

УДК 528.8

**Использование многоканальных космических снимков
для анализа годовой динамики вегетационной активности**

Козлов А.В.^{1*}, Козлова М.В.^{2}, Скорик Н.А.^{3***}, Шаронов А.В.^{3****}**

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Россия*

²*Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова,
Кропоткинский пер., 6, Москва, 119034*

³*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: a.kozlov@navlab.ru,*

***e-mail: mariakozlova_soi@mail.ru,*

****e-mail: na9577@yandex.ru*

*****e-mail: k308@mai.ru*

Аннотация

В статье представлены результаты использования многоканальных космических снимков со спутников OrbView-2 и Envisat для анализа годовой динамики вегетационной активности в 12 тестовых полигонах Волго-Ахтубинской поймы на основе общепринятого индекса FAPAR за десятилетний период с 1997 года, включающий засушливый летний сезон 2006 года. Рассмотрена возможность использования общедоступных данных с метеостанций Всемирной метеорологической организации о годовой температуре в дополнение к спутниковым снимкам. По результатам исследования сделан вывод о том, что учёт

данных о температуре хотя и приводит в большинстве случаев к уточнению модели годовой динамики вегетационной активности, не даёт существенного улучшения точности, повышая при этом требования к объёму исходных данных для анализа.

Приведены количественные результаты.

Ключевые слова: вегетационная активность, дистанционное зондирование Земли, многоканальные снимки, FAPAR.

Введение

Многоканальные спутниковые снимки являются одним из немногих инструментов объективного контроля состояния крупных экосистем. В частности, мониторинг Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), проводимый Государственным океанографическим институтом им. Н.Н. Зубова, требует анализа количественных показателей, характеризующих состояние водных объектов и связанных с ними растительных сообществ на площади порядка 9000 км². Полевые исследования, и даже аэрофотосъёмка, несмотря на то, что они являются важными составляющими этих исследований, технически не могут обеспечить охват всей требуемой территории.

Одними из важнейших показателей состояния экосистем ВАП являются характеристики вегетационной активности. Инструменты SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor – широкоугольный сенсор для наблюдения за морями [1]) и MeRIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer – фотографический спектрометр

среднего разрешения [2]), входящие в состав научной аппаратуры спутников OrbView-2 (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства Соединённых штатов Америки) и Envisat (Европейское космическое агентство), обеспечивали регулярную съёмку поверхности Земли с разрешением соответственно 1 км и 300 м в 8 и 15 каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с периодичностью 1 и 3 дня в период 1997-2006 гг. Аналогичные данные доставляются спутниками серии Landsat, Sentinel и другими. Подобные системы разрабатываются и в России [3]. Наличие снимков, содержащих одновременно красный и ближний инфракрасный каналы, позволяет выделить области, соответствующие активно фотосинтезирующим растениям. Синий канал обеспечивает возможность атмосферной коррекции снимка.

Общепринятым в мировой практике анализа вегетационной активности по многоканальным спутниковым снимкам считается индекс FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation – доля поглощённого при фотосинтезе излучения [4]), входящий в число важнейших характеристик, учитываемых при анализе климатических изменений (ECV – Essential Climate Variables [4]), определённых Всемирной метеорологической организацией в рамках программы глобального наблюдения за климатом. Для получения значений этого индекса в заданной области на поверхности Земли на момент съёмки существуют стандартные специальные алгоритмы и Интернет-ресурсы [5–6]. Важно отметить, что из-за облачности и по ряду других причин временные ряды значений индекса на основе спутниковых снимков содержат погрешности, сбои и не являются регулярными. В

данной работе под вегетационной активностью понимается активность фотосинтеза, а ещё точнее – значения индекса FAPAR, её отражающие.

Характерной особенностью растительности в водно-болотных угодьях (ВБУ) аридной и полуаридной климатической зоны, в том числе в Волго-Ахтубинской пойме, является её значительная изменчивость во времени и в пространстве, связанная с существенными изменениями влагозапаса почвы и уровня грунтовых вод в течение короткого времени – порядка недель или месяцев. Причём эти изменения могут значительно различаться для участков земли, расположенных недалеко друг от друга. Как следствие, стандартные методики оценки динамики вегетационной активности показывают недостоверные результаты, поскольку они предполагают, что растительность имеет стандартный годовой цикл развития, где вегетационная активность увеличивается к середине вегетационного сезона и спадает к его концу, не изменяясь существенно на значительных площадях, что, как правило, верно например, для лесов, степей и сельскохозяйственных полей, но не для ВБУ. Однако интерес представляют при этом не мгновенные значения индекса FAPAR, а его характерные долгосрочные изменения во времени и в пространстве. В связи с этим в [7] была разработана и опробована простая гармоническая модель для аппроксимации временных рядов индекса FAPAR, полученных за несколько лет наблюдений, позволяющая проводить их практический анализ.

