

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА

О.В. Томченко, А.В. Соколовская, А.Д. Федоровский

*Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-б, Киев 01601, Украина, e-mail: tomch@i.ua, ania1331@rambler.ru, fedorovsky@casre.kiev.ua*

Рассмотрены результаты использования космической информации дистанционного зондирования Земли на основе системных методов и моделей для исследования экологического состояния окружающей среды. Выполнена адаптация метода адаптивного баланса влияний (АВС-метода) на примере двух антропогенных ландшафтов, различных по структуре составляющих и состоянию развития. Детально описаны результаты моделирования экологического состояния урболандшафта территории г. Киева и прогнозирования качества воды Киевского водохранилища в зависимости от последующих изменений составляющих водно-болотного антропогенного ландшафта. В результате оценки возникших изменений за последние 20 лет на территории г. Киева построена модель, адекватно реагирующая на изменение состояния составляющих урболандшафта. По результатам прогнозирования состояния Киевского водохранилища АВС-методом получены прогнозные значения индекса сапробности на последующие 10 лет при стабильном протекании процессов зарастания водоема высшей водной растительностью. На примере водохранилища прослеживается обратный процесс трансформации антропогенно измененного аквального ландшафта рек Днепр и Припять в природный путем восстановления утраченных аквальных ландшафтных комплексов при отсутствии регуляторной деятельности человека после аварии на ЧАЭС.

Ключевые слова: космический мониторинг, классификация изображений, системный анализ, метод адаптивного баланса влияний, урболандшафт, водно-болотный антропогенный ландшафт.

Введение. Современная концепция повышения эффективности космического мониторинга состояния окружающей среды предполагает получение не только информации об объекте исследований, но и результатов самих исследований, что дает возможность иметь полное представление об объекте и сопутствующих процессах на основе множества регистрируемых и вычисляемых характеристик. В связи с этим необходимо создание качественно новых системных методов использования космической информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), повышающих эффективность решения задач оценки состояния окружающей среды [9].

Исходные положения. Космический мониторинг оценки экологического состояния окружающей среды выполнен на примере урболандшафта (городской среды) территории г. Киева и водно-болотного антропогенного ландшафта (ВБАЛ) мелководья Киевского водохранилища.

Урболандшафт — это сложная геосистема, обладающая антропоцентрической организацией и функционирующая с устойчиво высокой концентрацией населения, с долговременной застройкой и с определенным распределением материально-вещественных элементов. Будучи в тесном взаимодействии и взаимопроникновении, природная и антропогенная подсистемы города образуют сложный природно-технический комплекс. Особое место в этом комплексе занимает человек, ко-

торый является и объектом, и субъектом процесса урбанизации, непосредственно регулирует изменение всех составляющих городской территории [4]. Современное развитие крупных городов (таких как Киев) во многом происходит за счет преобразования и более рационального использования внутренней структуры без расширения границ городской территории. В результате вытесняется зеленая зона, территория уплотняется застройкой, увеличивается численность населения и, соответственно, количество транспорта. Эти факторы, безусловно, влияют на экологическое состояние городской среды [10].

Вследствие гидростроительства в 1931–1976 гг. вся акватория Днепра в пределах Украины превратилась в каскад водохранилищ, что существенно изменило структурно-функциональную организацию речной экосистемы. Так, после создания в 1964–1966 г. Киевского водохранилища натуральные водные ландшафты трансформировались в антропогенные, как результат образовались специфические ландшафтные комплексы — ВБАЛ [3].

Известно, что и для естественных, и для антропогенных водных экотонів характерна нестабильность, поскольку в результате развития водно-болотного экотона наблюдается процесс постоянного и постепенного увеличения территории водно-болотной растительности за счет обмеления водоема. Следовательно, водохранилище, техногенное по происхождению, без вмешатель-

