

В. И. Лялько, А. С. Викторов, А. И. Сахацкий, Ю. В. Костюченко

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ГИДРОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ПОЛЕССКОГО РЕГИОНА УКРАИНЫ)

Представлені нові комплексні методологічні підходи до використання багатоспектральних супутникових зйомок і цифрових моделей рельєфу для класифікації земних покривів в зоні ризику несприятливих гідролого-гідрогіологічних умов на прикладі Поліського регіону України. Запропонована модель, що описує вплив підтоплення і заболочення на морфологічну структуру ландшафту, насамперед її кількісні характеристики. Розв'язана задача оцінки ризику для процесу заболочування для точкових об'єктів. Зроблені висновки дозволяють запропонувати шлях оцінки ризику для процесу заболочування на основі повторних супутникових зйомок.

The paper presents the new methodological approaches to use multispectral satellite data for the classification of ground cover at regions with risk of unfavorable hydrological and hydrogeological conditions. The Polesie region of Ukraine is an example. The model for describing the effects of flooding and waterlogging on the morphological structure of the landscape, especially its quantitative characteristics is proposed. The solution of the risk assessment process to waterlogging for point objects is presented. The conclusions suggest the way of risk assessment process on the basis of satellite monitoring data.

В Полесском регионе Украины широко развиты заболоченные территории и торфяники различных типов. Заболоченные территории, торфяные болота и связанные с ними торфяники во всем мире признаны одним из наиболее значительных и в то же время самым уязвимым типом природных биотопов. На протяжении многих десятков лет воздействие человека на болотные экосистемы имело деструктивный характер и росло вместе с развитием общества. Развернутая во многих странах широкая кампания по реабилитации мелиорированных болот еще требует своего осмысления и анализа. Важной стратегической задачей становится разработка концепции использования ресурсов болот как альтернативы традиционным и самым радикальным сценариям их хозяйственного освоения.

Одним из главных направлений решения проблемы деградации торфяников с целью достижения устойчивого управления земельными ресурсами и сохранения биоразнообразия является использование исчерпанных торфяных месторождений и осушенных земель для экологической реабилитации, которая обеспечивает восстановление болот и торфообразующих про-

цессов и повышает производительность болотных экосистем. Главное реабилитационное средство в этом отношении – повторное заболачивание и ренатурализация трансформированных экосистем болот [11, 15]. Вместе с тем необходимо признать, что успешное решение вопросов охраны и рационального использования болот невозможно как без решения фундаментальных проблем сугубо геоботаники и гидродинамики болот, так и без привлечения современных спутниковых средств мониторинга окружающей среды. Это позволит контролировать динамику опасных гидролого-гидрогеологических процессов (подтоплений и заболачивания территорий) при ренатурализации торфяных болотных экосистем.

Территория исследований охватывала ряд торфяников в пределах Волынской и Ровенской областей в бассейне р. Припять. По схеме физико-географического районирования этот район относится к области Волынского Полесья Полесской провинции Зоны смешанных лесов юго-запада Восточно-Европейской равнины. Общее описание физико-географических условий данного региона представлено во многих работах [6–7, 9–10, 14–15 и др.]. По климатическим условиям бассейн р. Припять относится к зоне избыточного увлажнения. Климат данной территории в целом умеренно континен-

тальный, холодный и влажный. Климатические условия и гидрографические особенности в этой зоне достаточно благоприятны для накопления подземных вод. Данный район полностью находится в пределах ледниковых отложений. Местность имеет характер моренно-зандровой равнины с флювиогляциальным покровом. Заторфованность изучаемой территории составляет около 10%. Район характеризуется распространением пойменных долин, междюнных и межрядовых впадин с торфяниками всех типов.

В результате проведенных нами работ собрана разноплановая информация, включающая космические снимки, топографические карты, а также данные климатических, агрономических, лесотаксационных, гидрологических, гидрогеологических и других исследований в данном районе.

