

МОНИТОРИНГ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С КАТАСТРО- ФИЧЕСКИМИ ПАВОДКАМИ В КАРПАТАХ

И. А. Пилькевич

Доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой*
Контактный тел.: (0412) 415-686, 067-397-87-39

В. И. Котков

Кандидат технических наук, доцент*
Контактный тел.: (0412)-22-94-08

А. В. Маевский

Аспирант*
Контактный тел.: 097-403-14-96

*Кафедра мониторинга окружающей природной среды
Житомирский национальный агроэкологический
университет
бульвар Старый, 7, г. Житомир, Украина, 10008

Проведено історичний аналіз паводків в Українських Карпатах. Розглянуто математичні моделі базових тенденцій формування та розвитку надзвичайних ситуацій гідрологічного характеру

Ключові слова: Українські Карпати, математичне моделювання базових тенденцій паводків

Проведен исторический анализ паводков в Украинских Карпатах. Рассмотрены математические модели базовых тенденций формирования и развития чрезвычайных ситуаций гидрологического характера

Ключевые слова: Украинские Карпаты, математическое моделирование базовых тенденций паводков

Historical analysis of the flood is conducted in the Ukrainian Carpathians. Mathematical models of the underlying trends in the formation and development of emergency hydrological considered

Key words: Ukrainian Carpathians, mathematical modeling of basic trends in flooding

1. Введение

Как известно [1], паводки в Украинских Карпатах формируются атмосферными осадками, которые выпадают 165-175 дней/год. Однако их формирование начинается тогда, когда осадки превышают 20 мм/сутки.

Во время катастрофических паводков затапливается большое количество населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, промышленных предприятий и т.п. Большие скорости паводковой воды имеют огромную силу. Они разрушают строения, мосты, трубопроводы, инженерные коммуникации, а также размывают берега и дороги. В это время тонут домашние животные, дикие звери, смывается собранный урожай и лесоматериалы.

По экспертным оценкам на разрушительные паводки в Украинских Карпатах влияют как естественные, так и техногенные факторы [2]. Поэтому моделирование процессов формирования и прогнозирования па-

водковых ситуаций является актуальной задачей экологического мониторинга чрезвычайных ситуаций.

2. Исторический анализ паводков на реках Украинских Карпат

Гидрометрические наблюдения на реках Украинских Карпат начаты с середины XIX столетия. Сначала проводились эпизодические наблюдения за уровнем воды, а потом – за ее расходом. Систематические наблюдения за уровнями и стоком на основных реках начались с 1895 г., а на большинстве горных рек – с середины 40-х годов XX столетия. Эти материалы наблюдений дают наиболее полное представление о катастрофических паводках.

Катастрофические паводки можно разделить на *региональные* и *локальные*. К региональным относятся те, которые охватывают весь карпатский макросклон или большую его часть, а к локальным – лишь те, кото-

рые охватывают только небольшие отдельные бассейны малых рек [3].

В XX столетии катастрофические региональные паводки на северо-восточном макросклоне Украинских Карпат наблюдались в теплое время года (июнь-август) в 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980 годах [4], а на юго-западном – в холодный период (ноябрь-май) в 1926, 1947, 1957, 1970, 1998, 2001 годах [5]. Локальные катастрофические паводки наблюдаются почти через каждые 2-3 года, иногда ежегодно.

На реках северо-восточного макросклона в XX столетии наблюдалось 7 катастрофических паводков. Первый из них сформировался 8-9 июля 1911 года вследствие сильных ливней. Уровни воды на Пруте ниже впадения Черемши достигали высочайших отметок, которые никогда не были превзойдены за весь период гидрометрических наблюдений. Максимальный расход воды в настоящее время возле Черновцов составляет 5250 м³/сек, а скорость поверхностного течения – 5-6 м/сек (при среднем многолетнем расходе воды 75 м³/сек и скорости течения 1-1,2 м/сек).

Второй высокий паводок в бассейне Днестра и Прута образовался 30-31 августа 1927 г. Тогда величины осадков в центре ливня достигли свыше 300 мм. Ливневые осадки затопили в низинах 10 городов и много сел. Паводком были разрушены дома, мосты, нанесены большие убытки народному хозяйству.

Ливневый дождь 1-2 сентября 1941 г., который охватил весь макросклон, привел к формированию небывалого паводка в бассейне Днестра, Прута и Серета. Максимальные уровни воды в Днестре на 1-3 м превысили максимальные уровни предыдущих лет. Паводок привел к большим разрушениям.

