

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО МАТЕРИАЛАМ МНОГОЗОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

К. Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 1 марта 2012 г.

Аннотация. В статье описывается методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища с помощью слежения за состоянием фитопланктона. Исходным материалом для анализа использованы архивные данные дистанционного зондирования. Описываются спектральные характеристики формирующихся и зрелых скоплений фитопланктона. Предложен специфический численный индекс, позволяющий эффективно выявлять такие скопления.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, фитопланктон, водохранилище, вегетационный индекс, спектральное пространство.

Abstract. In article the technique of tracking a condition of a phytoplankton of a water basin is described. An initial data for the analysis is the data of remote sensing. Spectral characteristics of formed and mature congestions of a phytoplankton are described. The specific numerical index allowing effectively revealing such congestion is offered.

Key words: remote sensing, phytoplankton, water basin, vegetation index, spectral space

Введение

Воронежское водохранилище испытывает значительное воздействие окружающей его городской агломерации г. Воронежа. Ливневые и осветлённые канализационные стоки превращают этот водоём в гиперэвтрофный. Это способствует интенсивному размножению в тёплое время года фитопланктона. Основу этого альгоценоза составляют одноклеточные сине-зелёные водоросли [1].

Как уже отмечалось нами ранее [2], в некоторые наиболее благоприятные для них годы эти водоросли интенсивно размножаются, что приводит к серьёзному осложнению экологической ситуации в водохранилище и на его берегах [3], а также способствует ухудшению качества питьевой воды, добываемой из неоген-четверичного коллектора, подпитываемого водами водохранилища [4]. Под действием ветра и волн скопления водорослей сбиваются в крупные массы, которые становятся настолько плотными, что местами полностью покрывают поверхность воды и даже иногда выступают над ней. В таких случаях воздух вокруг наполняется неприятным запахом от их гниения, также отравляется и вода. Особенно интенсивно подобные процессы развиваются во второй половине лета в южной части водохранилища.

Была поставлена задача разработать методику слежения за состоянием планктонных альгоценозов водохранилища с целью оперативного выявления предпосылок для образования мощных скоплений водорослей. Исходным материалом для анализа использованы архивные данные дистанционного зондирования, выполненные с помощью тематических картографов TM и ETM+ американских космических аппаратов Landsat-5 и Landsat-7.

Описываются спектральные характеристики формирующихся и зрелых скоплений фитопланктона.

Методика

Полный архив материалов программы Landsat по квадрату 176-24, включающему северную часть Воронежской области в настоящее время измеряется сотнями сцен. Однако, если выбрать из них те, на которых акватория Воронежского водохранилища практически свободна от облаков, и, кроме того, которые относятся к активному вегетационному периоду (с мая по сентябрь), то останется только 40 сцен. Тем не менее, они перекрывают значительный промежуток времени с 1984 по 2011 г.

За это время наблюдалось несколько мощных всплесков размножения фитопланктона. В 1988, 1993, 2004, 2009 и 2011 годах сине-зелёные в течение лета водоросли размножились настолько

сильно, что их скопления могли собираться в выдающиеся во всех отношениях массы. В таких случаях на многозональных спутниковых изображениях в пределах акватории южнее Вогрессовского моста отмечается появление волокнисто-перистых объектов, гонимых ветром от одного берега к другому.

В качестве начальной оценки спектральных характеристик были измерены спектры фитопланктона в подобных скоплениях и свободно плавающего в толще воды. Для контроля также были измерены спектры околководной жёсткой растительности и чистой воды (рис. 1). Кстати, воду, свободную от плавающих в ней водорослей, не без труда удавалось найти только в верховьях водохранилища.

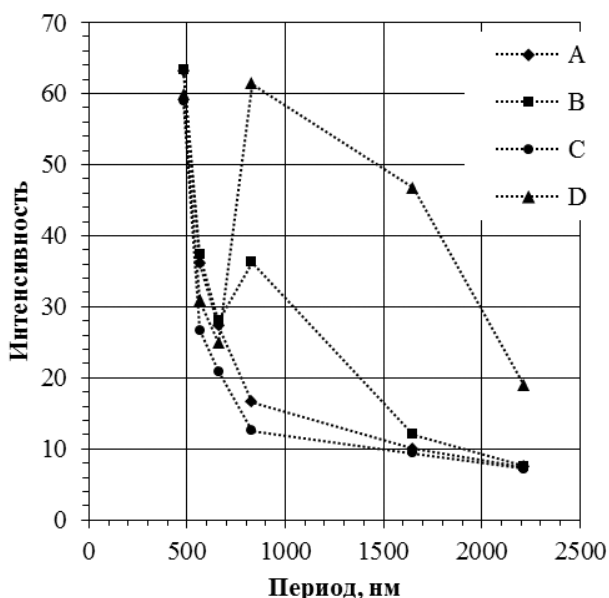


Рис. 1. Усреднённые спектры аквальных объектов: А – вода с рассеянными в толще водорослями, В – вода с плотными массами водорослей, С – чистая вода, Д – прибрежная жёсткая растительность

Рис. 1 демонстрирует как изменяется с частотой интенсивность оптического излучения, отражающегося с поверхности изучаемых объектов. Привязка по частоте осуществлена в соответствии с серединой полосы регистрируемых волн шести каналов сенсора-радиометра: 482.5 нм (синий), 565 нм (зелёный), 660 нм (красный), 830 нм (ближний инфракрасный), 1650 нм (дальний инфракрасный) и 2215 нм (микроволновый). Максимально возможное значение интенсивности равно 255 условных единиц.

