

УДК 004.65+519.6

В. Ю. Балачук; В. Б. Мокин, д. т. н., проф.; А. Р. Яцолт, к. т. н., доц.

ОЦЕНИВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛЬЮ С ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

Проведен обзор основных существующих подходов к оценке экологических рисков. Осуществлена формализация кодирования участков рек в разветвленной речной сети. Выведено соотношение для оценки ожидаемого экологического риска запирающего участка реки. Приведен пример расчета ожидаемого экологического риска.

Ключевые слова: экологические риски, качество поверхностных вод, оценка экорисков, моделирование экорисков, экологическая сеть.

На сегодняшний день достаточно остро стоит проблема управления экологической безопасностью. Это связано с обострением экологических проблем на территории Украины и, как следствие, ухудшением условий жизнедеятельности, состояния здоровья населения. Актуальным является совершенствование моделей и возможностей геоинформационных технологий в задачах управления экобезопасностью, природопользованием и мероприятиями при чрезвычайных ситуациях.

Проблемы загрязнения водных ресурсов, водопользования, вероятность возникновения различных чрезвычайных ситуаций, связанных с этими проблемами, делают актуальными различные методы и технологии оптимального управления экологической безопасностью объектами водной сети.

Для оценки экологического риска необходимо сначала осуществить моделирование процессов изменения состояния поверхностных вод в бассейне реки. Для этого речную систему в целом следует рассматривать как геометрическую сеть.

Рассматривая речную систему (РС) как геометрическую сеть (ГС), можно также решать такие задачи, как: определение изменения качества (количества) воды после установки сброса (водозабора) на определенном участке, определение влияния природных факторов (осадки, испарение) на количество воды, определение возможности построения водозабора на участке реки в зависимости от качества воды и многие другие.

Таким образом, целесообразно рассматривать РС именно как ГС, причем для более оперативного, комплексного и наглядного анализа данных для оценки экобезопасности (экорисков) использовать специализированные ГИС.

Постановка задачи

Сегодня существует множество подходов и методов оценки экологических рисков. Рассмотрим их в соответствии со следующими критериями: те, которые учитывают состояние экосистем, зоны чрезвычайной экологической ситуации, уровни загрязненности водных объектов, состояние загрязненности рек, общий индекс загрязненности.

По одной из методик экологический риск для водных экосистем определяют как [1]:

$$P_G^c = f(G_v \langle v = \overline{1, N_G} \rangle, H_{Gm} \langle m = \overline{1, N_{HG}} \rangle), \quad (1)$$

где G_v – нынешнее состояние водных экосистем; H_{Gm} – интегральная оценка нынешнего уровня антропогенного давления под воздействием негативных факторов на водные экосистемы по v -му показателю.

В работе [1] дается определение понятия «экологический риск для поверхностных вод» как вероятность нежелательных последствий для водных экосистем и их компонентов в Наукові праці ВНТУ, 2013, № 1

результате действия антропогенных и природных факторов, в том числе ухудшение качества воды. Экологический риск для водных экосистем определяют по формуле (1). Такая оценка является обобщенной и предназначена для определения состояния регионов, бассейнов рек или их частей, где существует угроза нежелательных последствий для водных экосистем, в том числе их деградации, при условии сохранения существующих тенденций антропогенного давления [2].

Одним из подходов к оценке экологической безопасности является выявление уже сложившихся зон чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия. Эту процедуру осуществляют по химическим и экологическим показателям. Для совокупной оценки опасных уровней загрязнения водных объектов при выделении зон чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия предлагается использовать формализованный суммарный показатель химического загрязнения (ПХЗ-10) [3]. Этот показатель особенно важен для территорий, где загрязнение химическими веществами наблюдается сразу по нескольким веществам, каждое из которых многократно превышает допустимый уровень (предельно допустимую концентрацию (ПДК)).

Расчет ПХЗ-10 ведется по десяти веществам, максимально превышающих ПДК, по формуле [3]:

$$ПХЗ - 10 = \left(\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_{10}}{ПДК_{10}} \right), \quad (2)$$

где C_i – концентрация i -ого загрязняющего вещества в воде; $ПДК_i$ – рыбохозяйственное ПДК i -ого ЗВ в воде.

