

Е.М. Гусев

Ye.M. Gusev

Институт водных проблем РАН

Institute of water problem Russian academy of sciences

РЕСУРСЫ ПОЧВЕННЫХ ВОД И ЭКОЛОГИЯ НАЗЕМНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

SOIL WATER RESOURCES AND ECOLOGY OF TERRISRIAL VEGETATION

Аннотация. Дано экологическое обоснование понятия ресурсов почвенных вод и меры их оценки. Показано, что ресурсами в общеэкологическом понимании, обеспечивающими постоянство явления жизни на Земле, служат не мгновенные запасы каких-либо субстанций (энергии, веществ, в том числе и воды), а потоки этих субстанций, причем в силу ограниченности по количеству вещества и объему такой системы, как Земля, постоянное присутствие на ней потоков вещества может быть связано только с вовлечением их в систему круговоротов.

Abstract. The ecological grounding of the concept of soil water resources and measure of their evaluation are given. Shown that from viewpoint of ecology resource, which ensures permanence of life on Earth, are not instantaneous reserves of any substance (energy, materials, including water), but the flow of these substances, and because of the limited quantity of material and volume of such system as the Earth, a constant presence r of matter flows on he can be provided only by their involvement in the cycle systems.

Воды суши обычно принято подразделять на поверхностные, подземные, почвенные воды, ледники и снежники [8]. В данной работе обсуждаются в основном почвенные воды, а именно, воды, содержащиеся в системе почва – растительный покров суши. Поскольку воды суши являются необходимым фактором существования наземных экосистем и экосистем внутренних водоемов в процессе своего функционирования, имеет смысл и принято говорить о ресурсах вод суши. Что касается поверхностных и подземных вод, то понятия о ресурсах этих составляющих вод суши употребляются в гидрологии, гидрогеологии и водном хозяйстве уже давно и общеприняты. Не вдаваясь в подробности определения этих понятий, все же отметим связанные с ними два обстоятельства.

Первое из них заключается в том, что оценка ресурсов поверхностных и подземных вод базируется на антропоцентристской точке зрения, т.е. данные понятия прежде всего связываются с тем, в какой мере эти вода прямо или косвенно могут быть использованы для развития или хотя бы поддержания устойчивости человеческой популяции на Земле. Такая позиция во многом сужает взгляд на действительную биосферную ценность тех или иных субстанций на планете, которые можно рассматривать в качестве общеэкологических ресурсов. Во всяком случае, «в философии Вернадского нет ничего ограниченно антропоцентристского; в неотделимом от эволюции биосферы человеку нельзя усмотреть изначально предопределенный акмеизм Homo sapiens» [33]. (В современном понимании "акме"—высшая степень развития.) В этом мировоззрение Вернадского отличается, например, от пронизанного некоторым теологическим отблеском мировоззрения П.Тейяра де Шардена [34], согласно которому человек — "ось и вершина эволюции". Однако распространенная среди специалистов философия антропоцентризма, отражающая потребительское отношение человека к остальной части биосферы, в конце концов негативно сказалась и на условиях существования самого «венца природы».

Второе обстоятельство, относящееся к определению ресурсов поверхностных и подземных вод, заключается в том, что количественную меру этих ресурсов связывают, как правило, с интенсивностью поверхностного и подземного стока [33, 40]. Факт определения ресурсов поверхностных и подземных вод на основе величин их стока, подчеркивающий непрерывную возобновляемость данных ресурсов, указывает на то, что рассмотренные

составляющие вод суши являются ресурсами в той мере, в какой они вовлечены в так называемый гидрологический цикл (климатический круговорот воды на Земле).

Что же касается понятия ресурсов почвенных вод, то оно было введено сравнительно недавно [4] и связано с тем, что почвенные воды—важнейший фактор существования и развития растительного покрова суши, В качестве меры ресурсов почвенных вод А.И.Будаговский предложил использовать величину суммарного испарения с поверхности суши за безморозный период E_c , представляющего собой сумму испарения воды почвой E_p и поверхностью растительного покрова—транспирации E_T (включая испарение перехваченных растительностью осадков). В основу такого предложения были положены следующие соображения. Рассматривается уравнение среднемноголетнего водного баланса некоторой территории

$$P = E_c + R_s + R_g \quad , \quad (1)$$

где P – атмосферные осадки (за вычетом их части, испарившейся с поверхности снега, льда и зеркала внутренних водоемов и водотоков), R_s и R_g —поверхностная и подземная составляющие речного стока. Два последних члена в правой части (1) как раз и фигурируют во многих работах в качестве оценок ресурсов поверхностных и подземных вод. Таким образом, если почвенные воды—необходимый приходный ресурс, используемый растительным покровом, а R_s и R_g — меры ресурсов других составляющих вод суши, то естественно принять в качестве оценки ресурсов почвенных вод величину E_c а P при данном подходе будет мерой «ресурсов естественного увлажнения» [4].