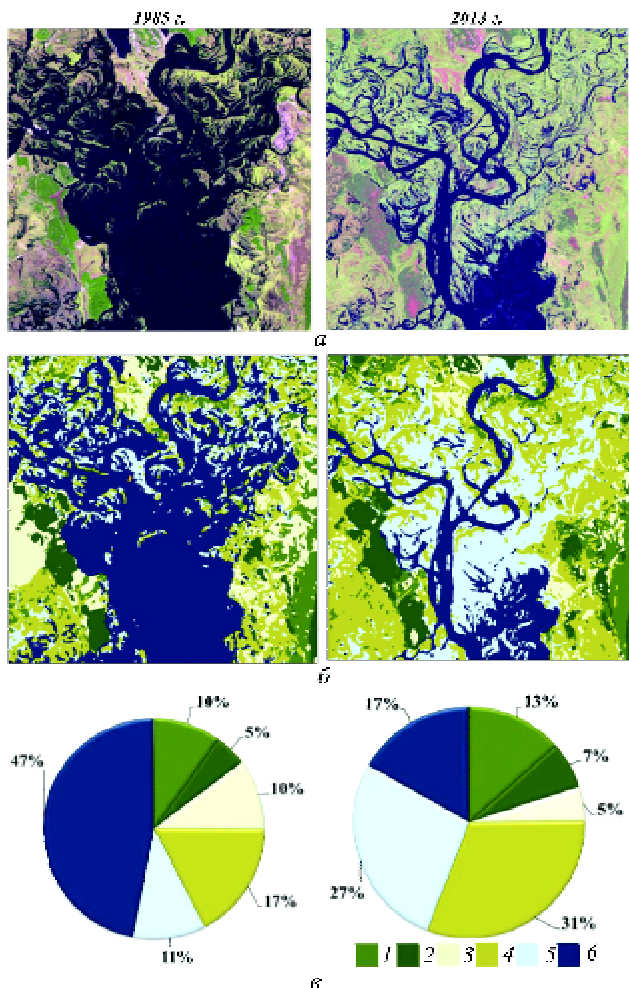


Рис. 1. Динамика зарастания верховья Киевского водохранилища, на основе материалов дешифрирования данных ДЗЗ за 1985 и 2013 гг.: а – фрагмент космоснимка Landsat; б – карты водно-болотных антропогенных ландшафтов водохранилища; в – диаграммы изменений площадей ПТК водохранилища; 1 – лиственные древесно-кустарниковые комплексы; 2 – хвойные леса и редколесья; 3 – мезофитная луговая растительность; 4 – гелофитная растительность; 5 – гидрофитная растительность; 6 – водная поверхность

ства человека не может сохранять константу в силу гидродинамических и гидробиологических процессов [8]. В настоящее время ВБАЛ водохранилища вследствие ландшафтопреобразования и протекания вторичных сукцессионных процессов представляют собой приближенные к естественным вторичные пойменные комплексы дельтового типа (рис. 1).

Исследования любых изменений, происходящих в экосистемах, подразумевают временной сравнительный анализ. Крайне важны такие подходы при оценке разных видов антропогенной трансформации и ведении экологического мониторинга. Из современных методов построения рядов ретроспективных сравнений наиболее эффективны методы, основанные на использовании данных ДЗЗ [2].

Для классификации объектов, представленных на мультиспектральных снимках Landsat, был ис-

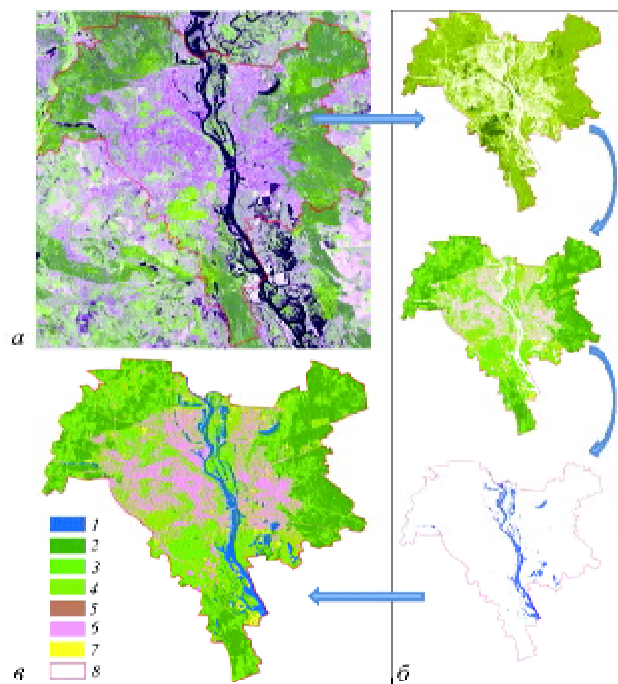


Рис. 2. Дешифрирование составляющих урболандшафта территории г. Киева состоянием на 2013 г.: а – исходный снимок Landsat 8 (06.01.2013г.); б – тематические слои (результат расчета NDVI, классификации снимков по алгоритму ISODATA и NWI соответственно); в – карта распределения составляющих урболандшафта: 1 – водные объекты; 2 – массивы хвойных деревьев; 3 – массивы лиственных деревьев; 4 – массивы травянистой растительности; 5 – поверхность без растительности; 6 – территория под застройкой, дорогами и т. д.; 7 – песок и строительная площадка; 8 – границы исследуемой территории

пользован классификатор, построенный на искусственных нейронных сетях (ИНС). Распознавание выполнялось с использованием модели нейронной сети MLP (многослойный перцептрон), а также алгоритма ISODATA (итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных). Входные признаки модели – данные спектральных каналов, а также значения нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и нормализованного водного индекса (NWI) (рис. 2, б).