В настоящей работе рассматривается возможность уточнения этой модели за счёт привлечения дополнительно информации о годовом изменении температуры. Архив данных о температуре на большом количестве метеостанций, входящих в

единую сеть Всемирной метеорологической организации, имеется в свободном доступе [8].

Модель годовой динамики вегетационной активности без учёта температуры

Приведём краткое описание модели из работы [7]. Модельный "нормальный" годовой цикл вегетационной активности в средних широтах, к которым относится исследуемый регион нижней Волги, предполагает, что имеется выраженный межвегетационный период, в течение которого активность фотосинтеза близка к нулю, и вегетационный период, в начале которого активность плавно нарастает, а в конце – постепенно ослабляется. Это означает, что модельный цикл является периодической функцией времени в границах вегетационного сезона. Из теории рядов Фурье известно, что всякая непрерывная периодическая функция представляется в виде суммы гармонического ряда, а значит можно надеяться, что возможна её аппроксимация конечной суммой гармонических функций [9]. Введём нормализованное время t :

$$t = \frac{[\text{DOY} - G_B]_{\text{mod } 365}}{[G_E - G_B]_{\text{mod } 365}}, \quad (1)$$

где DOY – номер дня в году, G_B – день начала вегетационного сезона, G_E – день окончания вегетационного сезона, а $[\cdot]_{\text{mod } 365}$ – взятие числа по модулю 365, что актуально для Южного полушария, где $G_B < G_E$. Тогда модельное значение F^* индекса FAPAR представим в виде:

$$F^*(DOY) \equiv f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^n (b_j \cos 2\pi jt + c_j \sin 2\pi jt), \quad c_1 = - \sum_{j=2}^n j c_j, \quad (2)$$

где n – некоторое априорно выбранное достаточное количество гармоник, а a_0 , b_j и c_j – неизвестные гармонические коэффициенты, а условие на них возникает из равенства нулю производной в начале и в конце вегетационного сезона.

Гармонические коэффициенты находятся по методу наименьших квадратов при аппроксимации имеющихся временных рядов значений FAPAR, полученных по многоканальным спутниковым снимкам за несколько лет. Полученное выражение (2) для непрерывной модельной функции позволяет вычислять количественные характеристики годовой динамики вегетационной активности, характерные для исследуемой местности (подробнее см. [7]). На Рисунке 1 приведён пример такой аппроксимации для одного из тестовых полигонов – окрестностей высохшего в настоящее время озера Замора. Значения FAPAR за относительно многоводный период 1997–2005 годов служили исходными данными для аппроксимации. Хорошо видно отличие данных за аномально засушливый 2006 год, выделенных чёрным цветом, от модельной функции. Жёлтым цветом приведена оценка погрешности модели в пределах уровня 2-сигма по вероятности.

