

УДК 574:004.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108415

Математическое моделирование колориметрических параметров для дистанционного контроля состояния естественных биоценозов

Ю. П. Балым, М. А. Георгиянц, Е. В. Высоцкая, А. И. Печерская,
А. П. Порван

Представлены результаты моделирования межкомпонентных отношений колориметрических параметров природных биоценозов. В качестве исходных данных использованы космические снимки плавней в дельте Дуная. Запропоновано использовать системный колориметрический параметр, который отображает размах значений ступени выравнивания значений колориметрических параметров. Выделены признаки, позволяющие дистанционно диагностировать состояние биопродуктивных процессов природных биоценозов

Ключевые слова: биоценоз, биопродуктивный процесс, водоплавные птицы, граф отношений, колориметрические параметры, дистанционный контроль, траектория системы

1. Введение

Изменчивость мира, в котором живет человек, критически возрастает. Климатические изменения, социальные потрясения, результаты технического прогресса требуют быстрого адекватного реагирования. С другой стороны, успехи компьютерных наук и математики дают мощные средства для обеспечения такого реагирования. Важнейшим средством для этого являются методы математического моделирования и связанные с ними информационные технологии. Следует сказать, что эти средства позволяют достаточно быстро проверять рабочие гипотезы. Для проверки рабочих гипотез путем статистической обработки и анализа собраны большие массивы информации и разработаны программные средства.

Перед человечеством стоит задача преодоления противоречия между следующими двумя требованиями. Содержанием первого из этих требований является увеличение продуктивности аграрного сектора мировой экономики. Второе связано с необходимостью поддержания факторов, обеспечивающих стабильность биосферы нашей планеты. Эти факторы связаны с биоразнообразием, сохранение которого требует максимального сбережения естественных экосистем. Это, в свою очередь, предполагает минимизацию влияния агротехнологий на естественные ландшафты.

В ряде случаев эти проблемы могут быть решены путем использования агротехнологий, некоторые существенные элементы которых предполагают минимальное влияние на естественные экосистемы и ландшафты

Примером таких агротехнологий является потребление естественных кормов домашними водоплавающими птицами (преимущественно – утками). Использование естественной кормовой базы часто происходит на природных и

искусственных водоемах в местах, где обитают их дикие сородичи. Такие водоемы часто используются для рыбоводства, мелиорации и в других целях. [1].

Следует сказать, что такой подход имеет и отрицательные аспекты, в частности, связанные с возникновением новых проблем биозащиты и биобезопасности. Речь идет об увеличении риска распространения болезней – как птиц, так и людей. В качестве примера можно назвать «птичий грипп» (*Grippus avium*) [2]. Использование в данном случае естественной кормовой базы водоплавающей птицы на больших площадях, часто – труднодоступной местности, не позволяет ограничиться традиционными методами ветеринарии. Важно, что на этих обширных и труднодоступных участках присутствуют не только значительные ресурсы естественной кормовой базы, но и факторы элиминации упомянутых угроз биобезопасности. Речь идет о факторах, обеспечивающих естественное самоочищение воды. К таким факторам относятся массивы полупогруженных высших водных растений (ППВВР), давно используемых для очистки воды в сооружениях, получивших название «биоплато» [3].

На участках местности, пригодных для хозяйственного использования естественной кормовой базы водоплавающей птицы, часто встречаются заросли ППВВР (тростника, камыша, рогоза), которые могут быть использованы в качестве естественных биоплато. В качестве примера такой местности можно назвать плавни, занимающие значительные пространства, доступ на которые затруднен как по воде, так и по суше.

В некоторых экстремальных ситуациях естественные биоплато могут быть полезны для преодоления серьезных угроз биобезопасности. Речь идет о биобезопасности питьевого и других видов водопотребления. Причинами этих угроз могут быть разрушения систем канализации и очистки воды, а также хранилищ вредных и токсических веществ. Эти разрушения могут возникнуть в результате техногенных и природных катастроф. Кроме того угрозы биобезопасности могут возникнуть в результате попадания в водоемы неочищенных бытовых сточных вод. При загрязнении в источниках водопотребления создаются условия для развития возбудителей опасных инфекционных заболеваний.

В подобных экстремальных ситуациях может не быть времени для сооружения биоплато. В качестве естественных биоплато в местах разведения водоплавающей птицы могут быть использованы массивы ППВВР. В местах, где домашние водоплавающие птицы используют естественную кормовую базу, вместе с их дикими сородичами могут быть использованы такие же массивы ППВВР.

Важным аспектом отбора этих массивов является использование информации о характере протекающих в них биопродукционных процессов. Ключевое значение имеет отношение продукции и деструкции органического вещества. Преобладание фотосинтетической продукции над деструкцией способствует поглощению агентов загрязнения из воды. При этом предотвращается вторичное загрязнение воды вследствие отмирания и последующего разложения биомассы ППВВР.

В экстремальных ситуациях, о которых идет речь, для сбора информации о характере биопродукционных процессов целесообразно использование дистанционных (аэрокосмических) методов. Это определяется, в частности, следующими двумя факторами. Первым фактором является большая вероятность расположения массивов ППВВР на обширных территориях. Участки этих территорий могут быть труднодоступны при движении по воде и суше. Этот фактор имеет значение и в обычных ситуациях при выборе массивов ППВВР. Например, при выборе места для использования водоплавающими птицами естественной кормовой базы водоемов. Вторым фактором имеет значение только в экстремальных ситуациях. Этот фактор – острый дефицит времени для сбора информации, которая необходима для принятия решений.

В зависимости от конкретной ситуации может быть применен широкий ассортимент указанных дистанционных методов: от цифровой фотосъемки с борта легких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) до использования космических снимков.

