

Исходный текст статьи, опубликованной в английской версии журнала Экология (Makar'eva A.M., Gorshkov V.G. (2008) The Forest Biotic Pump of River Basins. Russian Journal of Ecology, v. 39(7), pp. 537-540).

УДК 574.4:581.5

Лесной биотический насос речных бассейнов

© 2006 А. М. Макарьева, В. Г. Горшков

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

Показано, что ненарушенный лес, благодаря высокому листовому индексу, развивает испарение, превосходящее испарение с открытой поверхности океана той же площади. Разность в величинах испарения приводит к разности скоростей восходящих потоков воздуха. Это приводит к возникновению горизонтальных потоков влаги и воздуха из области с меньшим испарением (океана) в область с большим испарением (лес), что соответствует существованию биотического насоса влаги из океана на сушу, компенсирующего речной сток.

Ключевые слова: лесной покров, круговорот воды, осадки, эвапотранспирация

Жизнь на суше возможна при влажной почве. Влажность почвы обуславливает возникновение строго скоррелированного с ней речного стока. При одинаковой оптимальной влажности почвы и постоянном уклоне суши плотность речного стока на единицу площади также одинакова во всем речном бассейне. В стационарном состоянии речной сток в океан должен быть в точности скомпенсирован во всех участках речного бассейна, независимо от их удаленности от океана, противоположным потоком влаги с океана на сушу.

Геофизические потоки влаги с океана на сушу, такие как муссоны, пассаты, атмосферные фронты и проч., экспоненциально затухают с длиной проникновения вглубь континента на расстояниях порядка нескольких сотен

километров, что во много раз меньше размеров континентов и протяженности крупнейших речных бассейнов, рис. 1 и 2а. Только покрытые ненарушенными естественными лесами речные бассейны простираются на любые неограниченные расстояния вглубь континентов, рис. 1 и 2б.

Биотическое управление потоком влаги с океана на сушу, осадками и испарением над сплошным лесным покровом основано на физическом законе Клапейрона-Клаузиуса и вытекающих из этого закона следствиях, которые до сих пор не учитывались. Закон Клапейрона-Клаузиуса соответствует увеличению парциального давления насыщенного водяного пара в геометрической прогрессии с ростом температуры: с увеличением температуры на каждые десять градусов происходит удвоение давления насыщенного водяного пара. Согласно спутниковым данным, усредненное по временным флуктуациям влагосодержание земной атмосферы в региональном масштабе очень точно описывается этим фундаментальным физическим законом (Wentz, Schabel, 2000). В отличие от остальных — неконденсирующихся — атмосферных газов, пары воды в атмосфере могут находиться в аэростатическом равновесии (когда давление газа скомпенсировано его весом в атмосферном столбе) только при условии, что величина отрицательного вертикального градиента температуры воздуха G не превосходит критического значения $G = G_{H_2O} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{км}$, см. Приложение. При $G < G_{H_2O}$ пары воды достигают насыщения только у влажной земной поверхности; потоки испаренной влаги и скрытого тепла из гидросферы и влажной почвы в атмосферу отсутствуют; облака не образуются и не происходят осадки влаги.

Наблюдаемый отрицательный вертикальный градиент температуры воздуха в атмосфере $G_{ob} = 6,5 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{км}$ в 5,4 раза больше критического значения $G_{H_2O} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{км}$. При этом пары воды на всех высотах не находятся в аэростатическом равновесии — давление паров воды в несколько раз больше, чем вес паров воды в атмосфере. При наблюдаемом значении $G = G_{ob} = 6,5 \text{ } ^\circ\text{K}/\text{км}$ отрицательный градиент концентрации давления паров воды за вычетом

веса единицы объема паров воды на каждой высоте создает направленную вверх силу, приводящую к возникновению восходящих потоков влажного воздуха и поддержанию облачного покрова на устойчиво фиксированных высотах, см. Приложение. Конденсация и осаждение влаги при подъеме воздуха компенсируется испарением влаги с земной поверхности.

Различие в величине испарения в двух соседних областях приводит к различию в силах и величинах восходящих потоков воздуха. Это вызывает горизонтальные потоки влажного воздуха в нижних слоях атмосферы из областей с меньшим испарением в области с большим испарением, см. Приложение. Воздух, пришедший в область с большим испарением поднимается вверх, а содержащаяся в нем влага конденсируется и выпадает в осадки над этой областью. Ободренный влагой воздух уходит в верхних слоях атмосферы обратно в области с меньшим испарением. Этот процесс соответствует геофизическому насосу, перекачивающему влагу из областей с меньшим испарением в область с большим испарением даже в том случае, если влагосодержание первых меньше, чем последних, т.е. против градиента концентрации влажности. Энергия насоса поддерживается потоком солнечной энергии, затрачиваемой на испарение и сохранение наблюдаемого значения G_{ob} градиента температуры воздуха.