С нашей точки зрения, предложенная концепция представляется логичной и конструктивной в том смысле, что позволяет с единых позиций подойти к оценке возможностей использования биосферой всех вод суши. Следует отметить, что из трех составляющих ресурсов вод суши в правой части уравнения (1) основная доля приходится на ресурсы почвенных вод, поскольку при величине осадков, выпадающих на суше и равных 119 тыс. км³/год, на испарение расходуется 72 тыс. км⁵/год [33]. Однако, в большинстве же исследований понятие ресурсов почвенных вод не фигурирует вообще. По этой причине представляется необходимым еще раз затронуть вопрос определения ресурсов почвенных вод и меры их оценки, подойдя к нему не столько с гидрологической, сколько с более общей экологической точки зрения.

Для этого сначала следует коснуться такого понятия, как «жизнь». Полное определение указанного понятия в силу значительной комплексности и многосторонности явления жизни, по-видимому, дать невозможно [14, 31, 38, 39]. «С какой бы стороны мы ни попытались к нему подойти, всегда остается ощущение, что оно ускользает от нас [39, с. 74]. Но тем не менее определение сложного явления, позволяющее рассматривать его даже в какой-то одной плоскости, с целью упорядочивания и согласования знаний в определенной системе может оказаться полезным.

Воспользуемся определением жизни, данным Онсагером и Моровицем [39, с.75]: «Жизнь есть свойство материи, приводящее к сопряженной циркуляции биоэлементов в водной среде, движимой в конечном счете энергией солнечного излучения по пути увеличения сложности». Под «биоэлементами» в данной трактовке понимаются углерод, водород, азот, кислород, фосфор и сера (или кратко CHNOPS), составляющие более 90 % массы организма [47]. Отметим также обязательное наличие водной среды. Все функционирующие живые системы состоят в основном из воды в жидкой фазе. В наземных растениях, в частности, содержится до 85-95 % воды [15]. Необходимость выполнения этого условия можно объяснить то, что из всех планет Солнечной системы жизнь существует, по-видимому, только на Земле [16, 38]. И наконец, самое основное в этом определении, что потребуются при дальнейшем анализе, – это утверждение, согласно которому с понятием «жизнь» неразрывно связано понятие «циркуляция», Жизнь в ее современной форме не может существовать вне биотического круговорота, он является одним из наиболее важных ее выражений [19].

Биологические круговороты сопряжены друг с другом [39] как на уровне клетки, простейших и высших организмов, биоценозов, так и в планетарном масштабе. Движущей силой всех круговоротов на Земле, в том числе и биотического, является энергия Солнца. Как показано в [47], при постоянном действии потока свободной энергии на ограниченную (по объему и веществу) систему единственной ее структурообразующей реакцией может быть лишь организация собственного потока энергии, нейтрализующего согласно принципу Ле Шателье воздействие внешнего возмущения на основе круговорота вещества. В биологических процессах участвует энергия квантов определенной части спектра излучения Солнца либо непосредственно, как в случае фотосинтеза, либо косвенно, в результате передачи энергии биомассы одних организмов другим в ходе их питания (трофические цепи). При этом, согласно так называемому «закону 10 %» [21, 29], у каждого последующего звена цепи количество усвоенной энергии примерно в десять раз меньше количества, усвоенного предыдущим звеном [7]. В качестве первичного звена трофической цепи наземных экосистем выступают автотрофные зеленые растения, биомасса которых составляет примерно 99 % общей биомассы живого вещества суши [1, 21].

В принятом выше определении жизнь — экологическое свойство планетарного масштаба. Как свойство индивидуума оно проявляется на короткий миг и лишь в одном из звеньев общей циркуляции биоэлементов. Поэтому те потоки веществ, которые при глобальном рассмотрении вовлекаются в «циркуляции», для конкретного организма служат либо «питательной» субстанцией, либо «отходами». Но любой организм в нормальном более или менее стабильном состоянии не накапливает в себе все то, что он получает из внешней среды, а большей частью экспортирует обратно (даже с учетом ассимиляции биомассы, например, в растениях). В чем же тогда смысл пропускания через организм указанных потоков, смысл «обмена веществ», когда «любой атом азота, кислорода, серы и т.п. так же хорош, как любой другой атом того же элемента <...>. Что „же тогда составляет то драгоценное нечто, содержащееся в нашей пище, что предохраняет нас от смерти. На это легко ответить. Каждый процесс, явление, событие, <...> все, что происходит в Природе, означает увеличение энтропии в той части Вселенной, где это имеет место. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию <...>, приближаясь к опасному состоянию максимальной энтропии, представляющей собой смерть. Он может избежать этого состояния <...>, только постоянно извлекая из окружающей среды отрицательную энтропию <...> или, чтобы выразить это менее парадоксально, существенно в метаболизме то, что организму удастся освободиться от всей той энтропии, которую он вынужден производить, пока жив» [42, с.74].

