

УДК 528.88

С.Л. Кравцов

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассматриваются спектральные индексы, наиболее часто используемые для оценки влажности земной поверхности. Излагается методика оценки влажности земной поверхности с применением изображений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) методом спектральных индексов. Дается пример оценки влажности земной поверхности для территории Республики Беларусь с использованием спутниковых изображений сенсора Terra MODIS методом спектральных индексов.

Введение

По сравнению с общим количеством воды в глобальном масштабе объем влажности земной поверхности в верхних 1–2 м является небольшим, тем не менее он имеет фундаментальное значение во многих гидрологических, биологических и биогеохимических процессах [1]. Так, влажность земной поверхности, являясь критической переменной, в совокупности с другими факторами определяет продолжительность и интенсивность засухи, урожай сельскохозяйственных культур и деревьев, уровень эрозии почвы и стока, интенсивность испарения, а также возможность наводнения, если почва стала слишком влажной, чтобы удерживать последующий объем стока или осадков. В покрытых же лесом областях влажность земной поверхности оказывает большое влияние на состояние и здоровье лесов, интенсивность роста, регенерацию и пожароопасность лесов, ассимиляцию углекислого газа лесами, планирование сбора урожая и посадку деревьев [2]. Влажность земной поверхности влияет на динамику граничного слоя атмосферы и, следовательно, на погоду и климат (в том числе на их аномалии). Поэтому улучшенная характеристика влажности земной поверхности в моделях погоды повышает точность ее прогноза.

В результате разнородности свойств почвы и растительности, топографии, испарения и осадков, поверхностного стока и впитывания воды влажность земной поверхности значительно изменяется как в пространстве, так и во времени. В настоящее время инструментальные измерения влажности земной поверхности проводятся только в определенных местоположениях (например, в Республике Беларусь на 54 агрометеорологических станциях) вследствие высоких трудоемкости и стоимости работ. Такие точечные измерения не позволяют получить близкое к непрерывному пространственное распределение влажности земной поверхности и поэтому не подходят для исследований областного и республиканского уровней. Между тем в течение сельскохозяйственного сезона требуется частая и регулярная оценка влажности земной поверхности, чтобы можно было своевременно принять адекватные меры при неблагоприятных условиях (чрезмерной влажности или засухе).

Непрерывное пространственное распределение влажности земной поверхности для больших областей и при достаточно малом временном разрешении можно получить с использованием изображений ДЗЗ. При этом наибольшее распространение получили методы ДЗЗ в микроволновой и ИК-областях спектра [3, 4]. Высокое пространственное разрешение изображений ДЗЗ, сопоставимое с размерами возделываемых полей, необходимо для фермеров (например, с целью более рационального проведения ирригации), тогда как низкое пространственное разрешение, позволяющее проводить региональный охват, – для сельскохозяйственных агентств и властей (например, с целью оценки условий роста сельскохозяйственных культур). Влажность земной поверхности, официально признанная программой NASA Post 2002 как критическое измерение, стала приоритетом исследований программы NASA MTPE (mission to planet Earth) и предметом исследований серии крупномасштабных экспериментов в 1997–2005 гг. по всему миру программы SMEX (soil moisture experiment), проведенных NASA и Министерством сельского хозяйства США с привлечением научных организаций США, Японии и Бразилии [5].

1. Спектральные индексы

Основываясь на изменениях спектральных особенностей поглощения воды, для оценки ее содержания в растительности и почве по изображениям ДЗЗ разработаны индексы, использующие коэффициенты отражения в каналах ИК-области спектра (рис. 1). Для изображений много-спектральных сенсоров (Terra/Aqua MODIS, Landsat TM/ETM+ и т. д.) спектральные индексы, как правило, используют только два канала (чувствительный и нечувствительный (табл. 1)). Есть несколько основных причин популярности спектральных индексов в исследованиях ДЗЗ: возможность использования для их вычисления изображений многих сенсоров, простота вычисления, уменьшение влияния атмосферы и почвы при нормализованном вычислении индекса [4].