В 1955 году на речках горной части бассейна Днестра и Прута наблюдались два максимальных поднятия уровней воды (30 июля и 10 августа), но они были низшими по уровню от предыдущих (оба паводка были вызваны ливневыми осадками).

Катастрофический паводок 8-12 августа 1969 года, который по высоте поднятия уровней превысил все предыдущие паводки, образовался в результате исключительно сильных ливней, охвативших весь северо-восточный макросклон (площадь паводка составил 22 тыс. км²). Количество осадков за 7-10 июня местами превышало месячную норму. Очень интенсивные осадки наблюдались в верховьях Быстрицы Надворнянской, Быстрицы Солотвинской, Ломницы и Прута, где за один дождь выпало от 200 до 300 мм. Вообще в июне выпало от 200 до 400 мм, что соответствовало свыше трех месячных норм. Во время паводка вода в горах поднималась на 2-4 м, а в предгорье – на 5-6 м. Этот паводок на данных участках по величине максимальных уровней и расхода воды превысил максимумы всех паводков XX столетия и нанес огромные убытки народному хозяйству.

Катастрофический паводок 1980г. в бассейне Днестра был сформирован интенсивными ливнями 22-26 июля, во время которых выпало 200-340 мм осадков (больше двух месячных норм). Ливень интенсивностью свыше 100 мм охватил площадь около 15 тыс. км². Паводок нанес значительный ущерб разным отраслям народного хозяйства, поскольку уровни воды поднялись на 4-5 м.

Юго-западный макросклон отличается от северо-восточного богатыми гидроклиматическими ресурсами. Оптимальное объединение тепловых ресурсов и влаги послужило базой для формирования чрезвычайно богатых водных, рекреационных, минеральных и биологических ресурсов. В результате в регионе создались разнообразные и неповторимые ландшафты и привлекательные виды. На фоне этих естественных богатств особенно мучительными и невыносимыми являются катастрофические паводки, которые в XX столетии наблюдались пять раз и один раз в XXI столетии.

25 октября 1926 года интенсивные ливни охватили весь бассейн р. Тиса и сформировали катастрофический паводок. Особенно значительным он был в бассейне р. Уж.

28-30 декабря 1947 г. интенсивные дожди в верховьях Тисы, Реки, Тересви и Терембли, а также резкое повышение температуры воздуха от -14 до +12⁰С, послужили причиной интенсивного таяния снега, высота которого составляла 40 см (через сутки здесь выпадало 130 мм, а с 28 до 30 декабря выпало 255 мм). В результате в бассейне сформировался катастрофический паводок, вода которого частично затопила город Хуст и поселок Вил, а также много сел, большие площади сельскохозяйственных угодий, много народнохозяйственных и других объектов и т.п.

14 декабря 1957 г. в бассейне рек Терембли, Реки, Латорицы и Ужа выпали интенсивные ливневые дожди с одновременным таянием снега, связанного с резким повышением температуры воздуха до +8-14⁰С. Таяние снегового покрова (запасы воды достигли 37 мм) и ливень, во время которого выпало 100 – 135 мм, на всех реках региона привели к поднятию воды на 0,6-0,9 м (выше высочайшего многолетнего), а скорость течения достигала 3-4 м/сек. Паводок нанес большой ущерб народному хозяйству.

Катастрофический паводок 12-18 мая 1970 г. сформировали интенсивные дожди в верховьях Тисы и на ее притоках. Величина осадков в 2-3 раза превышала месячную норму и составила 150-200 мм. Дожди с перерывами длились почти весь месяц, а наиболее интенсивными были 12-14 мая. Суточная сумма осадков 13 мая в центре ливня (возле города Хуст) составляла 130-135 мм, а на левобережных притоках (Вилечул, Иза, Тур, Само), которые протекают на территории Румынии и Венгрии – 115 мм. Сформировавшийся паводок превысил все предыдущие. Например, в поселке Большой Бычков он превысил высочайший многолетний уровень воды на 189 см. В результате воды паводка затопили много населенных пунктов, промышленных предприятий, сельскохозяйственных угодий, разрушили инженерные коммуникационные сооружения. Большие катастрофические последствия нанес паводок городу Тячеву, который был полностью затоплен.