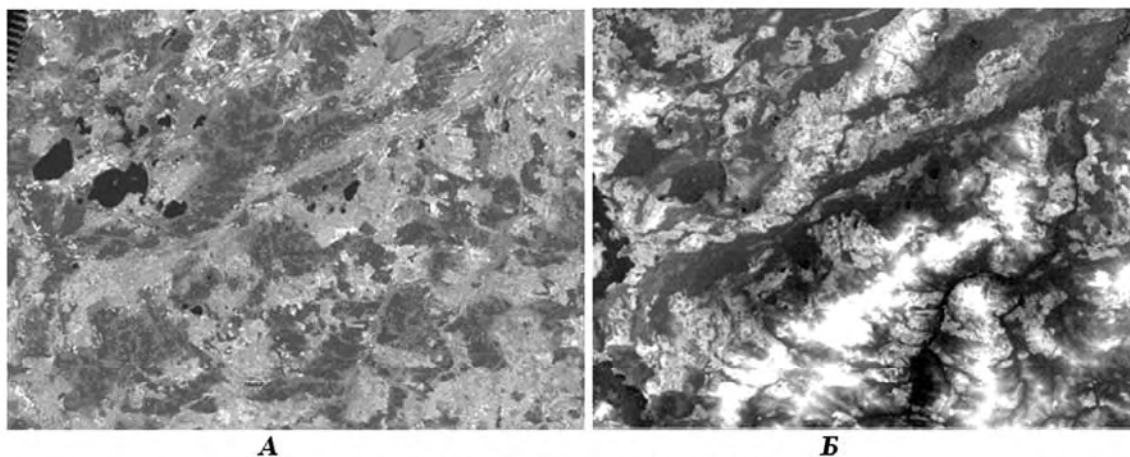
Для классификации снимков, которая проводилась по методике, описанной в работах [1, 2, 8, 12], использовались также данные маршрутных наблюдений и измерений по нескольким десяткам тестовых участков в районе исследований.

При проведении работ наиболее удачной оказалась классификация по космическому

снимку Landsat-7/ETM+ (17 июля 2007 г.). Исходное синтезированное изображение фрагмента изучаемой территории на основе этого снимка (синтез 2, 3 и 4 каналов снимка) показано на рис. 1, А.

Кроме каналов снимка Landsat-7 при классификации использовались искусственные слои информации, созданные на основе цифровой модели рельефа (DEM), полученной по данным миссии космического корабля "Шаттл" 2000 года (SRTM-3) с разрешением 90 м. Известно, что цифровые модели рельефа и математические методы изучения морфологии ландшафта эффективны при проведении геоэкологических исследований [4, 5]. Кроме того, для создания искусственных слоев информации привлекались индексы – NDVI (нормированный вегетационный индекс) и NWI (нормированный водный индекс) [12, 20, 26].

При сравнении DEM, полученной по результатам миссии космического корабля "Шаттл", с данными абсолютных отметок топографической карты масштаба 1:100 000, в отдельных точках оказалось, что в большинстве случаев значения DEM близки к отметкам топографической карты. Погрешность,



Условные обозначения для рис. 1, Б:  
Значения локальной составляющей высотного поля рельефа, м:



Рис. 1. Изображение фрагмента территории района Шацких озер и верховья р. Припять (Полесский регион, северо-запад Волынской области Украины)

А. Синтезированное изображение фрагмента изучаемой территории на основе снимка Landsat-7/ETM+ (17 июля 2007 г., синтез 2, 3 и 4 каналов снимка).

Б. Изображение локальной составляющей высотного поля рельефа, рассчитанной на основе обработки цифровой модели рельефа (DEM) (по данным миссии космического корабля "Шаттл"). Более светлый тон отвечает большим значениям локальной составляющей высотного поля рельефа (см. услов. обозн.)

как правило, не превышает нескольких метров (1–2 м). Иногда абсолютные отметки DEM в пониженных частях рельефа в районе Шацких озер и сами уровни озер на DEM меньше на 3–5 м по сравнению с данными топографической карты. В то же время в пределах лесных территорий на участках, где кроны деревьев, как правило, сомкнуты, наблюдается превышение значений DEM на 4–5 м по сравнению с абсолютными значениями топографической карты. Однако общие особенности и тенденции изменения рельефа (локальные поднятия, овраги, долины рек и т. п.) по данным DEM полностью соответствуют топографической карте.

В качестве искусственного слоя использовались не сами значения DEM, а морфометрический показатель – локальная составляющая высотного поля рельефа, которая была получена следующим способом. Было проведено осреднение значений DEM скользящим окном размером 25x25 км в каждом пикселе с пространственным разрешением 90 м. Размер окна был подобран экспериментально. Затем вычислялась локальная составляющая, которая представляла собой разницу между значением DEM в пикселе и осредненным значением в скользящем окне. Полученное распределение локальной составляющей было приведено к пространственному разрешению снимка Landsat-7/ETM+ (разрешение 30 м) (рис. 1, Б).