Следует отметить, что усреднённые спектры дают только общее представление об отражательных способностях изучаемых объектов. В действи-

тельности возможны некоторые их вариации, что требует более детального рассмотрения.

Сузим дальнейший анализ до каналов 2–4, комбинация которых, называемая «псевдо-цвет», наиболее часто используется для изучения наземной растительности. Сделать это нам позволит тот факт, что в синей, дальней инфракрасной и микроволновой зоне изучаемые объекты различаются мало (за исключением жёсткой околководной растительности). Посмотрим, как в трёхмерном спектральном пространстве отображается вариация спектра фитопланктона. Однако непосредственно сделать это для всех пяти отобранных сцен невозможно. Атмосферные и иные систематические помехи искажают спектры, делают их несопоставимыми.

Тем не менее, путём несложных преобразований эту ситуацию можно исправить. Поскольку к спектру водорослей в большей или меньшей степени примешивается спектр воды, в которой они плавают, то, вычтя этот фон, можно одновременно удовлетворительно учесть некоторое радиометрическое несоответствие между разновременными сценами.

Были проанализированы трёхмерные спектры по отдельности для разных сцен и разных объектов, но на рис. 2 представлены уже обобщённые спектры, включающие в себя всю доступную информацию.

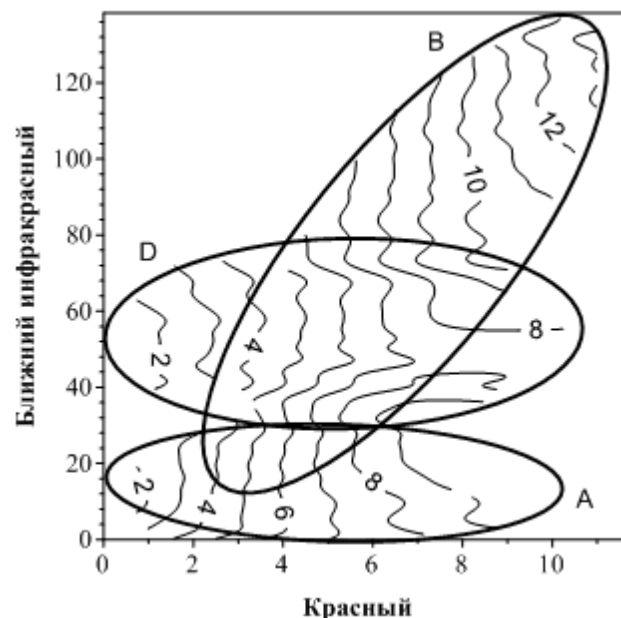


Рис. 2. Распределение отражающих относительных характеристик аквальных объектов в трёхмерном спектральном пространстве (изолиниями показана зелёная составляющая): обозначения А, В и D см. на рис. 1

Результаты

Рассмотрим для начала усреднённые спектральные характеристики (рис. 1). Можно видеть, что, как и следовало ожидать, минимальными отражательными способностями во всех спектральных зонах обладает чистая вода. Однако радиометрическая разрешённость между всеми изученными объектами в видимом диапазоне невелика.

Плавающие в толще воды водоросли лишь увеличивает интенсивность излучения лишь на 4 единицы по первым четырём каналам и совсем не влияют на остальные. В то же время, если водорослей становится так много, что они собираются ветром в массы, выступающие из воды, то сразу начинает проявляться характерная особенность содержащегося в них хлорофилла – по ряду *B* период 830 нм отмечен значительным всплеском интенсивности излучения. Для всех других зон этот ряд ничем больше не выделяется. Таким образом, даже по осреднённым спектрам можно сделать предварительный вывод о том, что в массовые скопления водорослей достаточно уверенно можно выявлять в ближней инфракрасной зоне [5].

Далее перейдём к анализу распределения вариаций полученных спектров в трёхмерном спектральном пространстве. Поскольку мы вычли из наблюдаемых спектров фоновое излучение чистой воды, то на рис. 2 показаны уже относительные величины интенсивности излучения. Интерпретация с выделением кластеров рассеянного и сконцентрированного фитопланктона, а также прибрежной водной растительности представилась возможной только после детального изучения спектров каждого вида объектов в отдельности.

Несмотря на некоторую изменчивость год от года, при совмещении всех спектров в одной координатной системе, обнаружилась стабильная повторяемость характеристик изучаемых объектов. Это даёт основание полагать, что выявленные особенности спектров имеют под собой определённую закономерность, выявленную нами на опыте.

