через избирательно проницаемые клеточные мембраны. Однако по мере выхода воды из ксилемных сосудов в столбе воды создаётся натяжение, передающееся вниз по стеблю, вплоть до корней. Оно связано со способностью молекул воды к сцеплению, или когезии. Это свойство обусловлено их полярностью (дипольным моментом), в силу которого под воздействием электростатических сил молекулы воды притягиваются друг к другу (как бы «склеиваются») и удерживаются за счёт водородных связей. В результате

*Процесс опустынивания трудно остановить.
Фото Е. Константинова.*

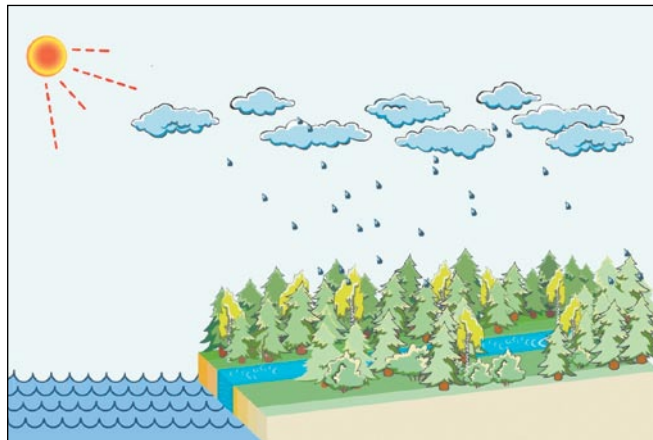
когезии натяжение в сосудах ксилемы достигает такой силы, что может тянуть вверх весь столб воды. Разные оценки прочности на разрыв для столба ксилемного сока варьируются в пределах от 3000 до 30 000 кПа (от 30 до 300 атм).

И, наконец, на самом последнем этапе вода стремится покинуть растение, поскольку водный потенциал окружающего умеренно влажного воздуха на несколько десятков тысяч килопаскалей ниже, чем в самом растении. Причём покидает его вода главным образом в парообразной форме. Для превращения воды в пар нужна дополнительная энергия, называемая скрытой теплотой парообразования. Эту энергию и дают солнечные лучи, служащие в конечном счёте той силой, что движет процессом транспирации на всех его этапах — от почвы к корням растения и от корней к стеблям и листьям.

То, что вода необходима растению для обеспечения его жизнедеятельности, в том числе для нужд фотосинтеза, совершенно очевидно. Менее очевидна интенсивность этого процесса. Ведь само растение использует в среднем меньше 1% поглощаемой им из почвы воды, остальные же 99% возвращаются в атмосферу, так сказать, транзитом. Уровень транспирации при достаточной освещённости, увлажнённости почвы и температуре окружающего воздуха может быть очень высок. Например, травянистые растения, такие как хлопчатник или подсолнечник, способны терять за сутки до 1—2 л воды, а столетний дуб — более 600 л. Неслучайно транспи-



рацию иногда называют неизбежным злом. Правда, у большинства растений в ходе эволюции выработался ряд приспособлений, позволяющих регулировать процесс испарения и при необходимости удерживать влагу. Это, например, сбрасывание листьев во время сезонных похолоданий или засухи. Это запасание влаги в слизистых клетках и в клеточных стенках различных частей растения. Это, наконец, устьица — особые поры в эпидермисе, расположенные в листьях и



