

УДК 551.46+581.19

## Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации

А. Д. Федоровский<sup>1</sup>, Л. А. Сиренко<sup>2</sup>, Э. Л. Звенигородский<sup>1</sup>,  
И. Ю. Иванова<sup>2</sup>, К. Ю. Суханов<sup>1</sup>, В. Г. Якимчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут гідробіології НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 25.07.96*

На прикладі гірла ріки Прип'ять розглядається застосування ландшафтознавчого підходу для оцінки екологічного стану водоймищ із використанням космічної інформації. Описується методика класифікації водних рослинних ландшафтних комплексів.

Зарастающая часть мелководных участков водоемов (литорали) относится к числу важных информативных зон водных экотонів. К числу последних относятся переходные зоны водных масс — участки смешения и границы контактов вод различного происхождения и качества. Такими зонами, например, могут быть: прибрежная зона на границе раздела берег — водоем, устья рек (река — водохранилище, река — море), участки смешения водных масс различных рек. Зоны экотонів, с одной стороны, относят к числу наиболее критичных участков с точки зрения возможности ухудшения экологической и санитарно-эпидемиологической ситуации в регионе их нахождения. С другой стороны, эти зоны являются наиболее информативными участками, контроль за состоянием которых позволяет не только оценивать экологическую ситуацию, но и прогнозировать ее развитие.

Наиболее сложные экотоны возникают на границе раздела двух сред при образовании мощных зарослей водных растений (воздушно-водных, погруженных и растений с плавающими листьями). Благодаря комплексу биологических особенностей и специфичности занимаемых ими экологических ниш обитания, функциональная роль этих фото-

синтезирующих гидробионтов в формировании качества природных вод и биологической продуктивности континентальных водоемов достаточно велика. Не менее существенна роль высших водных растений в биоиндикации тех изменений, которые происходят в водных экосистемах под влиянием природных и антропогенных факторов. Они в определенной мере являются интегральным показателем экологического состояния среды их обитания, дают достаточно полное представление об абиотических составляющих водной среды, в частности уровне рН, нагрузке среды биогенными элементами (трофности водоема) и наличии загрязнений.

Флористический состав высших водных растений (включая мочролуговые виды) в водохранилищах днепровского каскада представлен 150 видами. Согласно системе Браун — Бланке последние образуют 30 ассоциаций и 45 субассоциаций, составляющих водные растительные ландшафтные комплексы (ВРЛК). Под ландшафтным комплексом понимают конкретный участок водного объекта, на котором произрастает смесь нескольких растительных ассоциаций, совершенно независимых друг от друга и имеющих различный видовой состав и структуру. Известно, что тип ВРЛК с достаточной

степенью достоверности определяет гидрохимический и качественный состав водной среды, а также многие характеристики подстилающих грунтов (Гейне, Сытник, 1993; Bukata, 1981; Papastergiadou and Babalonas, 1993).

Важность роли ВРЛК для формирования и диагностики качества воды обуславливает необходимость систематического исследования их развития, особенностей горизонтального и вертикального (в толще воды) распределения по акватории, качественных и количественных изменений их структуры (видовой состав, продуктивность) под влиянием природных и антропогенных факторов.

В связи с этим значительный интерес представляет использование космических снимков водных объектов, которые позволяют оперативно получать информацию об изменениях видового и пространственного распределения водной растительности на больших площадях акватории (Кондратьев, Шумаков, 1990). Космические снимки, во-первых, обеспечивают возможность изучения особенностей местообитания растительных сообществ: характер береговой линии, тип мелководий, наличие пойменных водоемов, отмелей, рукавов, интенсивность водообмена и т. д. Во-вторых, позволяют выделить на снимке и вычислить площади растительных участков с произрастающими на них ассоциациями. Кроме того, космические снимки, полученные в разных спектральных диапазонах, выполняют роль реальной картографической основы, которая обеспечивает экстраполяцию сведений, полученных в результате наземных и подспутниковых наблюдений.

В связи с тем, что процесс классификации участков растительности весьма трудоемок, была разработана методика и программа автоматического отнесения выделенных участков водоемов с ассоциациями растительности к конкретным ВРЛК. В основу алгоритма и программы VRLK положены структурно-функциональные взаимосвязи биотических (характеристики растительных группировок) и абиотических (гидрохимические показатели) элементов акваториального ландшафта. При реализации указанных зависимостей использованы математические методы нечеткой логики, примененные в работе Кофмана (1982) для систематизации получаемой информации. Последнее связано с тем, что в естественных условиях существует значительное количество комбинаций видового состава растительности, которые под влиянием внешних факторов непрерывно изменяют свою конфигурацию, состав и обуславливают плавный и непрерывный переход одного типа ВРЛК в другой, соответствующий новым условиям. Указанные обстоятельства и

требуют применения такого экспресс-метода, который при классификации исследуемых участков позволял бы учитывать не только плавный и непрерывный переход одного типа ВРЛК в другой, но и проводить биоиндикацию изменений среды.