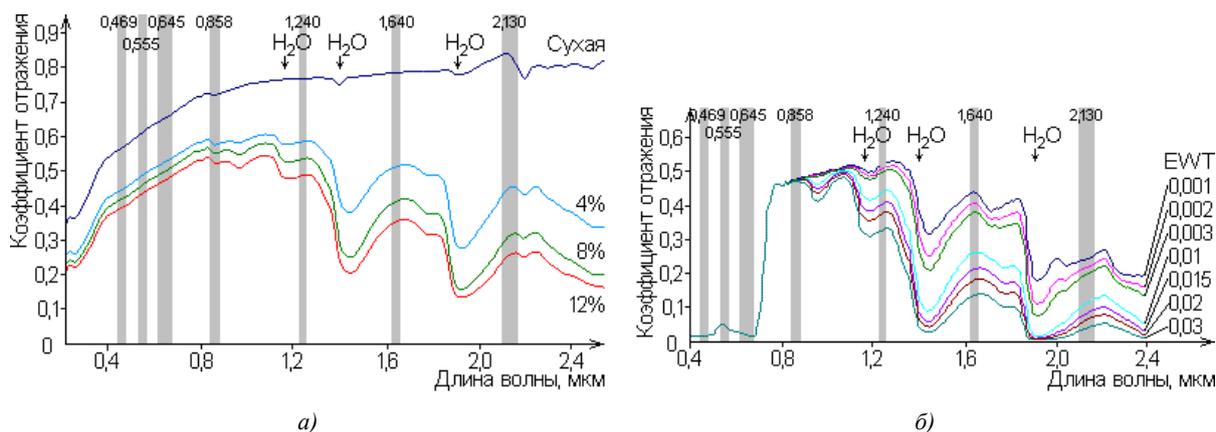


Рис. 1. Соотношения между спектральными каналами сенсора Terra/Aqua MODIS и спектрами: а) почвы при различной влажности; б) растительности при различных значениях эквивалентной толщины воды

Применительно к растительности используется такой параметр, как эквивалентная толщина воды EWT (equivalent water thickness) – количество воды на единицу поверхности. EWT листы рассчитывается по формуле [6]

$$EWT_{\text{leaf}} = \frac{FWT - DWT}{A_{\text{leaf}}}, \quad (1)$$

где EWT_{leaf} – EWT листы ($\text{кг}/\text{м}^2$); FWT – масса образца в сыром виде (кг); DWT – масса образца в сухом виде (кг); A_{leaf} – площадь листа образца (м^2).

При делении EWT_{leaf} на плотность воды ($1000 \text{ кг}/\text{м}^3$) единицы измерения EWT_{leaf} переводятся из $\text{кг}/\text{м}^2$ в метры ($1 \text{ кг}/\text{м}^2 = 1 \text{ мм}$) [7]. EWT покрова удобно использовать, поскольку она равна EWT листы, умноженной на индекс листовой поверхности [6]:

$$EWT_{\text{canopy}} = EWT_{\text{leaf}} \cdot LAI, \quad (2)$$

где EWT_{canopy} – EWT покрова ($\text{кг}/\text{м}^2$); LAI (leaf area index) – индекс листовой поверхности ($\text{м}^2/\text{м}^2$).

LAI является основной переменной, влияющей на EWT покрова: виды растительности с более высоким LAI (например, леса) характеризуются более высоким значением EWT покрова, чем виды растительности с более низким LAI (например, кустарники). Сезонный рост некоторых видов растительности (например, кукурузы) приводит к значительному увеличению их LAI и EWT покрова. После начального периода роста многолетней растительности значение LAI зависит от количества осадков и способности почвы удерживать влагу.

Таблица 1

Наиболее часто используемые для оценки влажности земной поверхности спектральные индексы