Метод исследования. Для моделирования интегральных процессов в экосистеме и оценки ресурсного потенциала И.Е. Тимченко и Е.М. Игумнова предложили метод адаптивного баланса влияний (АВС), который при использовании основных принципов метода системной динамики позволяет ввести в рассмотрение системы дифференциальных уравнений относительные коэффициенты влияния. АВС-модель коэффициентов влияния дает возможность более наглядно представить роль корреляционной функции процесса при прогнозе его значений [7].

АВС-метод позволяет моделировать и прогнозировать развитие сложных систем и выполнять вычислительные функции с учетом взаимодействия всех модулей, каждый из которых находится в состоянии динамического равновесия. Рав-

новесие поддерживается функциями влияния, связывающими данный модуль с другими модулями системы. Режим динамического баланса влияний внутри системы сохраняется под управлением внешнего влияния на систему [6].

Методика состоит в разработке концептуальной модели и формировании схемы причинно-следственных связей между элементами системы, на основании которой создается системная диаграмма модели. Причинно-следственные связи в модели изображаются с помощью функций влияния через соответствующие потоки, обеспечивающие взаимное влияние компонентов вектора состояния системы (модулей X_i) и динамическое равновесие системы. Формализация модели состоит в получении математических уравнений, которые выражают адаптивный баланс влияний внутри системы.

Основные уравнения метода выражают баланс значений процесса (x), обусловленных влиянием на него других процессов:

$$dx_i/dt = [1 - 2F^{(+)}(a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + x_i)], \quad (1)$$

где a_{in} – коэффициенты уравнений модели (далее коэффициенты), которые учитывают влияние составляющей n на составляющую i и сохраняют постоянное значение в выбранном интервале времени; t – временной аргумент процесса.

Уравнение (1) становится наиболее простым в случае выбора базовой функции влияний $F^{(+)}$ в форме параболы, которая асимптотически приближается к единице. При этом уравнение становится линейным и приобретает вид

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{i,i-1}x_{i-1} + a_{i,i+1}x_{i+1} + \dots + a_{in}x_n - x_i. \quad (2)$$

Коэффициенты влияния a_{ij} в уравнении модели могут быть идентифицированы двумя основными путями: по оценкам экспертов и на основе статистической обработки архивных данных.

Несомненное преимущество рассматриваемого метода системного моделирования – простота

перехода от концептуальной модели системы к ее формальному описанию.

Результаты исследований. Моделирование экологического состояния урбандиафтов. Приводятся результаты регионально-адаптированного моделирования изменений экологического состояния территории г. Киева в зависимости от изменений площадей, занятых зеленой зоной, водоемами, жилой застройкой и промышленными объектами [5].

На основе дешифрирования и анализа космических изображений г. Киева за период 1994–2013 гг. получены основные составляющие урбандиафта (зеленая зона (А), водные объекты (В), застройка (С) и техногенная нагрузка (Т)). В работе также использовались данные наземных статистических наблюдений постов Центральной геофизической обсерватории: концентрация углекислого газа, температура, а также численная оценка экологического состояния $E = 1/K$ в относительных единицах, где K – значения комплексного индекса загрязнения атмосферы (табл. 1).

Системное моделирование и прогнозная оценка развития экологического состояния городской территории под влиянием изменений составляющих урбандиафта выполнялись на основе уравнения (2) [1].

Если принять, что каждая из составляющих может быть выражена линейной комбинацией остальных составляющих, то можно составить математическую модель взаимосвязи составляющих урбандиафта:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= a_{EC}C + a_{ET}T + a_{EA}A + a_{EB}B - E, \\ \frac{dC}{dt} &= a_{CT}T + a_{CA}A + a_{CB}B + a_{CE}E - C, \\ \frac{dT}{dt} &= a_{TA}A + a_{TB}B + a_{TE}E + a_{TC}C - T, \\ \frac{dA}{dt} &= a_{AB}B + a_{AE}E + a_{AC}C + a_{AT}T - A, \\ \frac{dB}{dt} &= a_{BE}E + a_{BC}C + a_{BT}T + a_{BA}A - B. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1. Параметры моделирования состояния урбандиафта г. Киева

