

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСГРЕССИИ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ВОДОЕМОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ ГЕОБОТАНИЧЕСКИХ ИНДИКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

© 2011 г. В. В. Дмитриев, Е. Н. Финиченко*, Б. Ф. Свириденко

Омский государственный педагогический университет, Омск

**E-mail: efinicyenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.10.2009 г.

На примере изучения заболоченных озер Омской области и прилегающих частей их водосборных бассейнов рассмотрены возможности использования спутниковых данных для дистанционной оценки масштабов трансгрессии водоемов и роста увлажненности территории. В основу положен метод спутниковой фитоиндикации указанных процессов по данным радиометра LISS-III спутниковой платформы IRS-1D. Проведено исследование спектрально-яркостных и вегетативных характеристик различных типов растительности, а также пространственное и высотное (зависящее от рельефа) распределение растительных сообществ. С использованием наземных геоботанических данных проведена оценка точности предложенного метода.

Ключевые слова: данные спутниковых радиометров, водосборные бассейны, заболоченность, геоботанические данные, фитоиндикация, вегетационные индексы, Омская область

ВВЕДЕНИЕ

Для южной части Западно-Сибирской равнины характерны циклические колебания увлажненности, связанные с циклами солнечной активности. Такие смены климатических фаз оказывают огромное и разностороннее влияние на различные отрасли хозяйства региона. Особенно зависимо от них с.-х. производство: от характера текущей фазы увлажненности зависит площадь пахотнопригодных угодий, урожайность зерновых и кормовых культур, состояние и продуктивность лугов, продуктивность животноводства, численность кровососущих насекомых и многое другое (Максимов и др., 1979; Максимов, 1989). В современных условиях применение данных ДЗ в сочетании с маркерами, полученными наземными методами, позволяет оперативно оценивать изменения площади и некоторые важные экологические параметры гидроморфных экосистем Западной Сибири (Свириденко и др., 2005; Свириденко и др., 2007).

В 2005–2007 гг. в отдельных районах Западной Сибири был отмечен значительный рост увлажненности территории, вследствие чего акватории озер распространились не только на пограничные луговые экосистемы, но также заняли часть площади лесных биоценозов и агроценозов. Вокруг заболоченных днищ депрессий, занятых в регрессивную фазу длительно формирующейся болотной растительностью, возникли периферические акватории, на которых начала формироваться

водная растительность из несбалансированных группировок – проценозов. В водоемах проценозы за один-два вегетационных сезона достигают высокого уровня сомкнутости. Они имеют значительную пространственную протяженность, четко ограничены как от стабильных болотных фитоценозов, с которыми контактируют со стороны водоемов, так и от наземных луговых или лесных фитоценозов, с которыми граничат со стороны прилегающей суши. Поэтому проценозы хорошо выявляются на спутниковых снимках и могут служить индикаторами (маркерами) трансгрессивной фазы циклов увлажненности исследуемых территорий. Возможность использования подобных маркеров для оценки степени обводненности исследуемой территории была рассмотрена в статьях (Свириденко и др., 2005; Финиченко и др., 2009). В этих работах показана возможность использования метода спутниковой фитоиндикации для дистанционной оценки масштабов трансгрессии водоемов и роста увлажненности территории, занимаемой тестовыми участками, исследованных наземными методами. В работах также дана оценка точности разработанного алгоритма.

Цель данной работы:

– показать возможность распространения алгоритма, апробированного на тестовых участках, на достаточно обширные территории Называевского р-на Омской обл. Проверить, сохраняются

ли закономерности, полученные для тестовых участков, за их пределами;

– оценить величину трансгрессии исследуемого участка;

– исследовать спектрально-яркостные, вегетативные характеристики растительности различных типов покрытий;

– проанализировать высотное распределение различных типов растительности.

АЛГОРИТМ ФИТОИНДИКАЦИИ

Отработка метода спутниковой фитоиндикации и оценка его точности были осуществлены на базе двух тестовых участков, включающих заболоченные озера и прилегающие части их водосборов (“северное” – с координатами центра 55°31'16" с.ш. и 71°33'48" в.д. и “южное” – с координатами центра 55°29'03" с.ш. и 71°30'33" в.д.). Геоботанический анализ земных покровов этих участков позволил достаточно четко выделить основные типы покрытий, присутствующих на данной территории (приведены далее). Для каждого типа покрытий были выделены эталонные участки, которые использовались при построении классификационного изображения. Кроме наземных данных было использовано изображение земной поверхности, полученное радиометром LISS-3 спутниковой платформы IRS-1D (<http://www.nrsa.gov.in/satellites/irs-1d.html>) 8 августа 2005 г. Пространственное разрешение на земной поверхности после проведения геометрической коррекции составляло 23 м в пикселе. Облачное покрытие составляло 0%. Таким образом, искажающее влияние земной атмосферы сводилось к избирательному поглощению в газах и аэрозолях. Влияние последнего минимизировано за счет направленного выбора спектральных каналов. Географическая привязка была выполнена в проекции UTM, зона N43, геоид WGS84 (Сушкевич, 2006; Сухих, 2005). Ценотический состав растительности этих озер Называевского р-на Омской обл. и основные результаты исследования их трансгрессии на основе метода спутниковой фитоиндикации представлены в статье (Финиченко и др., 2009). Следует отметить, что данные, полученные на тестовых участках, с помощью разработанного алгоритма, достаточно хорошо совпадали с наземными геоботаническими данными.