Индекс	Вычисление	Особенности индексов
Нормализованный индекс разности воды NDWI (normalized difference water index)	$\frac{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} - I_{(x,y)}^{1,24\text{мкм}}}{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} + I_{(x,y)}^{1,24\text{мкм}}}$	NDWI основан на факте, что канал, центрируемый около 1,24 мкм, находится на краю полосы поглощения воды, тогда как канал, центрируемый около 0,86 мкм, нечувствителен к изменениям содержания воды [8]. Влияние почвы более эффективно удаляется в NDWI, чем в NDII, вследствие того, что используемый NDWI канал, центрируемый около 1,24 мкм, более чувствителен к влажности почвы, чем используемый NDII канал, центрируемый около 1,64 мкм
Нормализованный инфракрасный индекс разности NDII (normalized difference infrared index)	$\frac{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} - I_{(x,y)}^{1,64\text{мкм}}}{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} + I_{(x,y)}^{1,64\text{мкм}}}$	NDII подобен NDWI за исключением того, что он использует более сильную полосу поглощения воды (канал, центрируемый около 1,64 мкм). Так же, как и для NDWI, нормализованное вычисление индекса NDII уменьшает влияние почвы. Вместе с тем NDII не равнозначен NDWI. Например, NDII более чувствителен к значению LAI, чем NDWI с изменением влажности земной поверхности. Существует нелинейная связь между индексами NDII и MSI. С другой стороны, имеется линейная зависимость между NDII и EWT покрова (при ее низких значениях – до 1 мм), поэтому NDII более предпочтителен, чем MSI. При высоких значениях EWT покрова (более 1 мм), характерных для хвойных лесов с очень высоким LAI, соотношение NDII–EWT покрова выходит на насыщение
Индекс влажности поверхности земли LSWI (land surface water index)	$\frac{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} - I_{(x,y)}^{2,13\text{мкм}}}{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}} + I_{(x,y)}^{2,13\text{мкм}}}$	LSWI во многом подобен NDII
Простой индекс отношения воды SRWI (simple ratio water index)	$\frac{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}}}{I_{(x,y)}^{1,24\text{мкм}}}$	На SRWI основное влияние оказывают EWT и LAI (даже при его низких значениях), меньшее влияние (не более 10 %) – почва (при низком значении LAI) [9]. Так, LAI (при его значении от 2 до 10) оказывает значительное влияние на SRWI при EWT листья 0,3 мм, а при LAI > 10 индекс SRWI выходит на насыщение. Влияние почвы на SRWI наиболее значительно при значении LAI менее 2. При значениях LAI более 4 почва не оказывает сколь-нибудь значительного влияния на SRWI при любых значениях EWT листья
Индекс водного стресса MSI (moisture stress index)	$\frac{I_{(x,y)}^{1,64\text{мкм}}}{I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}}}$	MSI находится в обратной зависимости от EWT листья и таким образом может вызывать больше затруднений в интерпретации, чем нормализованные разностные индексы. Кроме того, MSI обладает меньшей точностью оценки EWT покрова, чем NDII. MSI недостаточно чувствителен для определения изменений EWT, когда растительность оказывается в состоянии водного стресса

Примечание: $I_{(x,y)}^{0,86\text{мкм}}$, $I_{(x,y)}^{1,24\text{мкм}}$, $I_{(x,y)}^{1,64\text{мкм}}$, $I_{(x,y)}^{2,13\text{мкм}}$ – значения яркости пиксела (x,y) в каналах, центрируемых около 0,86, 1,24, 1,64 и 2,13 мкм соответственно.

Повысить точность оценки влажности по EWT покрова можно путем учета вида растительности, поскольку значительное количество воды содержится в «нелиственных» компонентах. Действительно, общее содержание воды в растительности равно сумме воды в листьях и стеблях. При этом соотношение между ними зависит от вида растительности и изменяется со временем.

На точность оценки влажности земной поверхности значительное влияние оказывает структура (ориентация) растительного покрова. Однако одним из главных ограничений точности оценки EWT покрова является фон почвы, особенно когда плотность растительности низка или покров не полностью закрыл землю. На коэффициент отражения почвы, в свою очередь, влияют влажность, состав минералов, концентрация органических веществ и текстура.

2. Методика оценки влажности земной поверхности с использованием изображений дистанционного зондирования Земли методом спектральных индексов

Земная поверхность рассматривается в виде однородного слоя растительности над почвой. Влажность почвы является косвенной мерой влажности земной поверхности, поскольку в нормальных условиях они главным образом находятся в равновесии [2]. Данная модель является простой и позволяет эффективно оценивать влажность земной поверхности.

Для исследуемого региона должно быть получено изображение ДЗЗ, содержащее соответствующие используемому спектральному индексу спектральные каналы (рис. 2).

На этапе *предварительной обработки* проводится геометрическая коррекция изображения ДЗЗ для устранения существующих геометрических искажений (для точного отражения геометрических особенностей поверхности Земли [10]). Кроме того, из дальнейшей обработки исключаются облака, тени, населенные пункты и водные объекты.

Наземные измерения влажности земной поверхности в исследуемом регионе проводятся с пространственной привязкой (например, с использованием GPS-приемника) одновременно с получением изображений ДЗЗ. При этом должно быть достигнуто соответствие между точностью привязки наземных измерений, пространственным разрешением изображения ДЗЗ и точностью его геокодирования.



Рис. 2. Методика оценки влажности земной поверхности с использованием изображений ДЗЗ методом спектральных индексов

Спектральный индекс (см. табл. 1) рассчитывается по изображению ДЗЗ.