Период исследований	Площадь, км ²			Техногенная нагрузка		E, усл. ед.
	водных объектов	зеленой зоны	застройки	Концентрация CO ₂ , ppm	Температура, С°	
1994	48,3	596,3	174,4	–	20,7	1
1995	48,0	591,6	177,6	–	27,1	0,93
1996	48,4	590,0	177,9	–	26,7	1,16
...
2000	48,4	596,4	175,4	372,5	31,2	1,13
...
2008	45,9	560,8	202,9	384,3	26,2	0,63
2009	46,4	553,1	210,9	386,4	24,5	0,59
2010	45,6	552,7	211,8	387,9	26,8	0,54
2011	45,6	548,8	217,6	389,5	23,2	0,44
2013	45,5	552,2	215,03	392,6	33,5	0,39

Таблица 2. Матрица коэффициентов корреляции r_{is}

	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>T</i>
<i>E</i>	1,0	0,97	0,91	-0,85	-0,82
<i>A</i>	0,97	1,0	0,89	-0,93	-0,84
<i>B</i>	0,91	0,89	1,0	-0,86	0,71
<i>C</i>	-0,85	-0,93	-0,86	1,0	0,82
<i>T</i>	-0,82	-0,84	-0,71	0,82	1,0

Для моделирования и оценки экологического состояния необходимо знать значения коэффициентов a_{in} . Определение их – важный этап формирования модели. От того, насколько правильно определены значения коэффициентов, зависит качество прогноза сценариев развития системы. Особенность АВС-метода заключается в том, что, владея данными предыдущих исследований, можно оценить коэффициенты на основе статистических данных. С этой целью используются элементы корреляционной матрицы исследуемых составляющих, что позволяет исключить определение коэффициентов эвристически. Кроме того, упрощается построение уравнений модели, которые в этом случае имеют унифицированную форму. В соответствии с этим, состояние баланса составляющих в системе (3) может быть использовано для определения самих коэффициентов влияния.

Ниже в качестве примера приведены уравнения для нахождения коэффициентов влияния a_{EC} , a_{ET} , a_{EA} , a_{EB} :

$$\begin{aligned}
 a_{EC} + r_{CT}a_{ET} + r_{CA}a_{EA} + r_{CB}a_{EB} &= r_{EC}, \\
 r_{TC}a_{EC} + a_{ET} + r_{TA}a_{EA} + r_{TB}a_{EB} &= r_{ET}, \\
 r_{AC}a_{EC} + r_{AT}a_{ET} + a_{EA} + r_{AB}a_{EB} &= r_{EA}, \\
 r_{BC}a_{EC} + r_{BT}a_{ET} + r_{BA}a_{EA} + a_{EB} &= r_{EB}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Аналогично могут быть получены системы уравнений для процессов *C*, *T*, *A*, *B*, которые используются при нахождении соответствующих

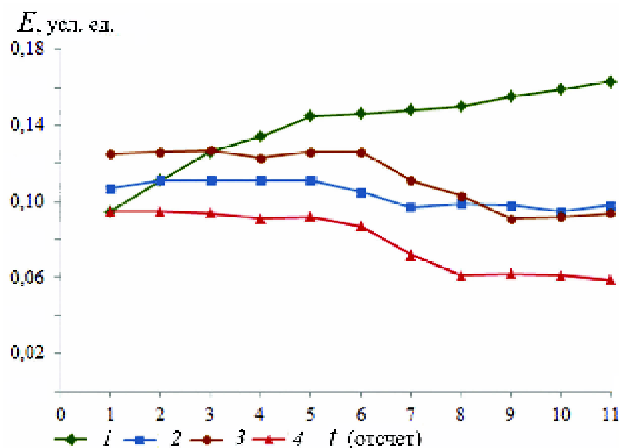


Рис. 3. Результаты моделирования изменений экологического состояния в зависимости от изменения площадей зеленой зоны (1), водоемов (2), застройки (3) и техногенной нагрузки (4)

коэффициентов a_{in} . Необходимые для этой цели коэффициенты корреляции находятся в соответствующих строках корреляционной матрицы. Для определения коэффициентов достаточно воспользоваться формулами Крамера (табл. 2). Рассчитанные по архивным данным исследуемых процессов коэффициенты корреляции r_{in} за период 1994–2013 гг. приведены в табл. 2; коэффициенты влияния для параметра *E* следующие: $a_{EA} = 1,14$; $a_{EB} = -0,37$; $a_{EC} = 0,75$; $a_{ET} = -0,26$.

Таким образом, после определения всех значений коэффициентов на основе первого уравнения системы (3) можно выполнить моделирование влияния составляющих урболандшафта на экологическое состояние городской среды, выявив постепенное изменение каждой из них (зеленой зоны, водоемов, застройки и техногенной нагрузки) на 10 % номинального значения 1994 г. (табл. 3, рис. 3).

