

В. И. Майорова, Д. А. Гришко,  
В. В. Муравьев, А. Г. Топорков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛОКАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

*Рассмотрены вопросы, связанные с математическим моделированием поведения локальных экосистем на основе данных с космических средств наблюдения на примере сельскохозяйственных угодий. Основное внимание уделено построению аппроксимирующих математических моделей динамики изменения вегетационного индекса NDVI с учетом климатических воздействий на исследуемый объект и верификации моделей.*

**E-mail:** victoria.mayorova@gmail.com; dim.gr@mail.ru;  
vasiliy.muravyev@gmail.com; toporkov.90@mail.ru

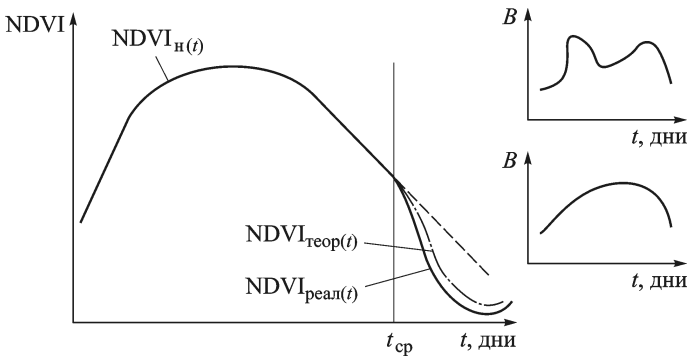
**Ключевые слова:** локальные экосистемы, математическое моделирование, нормализованный индекс вегетации (NDVI).

Локальные экосистемы являются сложными динамическими системами, свойства которых постоянно изменяются с течением времени в результате протекания сложных (и зачастую не полностью изученных и не поддающихся аналитическому описанию физических, химических, биологических) процессов, как внутри них (при взаимодействии компонентов локальных экосистем между собой), так и снаружи (при взаимодействии локальных экосистем с внешней средой). Единственным способом исследования таких систем часто становится использование вычислительного эксперимента, т.е. создание их математических моделей и моделирование их возможного поведения. Среди всего многообразия локальных экосистем подходящим объектом исследования как с теоретической, так и с практической точки зрения, являются площади, отводимые под сельскохозяйственные культуры.

Одной из основных задач систем мониторинга сельскохозяйственной деятельности является оценка состояния и урожайности сельскохозяйственных культур. Достаточно распространенный метод получения таких оценок в различных вариантах исполнения основывается на отслеживании вегетационной динамики растительности [1]. В качестве исследуемого фактора, по которому проводится оценка свойств изучаемого растительного объекта, часто используется индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Нормализованный относительный индекс растительности NDVI является одним из самых распространенных и применяемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова [2]. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых

растений. В красной области спектра (0,6... 0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7... 1 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа [1], т.е. высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих объектов и проводить ее анализ. Использование не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачности, дымки и поглощение радиации атмосферой.

Ввиду того, что динамика растительного покрова в период вегетативного цикла тесно связана с динамикой гидротермического фактора, любой временной тренд NDVI обусловлен, прежде всего, трендом климатических переменных [3]. Предлагается количественно определять влияние гидротермического фактора на динамику условий вегетации путем расчета коэффициентов корреляции и уравнений регрессии для объекта в регионе исследования. Эмпирическая линия регрессии, определяемая уравнением, описывает ожидаемые значения NDVI для разных сумм осадков и температур. Однако фактические значения NDVI отклоняются от линии регрессии по той причине, что в данный момент времени условия вегетации отличаются от условий, которым соответствует эмпирическая кривая. Если предположить, что фактические значения NDVI, соответствующие каждому интервалу гидротермического фактора, представляют собой функцию преимущественно климатической компоненты, то для ее учета необходимо добавить к значениям NDVI эмпирической кривой слагаемые, представляющие знакопеременное влияние влажности и температуры [3]. Получившаяся функция вследствие наличия других факторов, менее влияющих на индекс, будет неизбежно отличаться от кривой фактического NDVI, но при этом на малом временном интервале отличия будут крайне малы. Для детектирования очагов деградации растительного покрова необходимо проследить тренд отклонения фактических значений от эмпирических и расчетных; негативные значения тренда будут указывать на уменьшение восприимчивости растительного покрова к гидротермическому фактору и, следовательно, на происходящие процессы деградации [3]. Отметим, что гидротермические данные для конкретного региона являются доступными не только за текущий, но и за предыдущие года. В настоящей работе рассматривалась только внутригодовая динамика. Для этого были сопоставлены ряды NDVI и осадков, NDVI и температур и вычислена приблизительная корреляция между ними.



