



ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ

DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2024.2.6>

UDC 911.52:581.543

LBC 28.080.17



ISSUES OF ENERGY INDEX MODELING OF VEGETATION PHENOLOGY

Fakhraddin G. oglu Agaev

Research Institute for Space Research of Natural Resources of the National Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

Hikmet H. oglu Asadov

Research Institute of Aerospace Informatics of the Natural Resources of the National Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

Meraj E. oglu Omarov

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The article is devoted to energy index modeling of vegetation phenology. Based on the dual sigmoidal model representation of the phenological cycle, an energy-index approach to phasing the stages of vegetation development and deactivation is proposed. The optimal laws for changing the amplitude of the model in the phases of development and decontamination have been determined, at which the energy released by vegetation into the environment can reach a maximum. The relationship between the LAI index and the phenological state of vegetation has been investigated. The study of the relationship of LAI with another phenological indicator of vegetation, in particular the prognostic phenological state of vegetation P . It is shown that despite the inverse logarithmic relationship between LAI and FPAR, and also due to the direct dependence of P and FPAR, averaged over all possible values of f_v , the value of P increases in the presence of a direct relationship between LAI and f_v .

Key words: phenology, vegetation, modeling, energy index approach, vegetation index, LAI.

Citation. Agaev F.G. oglu, Asadov H.H. oglu, Omarov M.E. oglu. Issues of Energy Index Modeling of Vegetation Phenology. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 55-63. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2024.2.6>

ВОПРОСЫ ЭНЕРГОИНДЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЕНОЛОГИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Фахрадин Гульали оглы Агаев

НИИ космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Хикмет Гамид оглы Асадов

НИИ аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Мерадж Эльдар оглы Омаров

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. Статья посвящена энергоиндексному моделированию фенологии растительности. На базе сдвоенного сигмоидального модельного представления фенологического цикла предложен энергоиндексный подход к фазированию этапов развития и деактивации растительности. Определены оптимальные законы изменения амплитуды модели в фазах развития и деактивации, при которых выделяемая растительностью энергия в окружающую среду может достичь максимума. Исследована связь между индексом LAI и фенологическим состоянием растительности. Проведено исследование взаимосвязи LAI с другим фенологическим показателем растительности, в частности с прогностическим фенологическим состоянием растительности P . Показано, что несмотря на инверсно-логарифмическую связь между LAI и FPAR, а также благодаря прямой зависимости P и FPAR, усредненная по всевозможным значениям f_v значение P растет при наличии прямой связи между LAI и f_v .

Ключевые слова: фенология, растительность, моделирование, энергоиндексный подход, вегетационный индекс, LAI.

Цитирование. Агаев Ф. Г. оглы, Асадов Х. Г. оглы, Омаров М. Э. оглы. Вопросы энергоиндексного моделирования фенологии растительности // Природные системы и ресурсы. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 55–63. – DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2024.2.6>

Введение

Фенология растительности характеризуется четырьмя основными фенологическими фазами, определяемыми переходными датами. Следующие фазы определяют динамику растительности в масштабе одного года: 1) рост (green up) – начало фотосинтетической активности; 2) фаза зрелости, в которой площадь зеленых листов достигает максимума; 3) увядание – фаза, в которой фотосинтетическая активность и площадь зеленых листов начинает быстро уменьшаться; 4) этап бездействия (dormancy) – этап, в которой физиологическая активность растительности почти равна нулю [15].

На рисунке 1 схематически показаны даты перехода с одной фазы в другую в виде

минимумов и максимумов скорости изменения кривой.

Например, цикл увядания может быть охарактеризован следующей логистической функцией [10; 15; 17; 18]:

$$y(t) = \frac{c}{1 + \exp(a + bt)} + d, \quad (1)$$

где t – время, дни; $y(t)$ – значение вегетационного индекса в момент t ; a , b – параметры, определяемые путем подбора; $(c + d)$ – максимальная величина вегетационного индекса; d – предыдущее значение этого индекса.

Вместе с тем одна логистическая функция характеризует лишь один переход фаз с двумя датами перехода. В работе [4] была предложена двойная логистическая модель. Та-

кая модель, согласно [4], имеет некоторые преимущества, по сравнению с моделями на базе сплайнов и гармоническими моделями [9; 12].

В сдвоенной логистической функции фазы созревания (озеленения) и увядания характеризуются различными сигмоидальными функциями, а физический смысл параметров связаны ростом и увяданием растительности. Двойная логистическая модель имеет следующий вид:

$$f(t) = A_1 + A_2 \times \left(\frac{1}{1 + \exp[-m_1(t - n_1)]} - \frac{1}{1 + \exp[-m_2(t - n_2)]} \right), \quad (2)$$

где $f(t)$ – вегетационный индекс в момент t ; A_1 и A_2 – значения фона и амплитуды вегетационного индекса; $(m_1$ и $n_1)$ (m_2 и n_2) – пары параметров, характеризующих фазы роста и увядания растительности соответственно; n_1 и n_2 – даты максимума роста и увядания в сигмоидальной функции; m_1 и m_2 – определяют покатость формы сигмоидальных функций.