На изображении ДЗЗ выделяются пиксели, соответствующие наземным измерениям влажности земной поверхности. Значения спектрального индекса в указанных пикселях используются для определения *коэффициентов регрессии* соотношения между влажностью земной поверхности и значениями спектрального индекса пикселей изображения ДЗЗ:

$$WC_{(x,y)} = f(a_0, a_1, \dots, a_n, WCI_{(x,y)}), \quad (3)$$

где $WC_{(x,y)}$ – влажность земной поверхности для пиксела (x, y) изображения; (x, y) – координаты пиксела изображения; $f()$ – некоторая функция; a_0, a_1, \dots, a_n – коэффициенты регрессии; $WCI_{(x,y)}$ – значение спектрального индекса для пиксела (x, y) изображения.

Ратификация коэффициентов регрессии соотношения (3) проводится с использованием множества наземных измерений влажности земной поверхности.

Оценка влажности земной поверхности проводится для каждого пиксела изображения ДЗЗ исследуемого региона с использованием выражения (3). Далее получающиеся значения группируются в одну из ранее установленных градаций. Путем уменьшения их количества точность создания карты влажности земной поверхности может быть повышена [1].

3. Пример оценки влажности земной поверхности с использованием спутниковых изображений сенсора Terra MODIS методом спектральных индексов для территории Республики Беларусь

Область исследования. Площадь Республики Беларусь составляет 207,6 тыс. км²; протяженность с севера на юг – 560 км, с запада на восток – 650 км. Поверхность равнинная и довольно плоская. Климат умеренно континентальный, мягкий и влажный. Летом средняя температура колеблется от +17 °С на севере (июль), до +18–19 °С на юге. Осадков (ключевой фактор накопления влаги в почве) выпадает от 500 мм в год в южных районах до 700 мм в центральных районах и до 800 мм – в северо-западных. В целом количество осадков распределено в течение года достаточно равномерно, однако в осенне-зимний период их обычно выпадает максимальное количество.

Изображения ДЗЗ, предварительная обработка. Были использованы спутниковые изображения сенсора Terra MODIS (36 спектральных каналов в видимой, ближней, средней и дальней ИК-областях спектра (табл. 2)). Доступ к спутниковым изображениям осуществлялся через интернет-сервис компании International Ocean Color Coordinating Group. Данные сенсора Terra MODIS нулевого уровня были обработаны до уровня 1В, отражательные каналы переведены в значения коэффициента отражения поверхности суши, проведена атмосферная коррекция (на рассеяние и поглощение атмосферными газами и аэрозолями), а также коррекция на полосчатость. Изображения были перепроецированы (бикубическая интерполяция [10]) в систему координат WGS84, проекцию UTM, зону 35. Облака, а также тени были выделены кластеризацией и впоследствии исключены из обработки.

Таблица 2

Спутниковые изображения сенсора Terra MODIS

Дата получения изображения	Облачность, %	Количество агрометеорологических станций	Дата получения изображения	Облачность, %	Количество агрометеорологических станций
08.05.2002 г.	13,66	43	08.04.2006 г.	57,04	8
08.06.2002 г.	74,93	16	18.06.2006 г.	47,73	31
28.07.2002 г.	8,90	35	08.07.2006 г.	20,97	45
18.08.2002 г.	5,50	29	28.05.2007 г.	38,98	31
28.08.2002 г.	25,30	18	08.06.2007 г.	32,65	41

Наземные измерения влажности земной поверхности в Республике Беларусь проводятся на 54 агрометеорологических станциях, расположенных таким образом, чтобы охватить основные сельскохозяйственные районы (рис. 3). Инструментальные измерения влажности (термостатно-весовой метод) проводятся 8, 18 и 28 числа каждого месяца на трех-четырех сельскохозяйственных полях ближайшего хозяйства по 10-сантиметровым слоям (0–10, 10–20 см и т. д.). Погрешность определения влажности почвы в отдельной пробе составляет ±0,2 % при доверительной вероятности 0,90. Данные влажности почвы с агрометеорологических станций на соответствующие даты были приобретены у государственного учреждения «Республиканский метеорологический центр» по научно-технической программе Союзного государства «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» (шифр «Космос-НТ»). Из-за низкого пространственного разрешения используемых спутниковых изображений данные влажности почвы усреднялись для каждой агрометеорологической станции по каждой дате.