В сомкнутом покрове высоких деревьев ненарушенных лесов площадь испаряющей поверхности листьев в десятки раз превосходит площадь проекции кроны на поверхность Земли. Поэтому, при условии подвода тепла и сохранения постоянной температуры, испарение с поверхности листьев — эвапотранспирация леса — может существенно превосходить испарение с открытой поверхности океана той же площади, что и лес. Эта разница приводит к управляемому деревьями потоку влажного воздуха с океана в лесной речной бассейн, который круглогодично компенсирует речной сток на любом расстоянии от океана независимо от разницы температур суши и океана. При этом сохранение постоянной влажности почвы предотвращает наводнения

и возникновение пожаров. Этот процесс определяет биотический насос влаги с океана в естественный лес. Постоянство тяги биотического насоса предотвращает также возникновение ураганов и смерчей над ненарушенным лесом, включая поросшую лесом береговую границу, рис. 3а.

Отсутствие испарения влаги в пустыне приводит к выносу поверхностных слоев воздуха в океан, что делает пустыню круглогодично запертой для проникновения в нее насыщенного влагой воздуха с поверхности океана, рис. 3б. Аналогичная ситуация характеризует зимний муссон в саванне, когда испарение над океаном превосходит испарение над более холодной саванной, что приводит к потоку приземного воздуха с суши в океан и сухому сезону в саванне, рис. 3в. Однако в летнее время, когда саванна прогревается больше океана, сохранившаяся в саванне влага приводит к испарению, превосходящему испарение в океане. Это приводит к потоку влажного воздуха с океана на сушу в нижних слоях атмосферы и периоду дождей в саванне, рис. 3г. Растительность саванны не способна обеспечивать круглогодичное превышение испарения суши над океаном и постоянную оптимальную увлажненность почвы. Поэтому в саванне происходит чередование сухих и влажных сезонов, а летние муссоны, несущие влагу с океана, затухают на ограниченном удалении от океана, рис. 2а. Биотический насос в саваннах не действует, их увлажнение определяется геофизическими процессами.

Приложение

Зависимость давления воздуха p_a , находящегося в аэростатическом равновесии, от высоты z определяется известной формулой (Ландау, Лифшиц, 1954):

$$-\frac{dp_a}{dz} = \frac{p_a}{h_a}, \quad p_a(z) = p_{as} \exp\left\{-\int_0^z \frac{dz'}{h_a}\right\}, \quad h_a \equiv \frac{RT}{M_a g}, \quad h_{as} \approx 8,4 \text{ км}, \quad (1)$$

где нижним индексом s снабжены величины у земной поверхности, T — абсолютная температура воздуха, $\bar{T}_s = 288$ °К, $R = 8,3$ Дж/°К/моль — универсальная газовая постоянная, $M_a = 29$ г/моль — молярная масса воздуха, g

$= 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения. Зависимость парциального давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$ насыщенных паров воды от температуры воздуха T , зависящей от z , определяется законом Клапейрона-Клаузиуса (Ландау, Лифшиц, 1954; Ландау и др., 1965):

$$p_{\text{H}_2\text{O}}(z) = p_{\text{H}_2\text{O}s} \exp\left\{\frac{T_{\text{H}_2\text{O}}}{T_s} - \frac{T_{\text{H}_2\text{O}}}{T}\right\} \equiv p_{\text{H}_2\text{O}s} \exp\left\{-\int_0^z \frac{dz'}{h_{\text{H}_2\text{O}}}\right\}, \quad h_{\text{H}_2\text{O}} \equiv \frac{T^2}{\left(-\frac{dT}{dz}\right)T_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{H}_2\text{O}} \equiv Q_{\text{H}_2\text{O}}/R \approx 5300 \text{ }^\circ\text{K}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 4.4 \times 10^4 \text{ Дж/моль}$ — молярная скрытая теплота испарения.