При традиционном подходе к классификации растительных участков принимается бинарное решение, например:  $\mu = 1$ , если участок принадлежит к конкретному ВРЛК и  $\mu = 0$  в случае, когда не принадлежит ни к одному комплексу. Теория нечетных множеств заменяет строгую принадлежность исследуемого участка к какому-либо ВРЛК на непрерывную функцию принадлежности к каждому комплексу. Именно применение представлений нечеткой логики позволяет анализировать и использовать в последующих процедурах обработки информации реальное соотношение степени принадлежности того или иного участка к разным ВРЛК. В этом случае «жесткая» принадлежность какого-либо исследуемого участка к определенному типу ВРЛК заменяется «размытым» отношением условной принадлежности. Это условие характеризуется функцией принадлежности  $\mu_i$ , которая показывает в какой степени тот или иной участок принадлежит  $i$ -му ВРЛК. Таким образом, каждый участок исследуемого региона может принадлежать сразу нескольким ВРЛК, что дает ряд значений  $\mu_i$  в интервале (0 ... 1). Решение о принадлежности к конкретному ВРЛК принимается по максимальному значению функции принадлежности  $\mu_i$  (Звенигородский и др., 1994, 1996).

В алгоритм разработанной нами программы VRLK заложена априорная информация о принятой в гидробиологии классификации водных растительных ландшафтных комплексов по составу входящих в ВРЛК ассоциаций водных растений, а также информация о соответствии ряда ингредиентов гидрохимических характеристик водной среды типам водных растительных ландшафтных комплексов.

Для реализации метода используются математические модели разных типов ВРЛК. Принцип построения последних основан на обобщении опыта экспертов-гидробиологов по изучению распределения ассоциаций по площади в разных ВРЛК для конкретных водных экосистем. В структуре ВРЛК принята шкала баллов Браун—Бланке для описания составляющих ассоциаций. При этом первая доминанта соответствует баллу 4 по шкале Браун—Бланке (т. е. данная ассоциация занимает 50—75 % от общей площади ВРЛК); вторая доминанта — баллу 3 (25—50 %) и т. д.

Практика показала, что выставление баллов по шкале Браун—Бланке не является однозначной

процедурой. Так, например, если степень покрытия  $S = 55\%$ , то отнести ее к баллу 4 можно лишь с известной долей условности. Чтобы устранить этот недостаток, для каждого балла шкалы Браун—Бланке вводится соответствующая функция приближения  $m$ . Последняя принимает значение 1, если степень покрытия попадает в середину интервала площадей какого-либо балла, и 0.5, если это значение находится на его краю.