Коэффициенты регрессии. Исследовались три вида функции взаимосвязи (экспоненциальная, линейная и квадратичная) между влажностью земной поверхности и значениями спектрального индекса для спутниковых изображений сенсора Terra MODIS:

$$WC_{(x,y)} = a_0 + a_1 \cdot e^{WCI_{(x,y)}}; \quad (4)$$

$$WC_{(x,y)} = a_0 + a_1 \cdot WCI_{(x,y)}; \quad (5)$$

$$WC_{(x,y)} = a_0 + a_1 \cdot WCI_{(x,y)} + a_2 \cdot WCI_{(x,y)}^2. \quad (6)$$

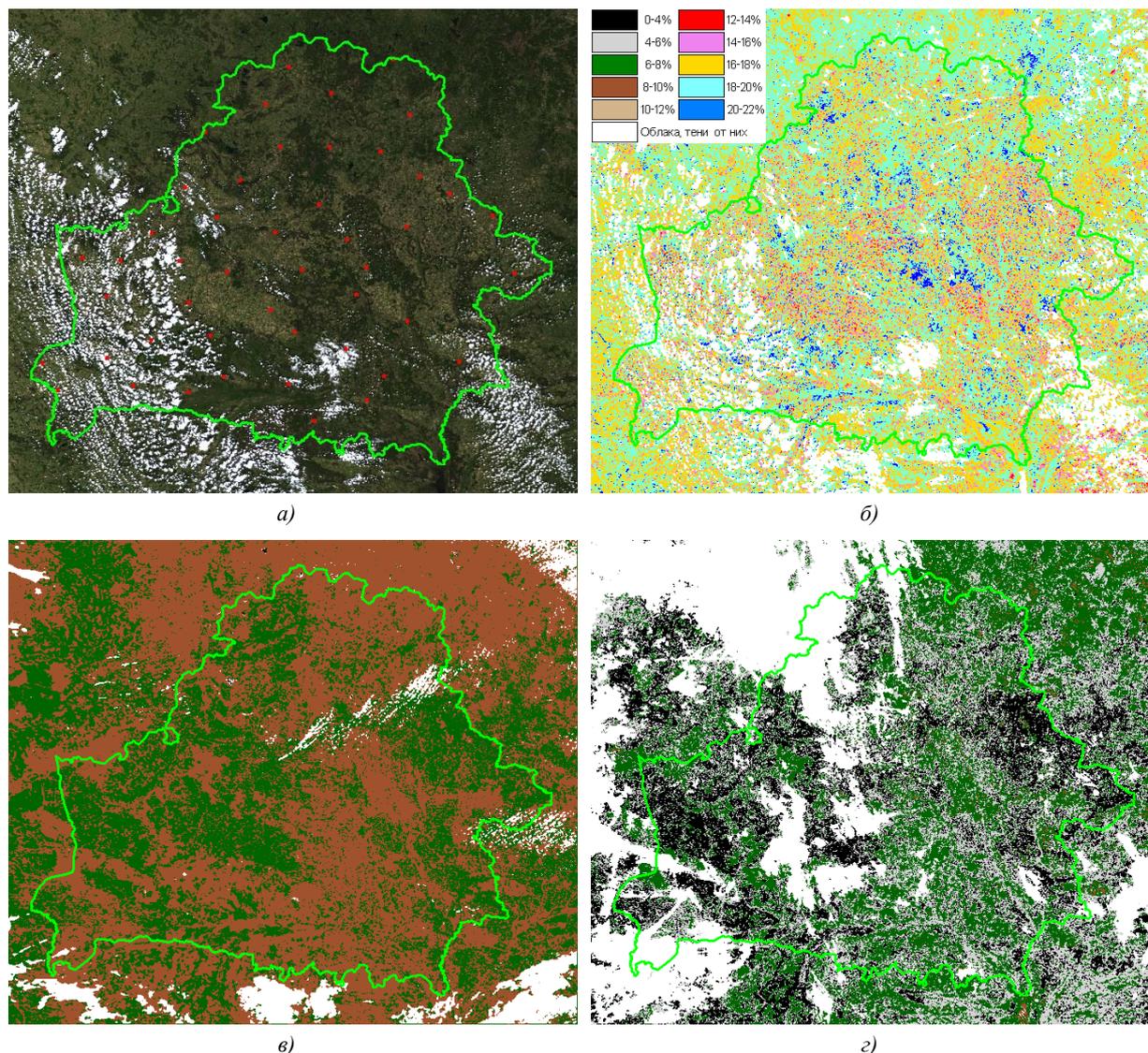


Рис. 3. Определение влажности земной поверхности с использованием спутниковых изображений сенсора Terra MODIS: *а)* исходное спутниковое изображение сенсора Terra MODIS от 08.05.2002 г. и распределение агрометеорологических станций (круглые метки красного цвета); *б), в), г)* карты влажности земной поверхности от 08.05.2002 г., 18.08.2002 г. и 28.08.2002 г. соответственно (линейная функция, индекс LSWI)