Следует отметить, что при использовании радиолокационного зондирования небольшие локальные участки с большими перепадами высот, переувлажненные территории, участки, занятые растительностью с высоким коэффициентом проективного покрытия, дают значительную, до нескольких метров погрешность при определении абсолютных высот рельефа по данным дистанционного зондирования Земли. То есть, требуется введение поправок за счет использования картографических данных и прецизионных точечных наземных измерений. Коэффициенты, определяющие разницу, возникающую при пересчете данных другого масштаба (например, топографических), могут быть определены так [28]:

$$F_i = \frac{\tan \beta_i}{\sum_j \tan \beta_j} \quad (1)$$

где  $i, j$  – масштабы, соответствующие решающей способности данных, а угол поверхности  $\beta$  определяется, согласно [22],

как  $\beta = d / L_d$ , где  $d$  – измеренная разница высот рельефа, а  $L_d$  – расстояние между точками измерения на поверхности.

Введение коэффициента  $F_i$  позволяет сопоставить данные различного масштаба и минимизировать возникающие погрешности определения высот рельефа.

Индексы NDVI и NWI, в соответствии с данными работ [12, 20, 26], вычислялись по спектральным яркостям каналов снимка Landsat в форме, предложенной в публикации [12]:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}(4) - \text{RED}(3)) / (\text{NIR}(4) + \text{RED}(3)); \quad (2)$$

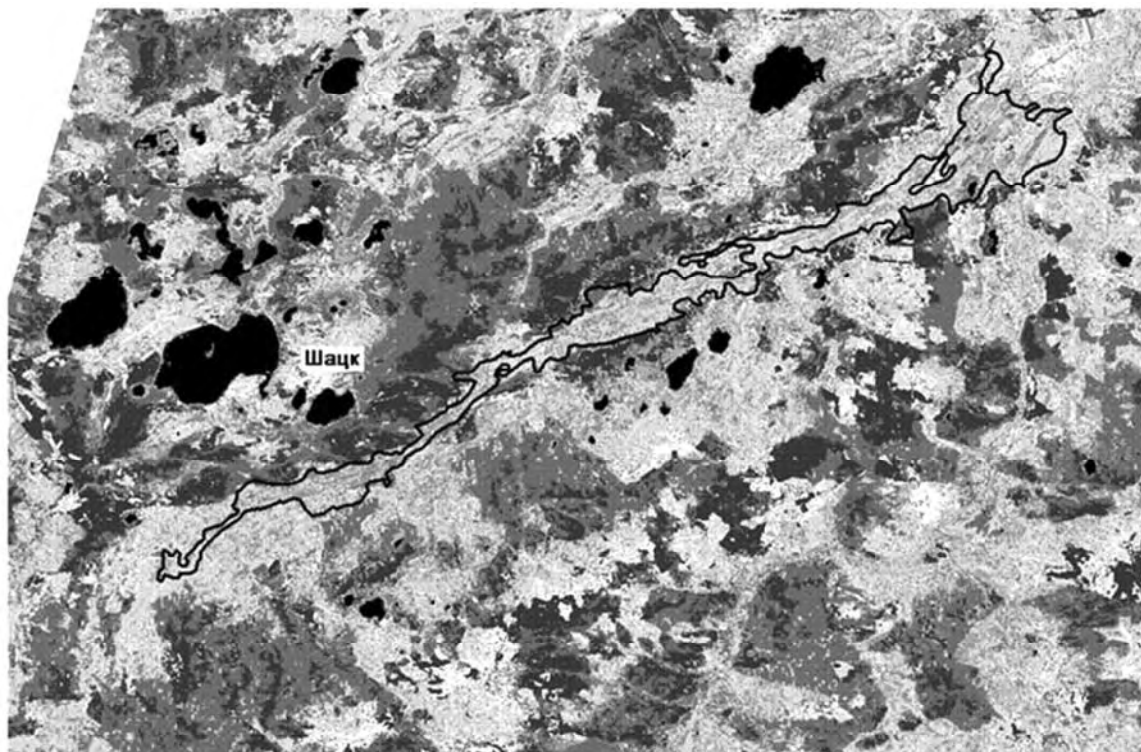
$$\text{NWI} = (\text{GREEN}(2) - \text{SWIR}(5)) / (\text{GREEN}(2) + \text{SWIR}(5)), \quad (3)$$

где GREEN (2), RED (3), NIR(4), SWIR (5) – каналы снимка Landsat-7, соответственно зеленый, красный, ближний инфракрасный и средний инфракрасный. Цифры в скобках отвечают номеру канала снимка.