Еще одним довольно распространенным методом оценки экобезопасности является определение уровня загрязнения по обобщенному показателю индекса загрязненности (I_3), который равен [3]:

$$I_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i}. \quad (3)$$

Как видно, формула (3) превращается в (2) при $n = 10$.

Рассмотрим еще один метод определения экологического риска $Risk$. Для этого используют формулы [4]:

$$Risk = -\ln(P), \quad (4)$$

где

$$P = \frac{\sum n_i}{N}, \quad (5)$$

где

$$\sum n_i = \sum \frac{C_i}{ПДК_i}, \quad (6)$$

где C_i – концентрация i -ого ЗВ, которая превышает $ПДК_i$ (ЗВ, которые не превышают ПДК, в формулу (6) не подставляют); N – общее количество ЗВ, которые анализируют (превышающие их ПДК и не превышающие).

Приведенные формулы, как правило, применяют для анализа данных в статике, а не в динамике, на основе обработки большого количества данных наблюдений. Например, если на определенном участке произошел аварийный сброс сточных вод и повысилось загрязнение реки, то это должно автоматически повышать экологический риск как на этом же участке реки, так и на участках, расположенных ниже по течению, даже если загрязнение

туда еще не дошло. Предложим для решения данной задачи специальный математический аппарат, основанный на представлении бассейна реки как графа, т. е. в виде геометрической сети. По сути, этот аппарат предоставляет возможность оценки ожидаемых экологических рисков на участках реки в динамике вследствие существенных изменений качества воды в реке выше по течению.

Формализация кодировки участков рек в разветвленной речной сети

В работе [5] была предложена декомпозиция реки на элементарные участки (ЭУ) по двум критериям: 1) каждый ЭУ имеет не более одного пространственно сосредоточенного входа сточных или приточных вод (рис. 1); 2) каждый ЭУ имеет приблизительно одинаковые характеристики физико-биохимических самоочищающихся процессов. На рис. 1 изображен i -ый ЭУ.

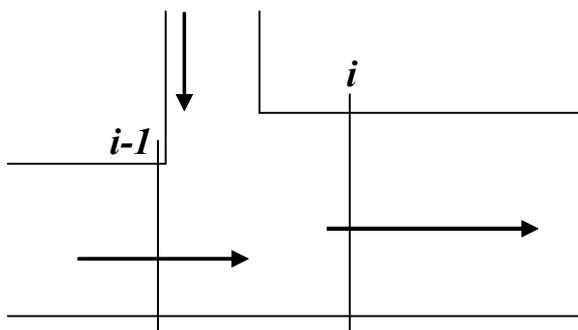


Рис. 1. Схема i -ого элементарного участка реки, на который поступают сточные или приточные воды

При оценке экологических рисков, как правило, разделение реки на ЭУ осуществляют следующим образом, чтобы в начале каждого ЭУ был створ (пост) контроля качества поверхностных вод. Такой подход к декомпозиции не противоречит приведенному выше, поскольку эти створы располагают именно в местах, где или в реку впадает приток, или есть сброс сточных вод, или существенно меняется качество вод (есть пороги или замедленное русловым водохранилищем течение, или др.).

Следовательно, стоит задача кодирования таких ЭУ. Существует немало известных подходов к кодированию. Например, в системе 2-ТП (водхоз), которую используют для государственного учета водопользования в Украине и содержит подходы к кодированию, заложенные еще в советские времена, реки каждого региона имеют многоуровневую структуру [6]. Есть реки нулевого уровня, которые не впадают ни в одну другую реку и впадают сразу в море. Реки первого уровня впадают в реки нулевого и т. д. Кодирование реки нулевого уровня начинают с ее условно сокращенного названия типа «Ю. Буг» или «Днепр». Кодирование приток этой реки формируется из расстояний в километрах от устья реки нулевого уровня до места впадения в нее данной притоки. Благодаря этой древовидной многоуровневой структуре предоставляется возможность точно идентифицировать реку на карте (недостатком является только то, что данное кодирование имеет точность 0,5 км и не учитывает: является река правым или левым притоком, поэтому иногда возникают неоднозначности при сравнении этого кодирования с картой). Это кодирование учитывает 7 уровней притоков рек и имеет 8 секций: название главной реки и 4-значный километраж впадения. Если река является притоком, например, 2-го порядка, т. е. притоком притока главной реки, тогда она будет содержать название главной реки, километраж впадения в нее притока 1-го по ряду, километраж впадения в этот приток, а во всех других секциях будут стоять нули. Пример фрагмента (начальные секции кодирования) соответствующей таблицы формы 2-ТП "Водхоз" представлен на рис. 2.