Особенно катастрофическим был паводок, который превысил все предыдущие по высоте уровней и последствиями разливов. Он сформировался от совокупного действия ливневых дождей и таяния снега. С 3 по 5 ноября почти на всей территории Закарпатской области выпало от 100 до 230 мм осадков. Паводку благоприятствовало предыдущее сильное увлажнение территории на протяжении лета и осени. Лишь в октябре выпало 150-240 мм, что в 1,5-2,0 раза превышает

норму. В результате паводка уровни и расход воды на некоторых реках превысили многолетний максимум. Уровень воды на горных участках поднялся на 2-4 м, а на равнинных – на 4,5-9,0 м. Паводок послужил причиной огромных разрушений и большого ущерба, погибло 18 людей.

Небывалый катастрофический паводок сформировался 3-5 марта 2001 г. на территории Закарпатской области (за эти три дня выпало две нормы месячных осадков). Уровневые воды на некоторых реках превысили на 1,5-2 м уровень паводка 1998 г. Объем осадков, которые сформировали этот паводок, составлял 2 млрд. м³ воды. В результате паводок стал причиной огромных разрушений, погибло 9 людей.

Таким образом, катастрофические паводки в Карпатах являются характерным элементом гидрологического режима. Они повторяются почти через каждые 10-15 лет и затрагивают значительные территории, нанося природе, народному хозяйству и населению огромных убытков.

3. Моделирование базовых тенденций формирования и развития чрезвычайных ситуаций гидрологического характера

Прогноз, относительно повторения паводков в Карпатах, подобный трагедиям, которые произошли осенью 1998 г. и весной 2001 г., к сожалению, крайне неутешительный. Исходя из тенденций дальнейшего потепления (по данным украинских метеорологов, температурный режим на территории страны повысился, и зимняя температура воздуха стала на 3...5°С выше многолетнего показателя. Как следствие изменился и характер осадков), прогнозируя увеличение количества осадков и общее увеличение уровня воды в реках Западной Европы, можно утверждать, что существует постоянная опасность паводковых процессов.

Систематизируя накопленную информацию, можно сделать вывод о том, что для решения проблемы эффективного паводкового контроля следует рассматривать комплексную системную задачу, с помощью которой на основе междисциплинарного подхода объединялись бы достижения многих научных и технологических направлений. *Системно-аналитический подход* дает возможность корректно и адекватно определить и формализовать основные параметры рисков, нормализовать в рамках модельных подходов эмпирические данные, ясно понять базовые тенденции, приводящие к катастрофическим последствиям.

Все изложенное дает возможность утверждать, что решение проблемы прогнозирования и эффективного контроля развития паводков лежит на границе оптимизации методик ландшафтного управления в экологически опасных регионах.

Новейшие тенденции в мировых системно-аналитических исследованиях доказывают, что именно в рамках холистического рассмотрения сложных систем можно достичь определенного успеха в понимании их функционирования и прогнозировании их развития. Только создание и системное применение постоянной стратегии ландшафтного управления может обеспечить своевременную и адекватную реакцию на катастрофические события, позволит разработать систему

предупреждения стихийного бедствия, оптимально редуцировать экономические затраты и экологические потери.

Определение характеристик опасности возникновения паводков основывается на системной модели русла реки, которая содержит водосборный бассейн и русловый сток. Базовые уравнения модели можно представить в общем виде [6].

3.1. Модель руслового стока. Модель имеет вид:

$$\frac{\partial(AV)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S'_{тр} \right) = 0, \tag{2}$$

где t – время; x – расстояние вдоль продольной оси водостока; g – площадь поперечного сечения водотока; V – скорость; h – высота положения водной поверхности относительно заданного уровня; S'_{тр} – угол трения.

3.2. Модель водосборного бассейна. Модель со сменной зоной питания имеет вид:

$$q(t) = \left(A_1(t)k \frac{dH}{dx} \right) + (A_2(t)P(t)) + (A_3P(t)), \tag{3}$$

где q – водный поток из бассейна; A₁(t) – площадь зоны полного насыщения в пределах бассейна; A₂ – площадь горизонтальной проекции зоны полного насыщения в пределах бассейна; A₃ – непроницаемая для воды площадь; P(t) – интенсивность осадков/снеготаяния; k – коэффициент фильтрации в условиях полного насыщения; H – гидравлический напор.

Уравнение фильтрации запишем как

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_2 \frac{\partial h}{\partial t} + W^*, \tag{4}$$

где k_{ij} – коэффициент фильтрации; S₂ – удельная влагоемкость; h – гидравлический напор; W*(x,y,z,t) – поток потерь через единицу объема; x_i – декартова координата; t – время.