Искусственные слои информации позволили провести классификацию более качественно. В частности, это позволило учесть расположение торфяников преимущественно в пониженных частях рельефа, а также особенности вегетационных индексов различных растительных сообществ и приуроченность последних к участкам с большей или меньшей влажностью.

Так, предварительный анализ карты локальной составляющей высотного поля рельефа показал, что заболоченные территории, торфяники и пойменные участки водотоков, которые периодически могут подвергаться затоплению, как правило, приурочены к значениям локальной составляющей высотного поля рельефа (–4...–7 м, а иногда и менее). Хвойные леса преимущественно расположены на участках, где значения этого показателя не менее +5 м и т. п.

Проведенная классификация многослойного искусственного изображения оказалась достаточно успешной, что подтвердили данные наземных заверочных работ. Для территории исследований результаты классификации показаны на рис. 2.



Контур наибольшего развития торфяных залежей показан черным цветом








- |                                                                                     |                                                                                  |                                                                                   |                                           |                                                                                   |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|    | хвойный лес                                                                      |  | смешанный и широколиственный лес          |  | болотная растительность |
|    | торфяники                                                                        |  | агрофитоценозы, луга, кустарники, пустоши |  | водная поверхность      |
|  | населенные пункты, техногенные объекты, иногда разреженная растительность, пески |                                                                                   |                                           |                                                                                   |                         |

Рис. 2. Результаты классификации многоспектрального спутникового снимка Landsat ETM+ (17.07.2007) для построения карты-схемы растительного покрова района исследований

По результатам классификации проведена оценка площади распространения выделенных классов растительного покрова на всей исследуемой территории и в пределах контура наибольшего развития торфяных залежей (см. таблицу).

Классификация земной поверхности района исследований на основе космического снимка Landsat по видам растительных группировок позволяет получить параметры оценки отдельных компонент водного баланса территории.

В частности, динамика процессов подтопления и заболачивания может быть описана изменением влагосодержания в зоне накопления влаги  $s_1$  и зоне разгрузки  $s_2$  так [19, 25]:

$$nz_r \frac{ds_i}{dt} = P - E_p - R_i \pm Q_i, \quad (4)$$

где  $i$  – индексы, соответствующие зонам накопления и разгрузки влаги,  $i = 1, 2$ ;  $E_p$  – потенциальная эвапотранспирация;  $Q_i$  – поток подземных вод;  $R_i$  – поверхностный сток;  $P$  – общий приток влаги (осадки);  $n$  – пористость;  $z_r$  – толщина активного корневого слоя;  $t$  – время.

Исходя из анализа растительных сообществ, можно сделать ряд важных предположений о динамике влаги, связанной с испарением через растительный покров, оценивая параметры потенциальной эвапотранспирации через комбинированное уравнение Монтейта [19]:

$$E_p = \left\{ \frac{[f(A) + 1][R_n - G]\Delta}{[\sigma f(A) + 1]C_p \rho} + [f(A) + 1] \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \times \frac{\rho_2^* - \rho_2}{r_a} \right\} \times \left\{ \frac{r_a + r_x}{r_a} + \frac{[f(A) + 1]L_v \Delta}{[\sigma f(A) + 1]C_p \rho} \right\}^{-1}$$

Здесь  $\Delta$  производная давления пара в условиях полного насыщения по температуре за сутки;  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_v$  – “скрытая” теплота испарения;  $\sigma$  – отношение площади конвекции к площади эвапотранспирации;  $r_a$  – сопротивление движению пара со стороны атмосферы;  $R_n$  – количество солнечного тепла в единицу времени;  $G$  – количество энергии, уходящей в почву в единицу времени;  $r_x$  – сопротивление движению пара со стороны растительного покрова;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\rho_2^*$  – плотность пара;  $\rho_2$  – фактическая плотность пара в атмосфере над растительным покровом;  $f(A)$  – эффективная площадь растительного покрова на единицу исследуемой площади.

Таким образом, выполненная классификация позволяет рассчитать важные для оценки параметров водного баланса территорий индикаторы, такие как эффективную площадь различных видов растительного покрова, площади конвекции, отношение площадей, занятых различными видами растительности, плотность растительного покрова на единицу площади поверхности (поверхность эвапотранспирации) и др.

Сравнение данных многолетних наблюдений, заверенных систематическими полигонными измерениями, позволит сделать вывод о тенденциях изменений параметров, важных с точки зрения оценки динамики региональных гидрологических и гидрогеологических рисков.