Освобождение организма от избытка энтропии может осуществляться только с помощью потоков вещества или энергии, уносящих последнюю в более «низкокачественном» состоянии по сравнению с ее состоянием в момент поступления в организм. Именно энтропия и является мерой качества передаваемой энергии. Естественное направление всех процессов в природе характеризуется понижением качества энергии [44], т.е. возрастанием энтропии. Поэтому, чтобы сохранить свою стабильность, организму необходим некоторый постоянно действующий «транспортный агент», экспортирующий избыток непрерывно производимой организмом энтропии. Поскольку такими экспортёрами для любого организма служат потоки проходящих через него веществ и (или) энергии, то организм, таким образом, является в определенном смысле «проточной системой» [12].

Эти системы, возникающие и существующие при постоянном отсутствии термодинамического равновесия, относятся к классу так называемых диссипативных структур [13, 43]. Они характеризуются наличием в них значительных градиентов температур, потенциалов, концентраций веществ, приводящих к возникновению потоков различных субстанций, которые в свою очередь вызывают постоянную диссипацию высококачественной энергии в низкокачественную в форме хаотического теплового движения частиц. Одно из условий самоорганизации и устойчивого существования диссипативной структуры — ее открытость, т.е. возможность обмена с окружающей средой

веществом и (или) энергией, что позволяет системе экспортировать постоянно производимую энтропию, вызванную диссипацией высококачественной приходящей энергии в низкокачественную, в окружающее пространство и тем самым сохранять свою упорядоченность. Экспорт энтропии, т.е. ее выделение открытой системой, является универсальной термодинамической основой структурообразования в космической, добиологической и биологической эволюции [11]. Таким образом, все живые организмы, их сообщества, биосфера в целом суть диссипативные структуры.

К диссипативным структурам относятся и наземные автотрофные растения. Рассмотрим вопрос о том, какой же (или какие) транспортный агент экспортирует производимую ими в процессе метаболизма энтропию, позволяя растениям не только поддерживать в относительно стабильном состоянии свою структуру, но и увеличивать упорядоченность, создавая новые структуры в процессе фотосинтеза фитомассы.

Входным потоком высококачественной свободной энергии служит поглощенная зеленым листом часть дошедшей до него энергии солнечного излучения. Большая доля этой энергии почти сразу же деградирует в тепло, проникая в ткани листа. Другая часть, поглощенная в хлоропластах клеток, идет (далеко не полностью) на восстановление рассеянных в окружающем пространстве двуокиси углерода и воды до углеводов в процессе фотосинтеза. Процесс фотосинтеза очень сложен, представляет собой целую цепочку различных световых фотохимическими и биохимическими ферментативных (темновыми) реакций, и на каждом его этапе происходит деградация части энергии, находящейся в более высококачественной форме, обусловленной химическими связями веществ, в тепловую [21, 26]. В результате общий энергетический коэффициент полезного действия фотосинтеза, т.е. отношение энергии, пошедшей на образование органического вещества, ко всей поступившей к растению энергии солнечного излучения, довольно низок. В настоящее время для растительного покрова суши он равен в среднем 0,3—6,4% [18, 37, 45]. Не очень велика даже его предельная теоретически возможная величина, оцениваемая в 5 — 7 % по отношению к энергии фотосинтетически активной радиации [27, 36], которая в свою очередь равна примерно половине энергии суммарной радиации.

Таким образом, почти вся поглощенная растением и деградировавшая в тепло энергия должна быть возвращена в окружающее пространство, унося произведенную растением энтропию. Она уносится потоками тепла, уходящими от поверхности растительного покрова: эффективным излучением (тепловым излучением листовой поверхности за вычетом противоизлучения атмосферы), турбулентным потоком тепла и транспирацией — потоком водяного пара, уносящим скрытую теплоту парообразования испарившейся с поверхности клеток мезофилла листьев. Прежде чем оценить роль каждого из потоков, обратим внимание на отмечавшуюся многими исследователями кажущуюся неэкономность, даже расточительность расходования растениями водных ресурсов [7, 15, 22].