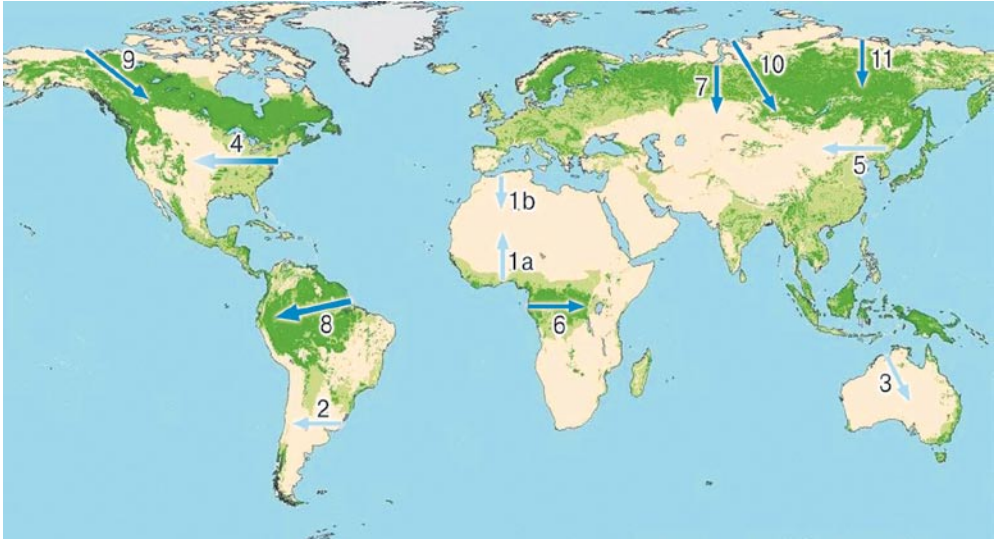
отчасти в зелёных стеблях, через которые происходит газообмен и испаряется до 90% воды. Благодаря специальным замыкающим клеткам устьица могут закрываться в засушливую погоду или в ночные часы, когда прекращается фотосинтез, замедляя тем самым процесс транспирации. Существуют и другие приспособления для уменьшения транспирации, сформировавшиеся в условиях засушливого климата и дефицита влаги, как, например, утолщение кутикулы (воскового слоя, покрывающего эпидермис листьев и стеблей), открытие устьиц в ночное время и закрытие днём и т.д. И всё же в обычных условиях в силу высокого листового индекса (отношения площади освещённых листьев к площади проекции кроны на почву), характерного прежде всего для древесной растительности, потери воды с транспирацией могут быть очень высоки, существенно превышая испарение с поверхности водоёма, равного по площади проекции кроны дерева на почву.

Однако транспирация не единственный источник испарения, формирующегося над лесом. Деревья обладают способностью аккумулировать, «перехватывать» своими кронами значительное количество дождевой атмосферной влаги или снега, которые также вносят свой существенный, достигающий 30%, вклад в развиваемое лесом испарение. Последнее обстоятельство имеет особое значение для бореальных хвойных лесов, где налипшие на деревьях снежные шубы и шапки обеспечивают поток испарения даже зимой, когда транспирация отсутствует. Таким образом, ненарушенный лес способен испарять влагу практически круглогодично, причём намного интенсивнее, чем открытая поверхность океана той же температуры, приближаясь в среднем к максимально возможной величине испарения, ограничиваемой потоком солнечной энергии. Так, согласно расчётам, максимальное испарение воды над лесом, соответствующее среднеглобальному потоку солнечной энергии, погло-

Так выглядит схематически влагооборот между океаном и покрытой лесом сушей, источником энергии для которого служит солнечный свет.

щённому земной поверхностью, составляет ~ 2 м/год, тогда как испарение с поверхности океана почти в два раза меньше ~ 1,2 м/год. А если учесть, что общая листовая поверхность растительной биоты в 4 раза превосходит поверхность всей суши, то станет понятно, что суммарное испарение леса может успешно конкурировать с испарением над океаном. И это имеет решающее значение в формировании континентального влагооборота.

Дело в том, что почвенный слой не способен достаточно долго удерживать влагу, которая неизбежно теряется с речным стоком, попадая в конце концов в океан. И поэтому проблема её сохранения на суше неразрывно связана с компенсацией потерь за счёт обратного потока влаги с океана. Однако, чем дальше от береговой линии, тем большая часть принесённых с океана осадков, в силу возвышенного положения материков, возвращается в него с речным стоком. В то же время пассивные атмосферные геофизические потоки, переносящие влагу с океана, затухают по мере их продвижения в глубь континента, причём это затухание имеет экспоненциальный характер. Правда, указанная закономерность справедлива прежде всего для обезлесенных территорий с низкорослой степной растительностью, непосредственно граничащих с береговой линией, где на каждые 400 км проникновения в глубь степи, саванны или прерии поток влаги и интенсивность осадков уменьшаются примерно вдвое. Данные о градиенте убывания осадков для обширных областей суши, удовлетворяющих указанному критерию, показали, что пассивный геофизический транспорт влаги способен обеспечить нормальные условия для жизни только в прилегающей к океану полосе порядка нескольких сотен километров (для протяжён-