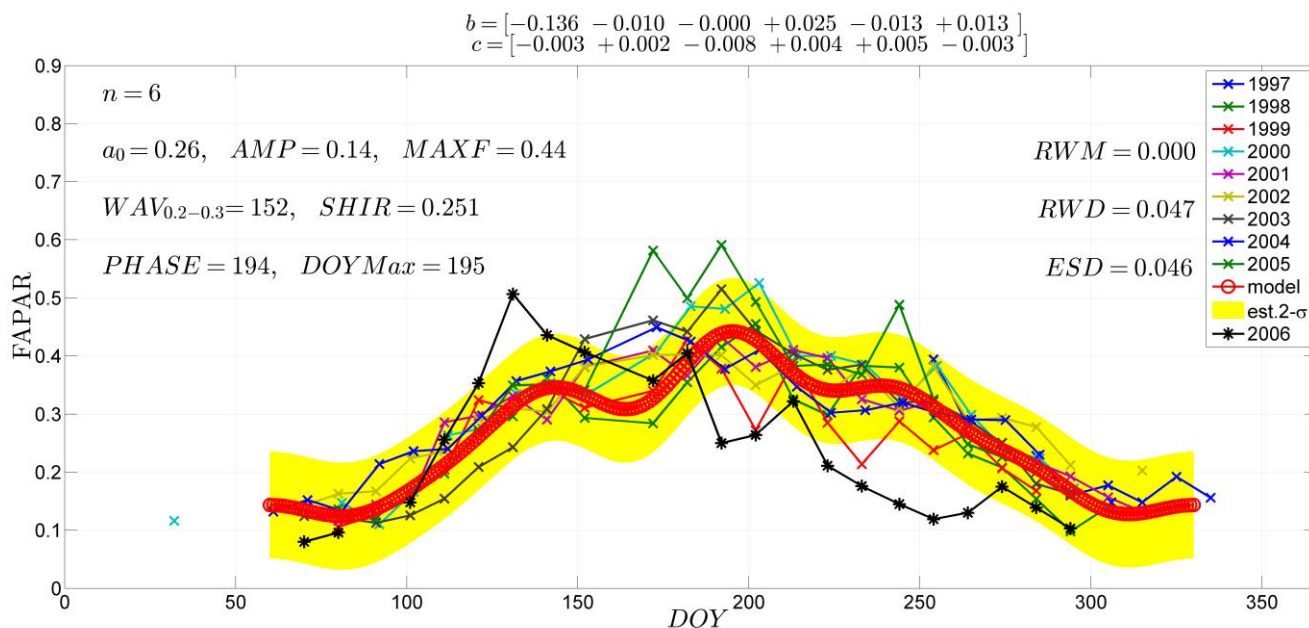


Рис. 1. Пример модельной функции индекса FAPAR (красный цвет) на фоне исходных данных, полученных за период 1997–2005 гг. Аномальный 2006 год выделен чёрным. Жёлтым цветом показана оценка погрешности до уровня 2-сигма.

Учёт температуры в модели годовой динамики вегетационной активности

Приведённая выше модель основывается главным образом лишь на предположении о периодичности "нормального" годового цикла вегетационной активности и фактических значениях индекса FAPAR за несколько лет, которые в некотором роде усредняются (на множестве усечённых гармонических рядов), и не учитывает особенности конкретного года. Вместе с тем, достаточно естественно предположить, что на рассматриваемые величины влияет температура. При учёте температуры необходимо учесть несколько особенностей рассматриваемого процесса.

Во-первых, измерение температуры и индекса FAPAR происходят в разные моменты времени, в разное время суток и часто даже в разные дни, и кроме того, реакция растений на изменение температуры имеет некоторую задержку, поэтому имеет смысл рассматривать не мгновенную связь вегетационной активности с температурой, а только связь усреднённых, сглаженных величин.

Во-вторых, анализ фактической связи индекса вегетационной активности с изменением температуры показывает, что следует учитывать не только собственно значение температуры, но и скорость (в т.ч. направление) её изменения. Этот факт демонстрируется на примере, приведённом на Рис. 2, где изображена связь значений FAPAR с температурой в разные годы и стрелками указано направление изменения температуры. При увеличении усреднённой (сглаженной) температуры, соответствующему весеннему сезону (стрелки вправо), вегетационная активность как правило выше, чем при её уменьшении, соответствующему осеннему сезону (стрелки влево). Необходимость вычисления адекватного значения среднего значения производной температуры накладывает дополнительные требования к используемым значениям температуры. Тот факт, что исходные временные температурные ряды, полученные от метеостанций, содержат суточные колебания с существенно различающимися скоростями изменения температуры, дополнительно подтверждает необходимость использовать сглаженную модельную температуру.

В-третьих, в моделях подобного рода связь температуры с исследуемой величиной предполагается мультипликативной. Это означает, что определённый уровень температуры может усилить или ослабить имеющуюся растительность, но

не может повлиять на вегетационную активность при её полном отсутствии, как было бы в случае, например, более простой аддитивной модели.