В этой статье рассмотрены результаты работы по распространению разработанного алгоритма спутниковой фитоиндикации на территорию всего Называевского р-на и прилегающие к нему территории соседних районов. Границы исследуемой территории определялись размерами снимка. Полный кадр включал 2066 пикселей (47.5 км) по широте и 2014 пикселей (46.3 км) по долготе.

Центр кадра имел координаты 55°29'43" с.ш. и 71°30'49" в.д., в пределах кадра географические координаты менялись от 55°17' до 55°42' с.ш. и от 71°08' до 71°53' в.д.

Как и для тестовых участков, для численной оценки площадей был использован алгоритм автоматической классификации и разделения земных покрытий. За основу был взят метод обучаемой классификации с использованием критерия максимального правдоподобия (Сушкевич, 2006). Однако, учитывая тот факт, что биологическое разнообразие на полном кадре было выше, чем на тестовых участках, классификация была уточнена и к исходным семи типам покрытий были добавлены еще два дополнительных. В конечном виде классификация включала в себя следующие девять типов покрытий:

№ 1 – открытая водная поверхность в центре депрессий;

№ 2 – болотные (тростниковые и ивовые) формации;

№ 3 – водная тростниковая формация;

№ 4 – водные осоковые (осока береговая), рогозовые, тростяковые формации на обводненной периферии депрессий;

№ 5 – луговые (вейниковые, полынно-разнотравные, кострцовые, пырейные) формации;

№ 6 – молодые, восстанавливающиеся после рубки, лесные (березовые, осиново-березовые) формации;

№ 7 – зрелые лесные (березовые, осиново-березовые) формации;

№ 8 – лесные сосновые искусственные насаждения;

№ 9 – пашни без растительного покрова.

Тип покрытия № 4 выступает в качестве маркера увлаженности исследуемых территорий, поскольку в нем представлена растительность, развивающаяся на вновь увлажненной территории. Виды растительности, отнесенные к покрытиям № 2 и № 3, являются стабильными болотными фитоценозами.

Поскольку разделяемые поверхности имеют близкие спектрально-яркостные характеристики, а количество используемых каналов невелико, для более уверенной классификации были созданы еще два дополнительных слоя: слой цифровой модели рельефа (ЦМР) и слой нормированного дифференциального вегетативного индекса (NDVI) (Сухих, 2005). Слой ЦМР был построен по данным миссии SRTM, оригинальные данные были приведены к разрешению 23 м и конвертированы в избранную картографическую проекцию. Относительно слоя ЦМР следует сделать следующее уточнение. В исходном виде этот слой отражает общий ход рельефа местности и локальные высотные особенности рельефа, следовательно, на

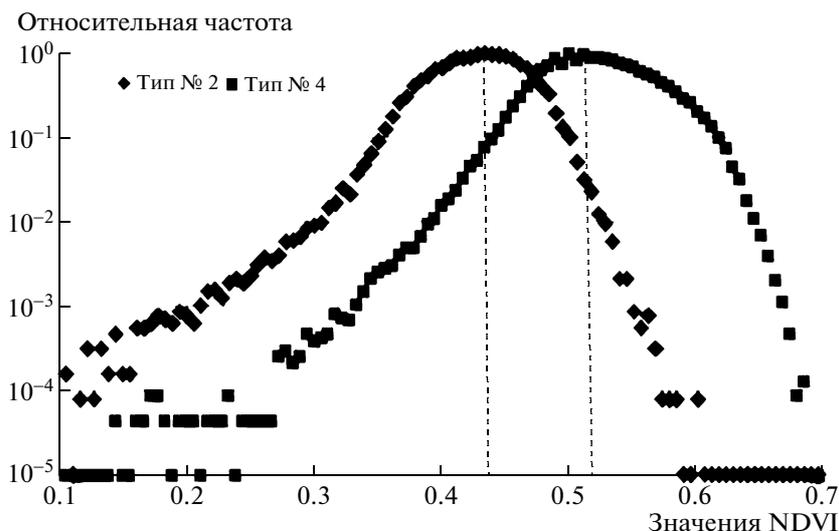


Рис. 1. Распределение количества пикселей от значения NDVI для типов покрытий № 2–№ 4. По оси абсцисс отложены значения NDVI, по оси ординат – относительная частота встречаемости пикселей, соответствующих данному значению NDVI.

нем одни и те же природные объекты могут находиться на разных абсолютных высотах. Поэтому для того, чтобы можно было использовать этот слой для дальнейшей классификации, оказалось необходимым искусственно “выровнять” ЦМР, убрав крупномасштабные особенности рельефа (Финиченко и др., 2009).