Существует ряд факторов, которые делают чрезвычайно актуальными проблемы контроля и коррекции состояния биопродукционных процессов в природных растительных сообществах. Это – глобальные климатические изменения, критический уровень влияния человеческой деятельности на природу, высокий уровень рисков техногенных катастроф и даже террористических актов, создающих угрозы биобезопасности. Природные растительные сообщества являются фактором, который во многих случаях уменьшает риски возникновения таких угроз. Возможность реализации этой позитивной роли растительных сообществ в большой степени зависит от характера происходящих в них биопродукционных процессов. Это относится и к массивам ППВВР, которые выполняют роль естественных биоплато и, таким образом, уменьшают риски возникновения угроз биобезопасности разных видов водопотребления.

Масштабы указанных рисков делают весьма актуальной проблему расширения арсенала высокотехнологичных наукоемких методов контроля характера биопродукционных процессов в растительных сообществах. В этом арсенале все большее значение приобретают дистанционные (аэрокосмические) методы. К этим методам относится, в частности, анализ космических снимков земной поверхности с использованием вегетационных индексов [4].

Значения вегетационных индексов определяются по результатам измерений спектральных параметров растительности. Спектральные параметры дополняются другими для коррекции искажений, которые вносят чисто физические условия съемки [5, 6].

Методы и средства обработки снимков земной поверхности позволяют получить информацию о состоянии растительных сообществ непосредственно в момент регистрации для использования вегетационных индексов. Но для решения ряда проблем обеспечения биобезопасности необходим прогноз динамики состояния биопродукционных процессов в растительных сообществах. Возникает потребность в подходах, которые позволяют

дистанционно регистрировать системные и динамические аспекты биопродукционных процессов в растительных сообществах. Такие подходы могут быть реализованы с использованием математических моделей динамики биологических систем.

Для информационной поддержки принятия решений по контролю и коррекции функционирования естественных биоплато потребуются методы математического моделирования с широкими возможностями. Речь идет о методах, которые дают возможность формализованного описания динамики моделируемой системы. При этом фактический материал не всегда отражает динамику моделируемой системы в реальном времени. Таким образом, необходим метод, который будет играть роль инструмента формирования рабочих гипотез. Эти рабочие гипотезы относятся к форме оригинальных вегетативных индексов, эффективность которых потом проверяется при обработке изображений массивов ППВВР.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для получения информации о динамических и системных параметрах состояния биопродукционных процессов в растительных сообществах используются широкий арсенал методов математической обработки. В основном это те же методы, которые применяются для анализа других живых систем. Можно привести следующие примеры такого применения этих методов.

Модели дифференциального уравнения в частных производных используются для исследования динамики генной регуляции через SAM (апикальные меристемы стебля) [7]. Для изучения динамики естественных и искусственных систем (физиологических, экономических, транспортных) используют модели данных типа временных рядов. В качестве примера можно назвать использование скользящего среднего для анализа временных рядов [8]. Анализ динамических аспектов подобных систем имеет большое значение в связи с проблемой сохранения их гомеостаза. Для решения этой задачи применялись трендовые модели [9]. Исходными данными для всех методов являются последовательности наблюдений (по скалярному или векторному параметру), упорядоченные по времени. Хотя для некоторых моделей предусмотрены переменные временные лаги, последовательность наблюдений должна сохраняться.

Математическое моделирование гидробиоценозов является наиболее наукоемким аспектом мониторинга больших озер. Эти озера часто являются важнейшим источником пресной воды для больших территорий. В условиях глобального потепления этот источник может оказаться под угрозой вследствие потери гидробиоценозами стабильности [10].

Математические методы описания экосистем используются для определения риска возникновения такой угрозы биобезопасности, как массовое развитие сине-зеленых водорослей в водоемах питьевого назначения [11].

Для математического описания динамики состояний различных растительных сообществ исходные данные, такие как вегетационные индексы,

необходимо упорядочить во времени. Для получения этой информации широко используются дистанционные (аэрокосмические) методы. Можно привести следующие примеры использования вегетационных индексов.

В работе [12] использовались вегетационные индексы для дистанционного исследования состояния хвойных пород с использованием узкополосных способов определения спектральных характеристик лесных массивов. В работе [13] использовались аналогичные методы для исследования биопродукционных процессов в листьях. Такие способы предполагают использование дорогостоящей аппаратуры, кроме того, описание динамики, требует серии измерений на протяжении определенного периода времени.

В работе [14], как и в приведенных выше работах, исследовались спектральные отклики деревьев пустыни. Полученные результаты создают предпосылки для получения дистанционными методами информации о характере биопродукционных процессов. В данном случае важно, что речь идет о больших труднодоступных территориях, на которых драматическим образом могут проявиться эффекты глобального потепления.

В работе [15] описывается большой арсенал средств дистанционной регистрации характера биопродукционных процессов в сообществах цианобактерий. Возможность появления штаммов этих организмов более токсичных, чем известные, представляет серьезную угрозу для биобезопасности питьевого водоснабжения [11].

Таким образом, дистанционные методы, которые используют вегетационные индексы, позволяют описывать характер биопродукционных процессов для самых разных видов растительных сообществ. Однако, для их реализации необходима специфическая, сравнительно дорогостоящая аппаратура, которая может производить измерения в узких полосах спектра. Кроме того применение рассмотренных методов описания динамических аспектов требует наличия исходного фактического материала, который отражает последовательность состояний исследуемой системы в реальном времени. Это создает серьезные проблемы финансового и организационного характера при увеличении масштабов использования этих методов. Глобальное потепление и усиление давления человека на природу могут создать ситуации, в которых это увеличение масштаба будет необходимо.

Указанные проблемы могут быть решены использованием математических методов, которые дают возможность формализованного описания динамики исследуемой системы на основе фактического материала, который непосредственно не отражает эту динамику в реальном времени. Такую возможность дает метод дискретного моделирования динамических систем (ДМДС), уже используемый для исследования структуры связей и динамики систем самой разной природы [16, 17].