**Рис. 1.** Принципиальная схема моделирования индекса NDVI

Это было сделано путем расчета линейных корреляционных коэффициентов и составления уравнений линейной регрессии.

На рис.1 представлена принципиальная схема моделирования. Описанная математическая модель имеет вид

$$NDVI_{реал}(t) = \underbrace{NDVI_H(t) + k_1 B(t) + k_2 T(t) + o(t)}_{NDVI_{геоп}(t)},$$

где  $NDVI_{реал}(t)$  — значения индекса, которые он будет принимать в прогнозируемой временной области;  $NDVI_H(t)$  — значения индекса, который он будет принимать при экстраполяции имеющейся текущей эмпирической кривой;  $B(t)$  и  $T(t)$  — функции влажности и температуры, полученные на основе прошлогодних данных (в случае года-аналога) или прогнозных данных текущего года;  $k_1, k_2$  — коэффициенты корреляции;  $o(t)$  — остаточное малое влияние других факторов на исследуемый индекс.

Влияние погодной компоненты на состояние растительности достаточно велико. Температурный режим и количество осадков являются наиболее значимыми факторами, формирующими состояние растительности на больших территориях. Поэтому детальный анализ локальных территорий может быть более продуктивным. Кроме того, на ограниченных площадях промышленные объекты являются наиболее значимым фактором, определяющим состояние вегетации [4].

С учетом изложенных факторов влияния для эксперимента были выбраны семь сельскохозяйственных полей, расположенных рядом с сельским поселением Мочилы на границе Московской и Рязанской областей вдали от крупных населенных пунктов.

В качестве исходных данных использовались безоблачные снимки с космических аппаратов Landsat 5 и Landsat 7 (до 2003 г.), которые заказывались на сайте <http://www.usgs.gov/> (сайт национальной географической службы США) для временного периода с мая по октябрь. По августовскому снимку 2011 г. было создано семь векторных слоев, повторяющих контуры каждого поля (рис. 2).



**Рис. 2. Взаимное расположение выбранных семи сельскохозяйственных полей**

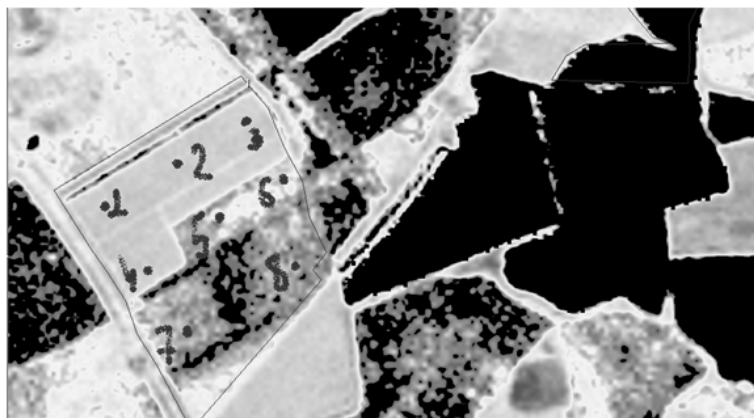
Далее была проведена обработка данных с каждого снимка: в программе Scan Image Processor для подгружаемого изображения рассчитывался вегетационный индекс NDVI, после чего результаты выводились в цветах стандартной палитры NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR, RED — коэффициенты спектральной яркости в ближней инфракрасной (841...876 нм) и красной (620...670 нм) зонах.

На территории каждого поля были отмечены области из восьми точек, с которых снимались показания рассчитанного индекса (рис. 3).