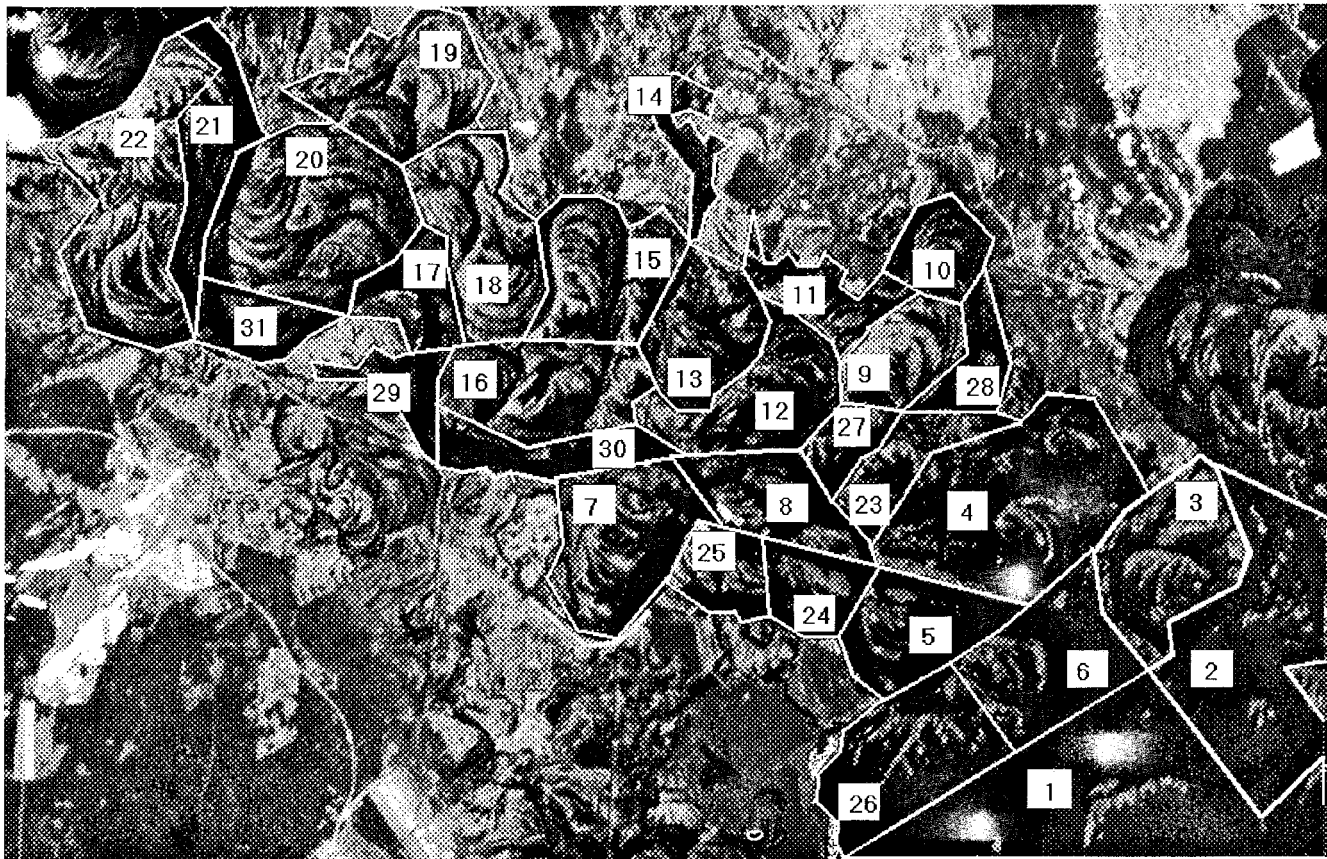
В качестве математических моделей ВРЛК были использованы уравнения, составленные для различного количества доминирующих ассоциаций. В случае двухдоминантных комплексов условие принадлежности участка к одному из ВРЛК можно представить в виде нечеткого выражения:

- «ЕСЛИ площадь ассоциации  $S_{i1}$  составляет около 4 баллов И  $S_{i2}$  — около 3 баллов, ИЛИ  $S_{i1}$  около 4 баллов И  $S_{i2}$  около 2 баллов, ИЛИ  $S_{i1}$  около 3 баллов И  $S_{i2}$  около 3 баллов, ИЛИ  $S_{i1}$  около 3 баллов И  $S_{i2}$  около 2 баллов, ТО коэффициент принадлежности участка к  $i$ -му двухдоминантному ВРЛК равен  $\mu_{2i}$ ».

Математическое выражение, дающее решение о принадлежности участка к тому или иному комплексу в случае ВРЛК с двумя доминирующими ассоциациями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu_{2i} = & [S_{i1}m_4(S_{i1}) \cap S_{i2}m_3(S_{i2})] \cup \\ & \cup [S_{i1}m_4(S_{i1}) \cap bS_{i2}m_2(S_{i2})] \cup \\ & \cup [bS_{i1}m_3(S_{i1}) \cap S_{i2}m_3(S_{i2})] \cup \\ & \cup [bS_{i1}m_3(S_{i1}) \cap bS_{i2}m_2(S_{i2})], \end{aligned}$$

где  $\cup$  и  $\cap$  — логические операции ИЛИ и И, обозначающие выбор максимального и минимального значений из соответствующих групп функций приближения,  $m_4(S_{i1})$  — функция приближения 4-му баллу шкалы Браун—Бланке для первой доминантной ассоциации  $i$ -го двухдоминантного комплекса,  $m_3(S_{i2})$  — функция приближения 3-му баллу шкалы Браун—Бланке для второй доминантной ассоциации,  $b$  — весовой коэффициент, учитывающий уменьшение площади ассоциации до более низкого балла шкалы Браун—Бланке.



Синтезированный космический снимок КА «Спот» 23.08.95 г. устьевой зоны реки Припять. 1—31 — участки водной растительности, выделенные дешифровщиком-гидробиологом на основе ландшафтоведческого подхода

На первом этапе освоения методики используется интерактивный ввод данных. Космические снимки дешифрируются экспертом-гидробиологом с применением вспомогательных программ (оконтуривание участков, измерение площадей, занимаемых ассоциациями и др.).