Действительно, на образование сухой биомассы растение расходует не более 0,2 % всей проходящей через него в процессе транспирации воды [9]. Если учесть, что еще требуется раз в десять больше воды на обводнение образовавшихся тканей, то в целом из всей воды, поглощенной корнями из почвы, на построение тканей растения и насыщение их водой для нормальной жизнедеятельности идет только 1—3 %, а 97—99 % уходит на испарение в атмосферу—транспирацию [16], «Это можно сравнить разве что с использованием尼亚гары на то, чтобы наполнить ванну» [15, с.88], Такие значительные затраты воды на транспирацию объясняют тем, что поскольку в процессе фотосинтеза принимает участие устьичный аппарат листьев, обеспечивающий поступление углекислого газа к мезофиллу листьев и далее к хлоропластам, то при нормальной работе этого аппарата (устьица открыты) растение неизбежно должно терять воду. «Ему приходится пролагать свой жизненный путь между Сциллой и Харибдой—голода и жажды» [35, с. 147]. «И чтобы не погибнуть от голода, растение вынуждено примириться с такой огромной потерей воды» [15, с.88]. Таким образом, кажется, что расход громадного количества воды, идущей на транспирацию, просто вынужденное зло, обусловленное сложившейся в результате эволюции морфологией высших

наземных растений. С нашей точки зрения это не совсем так, поскольку выработанный в процессе эволюции устьичный аппарат листьев наземных растений (высшие водные растения, листья которых полностью находятся в воде, не имеют устьиц [15]), наоборот, очень хорошо согласует функцию углеродного питания растений с другой не менее важной функцией — освобождением от избытка энтропии, производимой растением в период создания им новых структур, на основе весьма специфического механизма — транспирации.

Выше было сказано, что деградировавшая в тепло солнечная энергия уходит с поверхности растительного покрова за счет теплового излучения, конвекции и транспирации. При этом для большей части листовой поверхности нормально вегетирующего растительного покрова в условиях достаточного увлажнения «перегрев листьев растений по отношению к окружающему воздуху в обычных условиях не превышает 1—3°C, а чаще температура их соответствует температуре воздуха» [26, с. 107]. Поэтому «в растительном покрове в целом затраты на транспирацию должны заметно превышать теплоотдачу за счет конвекции» [2, с. 160], так же как и за счет эффективного излучения, которое тоже примерно пропорционально разнице температур листьев и окружающего их воздуха. Определяющая роль транспирации в сведении энергетических балансов листьев зеленых растений отмечена во многих работах [3, 17, 21, 26, 27 и др.].

Вообще говоря, доли количества тепла, отводимые от поверхности суши в атмосферу с помощью конвективного теплообмена и испарения примерно равны [7], но конвективный теплообмен преобладает в пустынных районах, аридных зонах, в периоды недостатка воды в степных и лесостепных областях, т.е. в тех случаях, когда практически не наблюдается фотосинтетическая деятельность растительности. В условиях же активной вегетации, т.е. в период образования новых структур, когда особенно сильны требования к удалению производимой растительным покровом энтропии, основным механизмом ее экспорта является транспирация.

Казалось бы, это очень неудачный способ, поскольку при этом «растения тратят воду, которую часто так трудно добыть, с расточительной непринужденностью» [15, с. 88]. Однако транспирация — очень эффективный способ отведения энергии от растительного покрова без сколько-нибудь заметного повышения его температуры. Чтобы удалить такое же количество тепла в отсутствие транспирации путем конвекции или теплового излучения, поверхность листьев должна быть нагрета до температур, значительно превышающих температуру окружающего воздуха, а в жаркий солнечный день, наиболее способствующий организации новых структур, «подвергаться температурам прямо вредным, даже убивающим» [35, с. 143], т.е. температурам, вообще выходящим за пределы не только депрессии фотосинтеза, но и существования ферментов и структурных образований плазмы клеток. Поэтому, чтобы избежать транспирации, наземные растения должны были бы обладать другой биохимической основой жизни, позволяющей ей существовать при более высоких температурах. Но поскольку биохимическая эволюция на Земле завершилась раньше морфологической дивергенции организмов [31, 48], то одним из главнейших свойств современной жизни стало ее биохимическое единство. Небольшой набор главных органических соединений, общий для всех живых систем, позволяет экосистемам эффективно действовать на разных трофических уровнях. Однако это означает, что подавляющее большинство организмов может существовать в довольно узком диапазоне условий среды: температур, солености, уровней радиации и т.д.