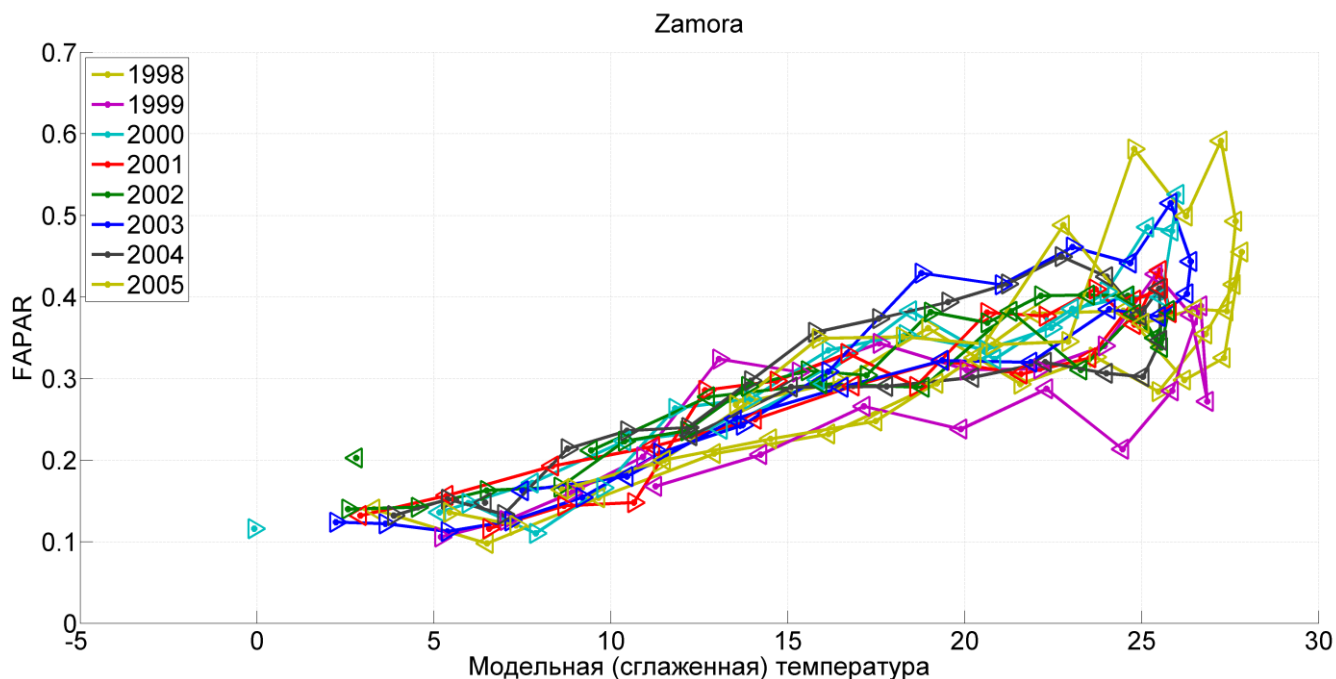


Рис. 2. Пример связи индекса FAPAR с температурой за период 1998–2005 гг.

Стрелками указано направление изменения температуры.

Анализ годовых записей среднесуточной температуры показывает, что они могут быть сглажены путём аппроксимации частичными гармоническими рядами, аналогично индексу вегетационной активности. Здесь время нормализуется по всему году

$$t^* = \frac{\text{DOY} - 1}{365}, \quad (3)$$

а модельное значение температуры представляется в виде

$$\tau^* = \alpha_0 + \sum_{k=1}^m (\beta_k \cos 2\pi k t^* + \gamma_k \sin 2\pi k t^*), \quad (4)$$

где число гармоник m определяется априорно, а коэффициенты α_0 , β_k и γ_k – по методу наименьших квадратов при аппроксимации температуры за выбранный год. Значение производной от модельной температуры по безразмерному времени t^* , соответственно

$$\dot{t}^* = \sum_{k=1}^m (-2\pi k \beta_k \sin 2\pi k t^* + 2\pi k \gamma_k \cos 2\pi k t^*). \quad (5)$$

С использованием приведённых выше значений строится модельная функция индекса вегетационной активности FAPAR с учётом температуры примет вид

$$F^*(DOY) = A_0 + A_\tau \tau^* + A_{d\tau} \dot{\tau}^* + \sum_{j=1}^n [(B_j + B_{\tau j} \tau^* + B_{d\tau j} \dot{\tau}^*) \cos 2\pi j t + (C_j + C_{\tau j} \tau^* + C_{d\tau j} \dot{\tau}^*) \sin 2\pi j t], \quad (6)$$

$$\tau^* = \tau^*(DOY), \quad \dot{\tau}^* = \dot{\tau}^*(DOY).$$

При этом набор коэффициентов $\{A_0, A_\tau, A_{d\tau}, B_j, B_{\tau j}, B_{d\tau j}, C_j, C_{\tau j}, C_{d\tau j}\}$, полученный по методу наименьших квадратов с учётом соотношений, обеспечивающих равенство нулю производной на границах вегетационного сезона

$$C_1 = -\sum_{j=2}^n j C_j, \quad C_{\tau 1} = -\sum_{j=2}^n j C_{\tau j}, \quad C_{d\tau 1} = -\sum_{j=2}^n j C_{d\tau j}, \quad (7)$$

полностью определяет модельную функцию.