П.БУГ	0395	0044	0000
-------	------	------	------

Рис. 2. Кодирование притока 2-го порядка р. Южный Буг

То есть река на 44-м километре впадает в реку, которая на 395-м километре впадает в Южный Буг.

Такое кодирование удобно для расчетов (сразу есть длина всех ЭУ между впадением речных притоков в одну реку и расстояние, которое преодолевается загрязняющими веществами от места впадения в устье основной реки), но оно является неудобным для обозначения соответствующих характеристик ЭУ в формулах и соотношениях. Для таких обозначений более удобным будет кодирование фиксированным количеством цифр. Предлагаем каждый i -ый ЭУ рек кодировать следующим образом:

$$i = k_{1i} k_{2i} k_{3i}, \quad (7)$$

где k_{1i} – порядок (уровень) реки, на котором размещен i -ый ЭУ: 0 – главная (или основная) река, 1 – притока главной реки, 2 – притока этой притоки и др.; k_{2i} – порядковый номер притоки k_{1i} -го уровня, на котором размещен i -ый ЭУ, на речке $(k_{1i}-1)$ -го уровня (для главной речки $k_2 = 0$), считая от устья последней; k_{3i} – порядковый номер элементарного участка на реке k_{2i} -го уровня, считая от ее устья.

Число k_1 – это, как правило, одно число. Понятно, что такое кодирование допускает максимум 9 уровней, чего вполне достаточно для кодирования гидрологической сети.

Числа k_2 и k_3 можно кодировать одно-, двух- и даже трёхзначными комбинациями цифр в зависимости от их максимальных значений. Хотя если вспомнить, что данное кодирование должно применяться для кодирования ЭУ и расчета экологических рисков (в соответствии с чем каждый ЭУ должен иметь один створ наблюдений качества воды), то это означает, что для их кодирования (в большинстве случаев) будет достаточно 1 – 2 цифр.

Стоит отметить, что главная (или основная) река, то есть река 0-го уровня – это не обязательно река, впадающая в море, как в системе 2-ТП (водхоз) (см. рис. 2). Как правило, это – река, на которой находится замыкающий ЭУ, экологический риск которого необходимо рассчитать. В этих условиях (в большинстве случаев) будет достаточно применять кодировку (7) из трех цифр – по одной цифре на каждый тип кода. Проиллюстрируем данное кодирование на примере реки с притоками 1-го и 2-го порядка:

– для основной реки:

$$0 0 p_3, \quad (8)$$

где p_3 – порядковый номер ЭУ на основной реке;

– для приток основной реки:

$$1 p_2 p_3, \quad (9)$$

где p_2 – порядковый номер притоки основной реки; p_3 – порядковый номер ЭУ на притоке;

– для приток на притоке основной реки:

$$2 p_2 p_3, \quad (10)$$

где p_2 – порядковый номер притоки на притоке основной реки; p_3 – порядковый номер ЭУ на этой притоке.

Пример схемы геометрической сети такой речной системы приведен на рис. 3.

Следовательно, сначала необходимо определить экологический риск для каждого отдельного ЭУ, а после этого уже определять его ожидаемое значение для замыкающего участка основной реки, с учетом экорисков ЭУ и приток, расположенных выше по течению. При этом следует учитывать время прохождения воды от одного ЭУ к другому. Усредненное время t_i прохождения воды от начала до конца i -ого ЭУ легко рассчитать по формуле:

$$t_i = \frac{L_i}{v_i}, \quad (11)$$

где L_i – длина i -ого ЭУ, вычисленная вдоль линии усредненного течения реки (как правило, внутри фарватера), м; v_i – средняя (или максимальная) скорость течения реки, вычисленная вдоль линии усредненного течения реки (как правило, внутри фарватера), м/с.

