Гидрометеорология и экология
№ 1 1999

УДК 504.4.062.2(574)

ОЧЕРЕДНЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЧНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЕЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ

Канд. геогр. наук М. Ж. Бурлибаев

Примеры современных деградаций речных экосистем показывают, что так называемые санитарные попуски (минимально необходимые расходы воды) в нижний бьеф крупных гидротехнических сооружений, себя полностью дискредитировали, потому как они были обоснованы не из интересов равновесного развития речных комплексов. В данной статье устойчивость речной экосистемы подвергается очередному испытанию для целей обоснования экологического стока рек Казахстана.

В настоящее время, из-за отсутствия общепризнанных критериев испытания устойчивости речных экосистем, в деле охраны создалась парадоксальная ситуация в понимании самой концепции экологической устойчивости. Например, практически все научные работы и правительственные документы последнего времени, декларируют о том, что охрана речных экосистем должна базироваться на устойчивости и развитии, хотя эти работы и не содержат мало-мальски значимых критериев устойчивости для практического применения. Поэтому, нам представляется, что решение подобной задачи возможно лишь на основе объективной оценки условий гомеостаза и толерантности в речной экосистеме, наблюдаемых как при естественном, так и в нарушенном гидрологическом и гидрохимическом режимах. В научных работах, посвященных оптимальному созданию единой системы критериев, должно доминировать именно это положение, основанное на реальных статистических данных отдельных биокомпонент, полученных при различных гидрологических и гидрохимических режимах водотоков, что и послужит основанием для объективной оценки устойчивости речной экосистемы.

В свете такой постановки, данная работа является завершающим этапом испытания устойчивости речной экосистемы р. Шу из условия детерминированного состояния развития на примере отдельных биокомпонентов.

Как ранее подчеркивалось нами, на основе полученных зависимостей (диапазон Д рисунка работы [2]) область определения функции, при испытании устойчивости речных экосистем, фазовое пространство системы уравнений, описывающей нормальное функционирование распадается на три условных области [1, 2]. А именно, первая область - многоводный период весеннего половодья и паводков с обеспеченностью $P = 1 \div 50$ % и стремящихся к среднемноголетнему для достижения максимума биопродуктивности и к минимуму соленакопления в затапливаемых почвах пойменных лугов. Вторая область - с обеспеченностью в пределах от 50 % до 60 % при относительной стабильности некоторых признаков устойчивости и ярко выраженном оптимуме биопродуктивности травостоя и соленакопления. Третья область - период перехода от среднемноголетнего ($P = 50 \div 60$ %) к маловодному периоду с обеспеченностью от 60 до 99,9 %, при снижающейся биопродуктивности и повышении соленакопления. Тем не менее, на основе предварительного анализа стабильности стохастичной природы стокообразования, нами также был предложен тезис о целесообразности объединения первой и третьей областей в область периодического решения, причем безо всякого ущерба для решаемых задач, с целью уменьшения численности (минимизации) фазового пространства системы уравнений.

Также следует отметить, что в вышеназванных работах нами были исследованы и освещены вопросы наличия и отсутствия признаков устойчивости (из области теории механики) академика А. М. Ляпунова, как в виде стационарных решений относительно оси точек перегиба парабол биопродуктивности и соленакопления, так и для целостного относительного равновесного состояния речной экосистемы с обеспеченностью ($P = 50 \div 60$ %), с ярко выраженным оптимумом развития выше названных биокомпонентов. Полученные результаты показали, что в двух рассматриваемых случаях устойчивость, применительно к теории механики, в речной экосистеме, за исключением некоторых признаков отсутствует. Для придания полновесности поиску признаков устойчивости, следующим этапом или циклом исследования является рассмотрение вопроса устойчивости в области периодических решений, то есть при $P = 1 \div 50$ % и $P = 60 \div 99,9$ %.