Для “обучения” алгоритма на исходном изображении были выделены образцовые участки (не менее семи на каждый тип покрытия), которые по наземным данным однозначно можно было отнести к какому-либо из выделяемых типов покрытий.

Тем не менее и в этом варианте оказалось сложным разделять некоторые типы покрытий, поскольку они имели близкие по значению спектрально-яркостные характеристики, например типы № 1 (открытая водная поверхность) и № 9 (пашни без растительного покрова). Поэтому было принято решение провести детальную классификацию отдельно в котловинах озер и на суходолах. Для этого были созданы две маски: маска 1, включающая только котловины озер, и маска 2, содержащая только суходолы. При классификации с использованием маски 1 учитывались только типы покрытий с № 1 по № 5. Логично предположить, что покрытия с № 6 по № 9 в котловинах озер встречаться не должны (что подтверждается наземными исследованиями озер на тестовых участках). При использовании же в процессе классификации маски 2 учитываются типы покрытий с № 4 по № 9, не учитывались типы с № 1 по № 3. Отсутствие этих типов покрытий на суходолах также подтверждается наземными исследованиями. Затем, после совмещения, было получено единое

классифицированное изображение по всему исследуемому району (Финиченко и др., 2009).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа полученной классификации по каждому из типов покрытия был проведен статистический анализ спектрально-яркостных, вегетативных и высотных характеристик. Наиболее показательными оказались результаты для NDVI и высотного распределения растительности различных типов, которые и будут рассмотрены далее. Следует заранее оговорить следующее обстоятельство: поскольку количество пикселей, отнесенных к различным типам покрытий, отличается на порядки, прямое сравнение статистических данных неудобно. Поэтому все результаты были нормированы на единицу по величине максимума, в результате все приводимые далее относительные частоты встречаемости пикселей меняются в промежутке от нуля до единицы и имеют максимальное значение, равное единице.

Как уже указывалось выше, индикатором роста увлажненности являются растительные сообщества, образующиеся на недавно обводненной периферии котловин озер, в новом варианте классификации им соответствует тип покрытия № 4. Растительность стабильных (центральных) частей озер соответствует покрытию № 2 и № 3. В этом случае имеет смысл ожидать более активной вегетации для новообразованных растительных сообществ (тип № 4) (Свириденко, Дмитриев, 2004; Свириденко и др., 2005). Данное соображение подтверждается рис. 1, на котором приведено распределение NDVI для покрытий № 2 и № 4.

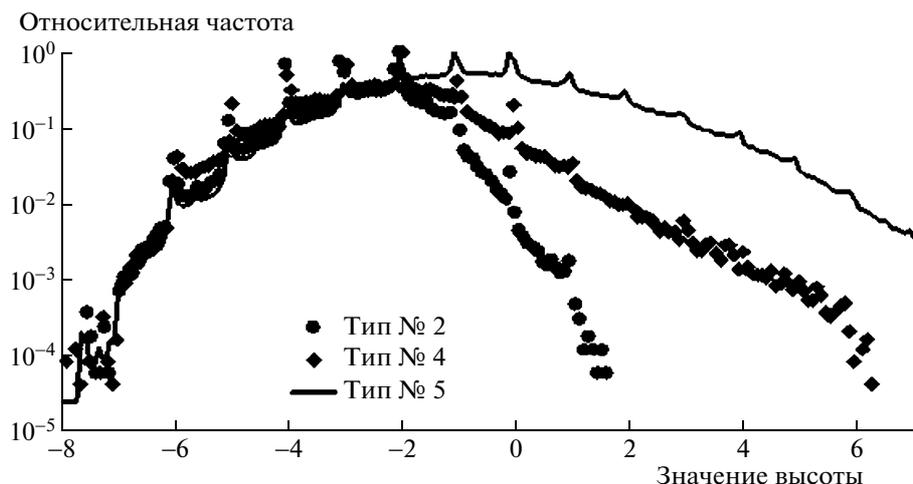


Рис. 2. Распределение количества пикселей от высоты поверхности для типов покрытий № 2, № 4 и № 5. По оси абсцисс отложены значения высоты, полученные по сглаженному слою ЦМР, по оси ординат — относительная частота встречаемости пикселей, соответствующих данному значению высоты.

Из рисунка видно, что общий ход распределения для указанных покрытий идентичен, но наиболее вероятные значения NDVI для них составляют 0.44 и 0.52 соответственно.