Примерный диапазон значений температуры существования большинства организмов (хотя есть и исключения) — от 0 до 40°C [21, 31]. Такие температуры были характерны для тех частей водоемов, где произошла химическая эволюция и зародились первые живые организмы [31]. После «выхода» в палеозое жизни на сушу живые структуры должны были эволюционировать так, чтобы сохранить внутренние температурные условия такими же, поскольку основные биохимические «кирпичики жизни» — аминокислоты, их основания, липиды и т.д. — остались без изменений. Для высших наземных растений единственной возможностью оттока деградирующей в тепло энергии солнечного излучения без

существенного повышения температуры тканей растений мог стать только механизм фазовых переходов вода — пар на поверхности мезофильных клеток, т.е. транспирация.

Таким образом, транспирация оказалась той «точкой», в которой произошло сопряжение двух циркуляционных диссипативных структур, двух гигантских «шестеренок»: физической циркуляции воды в системе почва — атмосфера и циркуляции биоэлементов в экосистемах наземных растений. Без этого сопряжения невозможно приведение в действие круговоротов биоэлементов в системе зеленых растений суши (рис.1).

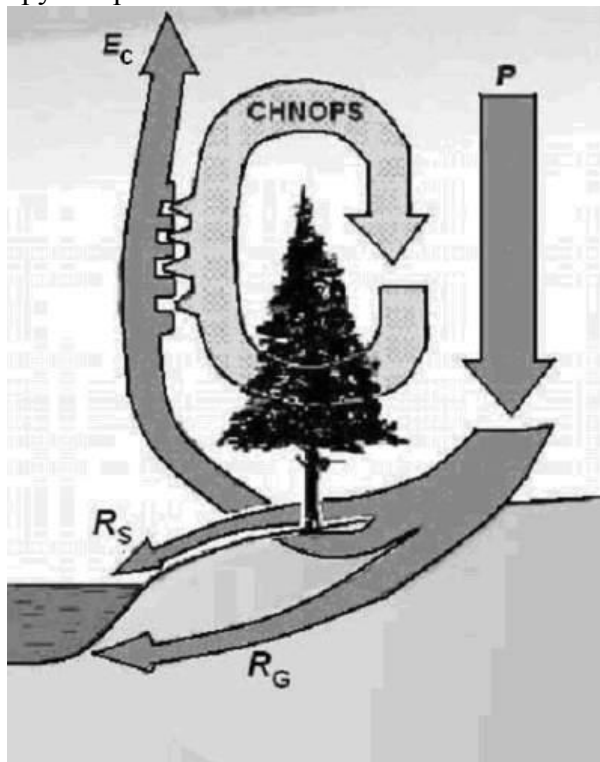


Рис. 1. Связь гидрологического цикла суши с круговоротом биоэлементов (обозначения в тексте).

растения представляют собой начальное звено трофической цепи наземных экосистем, циркуляция воды в системе почва — растительный покров — атмосфера, по существу, «раскручивает» круговорот биоэлементов во всей системе биоценозов суши.

Теперь напомним данное ранее определение жизни как «циркуляции биоэлементов». Из него следует, что ресурсами в общеэкологическом понимании, обеспечивающими постоянство явления жизни, служат не мгновенные запасы каких-либо субстанций (энергии, веществ), а потоки этих субстанций, причем в силу ограниченности по количеству вещества и объему такой системы, как Земля, постоянное присутствие на ней потоков вещества, как уже отмечалось, может быть связано только с вовлечением их в систему круговоротов, образующих соответствующие диссипативные структуры.

Даже многие из таких «ресурсов», которые обычно оцениваются через «запасы», например запасы угля, нефти, газа, сапропеля, гумуса и т.д., суть производные от

соответствующих циркуляционных структур, образовавшиеся в результате небольшой незамкнутости этих структур, наличия очень малых, но односторонних дисбалансов энергии и круговоротов веществ прошлых геологических эпох, длившихся сотни миллионов лет [24, 28].

Основываясь на принятом в данной работе понимании ресурсов, необходимых для существования биосферы, мы видим, что диссипативная структура циркуляции воды в системе почва — растительный покров — атмосфера является необходимым экологическим ресурсом, используемым биоценозами суши. Часть движущейся в этом круговороте воды может возвращаться из почвы в атмосферу, минуя растительный покров (непродуктивное испарение). Однако принципиального предела использования растительностью всего потока воды в указанной структуре нет. Во всяком случае, если для посевов сельскохозяйственных культур возникает проблема улучшения структуры суммарного испарения [4], т.е. увеличения доли транспирации, то в естественных ценозах, занимающих: примерно 70 – 80 % суши и образующих многоярусные поликультурные сообщества, в результате длительной эволюции эффективность использования всех видов ресурсов (в том числе и водных) неизбежно оптимизируется, и доля непродуктивного испарения в целом существенно меньше транспирации [21].