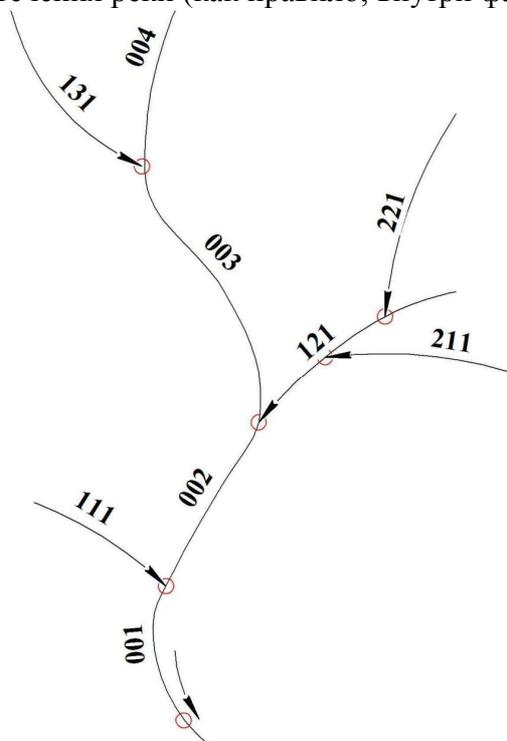


Рис. 3. Пример схемы декомпозиции геометрической сети речной системы с кодами элементарных участков, сформированных в местах впадения притоков в реки

При этом общее время T_i прохождения воды от начала i -ого ЭУ до устья речки будет равно сумме таких параметров для каждого из ЭУ от i -ого до последнего (N -ого):

$$T_i = \sum_{j=i}^N t_j. \quad (12)$$

Предложим математический аппарат расчета ожидаемого экологического риска замыкающего элементарного участка (код 001) в результате поступления загрязнения на ЭУ, расположенный выше по течению, используя предложенное кодирование ЭУ и систему обозначений.

Выведение соотношения для оценки ожидаемого экологического риска замыкающего участка реки

Как было указано выше, ожидаемый экологический риск является экологическим риском, который появляется в результате негативного влияния состояния воды рек (или сбросов), расположенных выше по течению. Учитывая предложенную выше декомпозицию речной системы можно утверждать, что ожидаемый экологический риск следует вычислять итеративно, переходя от реки к реке, от ЭУ к ЭУ. Сначала следует посчитать экориск в замыкающем створе каждой притоки, которая имеет более одного ЭУ или, в свою очередь, имеет свои притоки. Затем посчитать влияние этого запирающего створа на ЭУ, расположенные ниже по течению, и т. д. Например, для схемы на рис. 3 можно предложить такой алгоритм расчета:

ЭУ 221 и ЭУ 211 → ЭУ 121

ЭУ 004 и ЭУ 131 → ЭУ 003

ЭУ 003 и ЭУ 121 → ЭУ 002

ЭУ 002 и ЭУ 111 → ЭУ 001.

Напоминаем, что в общем случае расстояние между местами впадения нескольких притоков можно разбивать еще на несколько ЭУ.

Рассмотрим обобщенный случай расчета, когда речная система имеет N ЭУ. Соответственно на экологический риск в замыкающем N -ом ЭУ на главной реке влияет экологический риск $(N-1)$, расположенных выше ЭУ. Пусть для всех этих ЭУ речной системы рассчитан экологический риск r_i ($i = 1, \dots, N$) по одной из формул или методик, описанных выше, или др. Стоит задача рассчитать ожидаемый экологический риск R в замыкающем ЭУ главной реки с учетом экорисков ЭУ, расположенных выше по течению, и расстояний от начальных створов этих ЭУ до начального створа замыкающего ЭУ.

Математический аппарат строим на таких предположениях и ограничениях:

1. Влияние экологического риска i -ого ЭУ на N -ый ЭУ обратно пропорционально длительности добега воды T_i от i -ого ЭУ до устья (конечного створа N -ого ЭУ), то есть, чем дальше находится ЭУ от замыкающего, тем меньше его влияние, но оно все равно есть;

2. Ожидаемый экологический риск N -ого ЭУ R рассчитывают как средневзвешенное значение экорисков всех ЭУ r_i ($i = 1, \dots, N$), отнесенное к соответствующим значениям времени добега T_i ;

3. Даже в случае, если экориск на всех ЭУ будет равен 1, то R не может превышать 1 (по определению);

4. В случае, если экориск на всех ЭУ будет равен 0, то R тоже будет равным 0.