Уравнение баланса подземных вод имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial t_1}{\partial t} + A(z) \right), \tag{5}$$

где θ – объемная влажность; t – время; z – глубина; k(θ) – коэффициент фильтрации; A(z) – затраты воды на питание корневой системы.

Такое представление дает возможность корректно поставить задачу прогнозирования опасных природных явлений, в частности паводков и индуцированных ими явлений (например, смещений), как задачу определения характеристик бассейнового водосбора.

Таким образом, с целью эффективного паводкового контроля необходимо анализировать основные природные процессы, которые предопределяют характеристики поверхностного водосбора и в последующем формируют паводковый потенциал территорий.

Рассмотрим подробно два процесса, имеющие базовый характер с точки зрения опасности наводнений: накопление и таяние снега, а также влияние растительного покрова на формирование баланса поверхности водосбора.

4. Роль снежного покрова в формировании бассейнового водосбора

В настоящее время разработаны модельные методы прогнозирования гидрологической ситуации в регионах, имеющих снежный покров. Как известно, снеготаяние можно описать с помощью моделей, имеющих широкий спектр применения. В частности, эти модели можно использовать для:

- оценки стока (вследствие таяния снега) общего объема воды, которая задерживается и накапливается в снежном покрове, объем талой воды и тепла, поступающего в почву, и т.п.;
- оценки состояния почвы;
- расчетов площади распространения снега для использования в метеорологических прогнозах, в частности для оценки региональной составляющей в контексте глобальных климатических изменений;
- оценки количества воды, которая задерживается на поверхности растительного покрова, а также воды, которая тратится на транспирацию, связанную с изменением структуры землепользования, расчетов потерь влаги и т.п.;
- оценки рисков паводков с помощью моделей аккумуляции и таяния снежного покрова;
- планирования инженерных мероприятий и оценки хозяйственных рисков с точки зрения учета сезонной повене- и сдвигобезопасности;
- определения оптимальных долгосрочных управленческих стратегий (особенно в горных регионах, где влияние коротковременных нестационарных процессов является определяющим).

Все это предопределяет необходимость использования адекватного подхода к моделированию энерго-массообменных процессов в снежном покрове, ориентированного на применение эффективных технологий для получения и анализа информации с целью создания и совершенствования региональных стратегий постоянного землепользования, а также систем минимизации рисков природного характера.

4.1. Модель таяния снега. Как правило при описании таяния снега используются так называемые концептуальные модели, т.е. модели, направленные на полное обобщенное описание физических процессов в системе. Во время моделирования используют сосредоточенные параметры, а именно: физические показатели, которые обладают усредненными свойствами снежного покрова, без учета изменения параметров с глубиной z .

Базовыми уравнениями этой модели являются уравнения сосредоточенного баланса массы и энергии от $z=0$ до $z=Z$ [6]:

$$z \frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \bar{Q}_k) + (E_k)_z - (E_k)_0 = z \sum_j \bar{M}_{kj}, \tag{6}$$

$$z \sum_k \rho_k \bar{Q}_k (c_p)_k \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \epsilon_{oc} - \epsilon_0 = z \{ \bar{M}_{ив} L_{ив} + \bar{M}_{вн} L_{вн} + \bar{M}_{ин} \alpha_{ин} \}. \tag{7}$$

Здесь T усреднено в пределах пространства, например, как

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{z} \int_0^z T(z,t) dz. \tag{8}$$

Скорость уменьшения массы льда в покрове равняется скорости таяния

$$M = - \frac{z}{\rho_b} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \bar{Q}_i), \tag{9}$$

для всех других компонент ($k = a, 2, ?$):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \bar{Q}_k) = 0. \tag{10}$$

Будем считать, что снег – низкотемпературный и сухой или „зрелый”, т.е. насыщенный водой и изотермический при $T = 0^\circ C$.

Известно, что при $T = 0^\circ C$ в основе покрова образовывается вода; а если снег сухой, то вся поступающая энергия используется на повышение температуры снега.

Кроме того, следует ввести понятие критического содержания воды в порах снега, с достижением которого начинается сток талой воды.

С достижением критического значения $(Q_b)_{крит}$ содержание воды будет постоянным:

$$\begin{cases} T < 0, Q_b = 0; \\ T = 0, 0 \leq Q_b \leq (Q_b)_{крит}. \end{cases} \tag{11}$$

Тем не менее есть смысл увеличить значение $(Q_b)_{крит}$ на константу порядка 10 (мм водного столба) для учета определенной емкости в основе снежного покрова, где содержимое воды может быть больше, чем $(Q_b)_{крит}$.