Геофизические районы, где исследована зависимость среднегодовых осадков от расстояния до океана. Цифрами на карте обозначены районы:

1a и 1b — Западная Африка, 5° восточной долготы; 2 — Южная Америка, 31° южной широты; 3 — Северная Австралия, 4 — Северная Америка, 40° северной широты; 5 — Восточная Азия, 42° северной широты; 6 — Африка, долина реки Конго; 7 — долина реки Обь; 8 — долина реки Амазонка; 9 — долина реки Маккензи; 10 — долина реки Енисей; 11 — долина реки Лена.

ных областей континентов с невысоким уклоном средний показатель составляет около 600 км). Водный режим в подобных регионах сильно зависит от случайных флуктуаций и сезонных количественных

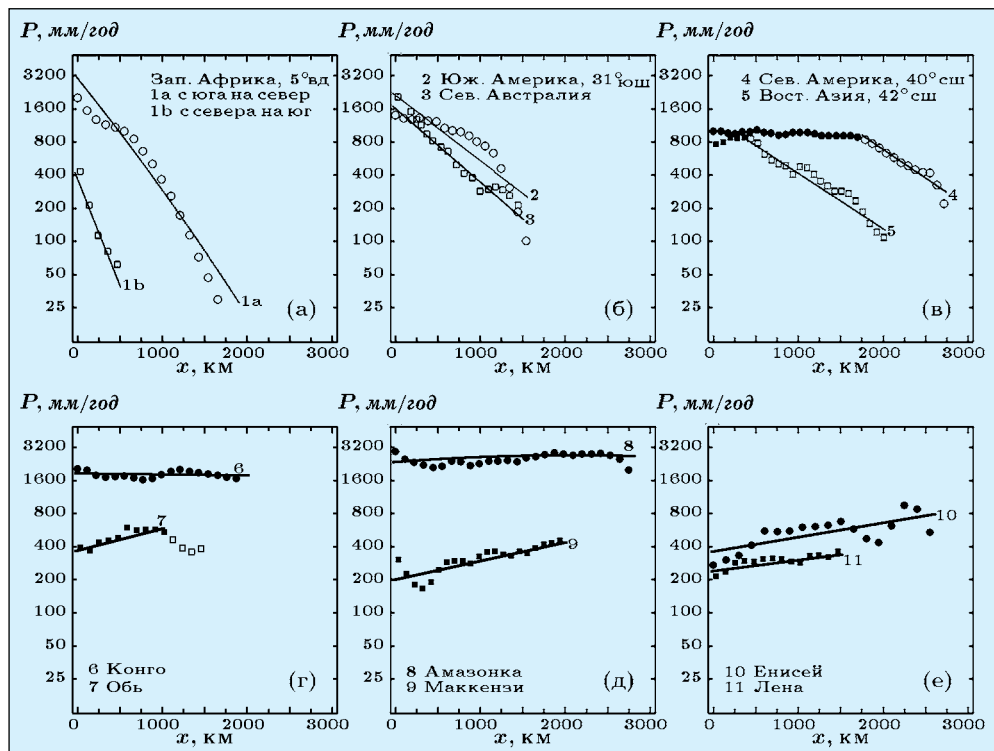
колебаний приносимых с океана осадков, как это имеет место в зоне муссонного климата с его обильными дождями летом и очень сухими зимами.

Но как же объяснить в таком случае существование хорошо увлажнённых областей в глубине континентов, на расстоянии нескольких тысяч километров от океана — в Сибири, бассейне Амазонки или Экваториальной Африке? Ответить на этот вопрос исходя из одних лишь пассивных геофизических потоков было бы, пожалуй, затруднительно, если не принять во внимание активный транспорт океанической влаги, движущим началом которого является лесной биотический насос. А если точнее — те атмосферные физические процессы, которые возникают над лесом вследствие транспирации, а также накопления атмосферной влаги древесными кронами.