Значения коэффициентов регрессии соотношений (4)–(6) для различных спектральных индексов (см. табл. 1) были получены методом наименьших квадратов (табл. 3, рис. 4, *а*). С этой целью использовались наземные измерения влажности почвы, а также значения спектральных индексов, вычисленные по спутниковым изображениям сенсора Terra MODIS. При этом усреднение значений влажности почвы для каждой агрометеорологической станции имело двойной эффект: с одной стороны, повышало точность значений влажности (низкое пространственное разрешение пикселей изображения) и соответственно найденных коэффициентов регрессии, с другой стороны, сужало диапазон значений влажности и таким образом снижало устойчивость соотношения вне указанного диапазона.

Ратификация коэффициентов регрессии проводилась с использованием измеренных и предполагаемых (полученных функцией взаимосвязи) значений влажности земной поверхности (табл. 4). Значение коэффициента корреляции находилось в диапазоне от 0,003 до 0,741. Значение относительной ошибки было тем ниже, чем выше среднее значение наземных измерений влажности земной поверхности (рис. 4, *б*). При высоком среднем значении наземных измерений достигалась приемлемая точность оценки влажности земной поверхности, при низком среднем значении наземных измерений отслеживалась только лишь тенденция влажности земной поверхности.

Таблица 3

Значения коэффициентов регрессии для индекса LSWI

Коэф. регрессии	Дата получения изображения									
	08.05.2002	08.06.2002	28.07.2002	18.08.2002	28.08.2002	08.04.2006	18.06.2006	08.07.2006	28.05.2007	08.06.2007
<i>Экспоненциальная функция</i>										
a_0	7,340	20,732	18,941	4,793	-4,917	9,137	7,574	4,207	34,219	24,620
a_1	6,786	-7,342	-7,342	2,078	6,457	15,407	5,769	1,014	-12,065	-8,207
<i>Линейная функция</i>										
a_0	13,742	14,388	11,989	6,527	1,232	24,412	12,370	4,749	24,304	17,870
a_1	9,432	-11,690	-10,108	3,639	8,713	12,770	9,684	2,495	-20,353	-13,793
<i>Квадратичная функция</i>										
a_0	15,655	28,844	-3,106	3,957	-0,235	23,542	6,195	-0,380	34,411	27,203
a_1	-3,624	-84,051	71,278	23,119	21,952	120,807	40,412	27,993	-63,924	-54,660
a_2	19,103	84,101	-97,598	-31,053	-25,694	1131,932	-34,170	-27,390	43,530	41,835

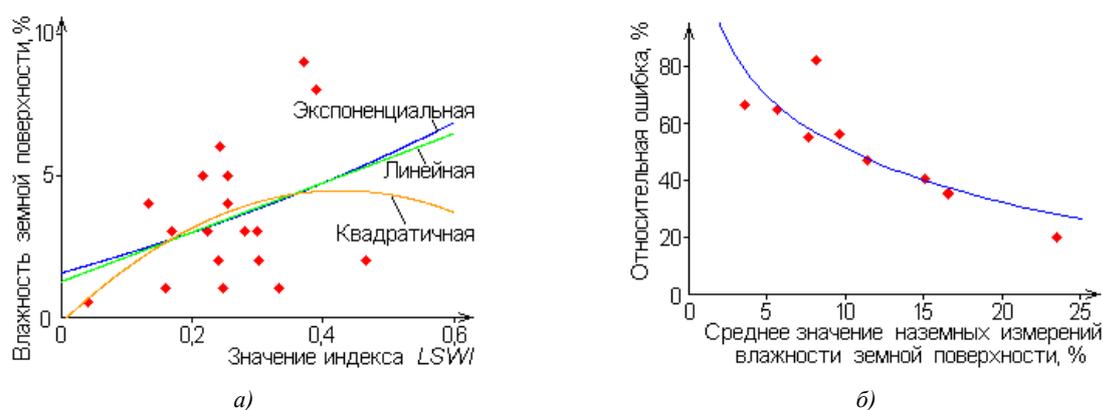


Рис. 4. Оценка соотношения между влажностью земной поверхности и значениями спектрального индекса:
 а) значения и функции взаимосвязи между влажностью земной поверхности и значениями индекса LSWI (данные от 28.02.2002 г.); б) соотношение между относительной ошибкой оценки влажности земной поверхности и ее средним значением для агрометеорологических станций

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции между измеренными и предполагаемыми значениями влажности земной поверхности