Критическое содержание можно определить в единицах $100(Q_b)_{крит} \frac{\rho_b}{\rho_{вл}}$, где его значение в среднем составляет 6-10. Количество энергии для изменения температуры снега от T_0 до $0^\circ C$ определяют как:

$$\int_0^t (\epsilon_0 - \epsilon_{oc}) dt = -z \rho_{вл} (c_p)_i \bar{T}_0. \tag{12}$$

Заметим, что уравнение (12) получено с помощью (7) при условии отсутствия в системе фазовых переходов.

Для зрелого снега из уравнений (6), (7), (9) и (10), получим

$$\epsilon_0 - \epsilon_{oc} = L_{ив} \rho_b M + L_{вн} E, \tag{13}$$

а из уравнений (6) и (9) –

$$(E_b)_t - (E_b)_0 = \rho_b M - E. \tag{14}$$

Или через интенсивность атмосферных осадков и скорость образования талой воды можно записать:

$$I_0 = M + I_b - \frac{E}{\rho_b}. \tag{15}$$

По определенной критической температуре воздуха $(T_{возд})_{крит}$ осадки $I_{ос}$ разделяют на снеговые $I_{сн}$ и дождевые I_b , т.е.

$$\begin{cases} I_b = I_{ос}, I_{ос} = 0, T_{возд} > (T_{возд})_{крит}; \\ I_b = 0, I_{сн} = I_{ос}, T_{возд} \leq (T_{возд})_{крит}. \end{cases} \tag{16}$$

Следует заметить, что $(T_{\text{возд}})_{\text{крит}}$ не всегда равняется 0°C . Это необходимо учесть, так как существует конечная ненулевая скорость перенесения талой воды (дождевых осадков, которые не были израсходованы на испарение) к основе покрова.

Учитывая временное запаздывание $t_{\text{ос}}$ движущейся воды между $z=0$ и $z=Z$:

$$I_0(t+t_{\text{ос}}) = M(t) + I_{\text{в}}(t) - \frac{E(t)}{\rho_{\text{в}}}, \quad (17)$$

или, согласно уравнения для кривой запаздывания:

$$t_{\text{ос}} = (3,49 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}\text{с})z^2 + (3,12 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}\text{с})z + 1,22\text{с}. \quad (18)$$

Определим модельные подходы с годовой аппроксимацией входной информации об энергии, которая поступает на верхнюю границу:

- модели, содержащие температурный коэффициент;
- модели энергетического баланса.

Рассмотрим их отдельно. Прежде всего модельные подходы, основанные на применении температурного коэффициента.

Эти модели учитывают корреляцию между энергией $\epsilon_{\text{ос}}$ и температурой воздуха $T_{\text{возд}}$ (в случае дождя эта корреляция другая).

В этом случае уравнение (13) можно записать в виде:

$$M = c_k (T_{\text{возд}} - T_{\text{станд}}), \quad (19)$$

где $T_{\text{станд}}$ – эталонная температура; c_k – константа, имеющая название „температурный коэффициент“.

Таким образом, задавшись мгновенным значением температуры $T_{\text{возд}}$ с помощью уравнения (19) можно оценить мгновенное значение скорости снеготаяния M .

По дискретным значениям температуры можно рассчитать среднее значение скорости таяния:

$$M = c_k (T - T_{\text{станд}}). \quad (20)$$

Как правило, в уравнении (20) используют среднесуточную температуру. В отдельных случаях это может быть минимум суточной температуры или их весовая суперпозиция.

Температурный коэффициент c_k измеряют в мм водн. ст. / (сутки·К). Средние значения температурного коэффициента и эталонной температуры используют для открытых участков соответственно 4,34 и 0,4 К, а для участков, покрытых лесом, – -2,51 и -0,9 К.

Таким образом, использование эмпирических значений температурного коэффициента и эталонной температуры дает возможность рассчитать скорость снеготаяния.

4.2. Модель таяния снега для бассейнов водосбора. Использование этих моделей позволяет определить разные гидрологические параметры путем решения отдельных уравнений. Поэтому процессы таяния снега и миграцию воды через снеговой покров следует рассматривать отдельно.

Концептуальные модели направлены на расчет реакции, усредненного за площадь участка больших размеров, и основаны на подходах, рассмотренных для

локальных моделей. Поэтому рассмотрим отдельно модели температурного коэффициента и модели энергетического баланса.