Не менее показательными оказались результаты для распределения различных типов растительности по высоте (по рельефу). Напомним, что в данной работе для построения классификационного изображения использован выровненный рельеф. Поэтому все высоты отсчитываются от некоторого среднего уровня высот по данному региону. Фактически различные типы покрытий оказалось возможным разделить по трем высотным ярусам. Данное утверждение иллюстрирует рис. 2, на котором хорошо заметно разделение по высотам для растительности типов № 2, № 4 и № 5. Так, вероятность встречи растительности, отнесенной к типу № 2 на высоте более 1 м, — менее 1% (99% растительности этого класса растет на высотах до 1 м). Вероятность встречи растительности, отнесенной к типу № 4, на высоте более 2 м также меньше 1%. Вероятность встречи растительности, отнесенной к типу № 5, на высоте более 6 м меньше 1%. Полученный результат полностью соответствует ожиданиям и геоботаническим закономерностям. Растительность типа № 2 формируется в центральных, наиболее низких частях озерных котловин. Новообразовавшаяся (при повышении уровня озера) растительность типа № 4 располагается на краях котловин, т.е. выше растительности типа № 2. И, наконец, растительность типа № 5 — сухопутные луговые формации — располагается там, куда вода не поднялась, т.е. на самом верхнем ярусе.

На рис. 3 приведены аналогичные данные для покрытий типов № 1—№ 4. Анализ данного графика позволяет подтвердить уже высказанное ра-

нее предположение о наличии высотных ярусов в распределении растительности. В частности, стабильная озерная растительность (тип № 2) занимает высотный ареал, практически совпадающий с высотным ареалом, занятым открытой водной поверхностью (тип № 1). На следующем высотном ярусе расположены типы растительности № 3 и № 4, что является вполне логичным и соответствует данным наземных обследований. Особо следует отметить заметное разделение первого и второго ярусов друг от друга (рис. 2) и весьма хорошее совпадение распределения высот для разных типов покрытий внутри каждого яруса (рис. 3).

Полное классифицированное изображение, построенное с учетом выделенных выше девяти типов покрытий, представлено в (Финиченко и др., 2009). На рис. 4 представлено полное классифицированное изображение территории, но уже в преобразованном виде. Эти изменения заключаются в том, что на классификации оставлен только один класс — класс № 4 (индикатор). Полученное в таком виде изображение наложено на исходный (не выровненный) слой ЦМР. Класс № 4 отображен черным цветом.

Совместный анализ двух типов данных, высотных и классифицированных, позволяет сделать вывод о том, что в 2005—2007 гг. в исследуемом районе Западной Сибири произошло значительное повышение увлажненности. Это следует из того, что на изображении, вокруг днищ депрессий, занятых стабильной болотной растительностью (тип № 2), отмечаются в виде каймы множественные ареалы, на которых начала формироваться водная растительность из несбалансированных группировок — проценозов (тип № 4). При этом тип покрытия № 4, развивающийся либо вблизи, либо вокруг котловин озер, совершенно не встреча-

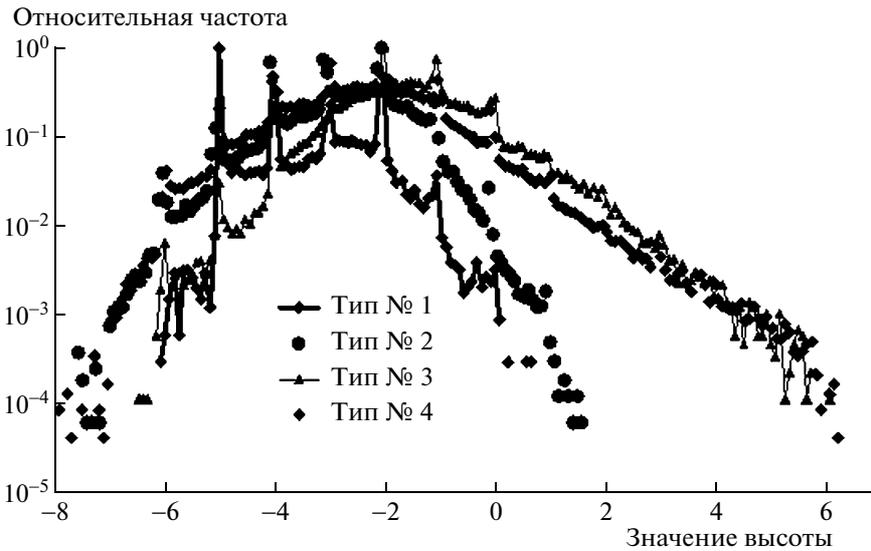


Рис. 3. Распределение количества пикселей от высоты поверхности для типов покрытий № 1–№ 4. По оси абсцисс отложены значения высоты, полученные по сглаженному слою ЦМР, по оси ординат — относительная частота встречаемости пикселей, соответствующих данному значению высоты.

ется на возвышенностях. Он редко занимает всю площадь котловин озер (за исключением наиболее низинных районов северо-восточного края снимка), наиболее характерной пространственной характеристикой для него является своеобразная каемка вокруг озер.

Кроме того, если сопоставить цифровые данные по распределению растительности типа № 4 с данными, полученными из оригинального (не сглаженного) слоя ЦМР, то можно сделать предположение, косвенным образом подтверждающее повышение увлажненности (возможно повышение уровня грунтовых вод). Оно заключается в том, что:

- чем ниже абсолютная высота уровня почвы, тем с большей вероятностью данная территория будет заболачиваться и тем большую площадь должна занимать растительность, относящаяся к типу № 4;
- для стабильной болотной растительности — тип № 2 — зависимость от абсолютной высоты уровня почвы должна проявляться значительно слабее, чем для № 4.