Несмотря на наличие прогрессивных и угнетенных участков, поле представляет собой достаточно однородный объект, поэтому можно использовать среднее значение индекса по каждому полю. Вместе с тем отметим, что имея снимки с пространственным разрешением



**Рис. 3. Пример поля с наложенной маской NDVI в цветах стандартной палитры NDVI (рисунок окрашен в черно-белые цвета) и с указанием точек, с которых снимались значения**



Рис. 4. Взаимосвязь значений индекса NDVI и степени развития зеленой биомассы

содержали некоторое число различного рода провалов и всплесков (рис. 5 и 6). Кроме того, для исследуемого региона характерно переменное землепользование с наличием так называемых полей под паром (рис. 6, а).

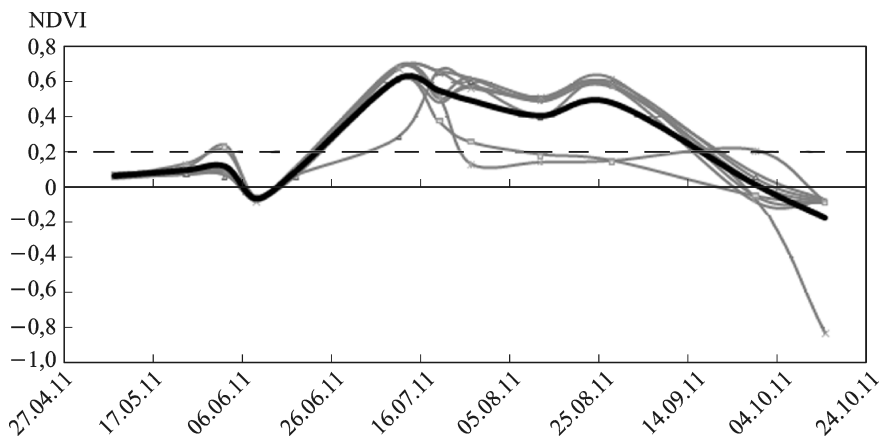
Таким образом, становится очевидным, что те ряды данных, где кривая NDVI не выходит за пределы значения  $0,2 \pm 0,05$ , представляя собой неактивные поля (пар) (см. рис. 6, а). Вместе с тем, максимум NDVI, приходящийся на интервал  $0,3 \pm 0,1$ , показывает, что с большой долей вероятности мы имеем дело с территорией, отведенной под пастбища или под вспомогательный засев, не требующий существенного использования почвенных ресурсов (рис. 6, б). Следовательно, для составления математических моделей имеет смысл рассматривать только те поля, максимальный индекс NDVI которых выше значения 0,45, причем, согласно уже имеющимся исследованиям, для большинства сельскохозяйственных культур максимум приходится на диапазон 0,6...0,7 (см. рис. 5).

При анализе полученных данных был выявлен тот факт, что некоторые из выбранных полей засеивались озимыми культурами, у которых период вегетации разделен на два временных промежутка: период роста приходится на осень, а период созревания — на весну и часть лета. Тем самым появляется необходимость изменения временного интервала исследования, индекс NDVI становится также функцией от количества зимних осадков, экстремальных значений температуры и времени взаимных переходов между сезонами и других факторов, что существенно усложняет предлагаемую математическую модель для прогнозирования. Вместе с тем, следует отметить, что методы

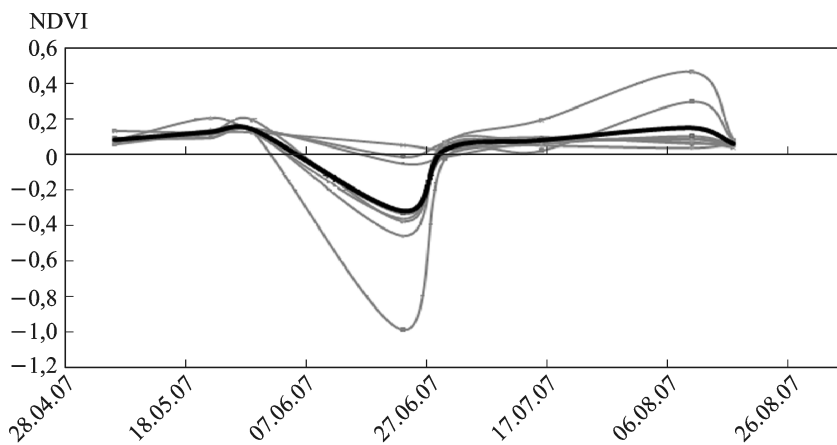
около 10 м, можно говорить и о мониторинге не всего поля в целом, а отдельных его участков, по той же самой методике, рассматривая эти участки как самостоятельные объекты.