Суть их, коротко, состоит в следующем. В атмосфере давление газа на любой данной высоте уравновешено весом столба газа выше этой отметки. С ростом высоты вес столба газа уменьшается, и следовательно, падает равновесное давление газа. Тот, кому приходилось подниматься в горы, знает по собственному опыту: на высокогорье труднее дышать, поскольку воздух там более разрежен и соответственно беднее кислородом. Но, в отличие от остальных компонентов воздуха, водяной пар может присутствовать в нём в двух фазах — жидкой (в виде капель дождя и тумана) и газообразной и при определённых условиях переходит в жидкое состояние, исчезая из газовой фазы. С этим явлением, на-



Мангровые заросли, типичные для прибрежных зон тропиков и субтропиков, не только поддерживают водный баланс, но и защищают берега от разрушения. Фото Л. Синицыной.

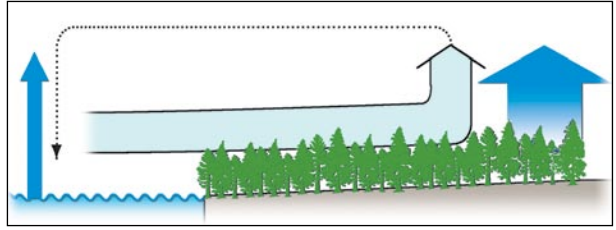
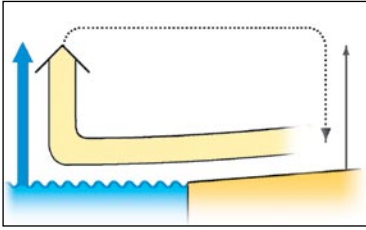


зывается конденсацией, каждому из нас приходилось сталкиваться не раз, хотя бы наблюдая образование росы, оседающей в прохладные летние вечера на траву, кустарники или какие-нибудь быстро остывающие поверхности и предметы. Объясняется это тем, что при понижении температуры замедляется процесс испарения воды и динамическое равновесие между её газообразной и жидкой составляющими сдвигается в сторону последней. В силу уменьшения своей кинетической энергии существенно меньшее число молекул воды стремится покинуть жидкую фазу, тогда как число возвращающихся в неё молекул водяного пара поначалу остаётся неизменным. И если в дневные часы в тёплом и сухом воздухе концентрация водяного пара была ниже своего возможного максимума, или так называемого уровня насыщенности, то теперь, достигнув стадии насыщения, водяной пар начинает быстро конденсироваться, переходя в жидкое состояние. В физике эта критическая температурная отметка получила название «точка росы», которую можно создать и искусственно — понижая температуру влажного воздуха или соприкасающихся с ним предметов.

Нечто подобное происходит с водяным паром и при подъёме в высоту. Если бы водяной пар, подобно другим составляющим атмосферного воздуха, не был конденсирова-

Зависимость количества осадков P (мм/год) от расстояния x (км) от океана в обезлесенных территориях (светлые символы) и территориях, покрытых лесом (тёмные символы). Нумерация районов, как на карте.

ющимся газом, он оставался бы в гравитационном равновесии на любой высоте от Земли, так что его давление понижалось бы примерно вдвое на каждые 9 км подъёма. Однако, как известно, в земной атмосфере с ростом высоты понижается температура воздуха — примерно на 6°C на один километр. Так, например, на высоте 10 км, где летают современные лайнеры, температура за бортом ниже приземной почти на 60°C . Для всех других газов воздуха такое падение температуры не является критическим, но совсем по-другому обстоит дело с водяным газом. Ведь с понижением температуры концентрация его молекул, соответствующая состоянию насыщенного пара, уменьшается, причём экспоненциально — примерно вдвое на каждые 10°C . Но концентрация водяного пара в воздухе не может быть выше насыщенной, а потому относительный его избыток начинает сразу же конденсироваться, исчезая из газовой фазы. А это в свою очередь сопровождается понижением веса водяного пара в атмосферном столбе, который уже не способен компенсировать его давление в более низких слоях атмосферы, что немедленно ведёт к возникновению