На рис. 5 представлен результат проверки данного предположения. Для получения данных рис. 4 классифицированное изображение и исходный, не сглаженный, слой ЦМР были разбиты на одинаковое количество равных секторов. Затем по классифицированному изображению в каждом из секторов определялась площадь растительности, относящейся к типам покрытий № 2 и № 4. Соответственно по слою ЦМР в каждом секторе определялась средняя высота поверхности. Сопоставление этих данных и дало результат,

представленный на рис. 5. Сплошные линии — линии тренда, которые подтверждают, что с понижением абсолютной высоты поверхности увеличивается площадь, занимаемая болотной растительностью типов № 2 и № 4. В то же время коэффициент корреляции для растительности типа

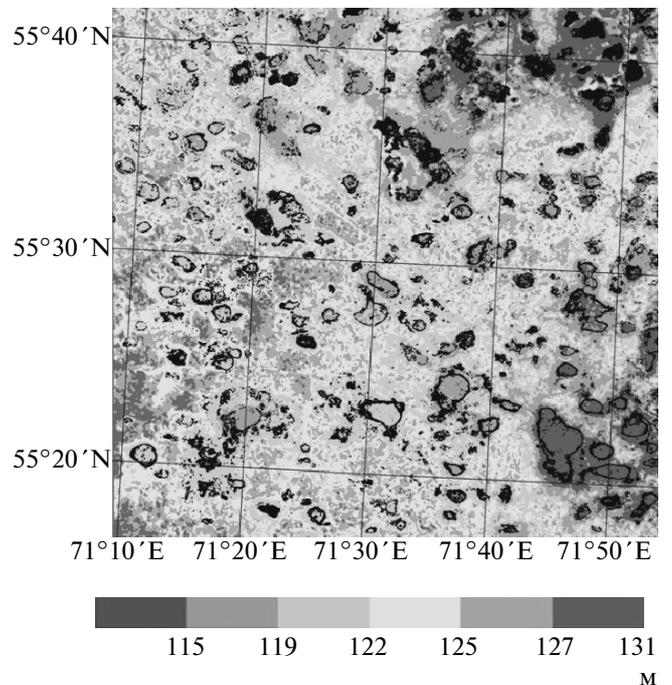


Рис. 4. Вариант исходного слоя ЦМР с наложенным векторным слоем растительности типа № 4. Под картой помещена шкала основных высот.

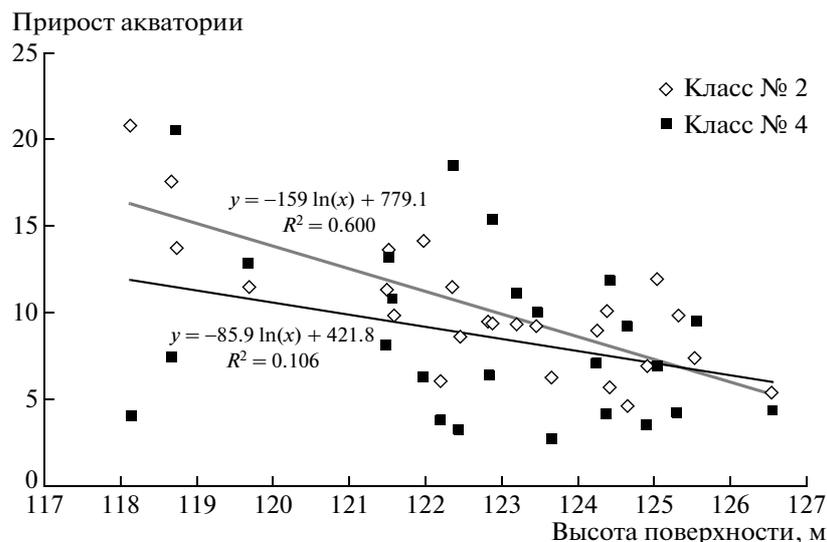


Рис. 5. Зависимость площади, занимаемой растительностью типов № 2 и № 4, от абсолютной высоты уровня почвы. Сплошные линии показывают результат аппроксимации экспериментальных зависимостей.

№ 4 составляет 0.6, а для растительности типа № 2 – всего 0.11, т.е. почти в 6 раз меньше. Таким образом, высказанное предположение может считаться подтвержденным.

Одной из целей работы являлась количественная оценка прироста акваторий озер и как следствие – степень трансгрессии водоемов на исследуемой территории. Она может быть выполнена по классифицированному изображению, для чего необходимо сравнить площади классов № 1, № 2, № 3 с площадью, занимаемой классом № 4. Напомним, что к классу № 1 относится открытая водная поверхность в центре депрессий, а растительность, отнесенная к покрытиям № 2 и № 3, является стабильным болотным фитоценозом. В таблице приведены окончательные результаты по определению площадей озер на 2005 г.