Для оценки качественного состояния подстилающей поверхности можно воспользоваться рис. 4, где отображена взаимосвязь значений индекса NDVI и степени развития зеленой биомассы.

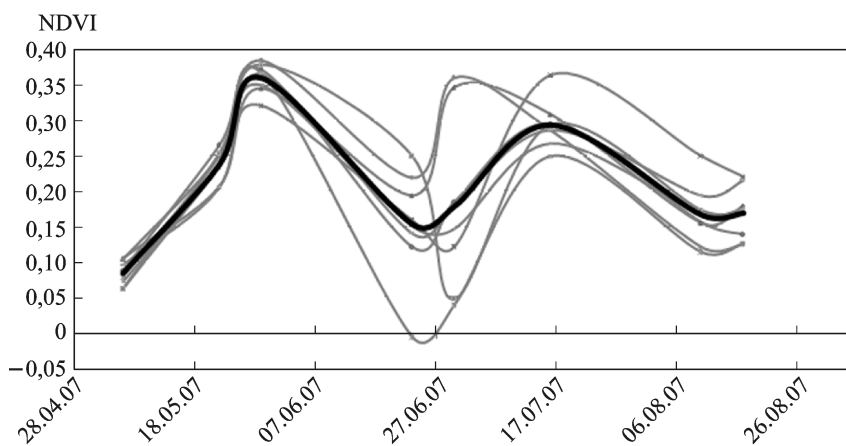
Полученные данные, даже в усредненной форме, хотя и отображали ожидаемую динамику изменения NDVI, но все же со-



**Рис. 5. Пример обработанных рядов данных по индексу NDVI для восьми точек одного поля (тонкие серые линии):**  
 толстой черной линией показано усредненное значение NDVI для всего поля; штриховая линия соответствует отсутствию всякой растительности



*a*



*б*

**Рис. 6. Пример графика изменения NDVI поля, находящегося “под паром” (а) и не засеянного в текущем году полезной с/х культурой (б)**

исследования в случае озимых культур останутся по большей части прежними, динамика индекса NDVI будет характеризоваться теми же параметрами, что и в случае обычных культур. Поэтому в нашей работе было решено остановиться на рассмотрении культур, у которых этапы роста и созревания приходятся на один вегетационный сезон.

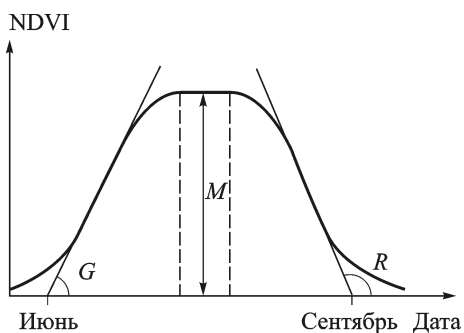
На основе описанных свойств для дальнейшего исследования были отобраны поля: 2011 г. — № 1 и № 7; 2006 г. — № 1 и № 7.

Далее, с помощью внешнего программного приложения *Formulaize.exe* был осуществлен перевод полученных графиков в аналитически заданные функции, которые выбирались в виде полиномов со степенью, преимущественно не старшей четырех, при условии минимальной ошибки с применением сглаживания. В результате были получены аналитические зависимости для исследуемых рядов данных.

Одномоментные (однодневные) значения NDVI позволяют четко отделять (для анализа) растительные объекты от прочих природных объектов, тогда как идентификация и классификация разных типов растительности становится затруднительной и не является эффективной. В связи с этим в качестве основы для идентификации и картографирования растительных объектов решено использовать их различия в динамике NDVI в течение вегетационного периода [5].