Насыщенные пары воды находятся в аэростатическом равновесии во всем атмосферном столбе при условии $h_{\text{H}_2\text{O}} = h_w \equiv \frac{RT}{M_w g}$ ($M_w = 18 \text{ г/моль}$ — молярная масса воды), означающем фиксацию градиента температуры воздуха значением:

$$G \equiv \left(-\frac{dT}{dz}\right) = G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{T_s}{H} = 1,2 \text{ }^\circ\text{K/км}, \quad H \equiv \frac{RT_{\text{H}_2\text{O}}}{M_w g} = 250 \text{ км},$$

где учтено, что $\exp(-z/H) = 1$ и $T = T_s$ при $z \leq h_w$ в силу $h_w/H \approx 0,05 \ll 1$.

При $G < G_{\text{H}_2\text{O}}$ пары воды находятся в аэростатическом равновесии и являются насыщенными только у земной поверхности.

При $G > G_{\text{H}_2\text{O}}$ пары воды не находятся в аэростатическом равновесии. Отрицательный градиент парциального давления паров воды за вычетом веса единицы объема водяного пара приводит к появлению силы испарения $f = -(dp_{\text{H}_2\text{O}}/dz + p_{\text{H}_2\text{O}}/h_w) = (\beta - \beta_0)\rho_a \gamma g$, $\beta \equiv h_a/h_w = 0,62$, $\gamma \equiv p_{\text{H}_2\text{O}}/p_a$, $\rho_a = p_a/g h_a$ — плотность воздуха. При наблюдаемом $G_{ob} = 6,5 \text{ }^\circ\text{K/км}$, $h_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2 \text{ км}$, $\beta \approx 3,5$. Сила f направлена вверх, вызывает восходящие потоки воздуха и поддерживает облачность на фиксированной высоте. Работа силы на расстоянии dz равна приращению кинетической энергии единицы объема воздуха: $\frac{1}{2}\rho_a dw^2 = fdz$

(уравнение Эйлера), w — вертикальная скорость влажного воздуха. Стационарная скорость подъема воздуха $w = E/\gamma_s \rho_{as}$, E — величина испарения. Среднеглобальная величина $\bar{w} = 2,5$ мм/с при $\bar{E} = 1$ м/год, $\gamma_s = 2 \cdot 10^{-2}$, $\rho_{as} \approx 1$ кг/м³ (Львович, 1970). Сила испарения исчезает при прекращении испарения. При этом скорость w вследствие диссипации энергии воздушных потоков обращается в ноль.

Различие в величинах испарения на двух соседних площадях земной поверхности приводит к разнице в силах испарения f и разнице в скоростях подъема восходящих потоков воздуха. Эта разница приводит к появлению горизонтальных потоков воздуха в нижних слоях атмосферы из области с меньшим испарением в область с большим испарением. Скорость возникающего горизонтального потока воздуха u связана с разностью вертикальных скоростей w в этих областях законом сохранения вещества (уравнением непрерывности): $u = wL/h_{H_2O}$, 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 силы трения о земную поверхность, которое соответствует соотношению $(\beta - \beta_0)\gamma g \sim u^2/l$, l — вертикальный размер области действия силы трения, соответствующий максимально быстрому изменению скорости u по высоте z , имеющий порядок высоты лесного покрова (Горшков, Макарьева, 2006). При $\gamma_s \sim 10^{-2}$, $l \sim 50$ м скорость $u \sim \sqrt{\gamma_s g l} \sim 6$ м/с. При $w > \bar{w}$ лесной биотический насос может закачивать воду с океана на расстояние $L = h_{H_2O} u/w > 4000$ км.

Литература

Горшков В.Г., Макарьева А.М. Биотический насос атмосферной влаги, его связь с глобальной атмосферной циркуляцией и значение для круговорота воды на суше. Препринт № 2655. Гатчина: ПИЯФ РАН. 2006. 49 с.

Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Общая физика. Механика и молекулярная физики . Москва: Наука. 1965. 384 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. Москва: ГИТТЛ. 1954. 795 с.

Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. Москва: Мысль. 1970. 375 с.

Wentz F.J., Schabel M. Precise climate monitoring using complementary satellite data sets // Nature. 2000. V. 403. P. 414-416.

Подписи к рисункам

Рис. 1. Геофизические районы, где исследована зависимость среднегодовых осадков от расстояния, отсчитываемого по направлению от океана вглубь материка.

Рис. 2. Зависимость осадков P (мм/год) от расстояния x (км) до источника атмосферной влаги (берега океана) на лишенных лесного покрова территориях (а) и на территориях, покрытых естественными лесами (б). Нумерация областей как на рис. 1. Использованные метеорологические данные соответствуют мировой базе данных месячных осадков Carbon Cycle Model Linkage-CCMLP, привязанных к географической сетке размером 0.5×0.5 градусов, период времени 1950-1995 г.г. (Горшков, Макарьева, 2006).