Из графиков рис. 3 видно, что модель адекватно реагирует на изменение составляющих урболандшафта. Так, увеличение площадей зеленой зоны приводит к значительному улучшению экологического состояния территории г. Киева, а по-

Таблица 3. Результаты моделирования влияния составляющих урболандшафта на экологическое состояние территории г. Киева

Период моделирования (t)	Зеленая зона	Водные объекты	Застройка	Техногенная нагрузка
1	0,095	0,107	0,125	0,095
2	0,111	0,111	0,126	0,095
3	0,126	0,111	0,127	0,094
...
8	0,15	0,099	0,103	0,061
9	0,155	0,098	0,091	0,062
10	0,159	0,095	0,092	0,061
11	0,163	0,098	0,094	0,059

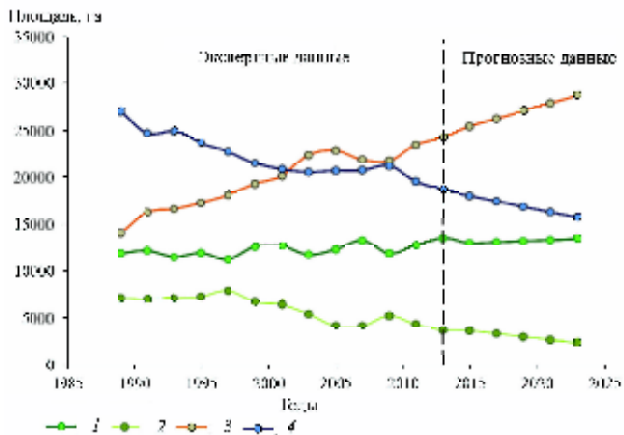


Рис. 4. Прогнозирование изменений площадей составляющих водно-болотных антропогенных ландшафтов верховья Киевского водохранилища по данным ДЗЗ: 1 – древесно-кустарниковая растительность; 2 – луговая растительность; 3 – высшая водная растительность; 4 – водная поверхность

вышение техногенной нагрузки и рост площадей застройки вызывают его ухудшение, изменение площадей водоемов незначительно влияет на экологическое состояние городской территории.

Прогнозирование экологического состояния водно-болотных антропогенных ландшафтов. С использованием математического аппарата ABC-метода приводятся результаты прогнозирования экологического состояния воды Киевского водохранилища в зависимости от изменений площадей составляющих ВБАЛ.

На основе дешифрирования и анализа космоснимков Landsat за период 1989–2013 гг. были получены площади основных составляющих ВБАЛ, а именно: древесно-кустарниковая, луговая, высшая водная растительность, а также водная поверхность (незаросшие гидротопы водохранилища). Кроме того, использовались данные численной оценки гидробиологических показателей экологического состояния водоема, полученные по наземным статистическим наблюдениям гидрометслужбы.

В качестве примера рассмотрим использование биологической индикация свойств воды по системе сапробности, основанной на тесной зависимости водного биоценоза от свойств воды. Под

	γ	γ_{norm}
1	-0.032615297	1.54356639178
2	-0.108192770	1.51552714928
3	-0.183715778	1.48750811309
4	-0.259293257	1.45946886864
5	-0.334870725	1.43142962772

Рис. 5. Рабочее окно программы ABC с прогнозными значениями индекса сапробности

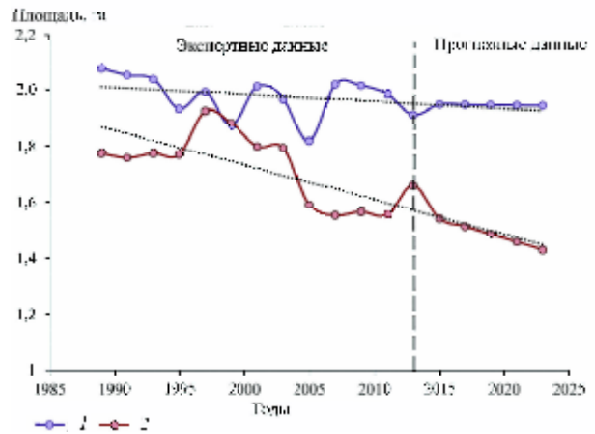


Рис. 6. Прогнозирование изменений степени общего загрязнения воды по данным наблюдений гидрометслужбы в зависимости от изменений ВБАЛ. Индекс сапробности: 1 – по фитопланктону; 2 – по зоопланктону

сапробностью понимают степень распада органических веществ в загрязненных водах. Индекс сапробности – численное выражение способности сообщества гидробионтов (фито- и зоопланктона) выдерживать определенный уровень органического загрязнения. Чем меньше значение индекса, тем меньше степень загрязнения воды органическими веществами.