В моделях температурного коэффициента используют типовой подход, когда модель снеготаяния в классическом случае описывается уравнением:

$$\bar{M} = c_{24} (\bar{T}_{\text{возд}} - T_{24}), \quad (21)$$

где \bar{M} – средняя скорость таяния снега в пределах всей площади $A_{\text{сн}}$ бассейна, покрытая снегом.

Среднюю температуру за 24-часовой период с 12:00 рассчитывают за средним временем по Гринвичу:

$$\bar{T}_{\text{возд}} = \frac{(T_{\text{возд}})_{\text{max}}^2 - (T_{\text{возд}})_{\text{min1}}^2}{4 \{ (T_{\text{возд}})_{\text{max}} - (T_{\text{возд}})_{\text{min1}} \}} + \frac{(T_{\text{возд}})_{\text{max}}^2 - (T_{\text{возд}})_{\text{min2}}^2}{4 \{ (T_{\text{возд}})_{\text{max}} - (T_{\text{возд}})_{\text{min2}} \}}, \quad (22)$$

где члены, возведенные в квадрат, тождественно равны нулю, если температура меньше нуля градусов.

Максимальную $(T_{\text{возд}})_{\text{max}}$ и минимальные температуры до и после максимума $(T_{\text{возд}})_{\text{min1}}$ и $(T_{\text{возд}})_{\text{min2}}$ определяют по максимальными и минимальными значениями температуры на абсолютной высоте h_0 . Расчеты проводят с использованием уравнения, описывающего снижение снегового покрова в зависимости от высоты:

$$T_{\text{возд}} = T_0 - \Gamma (h - h_0), \quad (23)$$

где Γ – аэротермический градиент, значения которого представлены в [7].

Среднее значение $\Gamma=5,9$ К/км отображает снижение температуры адиабатически насыщенного воздуха (т.е. с увеличением высоты при отсутствии инверсий). Как известно, значение Γ могут изменяться в пределах 6,4...8,4 К/км.

Соответствующую высоту h выбирают с использованием гипсо-метрической кривой так, чтобы площадь бассейна, превышающая h , равнялась площади покрова $A_{\text{сн}}$. Как правило это не всегда соответствует тому, что весь снег находится выше h . Важной особенностью модели являются уравнения, основанные на принципе обратной связи, которые дают возможность получить новые значения площади $A_{\text{сн}}$ на основе скорости таяния:

$$A_{\text{сн}}(t+1) = \left\{ A_{\text{сн}}(t) - \bar{M} \frac{A_{\text{сн}}(0)}{Z(0)} \right\}^{1/2}, \quad (24)$$

где $Z(0)$ – начальная средняя толщина снегового покрова.

Сток талой воды можно аппроксимировать так называемой моделью линейной емкости [7]:

$$V(t) = \xi F(t), \quad (25)$$

где $V(t)$ – объем запасов в системе; ξ – корректирующий коэффициент для емкостных моделей.

Зададимся интенсивностью дождевых осадков $I_{\text{в}}$ на площади бассейна $A_{\text{сн}}$ и запишем

$$V(t+1) - V(t) = \bar{M}(t)A_{\text{сн}}(t) + \bar{I}_{\text{в}}(t)A - F(t). \quad (26)$$

Воспользовавшись (25) и (26), получим уравнение авторегрессии

$$F(t+1) = \frac{(\xi - 1)}{\xi} F(t) + \bar{M}(t) \frac{A_{сн}(t)}{\xi} + \bar{I}_в(t) \frac{A}{\xi} \quad (27)$$

Уравнение (24) можно использовать для моделирования процессов таяния снега в модели (27).

Температурный коэффициент, входящий в модель, может быть и константой, и переменной величиной. Его можно связать с плотностью снега:

$$c_{24} = 11 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{сутки}^{-1} \frac{\rho_{сн}}{\rho_в} \quad (28)$$

С учетом атмосферных осадков:

$$c_{24} = (0,74 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{сутки}^{-1} + 0,07 \text{ К}^{-1} \bar{I}_в) \quad (29)$$

Анализ изложенного показывает, что одной из ключевых проблем применения этого подхода является выбор оптимального метода нахождения средних по площади значений температуры и количества атмосферных осадков. Систематическую погрешность оценки температуры $T_{возд}$ можно компенсировать подбором значений температурного коэффициента. Однако погрешность оценки $I_{ос}$ может привести к систематической погрешности в расчетах речного стока. Для предотвращения этого в некоторых моделях используют коэффициент, связывающий значение среднего увеличения воды, содержащейся в снеговом покрове, со средним расчетным значением атмосферных осадков. Это компенсирует низкую репрезентативность измерений интенсивности атмосферных осадков (как следствие, размеров снегового покрова) и систематическую погрешность расчетов значения $I_{сн}$ по точечным измерениям. Тем не менее возникает потребность использования различных значений этого коэффициента для разных участков исследуемого бассейна. Поэтому, необходима верификация описанного модельного подхода с использованием данных других исследований, которые дают возможность (как показано выше) определять с соответствующей точностью необходимые параметры для адекватного моделирования и успешных прогнозных расчетов.