В ряде случаев применение ДМДС позволяет описывать динамику системы на основании только одного изображения, которое фиксирует состояние системы только в один момент времени. Такую возможность дает прием, получивший рабочее название рехронизации [18]. Использование рехронизации основано на посылке, согласно которой состояния разных частей

исследуемой системы меняются в рамках одного цикла, но в момент фиксации этих состояний они могут соответствовать разным фазам этого цикла. Разным фазам цикла соответствуют условные шаги по времени идеализированной траектории системы (ИТС).

С практической точки зрения важно, что эта модель может быть построена на основе компьютерного анализа компонентов RGB-модели изображения растительного сообщества [19], что является преимуществом по сравнению с использованием других известных вегетационных индексов. Роли разных частей системы играют разные участки массива ППВВР. Это позволяет использовать в качестве источника исходного фактического материала находящиеся в свободном доступе космические снимки земной поверхности или цифровые фотографии, сделанные с борта легких БПЛА. Такая возможность снижает финансовые затраты на получение исходной фактической информации. Возможности для получения больших объемов исходной фактической информации также возрастают. Соответственно, возможности разработки новых, более простых в реализации, вегетационных индексов также возрастают.

Следовательно, целесообразно применение ДМДС к задачам дистанционного определения состояния биопродукционных процессов в естественных биоплато. На первом этапе исследования с помощью ДМДС будут построены модели динамики колориметрических параметров изображений естественных биоплато. Полученные модели помогут сформулировать рабочие гипотезы относительно процедуры вычисления значений новых вегетационных индексов. Роль этих индексов будут выполнять системные колориметрические параметры (СКП), которые выражают определенные отношения между первичными колориметрическими параметрами. Первичные же колориметрические параметры могут быть получены путем компьютерного анализа компонентов RGB-модели изображения растительного сообщества. На втором этапе исследования рабочие гипотезы, сформулированные на первом этапе, проверяются путем обработки изображений с использованием соответствующего СКП. Первоначально обрабатываются эталонные изображения, которые представляют заведомо разные состояния биопродукционных процессов в естественном биоплато. Диагноз и прогноз состояния биопродукционных процессов осуществляется путем сравнения изображений диагностируемых объектов с эталонными изображениями.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является моделирование колориметрических параметров изображений массивов ППВВР в местах разведения водоплавающей птицы. Это позволит определить структуру СКП, изменения соотношений значений которых будут сигнализировать о предстоящей смене состояний продуцирования живой и накопления мертвой биомассы, приводящей к вторичному загрязнению воды. Возможность дистанционно

определять такие СКП оптимизирует контроль состояния естественных биоплато и эффективности очистки воды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– обработать эталонные космические снимки плавней в устье Дуная методом, базирующемся на результатах моделирования структуры и динамики отношений колориметрических параметров с применением ДМДС;

– провести структурное и параметрическое моделирование системного колориметрического параметра, отражающего характер биопродукционных процессов растительных сообществ;

– сравнить результаты обработки космических снимков участков плавней в разные периоды вегетационного сезона при соответствующих состояниях биопродукционных процессов в ППВВР.

4. Материалы и методы исследований характера отношения системных колориметрических параметров естественных биоплато

Возможности прогноза изменения характера биопродукционных процессов в массиве ППВВР исследовались с использованием космических снимков плавней в устье Дуная [20]. Для обработки снимков использовалась рабочая гипотеза, базирующаяся на полученных ранее результатах моделирования структуры отношений и динамики колориметрических параметров посевов культурных растений с использованием ДМДС [19]. В соответствии с этой гипотезой динамике отношений растительных пигментов в подобных фитоценозах должны быть присущи некоторые черты Маргалефовой модели сукцессии. Речь идет об отношениях хлорофилла и желто-красных пигментов, которым на изображениях массивов ППВВР соответствуют отношения яркостей зеленой и желто-красной частей видимой области спектра. Из этого, в частности, следует, что разному характеру этих биопродукционных процессов могут отвечать разные значения колориметрических параметров. Использование аналогий с Маргалефовой моделью сукцессии предполагает использование системных колориметрических параметров (СКП), которые отображают определенные отношения между биопродуктивностью и биоразнообразием. Перспективность использования аналогий с Маргалефовой моделью сукцессии для разработки дистанционных методов контроля характера биопродукционных процессов в растительных сообществах ранее показана [21] на материале посевов культурных растений.

В рамках настоящей работы для нахождения СКП, пригодных для определения состояния естественных биоплато, также использовалась аналогия с Маргалефовой моделью сукцессии. С помощью ДМДС, строились матрицы отношений, графы отношений и идеализированные траектории системы (ИТС) отношений колориметрических параметров (КП). В качестве эталонного был использован космический снимок плавней в устье Дуная, представленный на рис. 1. Снимок был сделан в июне 2014 года, в середине вегетационного периода, когда биопродукционные процессы в массивах ППВВР характеризуются высокой интенсивностью и выраженным преобладанием продукции

над деструкцией. Как указывалось выше, такое состояние массива ППВВР обеспечивает высокую интенсивность биологических процессов очистки воды. Это состояние также минимизирует риск вторичного загрязнения воды – в результате отмирания и разложения биомассы ППВВР