Прежде всего, как и в предыдущих работах, мы будем придерживаться устойчивости академика А. М. Ляпунова [3, 4]. При этом основным постулатом хода решения задачи будут служить математические выкладки выдающихся советских математиков Л. А. Понтрягина и Л. Д. Кудрявцева. Необходимо строго оговориться о том, что несмотря на наличие в некоторых случаях устойчивости А. М. Ляпунова, а также их правильное решение в строгом соответствии детерминирования, эти методы не совсем корректны в отношении устойчивости речной экосистемы, где преобладающим фактором является состояние динамичного подвижного равновесия, в противовес задачам прикладной механики. Поэтому, при решении задачи устойчивости относительно биопродуктивности и соленакопления (то же самое и в отношении гомеостатической кривой Б. В. Фащевского по воспроизводству рыбных запасов), мы вынуждены были внести дополнительные ограничения, то есть ни одно значение задаваемых и оперируемых параметров аргументов и переменных в данном случае не могут быть равны нулю или бесконечности. Таким образом, и в этом случае решаемая задача превращается в детерминированную задачу с ограничением области определения функции. В противном же случае, то есть без естественных ограничений области определения функции, решаемые задачи не могут быть отнесены к решению задачи устойчивости речной экосистемы. Для начала решаемых задач, принимаем определение устойчивости А. Ляпунова, относительно произвольно взятого уравнения

$$Y' = f(P, Y), \tag{1}$$

Приведенное уравнение является векторной записью произвольной нормальной системы уравнений для речной экосистемы порядка n, правые члены которой совместно с их производными $\partial f(P,Y)/\partial Y^j$ определены и непрерывны в некоторой области пространства переменных P,Y. Решение данного уравнения с начальными значениями θ,ξ условно обозначим как $\varphi(P,\theta,\xi)$. Далее $\varphi(P)$ уравнение (1), с начальными значениями p_0 и y_0, является устойчивым согласно А. Ляпунову, при выполнении следующих условий: а) существует такое положительное число как ρ, что при $|Y_l - Y_0| \langle \rho$ решение, $\varphi(P,P_0,Y)$ определено для всех значений $P \geq P_0$; б) для всякого положительного числа ε можно подобрать такое положительное число $\delta \leq \rho$, что если $|Y_l - Y_0| \langle \delta$, при $P \geq P_0$, то получим $|\varphi(P,P_0,Y_l) - \varphi(P)| \leq \varepsilon$.. Такое устойчивое решение $\varphi(p)$ уравнения (1) с начальными параметрами P_0,Y_0, считается по А. М. Ляпунову асимптотически устойчивым, если найдется такое положительное число как $\sigma \leq \rho$, что при $|Y_l - Y_0| \leq \delta$ получим $|\varphi(P,P_0,Y_l) - \varphi(P)| \to X_l$ (при $P \to X_2$).

Будем рассматривать систему уравнений, правые части которых будут в основном зависеть от обеспеченности (p) в системе периодических решений, с выделением отдельных отрезков (τ). Например, $f(P+\tau Y) = f(P,Y)$, а также системы уравнений (1), являющейся автономной, то есть $f(P,Y) = f(Y)$. В том и другом случае во главу угла будем ставить вопрос устойчивости периодических решений $\varphi(P)$ периода τ, то есть $\varphi(P+\tau) = \varphi(P)$, которое в случае автономности системы будет существенно отличаться от положения равновесия $P = 50 \div 60$ %. При этом необходимо уточнить, что автономная система является частным случаем периодических решений, в силу чего можно было бы предположить, что эти условия применимы в целом и для периодического решения автономной системы.. Однако это не так, потому как периодические решения автономной системы не могут быть асимптотически устойчивыми.

Для достоверного изучения поведения решаемого уравнения, в области определения функции $\varphi(P)$, необходимо ввести новую дополнительную (неизвестную) векторную функцию (Z) и после чего предположить, что $Y=\varphi(P)+Z$. В дальнейшем мы будем исходить из того, что правые части системы уравнений (1) имеют в области определения функции вторые непрерывные производные по координатам вектора Y. Произведя замену переменных в системе уравнений (1) $Y=\varphi(P)+Z$ и принимая во внимание, что $\varphi(P)$ есть решение уравнения (1) и далее, разлагая правые части по Z, получим:

$$Z_i'=\sum\left[\partial f_i\left[P,\varphi(P)\right]/\partial X_i\right]Y_j+r_i(P,Z), \qquad (2)$$