Следующий шаг – выявление зависимости между тенденцией изменений составляющих ВБАЛ и индексами сапробности (общего загрязнения воды). Сначала для простого прогнозирования последующих изменений площадей ВБАЛ был использован способ регрессионного анализа – по функции тенденции вычисляются прогнозы, основанные на линейной связи между результатом наблюдения и временем, в которое это наблюдение зафиксировано (рис. 4). Далее с использованием программы ABC-моделирования, разработанной сотрудниками ЦАКИЗ (рис. 5), на основе формул (1), (2) были рассчитаны прогнозные значения общего загрязнения воды (табл. 4). Обучение системы ABC выполнялось на основе имеющихся данных площадей составляющих ВБАЛ, полученных по дешифрированию материалов ДЗЗ, и гидробиологических данных наземных наблюдений за период 1989–2013 гг. (выделены в таблице голубым цветом), затем системе на вход предоставлялись только прогнозные данные площадей составляющих ВБАЛ (синий цвет). Таким образом были получены результаты прогноза значения индекса сапробности (оранжевый цвет).

Результаты прогнозирования (рис. 6) доказывают дальнейшее улучшение качества воды по гидробиологическим показателям (индексам сапробности) на последующие десять лет при стабильном протекании процессов зарастания водохранилища высшей водной растительностью без вмешательства человека.

Таблица 4. Параметры прогнозирования значений индексов сапробности в зависимости от изменения площадей ВБАЛ Киевского водохранилища

Годы	Площадь, га				Индекс сапробности	
	древесно-кустарниковой растительности	луговой растительности	высшей водной растительности	водной поверхности	по фитопланктону	по зоопланктону
1989	11915,2	7147,6	14126	27093,5	2,079	1,776
1991	12194,2	7030,8	16307	24810,6	2,054	1,760
1993	11533,6	7115,4	16674,8	25018,4	2,040	1,776
1995	11947,2	7298,7	17335,3	23749,1	1,935	1,772
...
2005	12326,6	4227,3	22972,7	20745,1	1,820	1,692
2007	13338,8	4212,0	21988	20787,1	2,022	1,656
2009	11925,3	5283,6	21872,3	21250,5	2,017	1,618
2011	12753,4	4396,1	23583,3	19607,8	1,986	1,587
2013	13593,4	3707,8	24365,7	18717,2	1,914	1,611
2015	13064,8	3657,0	25541,5	18076,2	1,951	1,544
2017	13173,8	3332,1	26339,8	17496,9	1,950	1,516
2019	13282,9	3007,2	27138,1	16917,5	1,949	1,488
2021	13392	2682,3	27936,4	16338,2	1,948	1,459
2023	13501,1	2357,4	28734,6	15758,9	1,947	1,431

Выводы. Новизна работы связана с прогнозом параметров экологической обстановки г. Киева и Киевского водохранилища с использованием метода адаптивного баланса влияний. Сформированные модифицированные модели дают возможность моделировать и прогнозировать, исходя из реальных условий, изменение среды под влиянием составляющих ландшафта и различных факторов. Результаты адаптации АВС-метода для решения задач оценки экологического состояния окружающей среды доказывают эффективность использования метода системной динамики с целью расширения функциональных возможностей космического мониторинга территории.

1. *Ліщенко Л.П.* Ландшафтно-системний підхід до оцінки і прогнозування геоecологічного стану природно-техногенних систем (на прикладі дослідження Нікопольського гірничопромислового району) // *Л.П. Ліщенко, О.Д. Федоровський, В.Г. Якимчук // Геоінформатика. – 2005. – № 2. – С. 53–58.*
2. *Лялько В.И.* Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // *В.И. Лялько, А.Д. Федоровский, М.А. Попов и др. // Космічні дослідження в Україні 2002–2004. – К., 2004. – С. 7–14.*
3. *Мальцев В.И.* Водно-болотні угіддя Дніпровського екологічного коридору // *В.И. Мальцев, Л.М. Зуб, Г.О. Карпова, В.А. Костюшин, В.М. Титар, А.В. Мішта, О.Д. Некрасова; ред. В.И. Мальцев. – К., 2010. – 142 с.*