В пределах данного района значительные площади покрывают хвойные (более 15%) и лиственные леса (более 15%). Около 10% занимают смешанные леса. Таким образом, лесная растительность здесь в целом охватывает более 45% площади. Значительные площади занимают луга (около 20%), а также (в пределах 8–12% по каждому классу) растительность торфяников, болотная растительность и посевы сельхозкультур (см. таблицу).

Внутри контура наибольшего развития торфяных залежей (рис. 2) это соотношение совсем другое (см. таблицу). Наибольшую площадь занимают луга (более 30%), на втором месте по площади находится растительность на торфяниках (более 20%), значительные площади также охватывают агроценозы, кустарники и пустоши, а также болотная растительность.

**Оценка суммарной площади распространения выделенных классов растительного покрова на основе классифицированного космического снимка Landsat-7 ETM (17.07.2007) района исследований (рис. 2)**

№ п/п	Класс земного покрова	Площадь класса в пределах классифицированного снимка (км <sup>2</sup> )	Площадь класса в пределах классифицированного снимка (в %)	Площадь класса в пределах контура торфяных залежей (км <sup>2</sup> )	Площадь класса в пределах контура торфяных залежей (в %)
1	Хвойный лес	511,5744	15,6	2,0232	1,77
2	Смешанный лес	299,8467	9,12	1,1106	0,97
3	Широколиственный лес	521,5032	15,9	5,4711	4,78
4	Луга	584,46	17,8	34,9011	30,5
5	Болотная растительность	246,2544	7,49	13,7502	12
6	Торфяники	269,9244	8,21	24,2487	21,2
7	Кустарники, пустоши	62,694	1,91	9,8982	8,65
8	Залежные земли	75,4335	2,29	0,8721	0,76
9	Агроценозы	400,0734	12,2	18,8397	16,5
10	Разряженная растительность	97,209	2,96	1,8306	1,6
11	Населенные пункты (иногда разряженная растительность)	60,1929	1,83	0,5706	0,5
12	Водная поверхность	119,5623	3,64	0,3204	0,28
13	Другие классы	39,4623	1,2	0,6318	0,55

Проведенная нами классификация многоспектрального космического снимка Landsat-7/ETM+ (07.07.2007 г.) позволила выполнить картографирование современного состояния растительного покрова и ряда участков заболоченных территорий и осушенных торфяников. Выполненные работы могут служить основой для оценки возможностей ренатурализации территорий, находящихся в зоне риска развития неблагоприятных гидролого-гидрогеологических процессов.

Значительная (более 51%) площадь торфяников и лугов (в том числе заливных) означает, что риск развития процессов подтоплений в случае значительных колебаний уровней осадков и соответствующих изменений руслового стока будет неизбежно повышаться. При этом, принимая во внимание долгосрочную тенденцию роста средней температуры, можно предположить, что изменение структуры растительных сообществ не приведет к значительному возрастанию рисков естественного заболочивания и увеличению площадей существующих болот на фоне средних прогнозируемых колебаний осадков, поверхностного и руслового стоков в регионе.

Результаты проблемно-ориентированной классификации спутниковых изображений могут быть использованы для адаптации моделей процессов подтопления и заболочивания на основе методов математической морфологии ландшафта и повышения эффективности оценки соответствующих рисков.

На рассматриваемой территории, однородной в физико-географическом отношении, на которой развивается процесс заболочивания, дистанционными методами были изучены рельеф и почвенно-растительный покров, которые определяются местными геолого-геоморфологическими и зонально-климатическими особенностями. На исследуемой территории процесс заболочивания происходит в несколько стадий: на *первой стадии* процесс приводит к асинхронному появлению в понижениях болот (исходных "очагов"), которые растут независимо друг от друга; на *второй стадии* появление новых болот практически прекращается, так как процессом охвачены практически все понижения, а происходит

расширение и слияние болот, но болота сохраняют достаточно компактные очертания и вероятность слияния не связана с характеристиками болот.

В основу модели на первой стадии могут быть положены следующие предположения:

1. Образование исходных очагов болот происходит независимо, и вероятность их появления на пробной площадке прямо пропорциональна площади площадки и рассматриваемому интервалу времени.

2. Рост болота представляет собой случайный процесс, протекает без слияний, независимо от других болот и независимо на непересекающихся интервалах времени; при этом средний диаметр линейно зависит от уровня грунтовых вод.