Если вырубить леса, ветер не будет дуть с океана и над сушей не выпадут дожди. На рисунке показан физический принцип распространения воздуха у земной поверхности из областей с меньшим испарением в области с большим испарением. Чёрные стрелки — потоки испарения (величина потока пропорциональна толщине стрелки). Светлые стрелки — горизонтальные и восходящие потоки влажного воздуха. Пунктирные стрелки — горизонтальные и нисходящие потоки сухого воздуха. В пустыне испарение минимально, поэтому ветры всегда дуют с опустыненной области суши в океан, приводя к ещё большему иссушению. Лес, напротив, затягивает океанскую влагу на сушу, поддерживая уровень воды в реках.

направленной вверх силы. И именно эта сила увлекает за собой восходящие потоки водяного пара, который, возносясь в верхние слои атмосферы, также конденсируется, образуя облака и выпадая в осадки в виде дождя или снега. То есть выживание пара из воздуха непрерывно пополняется восходящими потоками влаги, которые, подобно древнегреческим атлантам, поддерживают облачный покров Земли.

И здесь мы, можно сказать, подошли вплотную к самой сути лесного биотического насоса. Ведь если восходящие потоки обусловлены процессами конденсации водяного пара в верхних слоях атмосферы, то, очевидно, их мощность будет тем выше, чем интенсивнее подпитывает их испарение с земной поверхности. А значит, и приземный влажный воздух будет засасываться из областей, где испарение меньше, туда, где оно интенсивнее. И если, как было показано выше, испарение над ненарушенным лесным массивом превосходит испарение

над поверхностью океана, то, следовательно, океанская влага будет закачиваться лесом всё дальше и дальше в глубь континента, компенсируя тем самым речной сток и обеспечивая круглогодичную влажность почвы. Но, конечно, при условии, что лесной покров простирается до береговой полосы, как это имеет место в бассейне Конго, Амазонки или северных рек России и Канады, чей таёжный полог граничит с заболоченными пространствами Крайнего Севера, имеющими выход к океану. Или, по крайней мере, если лесной массив удалён от берега на расстояние, меньшее длины затухания пассивного геофизического транспорта.

Уничтожение же лесного покрова на береговой полосе в пределах длины затухания (~ 600 км) обрывает действие биотического насоса, и осадки в глубине континента перестают компенсировать речной сток. Почвенная влага стекает в океан, леса засыхают, и речной бассейн прекращает своё существование. И все эти необратимые изменения могут произойти за очень короткий отрезок времени — порядка 4—5 лет, требуемых для стока пресной воды, накопленной в горных ледниках, озёрах и болотах.

По всей вероятности, нечто подобное имело место 50—100 тыс. лет тому назад в Австралии, когда её заселили первые люди. Естественно предположить, что пришельцы, как это всегда и бывает, осваивали в первую очередь побережье, истребляя попутно леса по всему периметру континента. И когда обезлесенная полоса достигла по ширине длины затухания пассивных геофизических потоков, то этого, увы, оказалось достаточно, чтобы даже в отсутствие антропогенной

● ЦИФРЫ И ФАКТЫ

- По природно-климатическим ограничениям леса могут занимать 50% суши, но в настоящее время они покрывают около 30% суши, или 38,8 млн км². Из них на Россию приходится 22,4% всех лесов мира общей площадью 8,8 млн км².
- За год в лесах образуется 80 млрд т биомассы (в

пересчёте на сухое вещество), что составляет 2/3 всего прироста биомассы растений суши.

- На долю всех лесов мира в биосфере приходится 15% оборота углерода, причём на долю тропических лесов приходится половина поглощённого на суше углерода.

- Леса одной Амазонии вырабатывают до 50% всего кислорода, образующегося на Земле в процессе фотосинтеза.