Данные, приведенные в таблице, позволяют утверждать, что площади акваторий озер на исследуемой территории увеличились. Причем трансгрессия акватории достаточно значительна и составляет 113.63% (т.е. размеры некоторых ак-

ваторий увеличились почти в 2 раза). Однако приведенная оценка является средней по региону. На рис. 4 видно, что трансгрессия водоемов сильнее всего выражена в низинных частях исследуемой территории (на нашем изображении это северо-восточный участок).

Следует отметить тот факт, что при распространении алгоритма построения классифицированного изображения за пределы исследованных наземными геоботаническими методами тестовых участков принималось два допущения: 1) стабильность биологического разнообразия: на расширенной территории исследования присутствуют только те типы покрытий, которые есть на тестовых участках. Подобное предположение вполне оправдано, поскольку район исследования располагается в пределах одной и той же климатической зоны и экосистемы; 2) единство классификационного признака: спектрально-яркостные характеристики одного и того же типа покрытия и на тестовом участке и на остальной территории исследования – одинаковы. Для про-

Результаты оценки трансгрессии акваторий заболоченных озер в 2005 г.

№ типа покрытия	Количество пикселей	Площадь, м ²	Отношение площадей покрытий к площади стабильной озерной акватории, %	Отношение площадей покрытий к площади современной озерной акватории, %
1	17555	9286595	100	46.81
2	209395	110769955		
3	140384	74263136		
4	417392	220800368	113.63	53.19
Всего	784726	415120054	213.63	100

верки этого предположения были использованы методы прикладной математической статистики, с помощью которых проведено сравнение параметров сдвига двух совокупностей спектрально-яркостных характеристик покрытий в пределах тестового и расширенного участков. Ниже представлены результаты только для интересующего нас маркерного типа покрытия № 4. На рис. 6 приведено распределение спектрально-яркостных характеристик для класса № 4 на тестовых участках и на увеличенной территории исследования. Как и в предыдущих случаях, данные по оси ординат нормированы на 1.

Для доказательства совпадения распределений был использован один из критериев непараметрической статистики (т.к. изначально вид закона распределения не известен) – критерий Манна–Уитни–Вилкоксона (Кобзарь, 2006). Этот критерий направлен на проверку гипотезы сдвига между двумя статистическими распределениями и относится к ранговым критериям. Отклонение гипотезы сдвига будет служить доказательством второго предположения.

Следуя алгоритму расчета критерия Манна–Уитни–Вилкоксона, для исследуемых в работе статистических распределений были рассчитаны следующие параметры:

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{i,j}, \quad \text{где} \quad h_{i,j} = \begin{cases} 1, & x_i < y_j, \\ 0, & x_i > y_j. \end{cases}$$

Индекс i относится к данным первой выборки (тестовый участок), индекс j – к данным второй выборки (весь снимок)

$$U = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{26} h_{ij} = 231.$$

Для $\alpha = 0.90$ используем следующие табличные данные $U_1(0.90) = 185$ и $U_2(0.90) = 375$, где $U_1(\alpha)$ и $U_2(\alpha)$ – критические значения, приведенные в (Кобзарь, 2006), α – уровень достоверности. Так как $185 < U = 231 < 375$, гипотеза сдвига отклоняется с достоверностью $\alpha = 0.90$.

Для статистики Вилкоксона получилось, что ранговый параметр $R = mn + \frac{n(n+m+1)}{2} - U$; $R = 499$. Расчет R необходим для вычисления параметра W статистики Вилкоксона

$$W = \frac{R - \frac{n(n+m+1)}{2}}{\sqrt{\frac{nm(n+m+1)}{12}}};$$

в нашем случае $W = 0.64$. Для $u_{1+0.90} = u_{0.95} = 1.64$.

Поскольку $W = 0.64 < 1.64$, гипотеза сдвига отклоняется с достоверностью $\alpha = 0.90$.

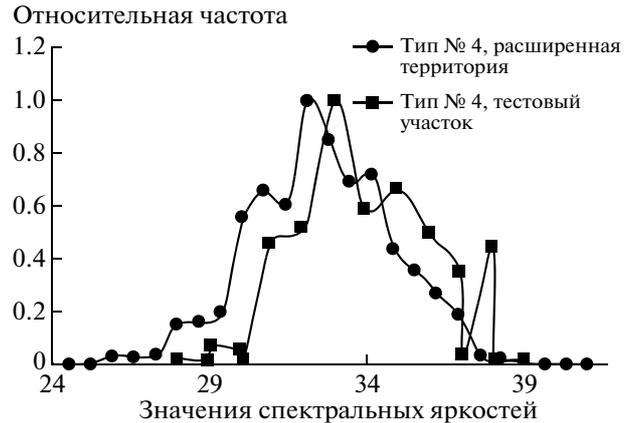


Рис. 6. Распределение количества пикселей от значения спектрально-яркостных характеристик для типа покрытия № 4 на тестовом участке и на расширенной территории исследования. По оси абсцисс отложены значения спектральной яркости, по оси ординат – относительная частота встречаемости пикселей, соответствующих данному значению спектральной яркости.