4. *Мильков Ф.Н.* Человек и ландшафты: Очерки антропогенного ландшафтоведения / *Ф.Н. Мильков. – М.: Мысль, 1973. – 224 с.*
5. *Соколовська А.В.* Використання космічної інформації ДЗЗ для моделювання впливу складових урболандшафту на екологічний стан території міста Києва / *А.В. Соколовська, К.Ю. Суханов, О.Д. Федоровський // Косм. наука і технологія. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 21–26.*
6. *Тимченко И.Е.* Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // *И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова // Мор. гидрофиз. журн. – 2004. – № 5. – С. 53–63.*
7. *Тимченко И.Е.* Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития / *И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И. Тимченко. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.*
8. *Томченко О.В.* Комплексна оцінка екологічного стану водойм на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (на прикладі оз. Світязь та верхів'я Київського водосховища) // *О.В. Томченко, Л.В. Підгородецька, О.Д. Федоровський // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. праць – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України, 2013. – № 10. – С. 111–117.*
9. *Федоровский А.Д.* Системная концепция повышения эффективности космического геомониторинга для решения задач природопользования / *А.Д. Федоровский, Е.Н. Боднар // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2008. – № 4. – С. 66–75.*
10. *Форрестор Дж.* Динамика развития города / *Дж. Форрестор. – М.: Прогресс, 1974. – 28 с.*

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АНТРОПОГЕННИХ ЛАНДШАФТІВ НА ОСНОВІ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ

О.В. Томченко, А.В. Соколовська, О.Д. Федоровський

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України,

вул. О. Гончара, 55-б, Київ 01601, Україна, e-mail: tomch@i.ua, ania1331@rambler.ru, fedorovsky@casre.kiev.ua

Розглянуто результати використання космічної інформації дистанційного зондування Землі на основі системних методів і моделей для дослідження екологічного стану навколишнього середовища. Виконано адаптацію методу адаптивного балансу впливів (АВС-методу) на прикладі двох антропогенних ландшафтів, які відрізняються за структурою складових і станом їх розвитку. Детально описано результати моделювання екологічного стану міського урболандшафту території міста Києва та прогнозування якості води Київського водосховища залежно від послідовних змін складових його водно-болотного антропогенного ландшафту. В результаті оцінки змін, що виникли за останні 20 років на території м. Києва, побудовано модель, яка адекватно реагує на зміну стану складових урболандшафту. Так, збільшення площ зеленої зони приводить до значного поліпшення екологічного стану території міста, а підвищення техногенного навантаження і зростання території забудови, в свою чергу, спричинює погіршення. За результатами прогнозування стану Київського водосховища АВС-методом отримано прогнозні значення індексу сапробності на наступні десять років за стабільного перебігу процесів заростання водойми вищою водною рослинністю. На прикладі водосховища простежується зворотний процес трансформації антропогенно зміненого аквального ландшафту річок Дніпро і Прип'ять у природний через відновлення втрачених аквальних ландшафтних комплексів за відсутності регуляторної діяльності людини після аварії на ЧАЕС.

Ключові слова: космічний моніторинг, класифікація зображень, системний аналіз, метод адаптивного балансу впливів, урболандшафт, водно-болотний антропогенний ландшафт.

MODELING THE ECOLOGICAL STATE OF ANTHROPOGENIC LANDSCAPES BASED ON SPACE GEOMONITORING

O.V. Tomchenko, A.V. Sokolovska, A.D. Fedorovsky

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth Institute of Geological Science National Academy of Sciences of Ukraine, 55b O. Honchar Str., Kiev 01601, Ukraine,

e-mail: tomch@i.ua, ania1331@rambler.ru, fedorovsky@casre.kiev.ua

Purpose. The purpose of the article is to describe the results of using remotely sensed data based on system methods and models to assess and simulate the development of the ecological state of the environment. Adaptation of the method of adaptive balance of causes is done on the example of two anthropogenic landscapes that differ in the components structure. The authors present the results modeling of the ecological state of the urban landscape of the city of Kiev and the forecasting of the water quality of the Kiev reservoir, depending on the subsequent changes in the components of the wetland anthropogenic landscapes.

Design/methodology/approach. The Adaptive Balance of Causes model (ABC-method) allows us to simulate and predict the development of complex systems and perform computation with all the modules, interacting each of which is in a state of dynamic equilibrium. The influence functions maintain the balance they connect this module with the other modules of the system. This technique consists in developing a conceptual model and creating a scheme of causal relations between system elements, from which permits to construct a system diagram of the model.

Findings. Based on the result of the assessment of the changes of the last 20 years on the territory of Kiev, a model was built, which responds adequately to changes in the state of components of the urban landscape. Thus, the increase of green zones leads to a significant improvement in the ecological state of the city, and the increase of anthropogenic impact and construction expansion cause deterioration. Predicted values of the saprobity index of the Kiev reservoir based on a steady flow of processes of eutrophication of aquatic vegetation for the next ten years were obtained using the ABC method. An example is given of a reverse process of transformation of anthropogenically changed aquatic landscapes of the Pripyat and Dnipro river to the natural state, by restoring the lost aquatic landscapes in the absence of man's activity after the Chernobyl disaster.