Пример результата калибровки модельной функции (6) по тем же данным, что и пример на Рис. 1, дополненным температурной информацией, демонстрируется на Рис. 3, где приведены для сравнения четыре показательные реализации за некоторые годы. Несмотря на то, что различия в годовой температуре выглядят на первый взгляд несущественными, модельные функции для индекса вегетационной

активности заметно различаются, хорошо соответствуют фактическим данным и повторяют некоторые их характерные особенности в части колебаний и скорости изменения. При этом используется один и тот же набор коэффициентов.

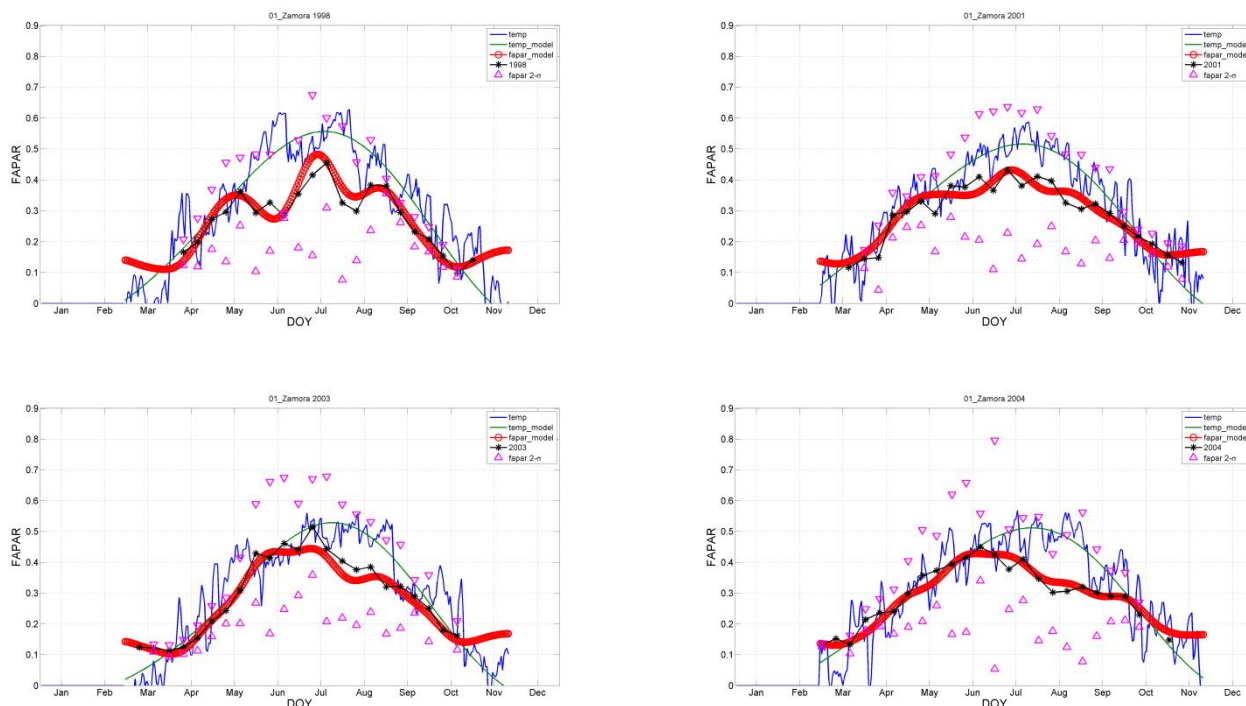


Рис. 3. Примеры модельных функций индекса FAPAR (красный цвет), построенных с учётом температурных данных, в сравнении с фактическими данными (чёрный цвет) на фоне графиков фактической и модельной (сглаженной) температур, нормализованных по уровню на 50°C, за 1998, 2001, 2003 и 2004 годы. Стрелками приведены оценки 2-сигма интервалов для фактических значений FAPAR.

Тем не менее, уточнение модели находится в пределах погрешностей фактических данных, которые часто бывают достаточно велики по указанным выше причинам.

Описание исходных данных и тестовых полигонов

Несмотря на достаточно убедительные преимущества учёта данных о температуре в модели годовой динамики вегетационной активности в приведённых примерах, для практического использования представляет интерес статистика по большему количеству данных. Далее приводятся результаты сравнения коэффициентов детерминации R^2 для двух моделей, использованных для двенадцати тестовых полигонов из работы [7], изображённых на Рис. 4.