Известно [5], что на аккумуляцию снегового покрова влияют не только топографические факторы (наклон и тип рельефа), но и характер растительного покрова. В частности обще признано, что в лесу накапливается меньше снега, чем в открытых районах. Поэтому следует отдельно рассмотреть влияние растительного покрова на формирование и развитие чрезвычайных ситуаций гидрологического характера.

5. Влияние растительного покрова на формирование бассейнового водосбора

В связи с повышенным вниманием к климатическим изменениям является актуальным вопрос об оценке последствий изменения в землепользовании, связанных с изменениями климата. Этот вопрос, в свою очередь, тесно связан с проблемой генезиса и развития негативных явлений, вызванных повышением средней температуры (изменением объема и структуры годовых осадков), а также влиянием факторов естественного и антропогенного происхождения (изменениями в растительных экосистемах). Как пра-

вило, среди проблем, рассматриваемых в контексте региональных ландшафтных изменений особое место занимает вопрос изменений в объеме и структуре речного стока, водоотдачи, распределения и накопление влаги в почве.

Рассмотрим параметры и переменные, которые в общем классическом случае должны быть использованы в процессе моделирования (как входные, так и моделируемые параметры) [8].

Переменные, которые используются в моделировании режима эвапотранспирации в естественных системах, можно разделить на следующие группы:

1. Климатические переменные

- коротковолновое излучение;
- температура воздуха (и точка росы);
- скорость ветра;
- интенсивность атмосферных осадков.

2. Свойства растительного покрова

<i>Кроновая растительность</i>	<i>Безкroновая растительность</i>
• количество воды, задерживаемая поверхностью растений;	• суммарная площадь корневой системы на единицу площади почвенного покрова;
• коэффициент эффективного покрытия;	• распределение корневой биомассы с глубиной;
• средняя длина листов;	• сопротивление течения воды корневой системой;
• относительные площади поверхности, в которых происходят скрытые и видимые затраты тепла;	• сопротивление испарению остатками растений на земной поверхности;
• альbedo поверхности растительного покрова;	• сопротивление течению воды стеблями растений.
• сопротивление испарения;	
• теплообмен с почвенным слоем.	

3. Свойства почвенного покрова

- начальная влажность;
- зависимость между влагой и давлением;
- пористость почвы;
- коэффициент фильтрации в условиях полного насыщения;
- приблизительное значение окончательной (недвижимой) влаги.

Заметим, что все климатические переменные имеют суточное усреднение. Значение величин коротковолнового излучения следует уточнять соответственно экспозиции участка и угла наклона. Это, в частности, можно осуществлять с помощью метода эквивалентных склонов.

Опишем переменные, характеризующие кроновую растительность. Будем считать, что изменения всех параметров кроновой растительности зависят от сезонных закономерностей. То есть, в зимний и межсезонный период они описываются постоянными значениями, а в период, когда растения покрываются листвой или теряют ее, – линейными переменными. Эмпирично определено количество влаги, которую может удерживать растение на всей поверхности [8]. Эти данные хорошо согласуются с натурными измерениями количества осадков, проходящих через крону в зимний период, период роста и среднегодовом усреднении. В частности, рассмотренный поход использует значения коэффициента проектного покрытия, которые получены с помощью точечных натурных измере-

ний. Это приводит к некоторым сложностям в пересчете к площади участка. Однако этого можно избежать, если использовать данные спутниковых наблюдений, которые оптимизируют подход и значительно увеличивают адекватность результатов [6].

Свойства безкрановой растительности можно оценить с помощью ограниченного объема эмпирических данных и результатов предыдущих (априорных) исследований. Сопротивление движению водяного пара остатками растений, оставшихся на поверхности почвы, можно определить воспользовавшись измерениями скорости испарения с растительной подстилки [6].