Если схематично изобразить динамику NDVI растений в течение периода вегетации, как представлено на рис. 7, и в качестве параметров, характеризующих форму кривой, выбрать: угол наклона кривой NDVI в период роста и развития вегетативных органов ( $G$ ), максимальное значение NDVI в течение всего периода вегетации ( $M$ ), угол наклона кривой NDVI в период созревания и плодоношения ( $R$ ), то этими параметрами можно характеризовать состояние растительного покрова, в том числе разделять растительный покров по типам [5].

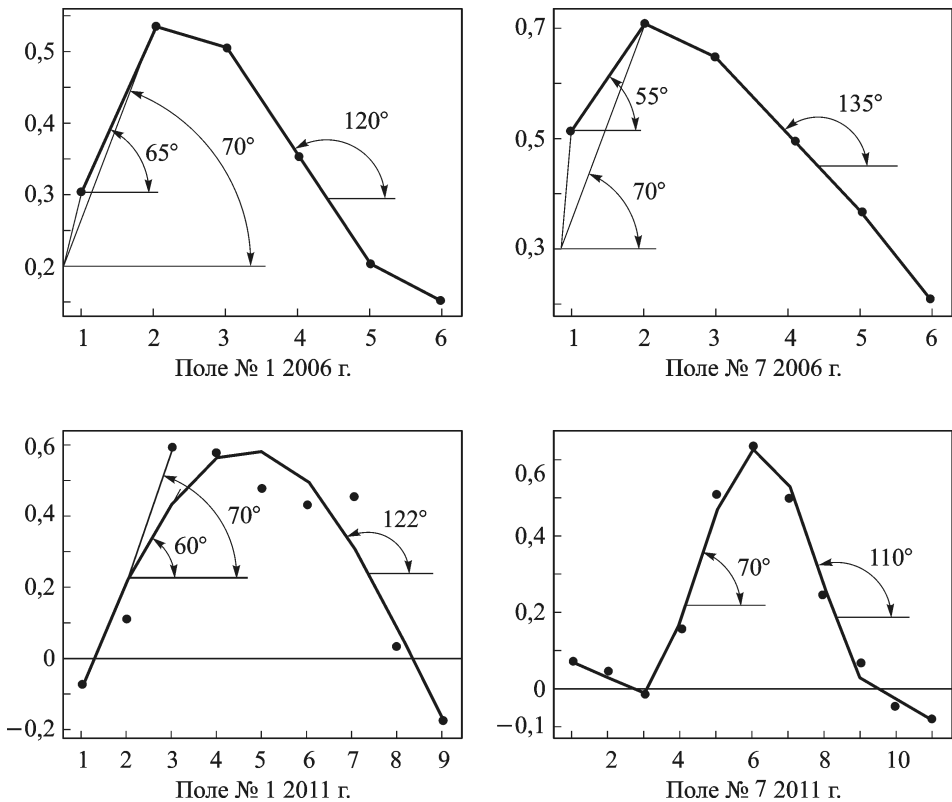
Аппроксимирующие функции показаны на рис. 8 и сведены для каждого из двух полей (№ 1 и № 7) для 2006 и 2011 гг. в таблицу.



**Рис. 7. Характеристики динамики изменения индекса NDVI**

В связи с тем, что для аппроксимации данных использовались полиномиальные функции, при прогнозировании дальнейшей ближайшей перспективы необходимо участок для  $(i + 1)$ -го шага заменять прямой, имеющей такой же угловой коэффициент, что и производная эмпирической функции в последней известной точке.

Как следует из приведенных графиков, во всех четырех случаях мы имеем дело с одной и той



**Рис. 8.** Полиномиальные функции, полученные для выбранных рядов данных с указанием углов наклона восходящих и нисходящих ветвей функции NDVI (по горизонтальной оси — номера дат съемки, по вертикальной — индекс NDVI, полученный по космическим снимкам)