Индекс	Дата получения изображения									
	08.05.2002	08.06.2002	28.07.2002	18.08.2002	28.08.2002	08.04.2006	18.06.2006	08.07.2006	28.05.2007	08.06.2007
<i>Экспоненциальная функция</i>										
NDWI	0,091	0,286	0,144	0,043	0,165	0,637	0,125	0,202	0,296	0,072
NDII	0,156	0,243	0,112	0,068	0,028	0,725	0,229	0,006	0,406	0,236
LSWI	0,202	0,243	0,199	0,089	0,349	0,143	0,235	0,070	0,406	0,306
SRWI	0,117	0,277	0,116	0,066	0,049	0,637	0,123	0,029	0,306	0,064
MSI	0,169	0,277	0,089	0,093	0,213	0,737	0,265	0,249	0,414	0,256
<i>Линейная функция</i>										
NDWI	0,074	0,288	0,130	0,055	0,175	0,637	0,126	0,215	0,292	0,075
NDII	0,160	0,251	0,111	0,069	0,016	0,727	0,237	0,003	0,410	0,241
LSWI	0,198	0,250	0,178	0,112	0,361	0,124	0,248	0,105	0,413	0,314
SRWI	0,110	0,283	0,113	0,067	0,044	0,637	0,125	0,019	0,300	0,069
MSI	0,165	0,265	0,107	0,076	0,195	0,733	0,252	0,235	0,414	0,250
<i>Квадратичная функция</i>										
NDWI	0,212	0,292	0,254	0,187	0,276	0,637	0,128	0,327	0,367	0,128
NDII	0,174	0,374	0,121	0,082	0,262	0,741	0,281	0,081	0,419	0,281
LSWI	0,205	0,297	0,322	0,234	0,392	0,658	0,292	0,293	0,424	0,334
SRWI	0,184	0,291	0,132	0,081	0,269	0,638	0,126	0,053	0,345	0,124
MSI	0,175	0,387	0,236	0,171	0,288	0,740	0,301	0,313	0,415	0,287

В целом наиболее устойчивый результат (т. е. получение значений влажности земной поверхности в физически обоснованных пределах для всей области исследования) получался при использовании линейной функции и нормализованных индексов (в первую очередь NDII и LSWI). По степени устойчивости результата функции расположились в следующем порядке: линейная, квадратичная, экспоненциальная. Несмотря на несколько большие значения коэффициента корреляции, квадратичная и экспоненциальная функции оказались менее пригодными, возможно, из-за ограниченного диапазона значений наземных измерений влажности земной поверхности, который использовался для нахождения коэффициентов регрессии. Применение квадратичной и экспоненциальной функций зачастую вызывало нежелательные искажения результата оценки влажности земной поверхности.

Нормализованные индексы (NDWI, NDII, LSWI) обеспечивали получение результата, который вызывал меньше затруднений в интерпретации, чем индексы отношения (SRWI, MSI). При использовании индексов отношения получение результата в физически обоснованных пределах носило случайный характер. Полосчатость спектральных каналов исходных спутниковых изображений сенсора Terra MODIS приводила к полосчатому виду результатов, особенно для индексов NDWI и SRWI (из-за спектрального канала, центрируемого около 1,24 мкм).

Оценка влажности земной поверхности с использованием спутниковых изображений сенсора Terra MODIS каждой даты проводилась согласно выражениям (4)–(6) с соответствующими коэффициентами регрессии (табл. 3). На полученных картах влажности земной поверхности белый цвет соответствует областям, которые были исключены из анализа вследствие наличия облаков и теней (см. рис. 3, б–г).

С апреля по сентябрь 2002 г. отмечался дефицит осадков (в некоторых районах всего 15–25 % от нормы) в сочетании с повышенной температурой (на 3–5 °С выше нормы) и низкой влажностью воздуха. В результате в большинстве областей Республики Беларусь отмечалась чрезвычайная пожарная опасность и почвенная засуха. Только в Гомельской области частично либо полностью погибли посевы зерновых культур на площади 40 тыс. га (12 % всей площади). Несмотря на невысокую точность, результаты оценки отразили тенденцию влажности земной поверхности (см. рис. 3, в, г). Таким образом, оценка влажности земной поверхности может рассматриваться в качестве элемента системы обнаружения и мониторинга засухи с использованием изображений ДЗЗ.