Участки №№ 11, 12 и 14, соответствующие пустынной местности, практически не имеющей растительности, не представляют интереса для данного исследования. Краткие характеристики участков приведены в Табл. 1. Все они имеют достаточно однородный тип растительности, но при этом в совокупности охватывают различные виды растительных сообществ: лесные массивы, сухие степи или остепнённые участки, различные типы заливных лугов, плавни и т.п.

Для всех рассматриваемых полигонов имелись временные ряды индекса вегетационной активности FAPAR по данным многоканальных спутниковых снимков SeaWiFS [1] и MERIS [2], полученные с сайта Объединённого исследовательского центра Еврокомиссии [6], представляющие из себя 10-дневные композиты значений FAPAR [5], усреднённые по площади 3×3 пикселя (т.е. 6×6 км²), за период с 1997 по 2005 годы. Данный период характеризуется относительно стабильными условиями существования экосистемы Волго-Ахтубинской поймы, в отличие, например, от засушливого 2006 года. Информация о температуре воздуха по дням была получена из открытого архива погодных

измерений Астраханской метеостанции, входящей в сеть станций Всемирной метеорологической организации под номером 34880 [8].

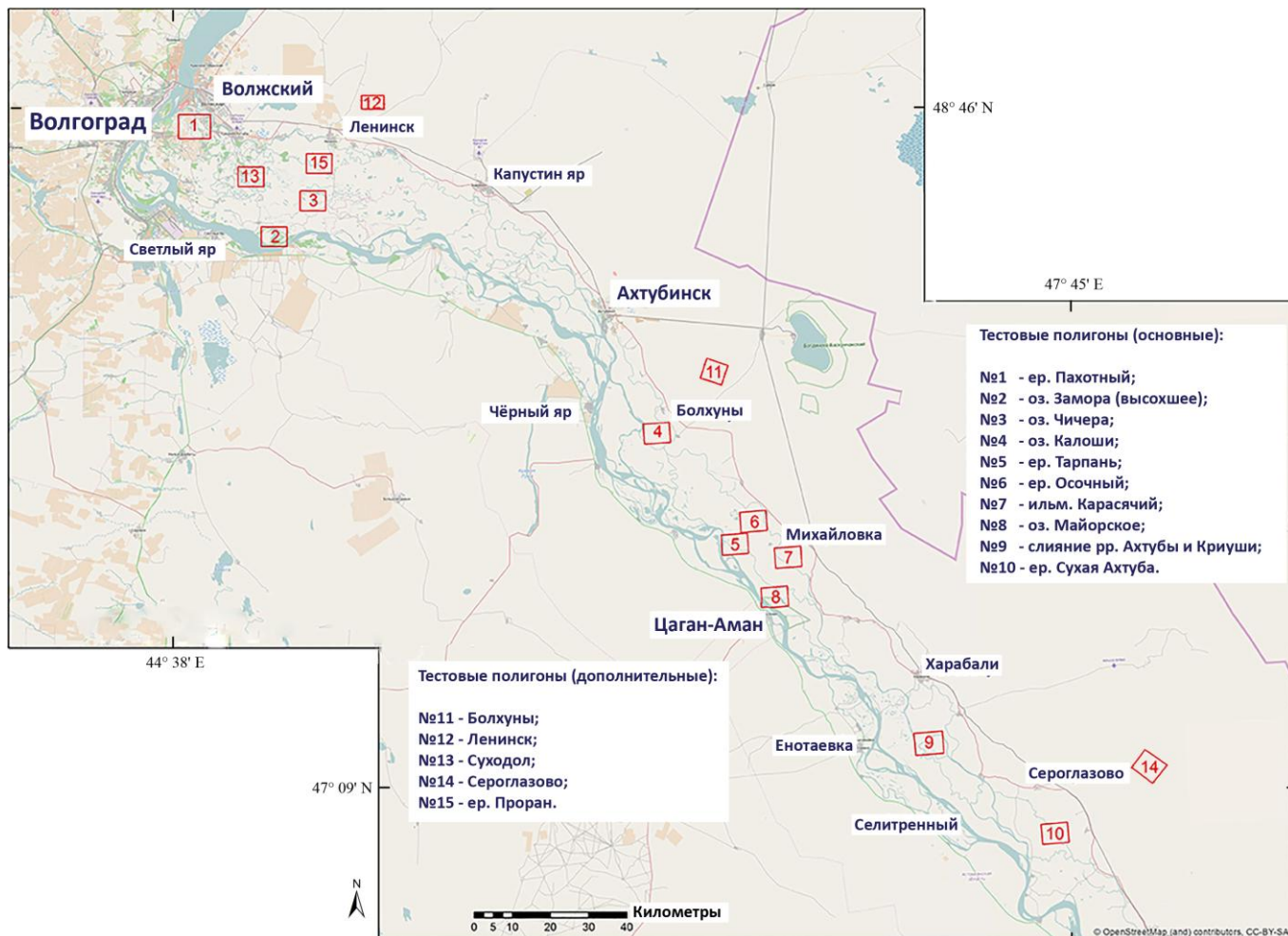


Рис. 4. Расположение тестовых полигонов Волго-Ахтубинской поймы на карте.

Табл. 1.

Краткие характеристики тестовых полигонов

№	Название полигона	Координаты	Основные виды растительности
1	Окрестности ерика Пахотный	48°42'44.9498" 44°43'12.6910"	Лесные массивы (дубравы, осокорники и ясеневники),

			зброшенны с/х земли