**Эмпирические полиномиальные функции, моделирующие динамику изменения значений индекса NDVI по отобранным полям**

Поля	Эмпирическая функция для NDVI
№ 1 2006 г.	$y(x) = -0,3481 + 0,9199x - 0,2971x^2 + 0,03082x^3 - 0,0007553x^4$
№ 7 2006 г.	$y(x) = -0,1691 + 1,047x - 0,4213x^2 + 0,06557x^3 - 0,003782x^4$
№ 1 2011 г.	$y(x) = -1,09 + 0,1171x^2 - 0,01564x^3 + 0,0005345x^4$
№ 7 2011 г.	$y(x) = -0,9911 + 2,29x - 1,715x^2 + 0,5625x^3 - 0,08721x^4 + 0,006336x^5 - 0,0001744x^6$

же культурой, для которой угол наклона вегетирующей части кривой NDVI равен  $\sim 70^\circ$ . Период активного роста протекает для данной местности практически одинаково во все исследуемые годы. Влияние такого фактора, как, например, затяжные дожди или засушливый июнь, показано в виде разброса точек. Нисходящая ветвь кривой NDVI является более чувствительной к такому фактору, как засушливость второй половины лета, из-за чего ее наклон несколько различается



по годам, причем данные можно считать достоверными, вследствие наличия большого числа точек.

Общий подход к моделированию динамики NDVI состоит в установлении функциональной зависимости между метеоданными и индексом. После установления однозначной связи (некоторым способом) эти зависимости предполагается использовать для предсказания значений NDVI на некотором интервале времени. При этом в качестве аргументов выступают прогнозные значения метеовеличин и дополнительно введено допущение по принципу суперпозиции о независимом влиянии погодных факторов на NDVI.

Примем справедливой зависимость следующего вида:

$$N(t^*) = N(t_0) + \int_{t_0}^{t^*} F_T(T(t), t) dt + \int_{t_0}^{t^*} F_H(H(t), t) dt, \quad (1)$$

где  $t^*$  — момент времени прогноза;  $t_0$  — начальный момент времени;  $N(t_0)$  — априорно известное значение NDVI в момент времени  $t_0$ ;  $N(t^*)$  — искомое значение NDVI к моменту времени прогноза;  $t \in [t_0, t^*]$  — текущее время;  $T(t)$  и  $H(t)$  — прогнозное значение среднесуточных температуры и влажности;  $F_T(T(t), t)$ ,  $F_H(H(t), t)$  — некоторые функции для определения зависимости NDVI от среднесуточной температуры и среднесуточной влажности, определяемые формулами

$$\begin{aligned} F_T(T(t), t) &= \frac{\partial N(T, H, t)}{\partial T}; \\ F_H(H(t), t) &= \frac{\partial N(T, H, t)}{\partial H}. \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимость функций  $F_T(T(t), t)$  и  $F_H(H(t), t)$  в (1) только от одного соответствующего метеопараметра объясняется использованием допущения о суперпозиции. Если в выражении (1) для  $N(t^*)$  прогнозируемый параметр по назначению зависит формально только от времени прогноза, то в (2)  $N$  — уже функция  $T$ ,  $H$  и  $t$ . Это объясняется тем, что зависимости (2) фактически используются для нахождения функций  $F_T(T(t), t)$ ,  $F_H(H(t), t)$ .

Методика и алгоритм определения функций  $F_T(T(t), t)$ ,  $F_H(H(t), t)$  следующие. На выбранном интервале времени  $t \in [t_1, t_n]$  получают данные об NDVI и метеоданных. Предпочтительной является информация на небольшом интервале времени  $[t_1, t_2]$  (порядка одной-двух недель) с большим числом  $n$  измерений параметра по назначению (порядка четырех измерений), с метеоданными, изменяющимися в ограниченном диапазоне ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ,  $\pm 10\%$  по влажности). Измерению  $i \in [1, n]$  соответствует значение  $N_i$  в момент времени  $t_i$ .