Источники погрешности оценки влажности земной поверхности с использованием изображений ДЗЗ. На результат оценки влажности земной поверхности оказала влияние разница во времени между наземными измерениями и получением изображений ДЗЗ [8]. Действительно, дистанционное зондирование позволяет оценить влажность земной поверхности только на глубину 3–10 длины волны (в ИК-области спектра – несколько миллиметров). Поскольку эти верхние несколько миллиметров наиболее подвержены влиянию атмосферы, их влажность быстро изменяется вследствие осадков и испарения, поверхностного стока и впитывания. Ошибки также были обусловлены тем, что точечные наземные измерения влажности земной поверхности (проводимые к тому же на глубине 10 см), возможно, не являются представительными для пространственного разрешения спутниковых изображений сенсора Terra MODIS. Большое влияние на точность оценки влажности земной поверхности в ИК-области спектра (условия «голой» почвы) оказала текстура, концентрация органических веществ, окисей Fe и т. д. [1]. Наибольший же вклад в погрешность оценки внесла неточность координат метеорологических станций (наземных измерений влажности земной поверхности).

Заключение

Изображения ДЗЗ являются информативным источником сведений о влажности земной поверхности. Разработка уравнения регрессии – наиболее простой подход к ее оценке с помощью наземных измерений. Устойчивость результата при использовании линейной функции и нормализованных индексов (в первую очередь NDII и LSWI) позволяет рассмотреть вопрос создания автоматизированной процедуры оценки влажности земной поверхности. Точность метода спектральных индексов может быть повышена путем выделения наиболее характерных классов земной поверхности с нахождением коэффициентов регрессии для каждого из них.

Следует отметить, что Республика Беларусь является регионом с высокой облачностью, поэтому здесь не может быть обеспечено регулярное получение изображений ДЗЗ в ИК-области спектра. В этой связи целесообразно использовать так называемый синергистический подход к оценке влажности земной поверхности, объединяя результаты, полученные по изображениям микроволновой и ИК-областей спектра [8]. В целом же до внедрения в практику методов ДЗЗ для оценки пространственного распределения влажности земной поверхности необходимы дальнейшие исследования.

Автор выражает благодарность младшему научному сотруднику лаборатории системотехники Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси А.А. Яновскому, оказавшему помощь при проведении исследований.

Список литературы

1. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra / A.M. Mouazen [et al.] // Soil science society of America. – 2006. – Vol. 70. – P. 1295–1302.
2. A wetness index using terrain-corrected surface temperature and normalized difference vegetation index derived from standard MODIS products: An evaluation of its use in a humid forest-dominated region of eastern Canada / Q.K. Hassan [et al.] // Sensors. – 2007. – Vol. 7. – P. 2028–2048.
3. Виноградов, В.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем / В.В. Виноградов. – М. : Наука, 1984. – 320 с.
4. Takeuchi, W. Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data / W. Takeuchi, Y. Yasuoka // 25th Asian conference of remote sensing. – Changmai, Thailand, 2004. – P. 859–864.
5. Soil moisture experiment 2005 and polarimetry land experiment (SMEX05/POLEX). Experiment plan / T. Jackson [et al.]. – Washington : US department of agriculture, 2005. – 109 p.
6. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper imagery / M.T. Yilmaz [et al.] // Remote sensing of environment. – 2008. – Vol. 112. – P. 350–362.
7. Hunt, E.R. Remote sensing of vegetation water content using shortwave infrared reflectances / E.R. Hunt, M.T. Yilmaz // Remote sensing and modeling of ecosystems for sustainability IV : Proceedings of the SPIE. – Florence, Italy, 2007. – Vol. 6679. – P. 1–8.
8. Lingli, W. Remote sensing techniques for soil moisture and agricultural drought monitoring / W. Lingli. – USA : George Mason University, 2000. – 164 p.
9. Zarco-Tejada, P.J. Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites / P.J. Zarco-Tejada, S.L. Ustin // Proceedings of the IEEE 2001 International geoscience and remote sensing symposium. – Sydney, Australia, 2001. – P. 342–344.
10. Кравцов, С.Л. Обработка изображений дистанционного зондирования Земли (анализ методов) / С.Л. Кравцов. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 256 с.

Поступила 07.06.10

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: Krautsou_sl@rambler.ru*

S.L. Krautsou

THE EARTH SURFACE MOISTURE ESTIMATION BASED ON THE REMOTE SENSING IMAGES

The most frequently used for Earth surface moisture estimation spectral indexes are considered. A technique of the Earth surface moisture estimation based on the remote sensing images by a method of spectral indexes is described. An example of the Earth surface moisture estimation for the territory of Belarus with the use of satellite images from Terra MODIS sensor is presented.