2	Окрестности высохшего озера Замора	48°28'29.4686" 44°59'01.2918"	Лесные массивы (дубравы, осокорники и ясеневники), вторичные ковыльно-полынные степи
3	Окрестности озера Чичера	48°33'39.7494" 45°08'23.6545"	Остепненные и злаковые луга
4	Окрестности озера Калоши	47°59'9.0350" 46°21'07.2180"	Злаковые луга
5	Окрестности ерика Гарпань	47°45'00.1975" 46°36'37.2794"	Разнотравно-злаковые луга, частично подверженные перевыпасу
6	Окрестности ерика Осочный	47°48'09.5740" 46°41'16.6068"	Злаковые и солодковые луга, подверженные перевыпасу
7	Окрестности ильменя Карасячий	47°42'24.3036" 46°48'44.6429"	Злаковые, солодковые и остепненные луга
8	Окрестности озера Майорское	47°36'06.7570" 46°44'54.1360"	Разнотравно-злаковые луга
9	Слияние рек Ахтуба и Криуша	47°14'46.0665" 47°17'53.5291"	Разнотравные, злаковые и солодковые луга
10	п. Сухая Ахтуба	47°02'38.5398" 47°43'47.7512"	Разнотравно-злаковые луга
13	Пахотные земли в окрестности п. Суходол	48°36'42.285" 44°55'14.4912"	Лесные массивы (ясеневники, лоховники), заброшенные с/х земли
15	Окрестности ерика Проран	48°39'44.0826" 45°09'08.7671"	Плавни

Оценка влияния учёта температуры на точность модели

Для каждого из тестовых полигонов была построена модель годовой динамики вегетационной активности без учёта температуры вида (2), и кроме того для каждого отдельного года – модель вида (6) с привлечением информации о температуре в течение года. Далее эффект от использования температурной информации оценивался по изменению стандартного коэффициента детерминации R^2 . Результаты приведены в Табл. 2.

Табл. 2.

Коэффициенты детерминации R^2 для моделей годовой динамики вегетационной активности с учётом температуры и без него, а также их сравнение.