Первое предположение приводит, как неоднократно показано (например, [4]), к пуассоновскому распределению болот и линейному росту плотности расположения очагов:

$$\chi(t) = \lambda t. \quad (6)$$

Второе предположение должно описывать рост болота с большей детализацией. Формулировка конкретной гипотезы в этом случае является более трудной задачей [21]. Но даже в рамках неких предварительных предположений нетрудно показать, что при равномерном росте уровня средний диаметр болота увеличивается линейно во времени, а средняя площадь болота соответственно растет, подчиняясь квадратичной зависимости:

$$s(t) = d^2 t^2 + \sigma^2 t, \quad (7)$$

где  $d$ ,  $\sigma$  – эмпирические коэффициенты, которые определяются геоморфологическими и гидрогеологическими условиями участка.

В основу модели на второй стадии процесса может быть положено следующее предположение. Развитие болот происходит вследствие их слияния; слияния происходят независимо друг от друга, причем вероятность слияния ( $p_c$ ) не зависит от характеристик болота, а только от длительности рассматриваемого интервала времени  $\Delta t$ :

$$p_c = \lambda \Delta t + \alpha(\Delta t), \quad (8)$$

где  $\lambda$  – эмпирический параметр.

Одной из важных характеристик болот является число отрезков положительной (отрицательной) кривизны, представляю-

щее собой число "отростков" контура болота; этот параметр может быть назван *индексом границы*. Его важность связана с тем, что соединение болот идет путем слияния именно "отростков" в седловых точках рельефа поверхности. Как нетрудно видеть, при слиянии пары болот для индексов их границ справедлива формула:

$$v = v_1 + v_2 - 2, \quad (9)$$

где  $v_1, v_2, v$  – соответственно индексы границы первого, второго и результирующего болота.

С индексом границы (количеством лопастей), очевидно, тесно коррелирует и площадь, занимаемая болотом.

В случаях, близких к описываемому, предельными теоремами о слабозависимых случайных величинах [18] доказана общая сходимость предельного процесса к квази-марковскому процессу, удовлетворяющему системе соответствующих дифференциальных уравнений [16] на ограниченных областях с гладкими границами для случайных полей с произвольными гильбертовыми нормами [3]. Этот факт позволяет нам более точно сформулировать статистическую гипотезу о распределении заболоченных участков и, таким образом, сделать предположение о росте плотности расположения очагов заболачивания.

Анализ, базирующийся на предположении модели, позволяет получить распределение индекса границы на рассматриваемой (второй) стадии болотообразования. Решение этой задачи может быть получено в рамках задачи анализа флуктуаций в динамических системах под действием случайных возмущений, где случайный процесс однозначно определяется на всем интервале возможных распределений [13] способом, описанным выше. Согласно полученному решению этой задачи [4, 5] можно получить уравнение для производящей функции распределения индекса границы:

$$\frac{d\varphi(z, u)}{du} = \lambda \left[ \frac{\varphi^2(z, u)}{z^2} - \varphi(z, u) \right]. \quad (10)$$

Используя его и то, что

$$\bar{v}(u) = \left. \frac{\partial \varphi(z, u)}{\partial z} \right|_{z=1}, \quad (11)$$

где  $\bar{v}(u)$  – средний индекс границы в момент времени  $u$ , после преобразования получаем:

$$\bar{v}(u) = [\bar{v}(0) - 2] e^{\lambda u} + 2, \quad (12)$$

где  $\bar{v}(0)$  – значение среднего индекса границы в начальный момент времени.

Для дальнейшего анализа удобно предположить, что комплекс воздействий, определяющих развитие процессов заболачивания, может быть представлен как функционал действия для решения асимптотических задач в функциональном пространстве [3]. Выбор такой формализации позволяет нам существенно ограничить набор применимых аппроксимаций для представления вида функций, описывающих рост болот, а также искомым функций риска [3]. Так, в частности, для описываемых гауссовских и квази-марковских процессов достаточно очевидно, что искомые функции будут иметь экспоненциальную форму [27]. Принимая во внимание приведенные соображения, а также учитывая весьма вероятную корреляцию площади болота и индекса границы, можно заключить, что на второй стадии болотообразования рост средней площади болота имеет экспоненциальный характер:

$$s(t) = ae^{\tau t} + b, \quad (13)$$

где  $\tau, a, b$  – эмпирические коэффициенты.