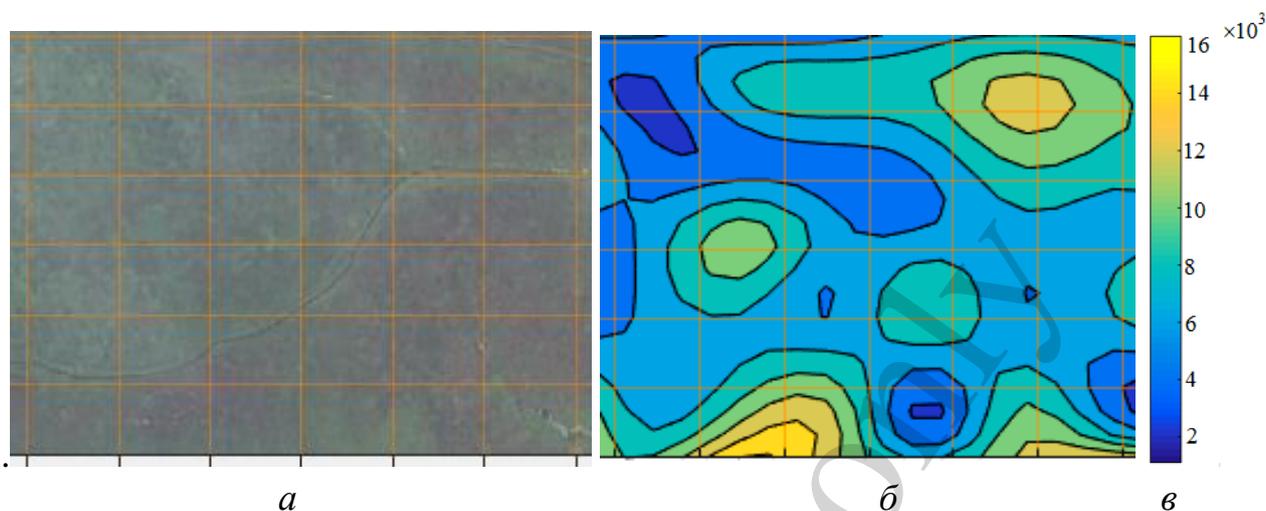


Рис. 1. Эталонный снимок выбранного участка дунайских плавней, сделанный 6 июня 2014 года: *а* – необработанный снимок; *б* – обработанный снимок; *в* – шкала условных цветов, соответствующих определенным значениям среднего квадратичного отклонения индекса *C*

На основе анализа вида полученных матриц и графов отношений строилась рабочая гипотеза относительно вида математического выражения, описывающего отношения между колориметрическими параметрами массивов ППВВР отражающими характер биопродукционных процессов. Эта гипотеза проверялась с помощью анализа космических снимков плавней [20]. Результаты обработки космических снимков участков плавней в разные периоды вегетационного сезона сравнивались с соответствующими состояниями биопродукционных процессов в ППВВР. Диагностика этих состояний необходима для своевременного проведения мероприятий по удалению биомассы ППВВР, которая может стать причиной вторичного загрязнения воды.

При моделировании динамики колориметрических параметров массивов ППВВР с помощью ДМДС использовался прием рехронизации [18]. Использование рехронизации предполагает изменение состояния разных частей исследуемой системы (разных участков зафиксированного массива ППВВР в плавнях в один момент времени на космическом снимке) в рамках одного цикла. Однако в момент фиксации (цифровой фотосъемки) этих состояний они могут соответствовать разным фазам этого цикла.

5. Моделирование характера отношения колориметрических параметров естественных биоплато

На первом этапе работы строились матрицы и графы отношений, а также ИТС, отражающие структуру отношений и динамику колориметрических параметров. Построение матриц проводилось с использованием ДМДС и рехронизации на основе материала, представленного на рис. 1, эталонного изображения массива ППВВР. Колориметрическими параметрами, выраженными отношениями элементов RGB-модели и связанными с определенными аспектами биопродукционных процессов, были:

$G/(R+G+B)$ – параметр, отражающий количество зеленого пигмента хлорофилла, влияющее на уровень фотосинтетической продукции;

$R/(R+G+B)$ – параметр, отражающий количество оранжево-красных пигментов, возрастание значений которого может рассматриваться как признак нарастания в системе мертвой растительной биомассы;

$G/(R+G)$ – параметр, отражающий отношение количества хлорофилла к общему количеству разных растительных пигментов, связанный с балансом молодой активно осуществляющей фотосинтез биомассы и старой, отмирающей биомассы;

R/G – параметр, отражающий, подобно «желто-зеленому индексу» Маргалевой модели сукцессии, биохимическое, пигментное разнообразие системы;

R , G и B – среднее значение количеств соответственно красного, зеленого и синего элементов пикселя на выделенном для обработки фрагменте цифровой фотографии.

В результате проведенного анализа были построены два варианта матриц отношений вышеуказанных колориметрических параметров, представленные в табл. 1, 2. Для каждой из матриц построены графы отношений, представленные на рис. 2, 3. Для отражения динамики изменений значений колориметрических параметров построены ИТС, представленные в табл. 3, 4.

Таблица 1

Первый вариант матрицы отношений колориметрических параметров

Колориметрические параметры	$R/(R+G+B)$	$G/(R+G+B)$	$G/(R+G)$	$R/(G)$
$R/(R+G+B)$	[0; 0]	[+; -]	[-; -]	[0; 0]
$G/(R+G+B)$	[+; -]	[0; 0]	[0; 0]	[0; 0]
$G/(R+G)$	[-; -]	[0; 0]	[0; 0]	[-; +]
$R/(G)$	[0; 0]	[0; 0]	[-; +]	[0; 0]

Таблица 2

Второй вариант матрицы отношений колориметрических параметров

Колориметрические параметры	$R/(R+G+B)$	$G/(R+G+B)$	$G/(R+G)$	$R/(G)$
$R/(R+G+B)$	[0; 0]	[+; -]	[0; 0]	[0; 0]

$G/(R+G+B)$	[+;-]	[0; 0]	[0; 0]	[-; -]
$G/(R+G)$	[0; 0]	[0; 0]	[0; 0]	[+; -]
$R/(G)$	[0; 0]	[-; -]	[+; -]	[0; 0]

Анализ структуры матриц отношений (табл. 1, 2) говорит о значительной роли отношений типа «плюс-минус» между параметрами $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$ в поддержании гомеостаза эталонного массива ППВВР. Это позволяет сделать первый шаг в формировании рабочей гипотезы относительно вида выражения для расчета СКП. На первом шаге предполагается использовать математические выражения отношений типа «плюс-минус» между значениями параметров $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$. Фиксация значений предлагаемого СКП позволяет выделить участки ППВВР с разным характером биопродукционных процессов.