Отсюда следует, что мерой ресурсов почвенных вод, т.е. показателем, характеризующим потенциальную мощность используемой биосферой циркуляции воды в системе почва — растительный покров — атмосфера, может служить величина суммарного

испарения с рассматриваемой территории суши за характерный промежуток времени, например за год. Вообще говоря, более точной характеристикой ресурсов почвенных вод является суммарное испарение за безморозную часть года, когда и происходит образование первичных биологических структур. Но поскольку в климатических зонах, в которых имеется вегетирующий растительный покров, количество испарившейся воды с поверхности снега обычно много меньше суммарного испарения за год (и часто лежит в пределах точности измерений твердых осадков), то за меру ресурсов почвенных вод можно приближенно принять и величину годового суммарного испарения.

Структура циркуляции воды в системе почва — растительный покров — атмосфера является составной частью общей диссипативной системы гидрологического цикла суши. В этой системе можно выделить еще две крупномасштабные структуры: циркуляция воды в системе атмосфера — поверхность суши — водоток — водоем и циркуляция воды в системе атмосфера — поверхность суши — грунтовые воды — водоем. Интенсивности циркуляции воды в каждой из указанных структур определяют и существующие меры водных ресурсов этих структур — величины стока соответственно поверхностных и подземных вод. Все три структуры связаны между собой. Русловая сеть может дренировать грунтовые воды, а может способствовать дополнительному питанию подземных водоносных горизонтов. Грунтовые воды могут подпитывать, корнеобитаемый слой почвы. Соответственно это влечет за собой и взаимный обмен ресурсов поверхностных, подземных и почвенных вод.

Ресурсы всех составляющих вод суши связаны при данном подходе одной методологической основой — они определяются на основе интенсивности потоков воды в соответствующей диссипативной структуре, поскольку (подчеркнем еще раз) интенсивность непрерывных жизненных процессов на Земле поддерживается только такими ресурсами, которые также имеют непрерывный и возобновляемый характер. В этом смысле всякого рода мгновенные «запасы» ресурсами не являются. Они служат характеристиками состояния элементов, образующих соответствующую диссипативную структуру, позволяя оценивать возможности регулирования временной динамики ее ресурса. (Конечно в более узком смысле «запасы» каких-либо субстанций можно трактовать в качестве «ресурса» для кратковременного, разового его использования, но отнюдь не как ресурса, обеспечивающего непрерывность жизни на Земле.)

Циркуляция воды в указанных структурах в конечном итоге поддерживает непрерывную циркуляцию биоэлементов суши. Поэтому собственно, их и можно рассматривать в качестве биосферных ресурсов. В большей степени это относится к почвенным водам, поскольку они приводят к движению самое мощное звено в циркуляции биоэлементов наземных экосистем — звено зеленых растений суши. Поверхностные воды (воды рек, озер, болот, водохранилищ и т. д.) в этом смысле имеют меньший коэффициент полезного действия. Это связано с тем, что первичная продуктивность (скорость образования сухого органического вещества в единицу времени на единице площади) водных экосистем в среднем имеет тот же порядок величин, что и продуктивность наземных экосистем [21, 46], а площадь поверхностных вод суши намного меньше ее общей площади. В результате звено циркуляции поверхностных вод, по мощности немного уступающее звену циркуляции почвенных вод, обеспечивает (разумеется, на совершенно другой основе) гораздо меньший по суммарной мощности круговорот биоэлементов в экосистемах внутренних водоемов и водотоков. Общая первичная продуктивность экосистем поверхностных вод суши не превышает нескольких процентов от первичной продуктивности континентов в целом [18, 30, 32, 46]. Однако в силу концентрации водных масс поверхностные воды удобны для использования их более сложными, с большей пространственной локализацией и более мощным метаболизмом биологическими структурами, такими, например, как животные и человек. Тем не менее подчеркнем, что в конце XX века 80—90 % так называемых «безвозвратных потерь» стока, т.е. изымаемых человеком ресурсов поверхностных и подземных вод, использовалось в сельском хозяйстве, прежде всего в орошаемом земледелии [41].