Аппроксимация Имана. В этом случае гипотеза сдвига отклоняется с достоверностью α' , если выполняется условие $|J| \leq J(\alpha')$.

Находим $J = \frac{W}{2} \left(1 + \left(\frac{n+m-2}{n+m-1-W^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, в нашем случае $J = 0.64$. Вычисляем $z_{1+0.90} = z_{0.95} = 1.64$;

$t_{0.95}(44) = 1.67$, где $(z_{\alpha} - \alpha)$ – квантиль нормального распределения; $t_{\alpha}(f)$ – α – квантиль распределения Стьюдента и $J(\alpha') = \frac{1}{2z_{\alpha'}} + \frac{1}{2t_{\alpha'}(f)}$, для наших данных $J(0.95) = 0.69$. Поскольку $|J| = 0.64 \leq J(0.95) = 0.69$, гипотеза сдвига отклоняется с достоверностью $\alpha = 0.90$.

Таким образом, согласно критерию Уитни–Манна–Вилкоксона, с достоверностью 0.90 можно сделать вывод о совпадении двух совокупностей спектрально-яркостных характеристик покрытия № 4 как в пределах тестового участка, так и на более обширной территории исследования и тем самым подтвердить допущение № 2.

В работе также была проведена оценка еще нескольких типов погрешностей.

1. Погрешность, связанная с точным отделением одного типа покрытия от другого. Речь здесь идет о следующем: при построении классифицированного изображения программа, работая по заданному алгоритму, четко отделяет один пиксел от другого (соответственно относит их к определенному типу покрытия), если более 50% процентов пиксела имеет спектрально-яркостные характеристики, соответствующие этому типу покрытия. Существуют и так называемые пограничные

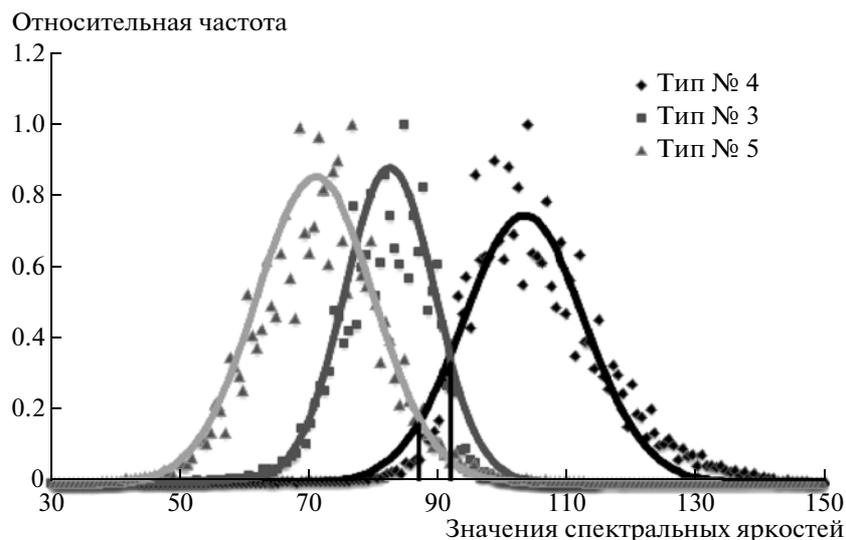


Рис. 7. Распределение количества пикселей от значения спектрально-яркостных характеристик для типов покрытия № 3—№ 5. По оси абсцисс отложены значения спектральной яркости, по оси ординат — относительная частота встречаемости пикселей, соответствующих данному значению спектральной яркости.

пиксели, которые по спектрально-яркостным показателям можно отнести сразу к двум классам. Если посмотреть на рис. 7, на котором одновременно присутствуют распределения спектрально-яркостных данных для трех типов покрытия № 3—№ 5, то видно, что в маркерный класс могут попасть как пиксели покрытия № 3, так и пиксели покрытия № 5 и наоборот. Выбор рассмотренных покрытий № 3 и № 5 обусловлен тем, что именно эти растительные сообщества наиболее часто контактируют с классом № 4. Погрешность, вызванная неправильным отнесением пиксела к какому-либо классу, может быть оценена с использованием критерия максимального правдоподобия (Сухих, 2005). В итоге при отделении маркерного покрытия № 4 от стабильных озерно-болотных формаций может быть допущена погрешность ~5.3%, при отделении покрытия № 4 от луговых формаций ~3.5%.

2. Погрешность, возникающая при процедуре “постклассификации”: генерализации изображения. Оценка данной погрешности была проведена путем сравнения площадей всех классов до и после генерализации. Данная погрешность составляет ~0.5%.

3. Погрешность, возникающая вследствие дискретизации изображения. Оценка данной погрешности была проведена с использованием процедуры буферизации (Сухих, 2005) и составила ~2.5%.