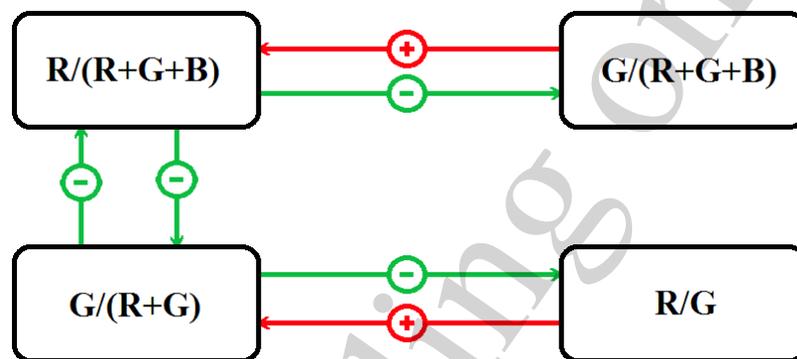


Рис. 2. Первый вариант графа отношений колориметрических параметров. Красная стрелка – прямая взаимосвязь между параметрами, зеленая – обратная

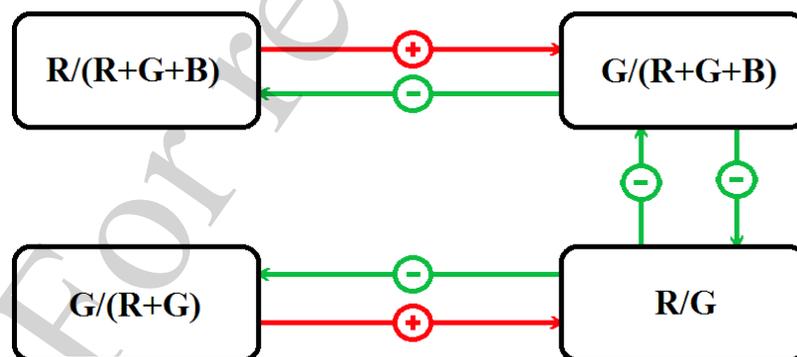


Рис. 3. Второй вариант графа отношений колориметрических параметров. Красная стрелка – прямая взаимосвязь между параметрами, зеленая – обратная

Анализ структуры графов отношений, представленных на рис. 2, 3, позволяет подтвердить и детализировать выдвинутое предположение. В ходе анализа следует выделить присутствующие на графах контуры усиливающие отклонения (КУО) и контуры, ослабляющие отклонения (КОО). В обоих вариантах графа отношений присутствуют КОО, базирующиеся на отношениях

типа «плюс-минус». Эти КОО связывают параметры $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$. В графе, представленном на рис. 2, КУО формируется отношениями типа «минус-минус» между параметрами $R/(R+G+B)$ и $G/(R+G)$. В графе, представленном на рис. 3, КУО формируется отношениями того же типа между параметрами $G/(R+G+B)$ и R/G . Наличие КОО ослабляют дестабилизирующее действие КУО. Также в обоих вариантах графов отношений присутствуют КОО, функционирующие за счет отношений типа «плюс-минус» между параметрами $G/(R+G)$ и R/G .

Таблица 3

Первый вариант идеализированной траектории системы

Колориметрические параметры	Условные шаги по времени											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R/(R+G+B)$	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2	1	1
$G/(R+G+B)$	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	2
$G/(R+G)$	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2
R/G	3	2	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3

Таблица 4

Второй вариант идеализированной траектории системы

Колориметрические параметры	Условные шаги по времени											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R/(R+G+B)$	3	2	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3
$G/(R+G+B)$	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2
$G/(R+G)$	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	2
R/G	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	1	1

Результаты проведенного анализа говорят о предпочтительности использования в качестве СКП математического выражения, описывающего отношения параметров $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$. Связывающие их отношения типа «плюс-минус», например в случае модели отношений «хищник-жертва» Лотки-Вольтерра [16] предполагают чередование максимумов значений связанных этими отношениями компонентов системы. В рамках рассматриваемой проблемы важна степень сближенности или удаленности этих максимумов, которая влияет на величину разброса значений отношения соответствующих параметров. При этом на отношения типа «плюс-минус» между параметрами $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$, поддерживающие гомеостаз системы, накладываются другие межкомпонентные отношения, формирующие КУО, действующие против гомеостаза. Для детализации характера динамики и определения степени сближенности максимумов значений этих параметров анализировался вид обоих вариантов ИТС, представленных в табл. 3, 4. В обоих вариантах ИТС наблюдается значительная степень взаимной удаленности максимумов значений большинства КП (за исключением параметров $G/(R+G+B)$ и $G/(R+G)$) используемых при математическом моделировании.

Такая значительная степень взаимной удаленности максимумов значений КП дает определенные основания для дополнения рабочей гипотезы положением о том, что в качестве СКП может быть использовано значение индекса Шеннона (H), вычисленное по формуле (1):

$$H = -\sum_{i=1}^k P_i \cdot \log_2 P_i, \quad (1)$$

где P_i – доля значения i -го колориметрического параметра в суммарном значении всех колориметрических параметров; k – количество колориметрических параметров.

По аналогии с Маргалевой моделью сукцессии [20] значительная взаимная удаленность максимумов КП может быть использована как диагностический признак характера биопродукционных процессов в сообществе ППВВР. При этом низкие значения индекса Шеннона могут служить выражением значительной взаимной удаленности максимумов.

Однако различия в размерности используемых КП могут создать сложности, которые уменьшают привлекательность такого подхода к формированию СКП. К тому же наиболее заметная взаимная удаленность максимумов наиболее ярко выражена в двух парах признаков, а использование индекса Шеннона для определения степени выравненности в паре признаков выглядит неоправданным усложнением.