На основании анализа космических снимков исследуемая акватория с учетом гидрологической обстановки делится на несколько географически и экологически обособленных территориальных участков. Каждый такой участок состоит из характерного для него набора ассоциаций. Описание участка представляется в виде набора записей, каждая из которых включает: географическое название, гидрологические характеристики участка, перечень ассоциаций и занимаемые ими площади. Полученные таким образом описания образуют базу данных для последующей машинной обработки. Принятие решения о принадлежности того или иного участка к конкретному типу ВРЛК проводится автоматически по максимальному значению функции принадлежности после решения программой VRLK всех уравнений.

Описанные методика и программа были апробированы на примере классификации участков водной растительности и определения качества воды в устьевой зоне реки Припять (Киевское водохранилище). По данным космических сканерных снимков, выполненных спутником «Spot» 23 августа 1995 г. в трех спектральных диапазонах, дешифровщиком-гидробиологом был выделен 31 участок водной растительности в пределах исследуемого района (рисунок) и с учетом наземных наблюдений выполнено описание входящих в них растительных ассоциаций. Результаты дешифрирования были использованы в качестве входной информации для классификации с помощью разработанной программы выделенных растительных участков по типам ВРЛК. В результате вычислений исследуемые участки были отнесены к 12 типам ВРЛК. По распределению последних в устьевой зоне реки была дана качественная оценка химического состава воды. В соответствии с существующей методикой (Оценка качества поверхностных вод суши и эстуариев Украины КНД 211.1.4.010-94) были выделены участки с различным качеством воды: предельно чистая (участки 1—3, 21, 29, 30); чистая (4—8, 13, 15—17, 23—27); слабо загрязненная (9, 18, 28); умеренно загрязненная (14, 31); грязная (10—12, 19, 20, 22).

В пользу достоверности полученных оценок качества воды свидетельствуют результаты наземных

контактных измерений показателей гидрохимического режима, выполненных Институтом гидробиологии НАН Украины в августе—сентябре 1995 г. на 4-м и 5-м участках (буй 210), на 25-м участке (Оташево) и на 26-м участке (Березовая кладь).

Как показали проведенные исследования, разработанная программа VRLK может быть применена для оценки экологического состояния экотонов типа «река—водохранилище», «берег—водоем» по информации, полученной с помощью космических снимков и последующей экстраполяции наземных наблюдений. Такой подход при использовании интегральных информационных показателей водной растительности открывает новые возможности для выявления общих тенденций изменений, происходящих в водных экосистемах, и может составить основу их комплексного мониторинга на качественно новом уровне.

Гейне С., Сытник К. М. Макрофиты — индикаторы изменений природной среды. — Киев: Наук. думка, 1993.—434 с.

Звенигородский Е. Л., Клоков В. М., Ларюшкин С. П. Адаптация метода дендрограммы для компьютерной обработки аэрофотознімків зарослів вищої водної рослинності // Вісник ВПН.—1994.—№ 2.—С. 39—43.

Звенигородский Э. Л., Ротштейн А. П., Иванова И. Ю. и др. Кластерный анализ иерархии структур ландшафтных комплексов водных макрофитов // Гидробиол. журн.—1996.—32, № 2.—С. 12—18.

Кондратьев К. Я., Шумаков Ф. Т. Дистанционный мониторинг еврофикации водоемов // Водные ресурсы.—1990.—№ 5.—С. 152—159.

Кохман А. Введение в теорию нечетких множеств. — М.: Радио и связь, 1982.—432 с.

Bukata R. P., Jerome J. H., Bruton J. E., et al. Optical water quality model of lake Ontario. 1. Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in lake Ontario // Appl. Opt.—1981.—20, N 9.—P. 1696—1703.

Papastergiadou E., Babalonas D. The relationships between hydrochemical environmental factors and the aquatic macrophytic vegetation in stagnant and slow flowing waters. 1. Water quality and distribution of aquatic associations // Arch. Hydrobiol. / Suppl 90 (Monographische Beitrage), 4, 475—491 Stuttgart, August 1993.—P. 475—489.

#### ASSESSING THE ECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES WITH THE USE OF INFORMATION FROM SPACE APPARATUSES

A. D. Fedorovskii, L. A. Sirenko, E. L. Zvenigorodskii, I. Yu. Ivanova, K. Yu. Sukhanov, and V. G. Yakimchuk

Using the estuary of river Prypiat's as an example, we discuss the application of landscape-study approach to the assessment of ecology of water bodies based on information obtained from space apparatuses. Methods for classification of water vegetation landscape complexes are described