Рис. 2 наглядно демонстрирует, что плавающие в толще воды водоросли, хотя и должны бы отражать инфракрасное излучение, но мы этого не видим, т.к. оно практически полностью поглощается водой. Однако вода с водорослями отличается от чистой воды в зелёной зоне. Попросту говоря, такая вода и из космоса выглядит в той или иной мере зелёной. Явный тренд вдоль оси красной составляющей свидетельствует, что помимо водорослей в воде взвешены и минеральные частицы.

Практически ортогонально к кластеру рассеянного фитопланктона расположен в трёхмерном спектральном пространстве кластер сконцентрированных одноклеточных водорослей. При практически такой же интенсивности излучения в красной зоне (очевидно, что илистых частиц в воде столько же), наблюдается полуторакратное превышение зелёной и шестикратное инфракрасной составляющей. Таким образом, мы видим, что в скоплениях фитопланктона, когда его массы показываются над поверхностью воды, возникают условия для полного проявления отражающих способностей хлорофилла. Это позволяет эффективно обнаруживать такие скопления на фоне воды с менее концентрированными водорослями.

Контрольную функцию на рис. 2 выполняет кластер прибрежной жёсткой растительности. Он демонстрирует значительную интенсивность отражения в инфракрасном диапазоне, хотя и не такую интенсивную, как у сине-зелёных водорослей, что может быть связано с более высокой биологической продуктивности последних.

Полученные результаты предоставляют обоснование к вводу специфического для фитопланктона эмпирического индекса, который мы по аналогии с другими вегетационными индексами [6], применяемыми при анализе растительности, предлагаем назвать нормализованным относительным альгоиндексом (НДАИ или NDAI).

NDAI рассчитывается следующим образом:

$$NDAI = \frac{I_G + 2I_{NIR} - I_B - I_R}{I_G + 2I_{NIR} + I_B + I_R} + 0.5,$$

где I_B , I_G , I_R , I_{NIR} – яркость излучения водного объекта в синем, зелёном, красном и ближнем инфракрасном диапазонах соответственно.

Альгоиндекс сконструирован таким образом, чтобы, с одной стороны, нейтрализовать атмосферные помехи, с другой стороны – снять фоновое излучение воды и с третьей стороны – учесть выявленные спектральные характеристики рассеянного и сконцентрированного фитопланктона. Альгоиндекс выражает меру отличия массы водорослей от окружающей их воды. Значения меньше $-0,5$ соответствуют чистой воде; около 0 – слабому размножению фитопланктона; больше $0,5$ – бурному «цветению» воды.

Заключение

В результате проведённого исследования на примере Воронежского водохранилища были выявлены типичные спектральные характеристики

развивающегося планктонного фитоценоза. Показано, что на зрелой стадии он под действием ветра может формировать массовые скопления, которые хорошо выделяются в трёхмерном спектральном пространстве. Предложен специфический численный индекс, позволяющий эффективно выявлять такие скопления.

Описанные результаты были получены по архивным данным. Если в Воронежском университете будет установлен давно ожидаемый аппаратный комплекс для приёма оперативных данных дистанционного зондирования, то это позволит в реальном времени обнаруживать скопления водорослей и организовывать их утилизацию, что будет способствовать улучшению экологической ситуации Воронежского водохранилища.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилова Е. В. Видовой состав, динамика численности и токсичность цианобактерий Шершневского водохранилища Челябинской области : автореф. дис. ... на соискание ученой степени канд. биол. наук / Е. В. Гаврилова. – Пермь : Изд-во Пермского гос. ун-та, 2009. – 25 с.

2. Силкин К. Ю. Материалы дистанционного зондирования Земли. Применение в экологических исследо-

ваниях / К. Ю. Силкин // Материалы научной сессии Воронежского государственного университета. Секция экологической геологии. – Воронеж, 2011. – Вып. 4. – С. 80–83.

3. Строгонова Л. Н. Гидроэкологические проблемы Воронежского водохранилища: оценка роли антропогенных и биотических факторов в пространственно-временной миграции соединений азота и формировании статуса трофии водоема / Л. Н. Строгонова, Н. Ю. Хлызова, М. Н. Бугреева // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: География, геоэкология. – 2001. – № 1. – С. 104–114.

4. Бочаров В. Л. Сравнительная гидрогеохимическая характеристика поверхностных и подземных вод Воронежского водохранилища / В. Л. Бочаров // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2004. – № 1. – С. 159–165.

5. Сапрыгин В. В. Изучение распределения хлорофилла в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений : автореф. дис. ... на соискание ученой степени канд. геогр. наук / В. В. Сапрыгину – Мурманск : Изд-во МБИ КНЦ РАН, 2011. – 25 с.

6. Wardlow B. D. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains / B. D. Wardlow, S. L. Egbert, H. J. Kastens // Remote Sensing of Environment. – Lincoln : University of Nebraska, 2007. – № 108. – P. 290–310.

*Воронежский государственный университет
К. Ю. Силкин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологической геологии
Тел. 8-909-210-05-52
Const.Silkin@mail.ru*

*Voronezh State University
K. Yu. Silkin, Candidate of Geological and Mineralogical Science, associate professor of Ecological Geology chair
Tel. 8-909-210-05-52
Const.Silkin@mail.ru*