Близкая размерность используемых КП обуславливает привлекательность выбора для создания СКП формализованного описания отношений значений параметров $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$, например, степени их выравненности. Анализ табл. 3, 4 указывает на наличие в обоих вариантах ИТС максимально широкого набора (выраженных в условных баллах) значений степени выравненности значений этих КП. Следовательно, математическое выражение для расчета СКП должно отражать размах значений степени выровненности значений параметров $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$.

Значения этой величины, выполняющей роль СКП, могут быть обозначены на разных участках изображения массива ППВВР соответствующими условными цветами. Анализ обработанных таким образом цифровых фотографий позволит получить информацию о распределении в пространстве и времени разных состояний биопродукционных процессов в массивах ППВВР.

В соответствии гипотезой, сформулированной на первом этапе работы, на втором этапе в качестве СКП использовались значения среднего квадратичного отклонения значений индекса C , определяемые по формуле (2):

$$C = \frac{|R - G|}{R + G + B}, \quad (2)$$

где R , G , B , соответственно – процент красных, зеленых и синих элементов пикселя.

В результате выполнения второго этапа настоящей работы были получены обработанные изображения участков плавней, которые могут быть использованы как естественные биоплато для элиминации угроз биобезопасности. При обработке изображений их участки обозначались условными цветами, соответствующими среднему квадратичному отклонению значений индекса S (рис. 1, *в*).

Для обработки были выбраны фотографии одного и того же участка дунайских плавней в периоды вегетационного сезона, которые заведомо отличаются по характеру соотношения процессов фотосинтетической продукции, накопления мертвой биомассы и ее деструкции.

Были обработаны снимки, сделанные в июне (рис. 1), марте (рис. 4), августе (рис. 5) и сентябре (рис. 6, 7) 2014 года.

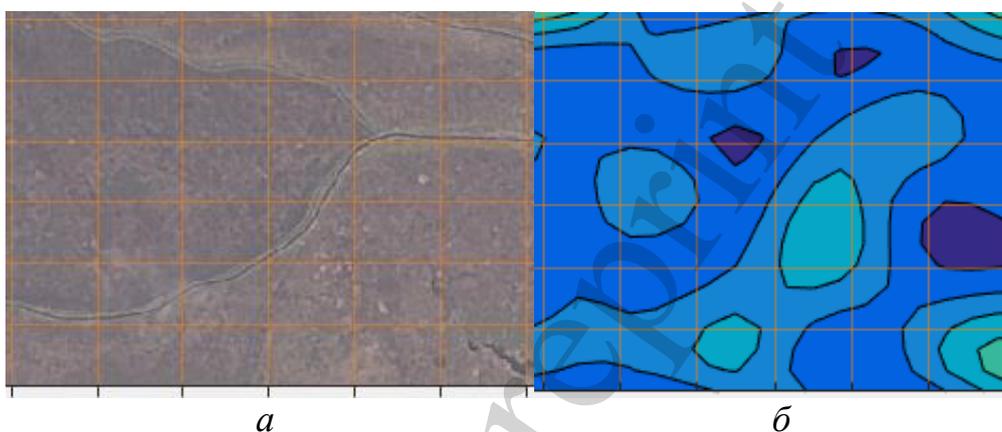


Рис. 4. Эталонный снимок участка дунайских плавней, сделанный 11 марта 2014 года: *a* – необработанный снимок; *б* – обработанный снимок

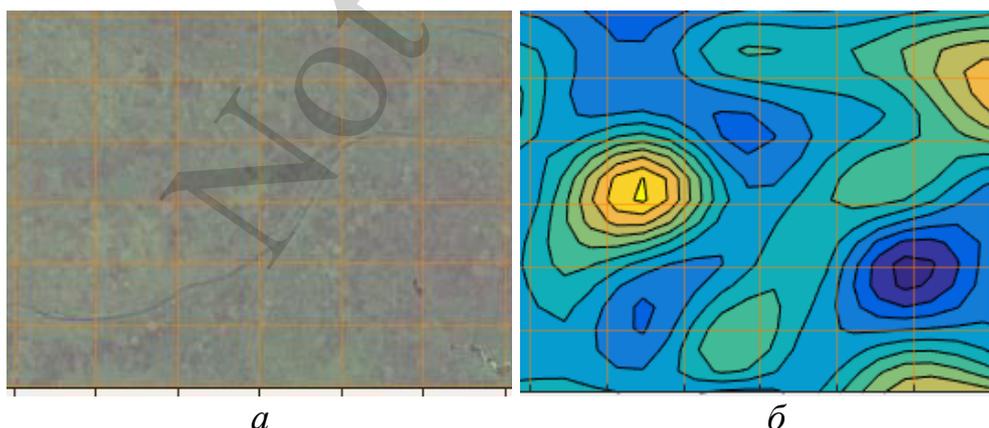


Рис. 5. Снимок участка дунайских плавней, сделанный в 25 августа 2014 года: *a* – необработанный снимок; *б* – обработанный снимок