В контексте настоящей работы это означает, что человеческой популяции на определенном этапе ее существования оказалось более удобным поддерживать свой гомеостаз, потребляя ресурсы поверхностных и отчасти надземных вод с переводом их в ресурсы почвенных вод. Однако удобство или в каком-то смысле «выгодность» определенного пути использования ресурсов с точки зрения части системы (человеческая популяция представляет собой часть биосферы в целом) вовсе не означает «выгодность» этого пути с позиций всей системы. В данном случае искусственное изменение эволюционно сложившихся структур общей циркуляции вод суши скорее всего невыгодно биосфере в целом с точки зрения минимизации общего производства энтропии в ней [23, 43], поскольку увеличение и поддержание упорядоченности создаваемых новых структур (в частности, структур ирригационных систем), влекущее за собой локальное уменьшение энтропии в месте расположения этих структур, «обусловлено тем, что где-то в другом месте порождается еще большая неупорядоченность» [44]. Последнее обстоятельство является простым следствием второго начала термодинамики.

Подземные воды, несмотря на то, что по своему общему количеству превышают запасы почвенных и поверхностных вод [16, 33], пожалуй, напрямую меньше всего связаны с циркуляцией биоэлементов, так как толщина покрывающей суши «пленки жизни <...>» очень незначительна; она для сплошных лесных пространств не подымается выше нескольких десятков метров над земной поверхностью <...>, проникает в глубину почвы и подпочвы на несколько метров» [10, с. 97]. Основная же масса подземных вод расположена гораздо глубже. Тем не менее их циркуляция также является ресурсом в силу взаимосвязи подземных вод в гидрологическом круговороте с двумя другими циркуляционными водными структурами, пополняя или изымая их ресурсы, которые уже напрямую сопрягаются с круговоротом биоэлементов.

С рассмотренных в настоящей работе позиций ресурсы вод суши вообще и ресурсы почвенных вод в частности, не имеют антропоцентристского оттенка и никак не связаны с «уникальностью» человека («Но обладает ли он ею на самом деле?» [39, с.75]). Ресурсы почвенных вод—ресурсы биосферы и использовались ею задолго до появления человека на Земле, причем, по-видимому, с большей эффективностью в силу более высокого энергетического коэффициента фотосинтеза, что было обусловлено в свою очередь повышенным по сравнению с современным содержанием в атмосфере двуокиси углерода [7, 31, 25, 28,]. По мере убыли вулканической деятельности планеты количество углекислоты в атмосфере, обеспечивающей основной «строительный материал» биологическим структурам суши, уменьшилось, что должно было привести и к некоторому снижению интенсивности циркуляции биоэлементов. Человек появился на Земле, когда мезозойское буйство жизни стало угасать [24, 25]. Но с появлением такого активного фактора эволюции биосферы, как человеческая популяция, возникла проблема отношения человека к ресурсам биосферы, среди которых ресурсы почвенных вод занимают одно из центральных мест.

Использование в качестве меры ресурсов почвенных вод величины суммарного испарения с некоторой части территории суши позволяет использовать данную концепцию и при решении практических задач. Здесь мы приведем только один пример.

В частности, данную концепцию можно использовать при разработке критериев, по которым должно проводиться сравнение изменения эффективности использования ресурсов почвенных вод в агроэкосистемах при воздействии на них того или иного агротехнического приема. В качестве показателя водообеспеченности фитоценоза η_w логично использовать отношение величины фактической транспирации растительного покрова за вегетационный период E_T к величине потенциальной транспирации E_{c0} [4], т.е.

$$\eta_w = E_T / E_{c0} \quad , \quad (2)$$

а в качестве коэффициента полезного использования наземными фитоценозами ресурсов почвенных вод η_e - отношение величины транспирации (продуктивного испарения) E_T к общей величине суммарного испарения E_c [4], т.е.

$$\eta_e = E_T / E_c \quad (3)$$

Указанные выше критерии η_w и η_e являются удобными наглядными показателями использования ресурсов почвенных вод. Так, в случае значительного отклонения η_w от 1 растительный покров находится в состоянии водного стресса, понижающего его продуктивность. В районах Нижнего Поволжья, например, среднемноголетняя величина η_w для посевов зерновых при использовании традиционных агротехнологий лежит в диапазоне 0.3 - 0.7 [6], что означает существенный дефицит водообеспеченности агроценозов.