В силу того, что исходных данных по  $N(t)$  — ограниченное число, для определения зависимостей  $F_j(j, t)$  ( $j = T, H$ ) делается допущение

о линейном характере  $F_j(j, t)$  в диапазоне метеоданных ( $\Delta T$  и  $\Delta H$  — отклонения от средних значений температуры и влажности соответственно):

$$F_T(T(t), t) = C_T + \alpha_T \Delta T, \quad t \in [t_1, t_i];$$

$$F_H(H(t), t) = C_H + \alpha_H \Delta H, \quad t \in [t_1, t_i].$$

Для четырех измерений  $N$  ( $i = 4$ ), т.е. трех интервалов времени  $t \in [t_k, t_{k+1}]$ , где  $k = 1, 2, 3$ , составляется система линейных уравнений относительно  $C_T + C_H$ ,  $\alpha_T$  и  $\alpha_H$ :

$$\begin{cases} C_T + \alpha_T \Delta T_1 + C_H + \alpha_H \Delta H_1 = \frac{N_2 - N_1}{t_2 - t_1}; \\ C_T + \alpha_T \Delta T_2 + C_H + \alpha_H \Delta H_2 = \frac{N_3 - N_2}{t_3 - t_2}; \\ C_T + \alpha_T \Delta T_3 + C_H + \alpha_H \Delta H_3 = \frac{N_4 - N_3}{t_4 - t_3}. \end{cases}$$

В этой системе  $\Delta T_k$ ,  $\Delta H_k$  — отклонения метеопараметров от средних значений на интервале времени  $[t_k, t_{k+1}]$ . Данная система решается одним из известных методов.

Для поля № 1 с сельскохозяйственной культурой были рассмотрены интервалы времени с 12 июля по 16 июля 2011 г., с 16 июля по 20 июля 2011 г. и с 20 июля по 24 июля 2011 г. Соответствующие изменения индекса NDVI: с 0,635 до 0,61; с 0,61 до 0,55, с 0,55 до 0,52. Среднесуточные температуры и влажности приземного слоя воздуха на рассмотренных интервалах времени [6]: 23,3 °С, 65,4%; 23 °С, 67,4%; 24,1 °С, 57,4%. Это позволило определить величины  $\alpha_T = 0,015NDVI/(^{\circ}C \cdot \text{сутки})$  и  $\alpha_H = -0,0045NDVI/(\% \cdot \text{сутки})$ . Полученные значения были использованы для предсказания значения NDVI к 28 июля 2011 г. По предложенной модели это значение должно быть равным 0,485 при известной среднесуточной температуре 25,9 °С и среднесуточной влажности 53,3%. Измеренное значение NDVI на 28 июля 2011 г. составляет 0,49. Удовлетворительное совпадение результатов говорит об удовлетворительном соответствии эмпирической модели реальному объекту.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности практической реализации достоверной математической модели конкретных сельскохозяйственных полей для краткосрочного прогнозирования. В качестве исследуемого параметра и основных, связанных с ним, влияющих факторов могут быть выбраны любые характеристики, по которым можно судить о качественном и количественном состояниях локальной экосистемы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.9 федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы” (ГК от 18 августа 2011 года № 11.519.11.5002, шифр “2011-1.9-519-004”).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS. / С.А.Толпин, М.А.Барталев, В.Ю.Бурцев и др. [Электронный ресурс] // ИКИ. URL: [http://d33.infospace.ru/d33.\\_conf/vol2/380-389.pdf](http://d33.infospace.ru/d33._conf/vol2/380-389.pdf) (дата обращения: 20.04.12).
2. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс] // GIS\_LAB. URL: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 15.04.12).
3. Пропастин П. А., Муратова Н. Р. Анализ многолетних рядов NOAA/AVHRR/NDVI и гидрометрических условий южной части Казахского мелкосопочника [Электронный ресурс] // ИКИ. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-366-374.pdf> (дата обращения: 04.03.12).
4. Оценка состояния естественной растительности Прикаспийского региона в зависимости от погодных и ландшафтных особенностей / Н.Р. Муратова, С. Северская, А.Г. Терехов и др. [Электронный ресурс] // ИКИ. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-351-358.pdf> (дата обращения: 23.03.12).
5. Пугачева И. Ю., Шевырнов А. П. Изучение динамики NDVI посевов сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и республики Хакасия [Электронный ресурс] // ИКИ. URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2008\\_pdf/2/46.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/46.pdf) (дата обращения: 3.04.12).
6. Архив метеоданных [Электронный ресурс] // Расписание погоды. URL: <http://RP5.ru> (дата обращения: 14.05.12).

Статья поступила в редакцию 20.06.2012