В итоге суммарная погрешность, связанная с особенностями работы алгоритма классификации, ≈13%.

При наземных геоботанических исследованиях тестовых участков было проведено определе-

ние границ маркерного типа покрытия с использованием GPS-навигатора, что позволило оценить площадь этого покрытия. Сопоставив результаты измерения площади этого типа покрытия на местности с площадью, которую он занимает на том же тестовом участке, но уже на классифицированном изображении, получили погрешность определения площади безотносительно к методу построения классифицированного изображения. Результаты сравнения показали, что относительная погрешность определения площади по классу № 4 составила для “северного” озера — 1.3%, а для “южного” озера — 1.1%. Таким образом, средняя величина относительной погрешности для тестовых участков составила 1.2%. Данная погрешность не превышает оценку суммарной погрешности для полученного классифицированного изображения, что позволяет говорить о надежности последнего.

ВЫВОДЫ

1. В начале трансгрессивной фазы увлажненности территории в периферических частях заболоченных озер формируются проценозы гелофитов, которые за один—два вегетационных сезона достигают высокой сомкнутости. Они хорошо выявляются на спутниковых снимках и могут служить качественными и количественными индикаторами границ и величины трансгрессии водоемов.

2. Суммарная погрешность, связанная с особенностями работы алгоритма классификации, составляет ~13%. Среднее значение относительной погрешности определения площади транс-

грессии методом спутниковой фитоиндикации по типу покрытия № 4 (маркерные гелофитные растительные сообщества) составляет 1.2%.

3. Увеличение акватории озер Называевского района в среднем достигало в 2005 г. 113% от исходной поверхности озер, причем 53% от новой площади поверхности, занимают маркерные гелофитные растительные сообщества. При этом процесс трансгрессии более выражен в низинных участках территории.

4. Полученные в ходе работы вегетативные и высотные характеристики для маркерных гелофитных сообществ соответствуют геоботаническим представлениям: вновь формирующаяся растительность обладает более высокой вегетативной активностью, занимает промежуточный высотный ареал между стабильной болотной и сухопутной растительностью.

Авторы благодарят компанию “СканЭкс” за предоставленные спутниковые данные и программное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- Максимов А.А., Понько В.А., Сытин А.Г.* Смена фаз увлажненности Барабы (характеристика и прогноз). Новосибирск: Наука, 1979. 65 с.
- Максимов А.А.* Природные циклы. Л.: Наука, 1989. 235 с.
- Панадиади А.Д.* Барабинская низменность. М.: Гос. изд-во геогр. лит., 1953. 231 с.
- Свириденко Б.Ф., Дмитриев В.В.* Растительность Ик-Салтаим-Тенисской озерно-речной системы (Омская область) как индикатор многолетнего уровня режима озер // Проблемы и перспективы мелиорации и водного хозяйства Западной Сибири в современных социально-экономических условиях / Под ред. Н.М. Колычева, Ю.М. Рогатнева. Омск: ОмГАУ, 2004. С. 20–24.
- Свириденко Б.Ф., Дмитриев В.В., Дмитриев А.В., Габки Т.Л., Вурдова О.В.* Оценка экологического состояния водоемов Ик-Салтаим-Тенисской озерно-речной системы (Омская область) на основе флористико-геоботанических и геоинформационных методов // Омская биологическая школа / Под ред. И.И. Богданова, И.В. Карнаевича. Омск: ОмГПУ, 2005. Вып. 2. С. 13–28.
- Свириденко Б.Ф., Дмитриев В.В.* Изучение трансгрессии заболоченных водоемов Называевского района Омской области (Западная Сибирь) по материалам фитоиндикации и спутниковой съемки // Омская биологическая школа / Под ред. И.И. Богданова, И.В. Карнаевича. Омск: ОмГПУ, 2007. Вып. 5. С. 14–23.
- Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ, 2006. 661 с.
- Сухих В.В.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 412 с.
- Финиченко Е.Н., Дмитриев В.В., Свириденко Б.Ф.* Метод спутниковой фитоиндикации для исследования трансгрессии водоемов Западной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Н.П. Лаврова и др. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. С. 466–473.

Study of the Transgression of West Siberian Waterlogged Lakes Using the Satellite Phytoindication Materials

V. V. Dmitriev, E. N. Finichenko, B. F. Sviridenko

Omsk State Pedagogical University, Omsk

On the example of studying the waterlogged lakes in the Omsk region and adjacent parts of their watersheds considered the possibility of using satellite data for remote assessment of the extent of the transgression of the lakes reservoirs and increase of territory moisture. These processes are based on the method of satellite phytoindication according to the radiometer LISS-III on satellite platform IRS-1D. The study of spectral brightness and vegetative characteristics of different types of vegetation, as well as spatial and altitude (depending on landscape) the distribution of plant communities. Using the land geobotanical data we evaluated the accuracy of the proposed method.

Key words: satellite radiometer data, watersheds, territory moisture, land geobotanical data, phytoindication, vegetation indexes, Omsk region