Practical value/implications. The proposed approach provides an opportunity not only to conduct a qualitatively new level of monitoring of the impact of landscape elements on the territory state, but also to predict changes in the ecological situation with minor errors and develop a sustainable management plan and public services.

Keywords: satellite monitoring, image classification, system analysis, adaptive balance of causes, urban landscape, wetland anthropogenic landscape.

References

1. Lishchenko L.P., Fedorovskiy O.D., Yakymchuk V.G. *Landshaftno-systemnyi pidkhid do otsinky i prohozuvannia heoekolohichnoho stanu pryrodno-tekhnohennykh system (na prykladi doslidzhennia Nikopolskoho hirnychopromyslovoho raionu)* [Landscape System Approach to the Estimation and Prediction of Geo-ecological Condition of Natural and Man-Caused Systems (for example: Exploration of Nikopol Mining District)]. *Geoinformatika* (Ukraine), 2005, no. 2, pp. 53-58.
2. Lyal'ko V.I., Fedorovskiy A.D., Popov M.A., Vorob'ev A.I., Kichka A.A., Kononov V.I., Kostyuchenko Yu.V., Lishchenko L.P., Mychak A.G., Sakhatskiy A.I., Stankevich S.A., Khodorovskiy A.Ya. *Ispol'zovanie dannykh sputnikovoy s'emki dlya izucheniya prirodoresursnykh problem* [The research natural resource to use of satellite data]. *Kosmichni doslidzhennya v Ukraïni 2002-2004*. Kyiv, 2004, pp. 7-14.
3. Maltsev V.I., Zub L.M., Karpova H.O., Kostiusyn V.A., Tytar V.M., Mishta A.V., Nekrasova O.D. *Vodno-bolotni uhiddia Dniprovskoho ekolohichnoho korydoru* [Wetlands of ecological corridor of the Dnieper]. Kyiv, 2010, 142 p.
4. Mil'kov F.N. *Chelovek i landshafty: Ocherki antropogennogo landshaftovedeniya* [People and landscapes: Essays anthropogenic landscape management]. Moscow, *Mysl'*, 1973, 224 p.
5. Sokolovska A.V., Sukhanov K.Yu., Fedorovskiy O.D. *Vykorystannia kosmichnoi informatsii DZZ dlia modeliuvannia vplyvu skladovykh urbolandshaftu na ekolohichni stan terytorii mista Kyieva* [The use of earth remote sensing information for estimation of the urban landscape influence on the ecological condition of the Kyiv territory]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 21-26.
6. Timchenko I.E., Igumnova E.M. *Prognozirovanie prirodnykh protsessov metodom adaptivnogo balansu vlianiy* [Prediction of natural processes by adaptive balance influences]. *Morskoy gidrofizicheskyy zhurnal*, 2004, no. 5, pp. 53-63.
7. Timchenko I.E., Igumnova E. M., Timchenko I.I. *Sistemnyi menedzhment i Avs-tekhnologii ustoichivogo razvitiya* [System Management and ABC-technology for sustainable development]. Sevastopol, *EKOSI-Gidrofizika*, 2000, 225 p.
8. Tomchenko O.V., Pidhorodetska L.V., Fedorovskiy O.D. *Kompleksna otsinka ekolohichnoho stanu vodoim na osnovi kosmichnoi informatsii dystantsiinoho zonduvannia Zemli (na prykladi oz. Svitiaz ta verkhivya Kyivskoho vodoskhovyshcha)* [The complex assessment of the ecological state of water bodies using remotely sensed data (for example: Lake Svityaz and upper Kiev reservoir)]. *Hidroakustychnyi zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen Svitovoho okeanu): Zbirnyk naukovykh prats* [Hydroacoustic Journal (Problems, Methods and Tools for Studies of the Worlds Oceans): Collected papers]. Zaporizhzhia, *Naukovo-tekhnichnyi tsentr panoramnykh akustychnykh system NAN Ukrainy*, 2013, no. 10, pp. 111-117.
9. Fedorovskiy A.D., Bodnar E.N. *Sistemnaya kontsepsiya povysheniya effektivnosti kosmicheskogo geomonitoringa dlya resheniya zadach prirodopol'zovaniya* [System concept of space geomonitoring efficiency enhancement aimed at solving problems of nature management]. *Sistemni doslidzhennya ta informatsiyni tekhnologii* [System Research & Information Technologies], 2008, no. 4, pp. 66-75.
10. Forrester Dzh. *Dinamika razvitiya goroda* [The dynamics of city development]. Moscow, *Progress*, 1974, 28 p.

Поступила в редакцию 14.10.2014 г.

Received 14/10/2014