Модель	Год	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Среднее по годам	Разница средних
	№ участка											
(2)	1	0.235	0.687	0.819	0.685	0.896	0.773	0.878	0.821	0.873	0.741	
(6)		0.238	0.766	0.832	0.852	0.880	0.872	0.953	0.903	0.814	0.790	0.049
(2)	2	0.744	0.862	0.570	0.870	0.861	0.705	0.840	0.771	0.660	0.765	
(6)		0.703	0.904	0.526	0.899	0.904	0.815	0.960	0.942	0.674	0.814	0.049
(2)	3	0.731	0.740	0.884	0.900	0.900	0.952	0.945	0.868	0.952	0.875	
(6)		0.812	0.773	0.901	0.928	0.952	0.873	0.978	0.937	0.920	0.897	0.023
(2)	4	0.848	0.826	0.911	0.785	0.888	0.882	0.938	0.783	0.856	0.858	
(6)		0.865	0.858	0.920	0.886	0.896	0.938	0.956	0.903	0.934	0.906	0.049
(2)	5	0.892	0.839	0.857	0.656	0.949	0.932	0.959	0.853	0.869	0.867	
(6)		0.958	0.935	0.849	0.666	0.952	0.948	0.975	0.922	0.917	0.902	0.035
(2)	6	0.553	0.855	0.484	0.644	0.791	0.690	0.892	0.710	0.702	0.702	
(6)		0.747	0.913	0.621	0.780	0.926	0.845	0.931	0.861	0.762	0.821	0.118
(2)	7	0.886	0.724	0.597	0.741	0.925	0.855	0.895	0.819	0.908	0.817	
(6)		0.800	0.786	0.671	0.808	0.966	0.864	0.926	0.880	0.879	0.842	0.026
(2)	8	0.848	0.887	0.825	0.851	0.939	0.935	0.954	0.836	0.943	0.891	
(6)		0.885	0.954	0.822	0.902	0.965	0.931	0.961	0.919	0.943	0.920	0.029
(2)	9	0.760	0.874	0.887	0.872	0.955	0.937	0.970	0.852	0.895	0.889	
(6)		0.759	0.938	0.933	0.943	0.949	0.946	0.984	0.924	0.908	0.920	0.031
(2)	10	0.520	0.876	0.786	0.928	0.933	0.937	0.947	0.901	0.928	0.862	
(6)		0.618	0.952	0.865	0.943	0.946	0.929	0.985	0.930	0.940	0.901	0.039
(2)	13	0.715	0.885	0.870	0.913	0.937	0.976	0.912	0.849	0.910	0.885	
(6)		0.798	0.937	0.885	0.954	0.955	0.945	0.972	0.937	0.892	0.920	0.034
(2)	15	0.834	0.941	0.925	0.956	0.953	0.945	0.974	0.918	0.926	0.930	
(6)		0.836	0.930	0.918	0.962	0.972	0.931	0.982	0.979	0.913	0.936	0.006
Общее среднее											0.041	

Из Табл. 2 следует, что в подавляющем большинстве случаев использование информации о годовой температуре приводит к некоторому уточнению модели. Вместе с тем, это уточнение вряд ли можно считать существенным. При этом необходимо понимать, что построение модели с учётом температуры требует

наличия метеорологических измерений за весь рассматриваемый период. Кроме того, в этом случае модель определяется значительно бóльшим количеством параметров, так как включает в себя температурные коэффициенты.

Заключение

В статье рассмотрено построение моделей годовой динамики вегетационной активности по спутниковым многоканальным снимкам как с привлечением метеорологических данных о годовой температуре, так и без него. Проведено статистическое сравнение эффективности использования температурной информации по данным 12 тестовых полигонов в Волго-Ахтубинской пойме за 9 лет измерений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что более полная модель несколько точнее соответствует фактическим значениям индекса FAPAR. Однако её использование приводит к необходимости использовать гораздо больше исходных данных, что значительно усложняет построение модели, но при этом не приводит к существенному её уточнению.

Библиографический список

1. Hooker S.B., Firestone E.R., Esaias W.E., Feldman G.C., Gregg W.W., McClain C.R. SeaWiFS technical report series. Volume 1: An overview of SeaWiFS and ocean color. NASA Goddard Space Flight Center, United States, 1992.

2. Rast M., Bezy J.L., Bruzzi S. The ESA Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS: a review of the instrument and its mission // International Journal of Remote Sensing. 1999. Vol. 20. Issue 9. pp. 1681-1702. DOI 10.1080/014311699212416.
3. Зимин И.И., Валов М.В. Разработка малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57807>
4. Steering Committee for GCOS (2003), Summary report of the eleventh session of the WMO-IOC-UNEP-ICSU, WMO/TD 1189, World Meteorol. Org., Melbourne, Australia.
5. Pinty B., Gobron N., Mélin F., Verstraete M.M. A time composite algorithm theoretical basis document, EUR Rep. 20150 EN, Inst. for Environ. and Sustainability, Ispra, Italy. 2002.
6. European Commission JRC FAPAR Download page. URL: fapar.jrc.ec.europa.eu/WWW/Data/Pages/FAPAR_Download/FAPAR.php
7. Kozlov A.V., Kozlova M.V., Skorik N.A. Simple Harmonic Model for FAPAR Temporal Dynamics in the Wetlands of the Volga-Akhtuba Floodplain // Remote Sensing, 2016, no. 8(9), pp. 762.
8. North Eurasia Climate Center. Download 223 daily station series for the territory of CIS. URL: neacc.meteoinfo.ru/monitoringdata/70-223-daily-downloads
9. Verhoef W. Application of harmonic analysis of NDVI time series (HANTS) // Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents. DLO Winand Staring Centre, The Netherlands. 1996, no. 108, pp. 19-24.