Рис. 3. Физический принцип распространения воздуха у земной поверхности из областей с меньшим испарением в области с бóльшим испарением. Черные стрелки — потоки испарения, величина потока пропорциональна толщине стрелки. Полые стрелки — горизонтальные и восходящие потоки влажного воздуха. Пунктирные стрелки — горизонтальные и нисходящие потоки сухого воздуха.

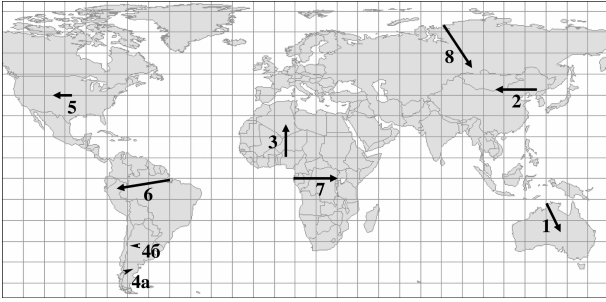


Рис. 1

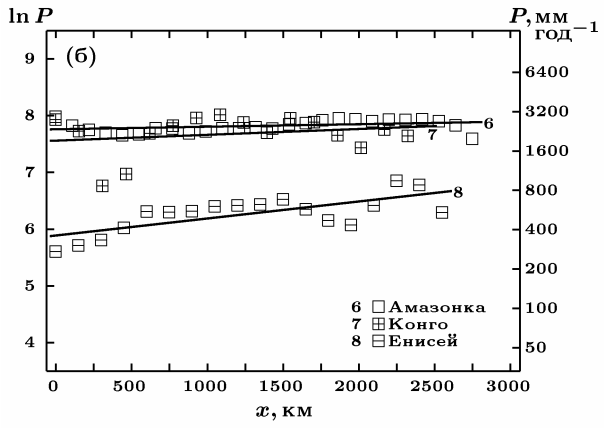
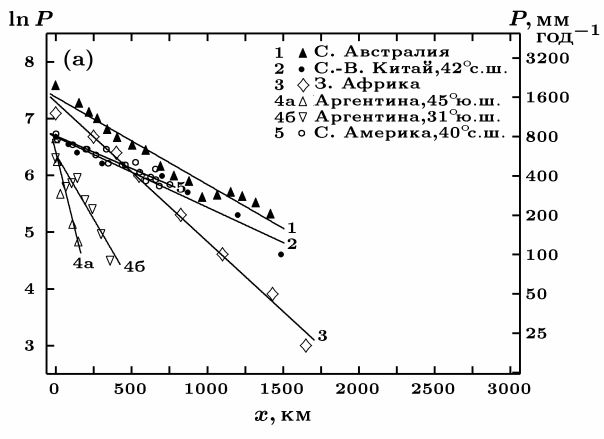
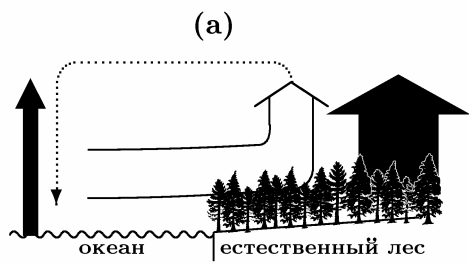
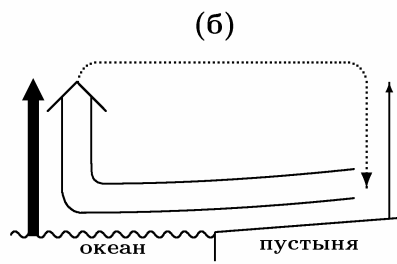


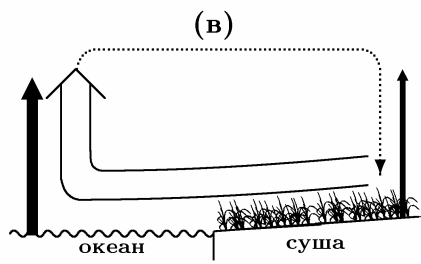
Рис. 2



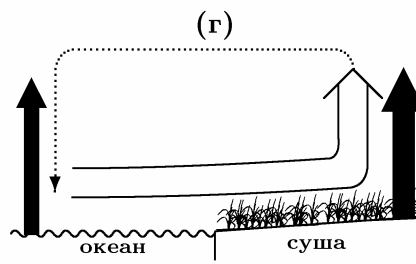
лесной насос влаги



пустыня заперта для влаги



зимний муссон



летний муссон

Рис. 3