Линеаризуя эту систему, то есть отбрасывая некоторые члены уравнения, как r_i второго порядка малости относительно Z, получим линейную систему $Z'=A\|P\|Z$, где в свою очередь $A\|P\|$ - матрица с элементами $a_j^i(P)=\partial f_j\left[P,\varphi(P)\right]/\partial Y_j$. Предположим, что правая часть этого уравнения относится к периодическому решению относительно τ по P, тогда как $\varphi(P)$ - тоже относится к периоду τ. При таком допущении линейная система $a_j^i(P)=\partial f_i\left[P,\varphi(P)\right]/\partial Y_j$ является также решением уравнения относительно периода τ и соответственно выглядеть как $a_j^i(P+\tau)=a_j^i(P)$ при $i,j=1....n$. При этом следует подчеркнуть, что в случае, когда система уравнений (1) характеризуется автономностью, а ее периодическое решение $\varphi(P)$ отличается от положения равновесия речной экосистемы, то линейная система $Z'=A\|P\|Z$ обязательно будет иметь одно действительное число, равное единице. Для доказательства правильности решаемых задач допустим, что $\varphi(P)$ - периодическое решение автономной системы (1) для периода τ с начальными параметрами P_0 и Y_0. Решение этой системы с начальными координатами p_0 и ξ обозначим через $\varphi(P,\xi)$. Построим для решения $\varphi(P)$ аналог функции последовательности, который будет здесь отображением $(n-1)$ - мерного пространства переменных $u^1 ...... u^{n-1}$. Допустим, что уравнение поверхности $y = f(u)$ при $u = (u^1 ..... u^{n-1})$, пересекает траекторию $\varphi(P)$ в единственной точке $y_0 = \varphi(P_0, Y_0) = f(u_0)$. То в таком случае векторы $\varphi'(P_0), \partial f(u_0) / \partial u^1 .... \partial f(u_0) / \partial u^{n-1}$, не касающейся в точке y_0 траектории $\varphi[P, f(u)]$, являются линейно независимыми. Как правило, подобное утверждение требует нахождения пересечения траектории $\varphi[P, f(u)]$ с поверхностью эллипсоиды, когда находится p_1 близкое к $p_0 + \tau$, считая, что $|u - u_0| \to 0$. Для этого предположим, что $f(v)$ - точка пересечения, тогда становится справедливым соотношение