Практика моделирования лесовых массивов [9] показала, что на моделях, в которых для расчета сопротивления движению почвенной влаги растительным покровом используется коэффициент фильтрации почвы в условиях неполного насыщения, можно получить адекватные водно балансовые оценки транспирации и влажности почвы. То есть влажность почвы играет большую роль при определении критических затрат и транспирацию.

Таким образом, описанный в работе комплекс данных дает возможность получать сбалансированные оценки параметров испарения влаги и моделировать процесс эвапотранспирации в естественных системах. Поэтому разработанные в работе модели дают возможность изучать региональные особенности режима эвапотранспирации с точки зрения решения задачи определения характеристик бассейнового водосбора и паводкового потенциала территории.

Выводы и практические рекомендации

1. По мере интенсификации освоения территории и ее урбанизации с каждым следующим катастрофическим паводком ущербы от разрушения увеличиваются. В связи с этим возрастает и актуальность предотвращения этих разрушений. Такое предотвращение традиционно осуществляется с помощью строительства водоохраных дамб, водоотводов и т.п. При определенных условиях они приносят соответствующий эффект, однако полностью не решают проблемы. Поэтому возникает необходимость в поисках более радикальных мероприятий. Одним из них мог бы быть перераспределение паводковых вод между реками, а именно транспортирование части этих вод на правобережье Днестра. Основанием такого перераспределения является то, что катастрофические паводки в бассейне Тисы формируются в холодную пору года, а на Днестре, в настоящее время, глубокая граница, во время которой обостряется дефицит воды, особенно в его нижней части. Однако, такое мероприятие нуждается в глубоком и всестороннем изучении и технико-экологическом обосновании.

2. В комплексе работ, направленных на решение проблем, связанных с природными катастрофами, большое значение имеют дистанционные исследования естественных систем. Высокая оперативность получения результатов, наличие большого количества независимых источников данных, т.е. с помощью съемочной аппаратуры разной разрешающей способности в разных диапазонах спектра, высокая степень интеграции информации, которая характеризует уровень

спутниковых технологий, определяют значительную роль дистанционных методов в решении прикладных задач контроля состояния и управления естественными системами.

3. Модели энергетического баланса позволяют с большей точностью прогнозировать чрезвычайные ситуации гидрологического характера по сравнению с моделями, использующими температурный коэффициент. Однако они требуют наличия большого объема точно измеренных метеорологических данных. Кроме того, использование таких моделей усложняет переход к расчетам водосборных бассейнов.

4. Несбалансированный обмен энергией между почвой и растительным покровом является одной из причин нарушения водного баланса в Украинских Карпатах.

5. Описанный комплекс данных позволяет получить сбалансированные оценки параметров испарения влаги с целью моделирования процесса накопления воды в природных системах.

Следует отметить, что при подготовке данного материала были использованы результаты исследований специалистов Научного центра космических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, направленные на разработку новых методов решения природо-ресурсных задач с помощью многоспектральной космической информации.

Литература

1. Машенко Е.П. Попросим у Запада еще и климат? / Е.П.Машенко // Зеркало недели, 7 апреля 2001. – №14 (338). – С. 12.
2. Стойко М.С. Причини катастрофічних паводків у Закарпатті та система екологічних профілактичних заходів їх попередження / М.С.Стойко // Український ботанічний журнал. – 2000. – Т. 57. – С. 11-13.
3. Науково-експертний висновок про природні й техногенні причини походження паводків у листопаді 1998 та березні 2001 років у Закарпатській області // Комісія Національної Академії України. – К.: РВПС України НАН України, 2001. – 21 с.
4. Тепловой и водный режим Украинских Карпат / [под ред. Л.И.Сакали]. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 456 с.
5. Дячук В.А. Паводки в Закарпатті та причини їх виникнення / В.А.Дячук, М.М.Сусідко // Укр. географ. журн. – 1999. – №1. – С. 15-18.
6. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / [за ред. В.І.Лялька, М.О.Попова]. – К.: Наукова думка, 2006. – 357 с.
7. Моррис Э.М. Снег и лед // Гидрологическое прогнозирование / [под ред. М.Г.Андерсон и Т.И.Берт]. – М.: Мир, 1988. – С. 193-228.
8. Huff D.D., Luxmoore R.J., Mankin J.B., Begovich C.L. TEHM: A Terrestrial Ecosystem Hydrology Model // EDFB/IBP-76/8, ORNL/NSF/EATC-27 (research project). – Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, Tennessee, 1977.
9. Federer C.A. Transpirational supply and demand: plant, soil and atmospheric effects evaluated by simulation // Water Resources Res. – 1982. – 18, N 2. – P. 355-362.