В то же время величина η_e , отражающая эффективность использования ресурсов почвенных вод, в указанных районах часто не достигает и 40-50% [5], что означает неэффективность традиционных сельскохозяйственных технологий (в естественных поликультурных многоярусных ценозах η_e , \approx 90-95% [21]) и наличие значительного резерва неиспользованных ресурсов почвенных вод, затраченных на непродуктивное испарение воды почвой. Приведенные оценки сразу ставят перед сельским хозяйством в данном регионе задачу использования нетрадиционных агротехнологий, повышающих η_w и η_e за счет снижения доли непродуктивного испарения, например, мульчирования почвы растительными остатками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Географические закономерности продуктивности и круговорота химических элементов в основных типах растительности Земли // Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. Л.: Наука, 1969. С. 24–33.
2. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 223 с.
3. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 242 с.
4. Будаговский А.И. Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // Водные ресурсы. 1985. № 4. С. 3–13.
5. Будаговский А.И., Григорьева Н.И. Пути повышения эффективности использования ресурсов почвенных вод // Водные ресурсы. 1991. N 1. С.131-142.
6. Будаговский А.И., Шумова Н.А. Ресурсы почвенных вод и их роль в решении водохозяйственных проблем // Научные основы рационального использования, охраны и управления водными ресурсами. Ч.1. М.: Изд-во МГУ. 1983. С.166-175.
7. Будыко М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
8. Великанов М.А. Гидрология суши. Л., Гидрометеиздат. 1948. 530 с.
9. Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1960а. Т. 4. 652 с.
10. Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1960б. Т. 5. 422 с.
11. Волькенштейн М.В. Сущность биологической эволюции // УФН. 1984. Т. 143. Вып. 3. С 429–466.
12. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука, 1986. 192 с.
13. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
14. Горбань А.Н., Хлебопрос Р.Г. Демон Дарвина: Идея оптимальности и естественный отбор. М.: Наука, 1988. 208 с.
15. Даддингтон К. Эволюционная ботаника. М.: Мир, 1972. 307 с.
16. Дерпгольц В.Ф. Мир воды. Л.: Недра, 1979. 254 с.
17. Джунипер Б. Э., Дзеффри К.А. Морфология поверхности растений. М.: Агропромиздат, 1986. 160 с.
18. Ефимова Н.А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 216 с.
19. Кашмилов М.М. Круговорот органического вещества и проблема сущности жизни // Журн. Общ. биологии. 1966. Т.27. № 3ю С.282 – 298.
21. Лархер В. Экология Растений. М.: Мир, 1978. 284 с.

22. Максимов Н.А. Развитие учения о водном режиме и засухоустойчивости растений от Тимирязева до наших дней. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. 46 с.
23. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
24. Моисеев Н.Н. Экология человека глазами математика М.: Молодая гвардия. 1988. 254 с.
25. Молостов В.Д. Старение и гибель цивилизаций. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 416 с.
26. Ничипорович А.А. Световое и углеродное питание растений (фотосинтез). М.: Изд-во АН СССР, 1955. 287 с.
27. Ничипорович А.А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 94 с.
28. Одум Ю. Экология. Том 1. М.: Мир. 1986. 328 с.
29. Реймерс Н.Ф. Большие качели. М.: Знание. 1975. 96 с.
30. Родин Л.Е., Базилевич Н.И., Розов Н.Н. Биологическая продуктивность растительности земной суши и океана и факторы, ее определяющие // Человек и среда обитания. Л.: ВГО, 1974. С. 160–175.
31. Рутген М. Происхождение жизни (естественным путем). М.: Мир, 1973. 412 с.
32. Рябчиков А.М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М.: Мысль, 1972. 244 с.
33. Соколов А.А. Вода: проблемы на рубеже XXI века. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 166 с.
34. Тейяр де Шардена П. Феномен человека. М., Наука. 1987. 240 с.
35. Тимирязев К.А. Сочинения. Т. 3. Земледелие и физиология растений. М.: Сельхозгиз, 1937. 452 с.
36. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.
37. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 264 с.
38. Флоренский К.П. Биосфера глазами натуралиста // Природа. 1988. № 2. С. 52–58.
39. Фолсом К. Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 160 с.
40. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л., Гидрометеиздат. 1978. 308 с.
41. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 300 с.
42. Шредингер Э. Что такое жизнь? М.: Атомиздат, 1972. 88 с.
43. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.
44. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. М.: Мир, 1987. 224 с.
45. Lieth H. Primary production terrestrial ecosystems // Human ecology. 1973. V. 1. № 4. P. 302–332.
46. Lieth H., Whittaker R.H. Primary Productivity of the biosphere. V. 14. Ecological Studies. Berlin; Heidelberg; New York; Springer-Verlag, 1975. 339 p.
47. Morowitz H.J. Energy Flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics. N.Y.: Acad. Press, 1968. 179 p.
48. Pirie N.W. Chemical diversity and the origins of life // The origin of life on Earth. L.: Pergamon Press, 1959. P. 76–83.