$$\varphi[P, f(u)] - f(v) = 0, \tag{3}$$

Далее следуя логике надо признать, что при $u = u_0$ мы имеем очевидное решение $p = p_0 + \tau$ и $v = u_0$ Здесь мы считаем, что u является независимой переменной, тогда как p и v - неизвестными величинами. Так как функциональный определитель системы (3), при $p = p_0 + \tau, u = u_0, v = u_0$ по неизвестным функциям p и не равен нулю в силу линейной независимости векторов $\varphi'(p_0), \partial f(u_0) / \partial u^1 ...... \partial f(u_0) / \partial u^{n-1}$, то в таком случае, для малого числа $|u - u_0|$ существует решение $p = p(u)$ и для $v = \chi(u)$ системы (3) с малыми числами $|P(u) - (t_0 + \tau)|$ и $|\chi(u) - u_0|$. Отображение $\chi(u)$ пространства переменных $u^1 ...... u^{n-1}$ в себя, определяемые при малом $u - u_0$, будет называться, согласно Л. А. Понтрягина, отображением последовательности. Каждому решению $u = u_1$ уравнения $\chi(u) - u = 0$ соответствует периодическое решение $\varphi[P, f(u_1)]$ автономного уравнения (1) с периодом τ. Например, решению $u = u_0$ предшествует исходное периодическое решение $\varphi(p)=\varphi\left[P,f(u_0)\right]$. Если функциональная матрица $M=\left\|\partial\chi^i(u_0)/\partial u^j\right\|$ при $(i,j=1.....n-1)$ не имеет собственных значений, равных единице, то решение $u=u_0$ уравнения $\chi(u)-u=0$ является изолированным. В самом же деле, функциональная матрица уравнения $\chi(u)-u=0$ при $u=u_0$ равна $M-E$. В данной детерминированной задаче детерминант этой матрицы не обращался в нуль, для чего необходимо, чтобы матрица M не имела собственного значения, равного единице. Следующим пунктом решения.. является выяснение вопроса о том, что все ли периодические траектории R_1, проходящие вблизи траектории RU, описываемая решением $\varphi(P)$, должно соответствовать $\varphi\left[P,f(u_1)\right]$, где u_1 - есть некоторое решение уравнения $\chi(u)-u=0$ при $n-2$. Исходя из этого предположения, нас в первую очередь интересуют результаты решения при $n \geq 3$, из позиции, будет ли результат таким же как при $n = 2$. Предположим, что есть минимальный период решения $\varphi(u)$, то есть равенство $\varphi(p_0+p)=\varphi(p_0)$ может иметь место лишь в том случае, если $p=k\tau$, где k - целое действительное число. Если траектория R_1, близка к траектории R, то она несомненно пересекается с поверхностью $y=f(u)$ при $u=(u^1....u^{n-1})$ в некоторой точке $f(u_1)$, причем $\left|u_1-u_0\right|$ близка к нулю. Для проверки этой гипотезы предположим, что $u_2=\chi(u_1)$, $u_3=\chi(u_2).......u_{i+1}=\chi(u_i)$. С учетом фактора, траектория R - замкнутая, допустим, что в этой последовательности обязательно отыщется точка, совпадающая с точкой u_1 и которую обозначим через u_{r+1}. В этом случае траектория R будет описываться уравнением $\varphi\left[P,g(u_1)\right]$. При этом минимальный период этой траектории находится близко к $k\tau$, вследствие чего решение $\varphi\left[P,g(u_1)\right]$ замыкается только в случае k - кратного прохождения вдоль траектории $\varphi(P)$. Здесь введем пояснение, что далее k будет называться кратностью траектории R_1. Для определения двойной траекторий необходимо решить уравнение $\chi\left[\chi(u)\right]-u=0$, а в случае необходимости определения трехкратных траекторий $\chi[\chi(\chi(u))]-u=0$. Функции $\chi[\chi(u)]$, $\chi[\chi(\chi(u))]$ называются итерациями функции $\chi(u)$ и следовательно k-кратную итерацию обозначим через $\chi^k(u)$. Таким образом, для определения k-кратных периодических решений (близких к $\varphi(p)$), необходимо решить уравнение $\chi^k(u)-u=0$. При этом функциональная матрица уравнения $\chi^k(u)-u=0$, при $u=u_0$ равна M^k-E. Для правильного решения этих уравнений немаловажным является тот факт, что детерминант матрицы M^k-E был отличен от нуля, или иначе говоря матрица M^k не имела собственных значений равных единице или k. Как показали наши дальнейшие исследования, эти условия в данном случае выполняются, где собственные значения матрицы по модулю меньше единицы.

Очевидно, какую важную роль играет матрица M в изучении и определении траектории автономного уравнения, описывающего равновесное или устойчивое состояния речной экосистемы, то есть $y'=f(p,y)$. При решении $z'=A(p)z$ предположим, что $\psi'(P)=A(P)\psi(P)$, при выполнении начальных условий $\psi(P_0)=E$. С учетом решения этих уравнений получим $\psi(P_0+\tau)=C$. Далее, введя в уравнение координаты векторов в фазовом пространстве уравнения $y'=f(p,y)$, предположим, что $y=\varphi(p_0)+x$. Следовательно, обозначая получаемые новые координаты (в фазовом пространстве уравнений) через $y^1......y^n$ зададимся уравнением $y^1=u^1,...y^{n-1}=u^{n-1},y^n=0$..

Последовательно дифференцируя $\varphi[P,g(u)]-g(v)=0$ по $u^1...u^{n-1}$ при $u=0$ и $P=P_0+\tau$ предположим, что $p=p(u)$ и $v=\chi(u)$ - функции переменных $u^1....u^{n-1}$, тогда получим равенство $C=M$. Следует отметить, что при $n=2$ матрица C есть скаляр λ и соответственно $C=M$ дает равенство $\chi'(u_0)=\lambda$.

В нашем случае, все собственные значения матрицы C по модулю меньше единицы, что показывает на отсутствие признаков асимптотической устойчивости периодических решений вблизи траектории R.