С учетом этих ограничений и предположений предлагаем следующее выражение для вычисления экологического риска ЭУ разветвленной системы реки с учетом влияния состояния вод на ЭУ, расположенного выше по течению:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha \cdot r_i}{T_i}}{N}, \quad (13)$$

где α – это специальный коэффициент для удовлетворения условия 3, который рассчитывают из соотношения:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha \cdot 1}{T_i}}{N} = 1.$$

Легко показать, что:

$$\alpha = \frac{N \prod_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_j}. \quad (14)$$

Например, в случае $N = 3$:

$$\alpha = \frac{3T_1T_2T_3}{T_2T_3 + T_1T_3 + T_1T_2}. \quad (15)$$

Продемонстрируем корректность и эффективность предложенного математического

аппарата на примере.

Пример автоматизированной обработки результатов выполнения измерений параметров вод

Проведем расчет ожидаемого экологического риска для речной системы, которая имеет $N = 6$ ЭУ с длинами L_i , которые равны соответственно $L_1 = 10$ м, $L_2 = 20$ м, $L_3 = 30$ м, $L_4 = 50$ м, $L_5 = 60$ м, $L_6 = 70$ м. Скорость течения $v_i = 0,5$ м/с.

Рассмотрим несколько вариантов при различных значениях рисков каждого ЭУ.

Для расчета используем среду Mathcad.

В первом варианте проведем расчет для следующих значений: $r_1 = 1$; $r_2 = 0.9$; $r_3 = 0$; $r_4 = 0$; $r_5 = 0.8$; $r_6 = 0.9$.

Аналогично выполним расчеты для других значений r_i , их значение и результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результат расчета ожидаемого экологического риска

№	1	2	3	4	5	6	7	8
r_1	1	0	1	0.5	0.1	0.9	1	0
r_2	0.9	0	1	0.5	0.2	0.8	1	0.2
r_3	0	0	1	0.5	0.3	0.7	0	0.4
r_4	0	0	1	0.5	0.4	0.6	0	0.6
r_5	0.8	0	1	0.5	0.5	0.5	1	0.8
r_6	0.9	0	1	0.5	0.6	0.4	1	1
R	0.731	0	1	0.5	0.234	0.766	0.772	0.269

Следовательно, после получения результатов видно, что все ограничения для R , описанные выше, выполнены.

Также можно сделать вывод, что R имеет гораздо большее значение в случаях, когда r_i больше на начальных участках, чем на конечных, поэтому особенно важно контролировать значение риска на ЭУ в начале речной системы.

Выводы

Предложен новый подход к оценке ожидаемого экологического риска на замыкающей области разветвленной реки, который, в отличие от существующих, учитывает влияние сбросов и качества воды в притоках реки на участках, расположенных выше по течению в бассейне этой реки. Предложенный подход может быть применен не только для речных, но и для других природных систем, которые можно представить в виде информационных моделей с геометрическими сетями. Также возможно применение подхода для экологических сетей или для моделирования экологических рисков от загрязнения атмосферного воздуха, что позволит более точно оценить ожидаемые экологические риски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукинский В. Н. Экологический риск и экологический ущерб качеству поверхностных вод: актуальность, терминология, количественная оценка / В. Н. Жукинский // Вод. ресурсы. – 2003. – Т. 30, № 2. – С. 213 – 321.
2. Ищук А. А. Прогнозно-моделирующие комплексы для Правительственной информационно-аналитической системы по чрезвычайным ситуациям / А. А. Ищук, В. Е. Козлитин [та інші] // ArcReview. Современные геоинформационные технологии. – 2002. – № 2 (21). – С. 14 – 15.
3. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [Электронный ресурс] / Министерства природных ресурсов РФ. (Методика от 30.11. 1992 г.). – Режим доступа: http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_10592_DocumIsPrint_Page_1.html.
4. Алымов В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2005. – 118 с.
5. Мокін В. Б. Математичні моделі та програми для оцінювання якості річкових вод: монографія. / Наукові праці ВНТУ, 2013, № 1

В. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 152 с.

6. Комп'ютеризовані регіональні системи державного моніторингу поверхневих вод: моделі, алгоритми, програми: Монографія / [Мокін В. Б., Боцула М. П., Горячев Г. В. та інш.] ; під ред. В. Б. Мокіна. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, – 2005. – 310 с.

Балачук Вікторія Юрьевна – аспірант кафедри КЕЕМИГ

Мокин Виталий Борисович – заведуючий кафедрой КЕЕМИГ, д. т. н., профессор.

Яцолт Андрей Русланович – доцент кафедри КЕЕМИГ, к. т. н.
Винницкий национальный технический университет.