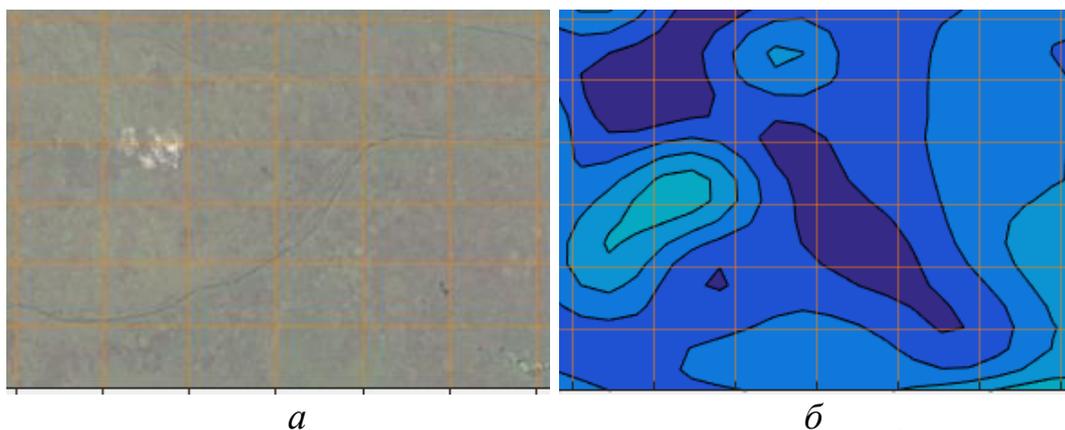


Рис. 6. Снимок участка дунайских плавней, сделанный 10 сентября 2014 года: *a* – необработанный снимок; *б* – обработанный снимок



Рис. 7. Необработанный снимок участка дунайских плавней, сделанный 19 сентября 2014 года

Сравнение необработанных снимков не позволяет уверенно зафиксировать указанную смену состояний. На обработанных снимках она выражена достаточно сильно.

6. Обсуждение результатов моделирования характера отношения колориметрических параметров естественных биоплато

Различия в значениях СКП, обнаруженные при сравнении обработанных снимков, сделанных в разные периоды вегетационного сезона, обусловлены различиями в характере соотношения процессов продуцирования живой и накопления мертвой биомассы ПШВР.

В июне, в середине вегетационного периода, процессы накопления живой растительной биомассы наиболее выражены. Эти процессы обеспечивают очистку воды. Поэтому обработка эталонного снимка, сделанного в июне (рис. 1), позволяет найти признаки периода с максимальной интенсивностью очистки воды.

В марте в растительном сообществе накоплены большие количества отмершей биомассы. Это создает предпосылки для вторичного загрязнения

воды в результате разложения этой биомассы. Обработка эталонного снимка, сделанного в марте 2016 года (рис. 4), позволяет найти признаки периода с максимальным риском вторичного загрязнения воды.

В результате сравнения рис. 1 и рис. 4 установлено, что большей выраженности процессов фотосинтетической продукции соответствует большее разнообразие значений среднего квадратичного отклонения индекса C .

Этот результат позволяет сформулировать очередную рабочую гипотезу о том, что распределение значений среднего квадратичного отклонения значений индекса C позволяет дистанционно диагностировать состояние биопродукционных процессов в массиве ППВВР. Такой анализ может включать сопоставление с обработанными изображениями каких-либо эталонных растительных сообществ и стадий их функционирования. Сравнение снимков, представленных на рис. 5–7, подтверждает эту рабочую гипотезу.

Изменению состояния массива ППВВР, зафиксированному на рис. 5, *a* и рис. 6, *a*, соответствуют процессы окончания вегетационного периода. В этот период продуцирование живой растительной биомассы сменяется накоплением мертвой биомассы. Удаление мертвой биомассы на временных биоплато является необходимым условием предотвращения угрозы вторичного загрязнения воды.

Различие в характере обработанных изображений (рис. 1, *б*, 4, *б*, 5, *б*, 6, *б*) позволяет зарегистрировать наличие тенденции к накоплению мертвой растительной биомассы. Дальнейшее развитие этой тенденции достаточно выразительно видно на рис. 7. Сдвиг колориметрических параметров в сторону красной составляющей, характерный для отмирания растительной биомассы, виден на рис. 7 даже без обработки. Обработка изображения (рис. 6) позволяет зафиксировать этот сдвиг на неделю ранее, что при эксплуатации временных естественных биоплато является несомненным преимуществом.

Однако следует заметить, что в работе был использован лишь один возможный подход к решению поставленной задачи, использующий результаты формализованного описания структуры отношений и динамики сравнительно просто измеряемых колориметрических параметров фитоценоза. Использование индекса C , в сравнении с известными вегетационными индексами, предполагает некоторое огрубление получаемых отношений растительных пигментов. Тем не менее, возможность определения периода вегетации биоплато только лишь по RGB-модели его изображения является подтверждением целесообразности дальнейших исследований в этой области.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности представленного подхода при разработке методов и информационных систем, позволяющих аэрокосмическими методами определять состояние биопродукционных процессов в сообществах полупогруженных высших водных растений.

Возможность дистанционной диагностики состояния естественных биоплато значительно повышает эффективность стратегий обеспечения биобезопасности питьевого и других видов водопользования. Это особенно актуально в экстремальных ситуациях и при реализации некоторых видов

агротехнологий. Примером таких агротехнологий может быть разведение водоплавающей птицы с использованием естественной кормовой базы водоемов и водотоков.

6. Выводы

1. С использованием ДМДС была проведена обработка эталонных космических снимков плавней в устье Дуная. Для анализа структуры отношений колориметрических параметров построены матрицы и графы межкомпонентных отношений. Для анализа динамики отношений колориметрических параметров построены идеализированные траектории анализируемых биосистем.

2. В результате структурного параметрического моделирования в качестве СКП предложено использовались значения среднего квадратичного отклонения значений индекса C , отражающего размах значений степени выровненности значений параметров $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$. Выбранная структура индекса C обусловлена наличием уникальной постоянной обратной взаимосвязи между параметрами $G/(R+G+B)$ и $R/(R+G+B)$ в каждой из возможных матриц отношений колориметрических параметров.

3. Сравнение результатов обработки космических снимков плавней в устье Дуная, отражающих различные биопродукционные процессы растительных сообществ, позволило выделить признаки риска вторичного загрязнения воды. Установлено, что высокие значения предложенного СКП (более 10000) указывают на выраженность процессов фотосинтетической продукции. Низкие значения среднего квадратичного отклонения значений индекса C являются маркером деструкции биомассы. Выделенные признаки позволяют дистанционно диагностировать состояние естественных биоплато и своевременно реагировать на возникающие угрозы биобезопасности водопользования.