В рамках проведенного исследования была оценена вероятность поражения точечного сооружения процессом болотообразования. Анализ предположений модели привел к выводу, что на обеих стадиях процесс отвечает модели неопределенно-диффузных процессов со следующими базовыми предположениями:

1. Возникновение очага за любой отрезок времени на выбранной свободной площадке является случайным событием, независимым от других очагов, и его вероятность пропорциональна длине отрезка времени  $\Delta t$  и величине площадки  $\Delta s$ ; при этом вероятность возникновения более одного понижения является бесконечно малой величиной по сравнению с вероятностью возникновения одного понижения:

$$p_1 = \lambda \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t), \quad (14)$$

где  $\lambda$  – параметр.

2. Изменение возникшего очага, имеющего произвольные очертания, описывается случайным процессом; при этом развитие разных очагов происходит независимо друг от друга.

Таким образом, исследуемая территория представляется нам как некоторый поток развивающихся очагов процесса болотообразования. Каждый очаг появляется в случайный момент времени независимо друг от друга, расширяется под действием, в том числе, случайных факторов.

Для решения ограничим рассматриваемую область кругом с радиусом  $R$  с центром, совпадающим с положением интересующего нас объекта. Вероятность, что очаг, возникнув на некотором расстоянии  $x$  от точечного объекта, поразит его, очевидно, равна:

$$\alpha(t, R) = \int_0^t \int_0^R \mu(x, t) \frac{2x}{R^2} dx \frac{du}{t}, \quad (15)$$

где  $\mu(x, t)$  – функция поражения.

Исходя из сформулированных выше предположений о характере случайных процессов и используя правило Байеса [17], можно оценить, что вероятность того, что ни один из появившихся в области контуров болот (количеством  $k$ ) не заденет точечный объект, равна:

$$P_{R,k}(l) = [1 - \alpha(t, R)]^k \frac{[\gamma(t)\pi R^2]^k}{k!} e^{-\gamma(t)R^2}, \quad (16)$$

где  $\gamma(t)$  – среднее число болот, приходящихся на единицу площади.

Суммируя ряд по  $k$  и преобразуя, получаем вероятность того, что точечный объект не будет задет контуром болот, возникшим в рассматриваемой области с радиусом  $R$ :

$$P_R(l) = e^{-\alpha(t,R)\pi\gamma(t)R^2}. \quad (17)$$

Искомую вероятность непоражения находим, перейдя к пределу при  $R \rightarrow +\infty$ , поэтому вопрос сводится к рассмотрению интеграла:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \pi\alpha(t, R)R^2 = \int_0^t \int_0^{+\infty} 2\pi x \mu(x, u) dx \frac{du}{t}. \quad (18)$$

Рассмотрим внутренний интеграл. Анализ показывает, что  $\mu(x, u)$  не что иное, как доля площади, занимаемой очагом в пределах тонкого кольца радиусом  $x$  с центром,

совпадающим с центром очага, а  $2\pi x dx$  – площадь такого кольца. Таким образом, подынтегральное выражение представляет собой величину площади кольца радиусом  $x$ , принадлежащей очагу, а сам внутренний интеграл – всю среднюю площадь очага через время  $u$  после его возникновения. Соответственно, в целом, интеграл представляет собой среднюю площадь очага через время  $t$  после начала процесса на рассматриваемой территории, при этом учитывается разное время генерации различных очагов.

Таким образом, искомая вероятность непоражения точечного объекта равна:

$$P(t) = e^{-\gamma(t)s(t)}, \quad (19)$$

И соответственно *вероятность поражения* (пораженность) будет:

$$P_d(t) = 1 - e^{-\gamma(t)s(t)}, \quad (20)$$

где  $\gamma(t)$  – среднее число понижений, приходящихся на единицу площади в момент времени  $t$ , рассчитываемое с использованием данных ДЗЗ в соответствии с формулой (1);  $s(t)$  – средняя площадь болота.

Полученное выражение полностью соответствует частным случаям уравнений для расчетов индивидуальных рисков, связанных с развитием негативных явлений, описываемых гауссовскими и пуассоновскими случайными процессами [29, 30], что подтверждает адекватность предложенной модели. Таким образом, могут быть получены количественные зависимости для функции риска поражения точечного объекта на разных стадиях процесса заболачивания:

$$P_{dl}(t) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi\lambda}{4}(d^2 t + \sigma^2)t^2\right] \text{ (стадия 1)}, \quad (21)$$

$$P_{dl}(t) = 1 - \exp[-\gamma(ae^{\tau t} + b)] \text{ (стадия 2)}, \quad (22)$$

где  $\tau$ ,  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты;  $\gamma$  – средняя плотность расположения очагов заболачивания (стабилизирована на стадии 2).