- Показатель регуляции влагообмена для лесных экосистем — 2,5, для травяных — 1,5, для агроценозов — 1,2. То есть леса расходуют влагу поч-

активности в глубине континента биотический насос остался отрезанным от океанской влаги и австралийские леса прекратили своё существование, уступив место огромной, протяжённостью 4 млн км², австралийской пустыне. Кстати, не по этой ли причине большая часть пустынь граничит с океанским побережьем или имеет выход к внутренним морям. Исходя из только что сказанного эта география находит своё убедительное обоснование в её истории, связанной с деятельностью людей, осваивавших новые территории, начиная с морского побережья.

Может показаться, что Западная Европа, практически уже лишившаяся своих естественных лесов, за исключением севера Скандинавии, но тем не менее не подвергается опустыниванию, представляет собой наглядное опровержение приведённых выше доводов. Однако это как раз то исключение, которое лишь подтверждает правило. И если Европа избежала подобной участи, то прежде всего благодаря своему уникальному географическому положению — окружающим её внутренним морям и повсеместной близости к береговой линии, в силу чего ни одна из областей этого субконтинента не отделена от неё расстоянием, большим длины затухания геофизического транспорта морской влаги. Последнее обстоятельство, по-видимому, и порождает иллюзию безнаказанного перенесения практики истребления лесов в другие регионы планеты, для которых она наверняка окажется или уже оказалась губительной. Впрочем, и в самой Западной Европе на наших глазах резко участились катастрофические наводнения и засухи, что обусловлено в первую очередь уничтожением лесов в горных районах и сокращением залесенных территорий, следствием чего явилось серьёзное нарушение естественного гидрологического режима (таяние горных ледников и пр.).

Если пустыню можно считать практически запертой для влаги, поскольку полное отсутствие транспирации приводит здесь не к засасыванию влажного воздуха с океана на сушу, а, наоборот, выносу сухого

воздуха в океан, то в ландшафтных зонах типа степи и саванны, а также на искусственно орошаемых землях и пастбищах испарение в тёплое время года может превышать его интенсивность над океанической поверхностью. В этот период с морей и океанов сюда поступает затухающий с расстоянием поток влажного воздуха, известный под названием «летний муссон», сезон дождей. В холодное же время года испарение над кустарниками и травостоем становится меньше океанического, а потому накопленная здесь влага «стягивается» с суши в океан, чему соответствуют засушливые зимы и ветра, дующие в сторону моря («зимний муссон»). Поэтому, хотя растительность экосистем степного типа и поддерживает определённый запас влаги, но отсутствие сплошного лесного полога с высоким листовым индексом не позволяет им довести испарение до уровня, при котором поток влаги с океана на сушу постоянно компенсировал бы речной сток. Полноценный биотический насос в таких экосистемах не действует, а интенсивность осадков экспоненциально затухает с увеличением расстояния от береговой линии.

Таким образом, движимое сиюминутной выгодой истребление аборигенных лесов — этого величайшего «изобретения» земной биоты — не может быть квалифицировано иначе, как преступление против жизни на Земле, в том числе и против самого человека. Но незнание законов, согласно юридическим нормам, не освобождает от наказания за их нарушение. И природа поступает с человеком точно так же, заставляя его платить самую высокую цену за своё неразумное к ней отношение. Так будут ли вечно течь реки и шуметь непроходимые леса, или мы общими усилиями превратим в конце концов наш «прекрасный и яростный мир» в огромную безжизненную пустыню?

Желающие познакомиться с концепцией лесного биологического насоса более подробно могут обратиться к веб-сайту http://www.bioticregulation.ru/pump/pump_r.php

ти вдвое экономнее, чем агроэкосистемы.

● До масштабного распространения человечества леса занимали на Земле примерно 60 млн км². Только до эпохи промышленной революции на Земле, по разным оценкам, было уничтожено от 30 до 50% лесов. Ещё 9%

лесов, в первую очередь тропических, было сведено в последние 200—300 лет.

● Общая площадь пустынь и полупустынь мира 48 млн км², или около 43% суши. Из них площадь антропогенных пустынь около 10 млн км², или 6,7% всей поверхности суши.

Процесс опустынивания (потеря местностью сплошной растительности с невозможностью её восстановления без участия человека) идёт со скоростью 7 км² в год.

Под угрозой опустынивания находятся ещё 30 млн км², или 19% всей суши.