Литература

1. Козлова, Т. В. Использование мускусной утки в интегрированном рыбоводстве на мелиоративном водоеме Припятского Полесья [Текст] / Т. В. Козлова, А. И. Козлов, М. В. Шалак, О. А. Глушаков // Рыбоводство и рыбное хозяйство. – 2014. – № 1. – С. 40–45.

2. Wikramaratna, P. S. Contact between bird species of different lifespans can promote the emergence of highly pathogenic avian influenza strains [Text] / P. S. Wikramaratna, O. G. Pybus, S. Gupta // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111, Issue 29. – P. 10767–10772. doi: 10.1073/pnas.1401849111

3. Титова, Т. А. Эффективность применения инфльтрационных биоплато при очистке коммунальных сточных вод [Текст] / Т. А. Титова // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2013. – № 15 (20). – С. 67–70.

4. Матюшенко, В. А. Оценка вегетационного индекса геосистем речичского района [Текст]: VIII Всерос. студ. науч. конф. / В. А. Матюшенко // Творчество юных – шаг в успешное будущее. – Томск, 2015. – С. 528–530.
5. Черепанов, А. С. Вегетационные индексы [Текст] / А. С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
6. Антипов, Т. И. Примеры автоматизированных методов анализа геоизображений для агроэкологической оценки земель [Текст] / Т. И. Антипов, А. И. Павлова, В. А. Каличкин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 40–44.
7. Hohm, T. A Dynamic Model for Stem Cell Homeostasis and Patterning in Arabidopsis Meristems [Text] / T. Hohm, E. Zitzler, R. Simon // PLoS ONE. – 2010. – Vol. 5, Issue 2. – P. e9189. doi: 10.1371/journal.pone.0009189
8. Lee, Y.-S. Forecasting time series using a methodology based on autoregressive integrated moving average and genetic programming [Text] / Y.-S. Lee, L.-I. Tong // Knowledge-Based Systems. – 2011. – Vol. 24, Issue 1. – P. 66–72. doi: 10.1016/j.knosys.2010.07.006
9. Anderson, T. W. The statistical analysis of time series [Text] / T. W. Anderson. – John Wiley & Sons, 1994. – 704 p. doi: 10.1002/9781118186428
10. Dupont, F. A NEMO based modelling system for the Great Lakes [Text] / F. Dupont, C. Padala, H. Anning et. al. // 15th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. – Burlington, 2011. – P. 46–52.
11. Gal, G. Implementation of ecological modeling as an effective management and investigation tool: Lake Kinneret as a case study [Text] / G. Gal, M. R. Hipsey, A. Parparov, U. Wagner, V. Makler, T. Zohary // Ecological Modelling. – 2009. – Vol. 220, Issue 13-14. – P. 1697–1718. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.04.010
12. Hernandez-Clemente, R. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT+DART simulations [Text] / R. Hernandez-Clemente, R. M. Navarro-Cerrillo, P. J. Zarco-Tejada // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 127. – P. 298–315. doi: 10.1016/j.rse.2012.09.014
13. Feret, J.-B. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments [Text] / J.-B. Feret, C. François, G. P. Asner, A. A. Gitelson, R. E. Martin, L. P. R. Bidel et. al. // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112, Issue 6. – P. 3030–3043. doi: 10.1016/j.rse.2008.02.012
14. Chavez, R. O. Modelling the spectral response of the desert tree Prosopis tamarugo to water stress [Text] / R. O. Chavez, J. G. P. W. Clevers, M. Herold, M. Ortiz, E. Acevedo // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2013. – Vol. 21. – P. 53–65. doi: 10.1016/j.jag.2012.08.013
15. Ruiz-Verdu, A. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass [Text] / A. Ruiz-Verdu, S. G. H. Simis, C. de Hoyos, H. J. Gons, R. Pena-Martinez // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112, Issue 11. – P. 3996–4008. doi: 10.1016/j.rse.2007.11.019

16. Zholtkevych, G. N. Discrete Modeling of Dynamics of Zooplankton Community at the Different Stages of an Antropogeneous Eutrophication [Text] / G. N. Zholtkevych, G. Y. Bepalov, K. V. Nosov, M. Abhishek // Acta Biotheoretica. – 2013. – Vol. 61, Issue 4. – P. 449–465. doi: 10.1007/s10441-013-9184-6
17. Zholtkevych, G. N. Descriptive models of system dynamics [Text] / G. N. Zholtkevych, K. V. Nosov, Y. G. Bepalov et. al. // 12th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications, ICTERI 2016. – Kyiv, 2016. – P. 57–72.
18. Высоцкая, Е. В. Моделирование динамики согласованности параметров сердечно-сосудистой системы на разных стадиях адаптационного синдрома [Текст] / Е. В. Высоцкая, Ю. Г. Беспалов, Л. И. Рак и др. // Вісник НТУ «ХП». – 2016. – № 4 (1176). – С. 74–78.
19. Vysotskaya, E. V. Unmasking the soil cover's disruption by modeling the dynamics of ground vegetation parameters [Text] / E. V. Vysotskaya, G. N. Zholtkevych, T. A. Klochko et. al. // Вісник Національного Технічного Університету України «КП». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2016. – № 64. – С. 101–109.
20. Landsat collections. Provding a stable environmental record [Electronic resource]. – Available at: <https://landsat.usgs.gov/>
21. Высоцкая, Е. В. Использование Маргалёфовой модели сукцессии в технологиях дистанционного обнаружения признаков антропогенных воздействий на растительный покров [Текст] / Е. В. Высоцкая, Ю. Г. Беспалов, А. И. Печерская, Д. А. Парвадов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 2 (76). – С. 15–19.