Таким образом, и в этом случае испытание устойчивости речной экосистемы показывает, что стохастическая природа стокообразования, в основном определяющая равновесие развития экосистемы, сводит на нет принципы автоматического восстановления первоначального состояния системы, как отклик на воздействие возмущающего фактора тождественно задачам испытания устойчивости в теории механики. Здесь следует строго оговориться, что рассматриваемые нами критерии устойчивости речной экосистемы, пусть даже в детерминированном состоянии в декартовых координатах, далеки от реально наблюдаемых в природе процессов развития речного комплекса, где в хронологии доминирует стохастическое начало, отображающее не ранжированную цикличность многоводья, маловодья и средние по водности годы. Тем не менее, для понимания самого процесса развития речной экосистемы и определения сформулированных требований к гидрологическому режиму, представляется целесообразным испытание устойчивости производить именно из условия детерминированности, потому как в настоящее время проведение прямых экспериментов просто не реально.

Как и в предыдущих работах, так и в этом случае полученные результаты показывают, что у речной экосистемы р. Шу по динамике биопродуктивности травостоя, соленакопления и воспроизводству фитофильных рыб (многоводные и маловодные годы) нет достаточной самоорганизации внутренних потенциалов по сокращению их на уровне оптимальных показателей в противовес изменяющемуся из года в год гидрологическому и гидрохимическому режимам. В многолетнем периоде развития, речная экосистема достигает процесса гомеостаза, то есть состояния внутреннего равновесия путем регулярного возобновления в благоприятные годы основных структур речного комплекса с помощью функциональной саморегуляции, на основе способности биоты выносить отклонение факторов среды от оптимума. При этом во всех фазах развития речной экосистемы огромная роль принадлежит анабиозу. Следовательно, в отношении речной экосистемы под устойчивостью нами понимается внутренняя самоорганизация системы по преодолению адаптационного синдрома, в виде видоизменяющегося отклика на воздействия возмущающих внешних факторов, то есть гидрологического, гидрохимического и т. д. режимов. Поэтому, обосновываемый экологический сток рек (необходимый для нормального развития и функционирования речной экосистемы) ниже крупных водохранилищ и гидротехнических сооружений не может быть из года в год постоянной величиной. Из условия потребности речной экосистемы экологический сток из года в год меняется, в зависимости от водности реального года. Только при соблюдении этих условий можно обеспечить нормальное развитие речной экосистемы на уровне оптимального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлибаев М. Ж. Об одной попытке испытания устойчивости речной экосистемы на примере р. Шу // Гидрометеорология и экология. - 1998. - № 1 - 2. - С. 94 - 106.
2. Бурлибаев М. Ж. Об одной задаче оценки сравнительной устойчивости речной экосистемы из детерминированного равновесного состояния ее развития // Гидрометеорология и экология. - 1998. - № 3 - 4. - С. 69 - 85.
3. Бурлибаев М. Ж. К вопросу определения устойчивости речных экосистем //Географические основы устойчивого развития Республики Казахстан. - Алматы: Гылым, 1998. - С. 21 2 - 216.
4. Ляпунов А. М. Исследование одного из особенных случаев задачи об устойчивости движения - Л.: ЛГУ, 1963. - 116 с.
5. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения (рассуждения А. Ляпунова) - Харьков: Изд-во Харьковского математического общества, 1892. - 250 с.

Казахский научно исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

ШУ ӨЗЕН ЭКОСИСТЕМАСЫНЫҢ ОРНЫҚТЫЛЫҒЫН, ОНЫҢ ШЕКТЕЛГЕН ДАМУ ҚАЛПЫНЫҢ ПЕРИОДИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРІ ТҰРҒЫСЫНАН КЕЗЕКТІ СЫНАУЫ

Геогр.ғыл.канд. М.Ж.Бурлібаев

Бүгінгі күндегі өзендердің экосистемасының құлдырауы үлкен гидротехникалық ғимараттарынан бөлінетін санитарлық ағыстардың дәлелсіз екендігін көрсетеді, өйткені олар өзен комплекстерінің қалыпты даму тұрғысынан дәлелденбеген. Бұл мақалада өзен экологиясының орнықтылығы экологиялық ағыстарды дәлелдеу үшін кезекті сынауға салынды.