При этом на второй стадии мы пренебрегаем уменьшением количества очагов вследствие слияния. Оценки всех необходимых коэффициентов, входящих в эти выражения, нетрудно получить на основе повторных аэро- или космических съемок.



Таким образом, в рамках математической морфологии ландшафта может быть предложена модель, описывающая воздействие подтопления и заболачивания на морфологическую структуру ландшафта, прежде всего ее количественные характеристики. Получено также решение задачи оценки риска для процесса заболачивания для точечных объектов. Сделанные выводы позволяют предложить вид функции риска для процесса заболачивания на основе повторных дистанционных съемок. За счет введения проблемно-ориентированной и эмпирически обусловленной функции риска появляется возможность [24] расширить свойства стабилизации нелинейных детерминированных систем управления на класс стохастических систем управления с устойчивостью к возмущениям (независимым по отношению к величинам рисков) [23]. Это позволит получить в дальнейшем обобщенное решение задачи об оценке гидролого-гидрогеологических рисков на основе использования данных дистанционных исследований земной поверхности, а значит, таким образом, повысит эффективность контроля динамики опасных гидролого-гидрогеологических процессов (подтоплений и заболачивания территорий) при ренатурализации торфяных болотных экосистем.

Работа выполнена при поддержке фонда совместных научных проектов НАН Украины и Российского фонда фундаментальных исследований.

1. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування* / Під ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 357 с.
2. *Використання багатозональних космічних знімків з метою вивчення рослинності Зони відчуження ЧАЕС* / О. І. Сахацький, В. І. Лялька, А. Я. Ходоровський та ін. // *Нові методи в космічному землезнавстві*. – К., 1999. – С. 105–113.
3. *Вентцель А. Д., Фрейдлин М. И.* Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979. – 424 с.
4. *Викторов А. С.* Математическая морфология ландшафтов. – М.: Тратек, 1998. – 192 с.
5. *Викторов А. С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
6. *Геоботаничне районування Української РСР* / Т. Л. Андрієнко, Г. І. Білик, Є. М. Брадїс та ін. – К.: Наук. думка, 1977. – 302 с.
7. *Клімат України* / Під ред. В. М. Липінського, В. А. Дьячука, В. М. Бабіченка. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
8. *Лялька В. І., Сахацький О. І., Ходоровський А. Я.* Використання багатозональної космічної зйомки з метою удосконалення карт лісів для вирішення екологічних та природоресурсних задач // *Національне картографування: стан, проблеми та перспективи розвитку*: Зб. наук. пр. – К.: ДНВП "Картографія", 2003. – С. 125–128.
9. *Природа Волинської області* / За ред. К. І. Геренчука. – К.: Вища шк., 1975. – 146 с.
10. *Проект організації території, охорони, відтворення та рекреаційного використання природних комплексів і об'єктів Шацького національного природного парку* / Горун А. А., Матейчик В. І., Прядко О. І. та ін. – К., 1999. – 132 с.
11. *Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: Материалы междунар. научн.-практ. семинара* (Минск, 30 сент. – 1 окт. 2009 г.). – Минск: Право и экономика, 2009. – 256 с.
12. *Сахацький О. І.* Застосування супутникових даних для вирішення задач водообміну у геосистемах // *Доп. НАН України*. – 2006. – № 4. – С. 118–126.
13. *Скоруход А. В.* Случайные процессы с независимыми приращениями. – М.: Наука, 1964. – 280 с.
14. *Справочник по водным ресурсам* / Ред. сост. А. В. Яцык, О. З. Ревера, В. Д. Дупляк. – Под. науч. ред. Б. И. Стрельца. – Киев: Урожай, 1987. – 304 с.
15. *Трансформация растительности осушенных переходных болот в процессе повторного заболачивания* / [Булко Н. И., Шабалева М. А., Козлов А. К., Толкачева Н. В.] // *Материалы междунар. научн.-практ. семинара "Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны"*, (Минск, 30 сент. – 1 окт. 2009 г.). – Минск: Право и экономика, 2009. – С. 90–95.
16. *Хасьминский Р. З.* Предельная теорема для решений дифференциальных уравнений со случайной правой частью // *Теория вероятностей и ее применения*. – 1966. – Т. 11, № 2. – С. 444–462.