Вместе с тем модель (2) используется обычно применительно к вегетационным индексам. Растительность является энергонасыщенным объектом и переходы с одной фазы фенологии в другую фазу будучи по сути переходом с одного энергетического состояния в другое, не могут быть охарактеризованы таким понятием как амплитуда. В предлагаемом энергофенологическом подходе если $f(t)$ в уравнении (2) интегрировать по t , то есть по всему фенологическому периоду (то есть за год), в принципе мы должны получить всю кажущуюся энергию, выдаваемую растительностью в окружающий мир. В таком случае $f(t)$ можно рассматривать в качестве мощности

растительности, и далее, считая A_1^2 и A_2^2 некоррелированными мощностями переписать выражение (2) в виде

$$f(t) = A_1^2 + A_2^2 \times \left(\frac{1}{1 + \exp[-m_1(t - n_1)]} - \frac{1}{1 + \exp[-m_2(t - n_2)]} \right), \quad (3)$$

где A_1, A_2 – соответственно амплитуда фона и амплитуда растительности.

Вместе с тем модели типа (2) и (3) могут охарактеризовать одну конкретную растительность при надлежащем подбора параметров A_2, m_1, n_1 . В случае если требуется охарактеризовать группу однотипных растений возникает вопрос о необходимости обобщения этих моделей применительно по всем растениям. В этом смысле определенный интерес представляет вопрос о потенциальной возможности модели (2) в смысле достижения экстремума интеграла второй составляющей на правой стороне (2), то есть следующего выражения:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} A^2 \times \left(\frac{1}{1 + \exp[-m_1(t - n_1)]} - \frac{1}{1 + \exp[-m_2(t - n_2)]} \right) dt. \quad (4)$$

По сути показатель S определяет ту энергию колоколо-образного импульса формирующегося в результате вычитания двух сигмоидальных импульсов в выражении (4). В общем случае задача оптимизации, то есть выбора такой взаимосвязи параметров, входящих в (4), при которой S достиг бы экстремума, может быть разделена на две задачи:

- оптимизация на этапе перехода на фазу роста;

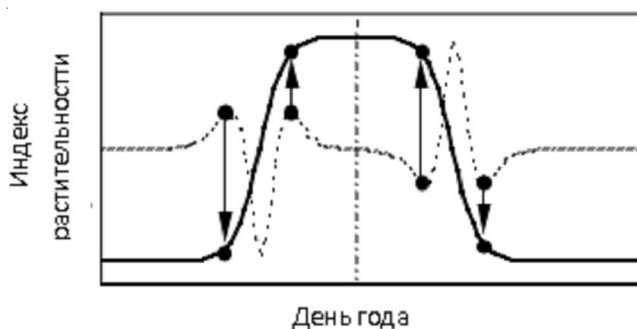


Рис. 1. Даты перехода фенологических фаз:

точки – даты перехода; пунктиры – экстремумы скорости перехода фаз

Примечание. Источник: [15].

– оптимизация на этапа перехода на фазу увядания.

Вместе с тем предлагаемый энергоиндексный подход подразумевает также учета энергосвязанности используемого вегетационного индекса в фенологическом фазировании развития растительности. В качестве такового индекса могут быть взяты NDVI и LAI. Однако, как нам представляется, эффект насыщения NDVI при высоком содержании хлорофилла листьях делает этот индекс мало пригодным при энергоиндексном подходе к фенологии. Следовательно, более рациональным выбором можно считать использование индекса LAI в указанных целях. Проанализируем вопрос об энергосвязанности индекса LAI.

Как отмечается в работе [14], индекс листовой площади (LAI) количественно определяет взаимосвязь атмосферы и кроны растения, в частности масштабы обмена скрытых и оседаемых тепловых потоков и CO₂ между ними. Согласно [1–3; 8; 13], LAI и фракционный показатель покрытия (кроны) растения являются необходимыми данными для текущего мониторинга состояния развития растений и валидации данных дистанционного зондирования. Измерение временной динамики LAI также используется для калибровки параметров моделей начального развития растений для прогнозирования объемов биомассы [11].

По определению, LAI является отношением односторонней площади листьев к единой площади земной поверхности. Индекс площади растительности PAI определяется как

$$PAI = LAI + SAI, \quad (5)$$

где SAI – индекс площади ствола и веток растительности. Показатели PAI и SAI, так же как LAI, являются безразмерными показателями и характеризуют долю покрытия площадей соответственно всей растительности, листьев и ствола и веток единой площади земной поверхности.

LAI является важным энергосвязанным показателем для исследования фенологии растений [6]. Для выяснения связи LAI с фенологическими показателями роста растений рассмотрим некоторые известные базовые положения этой связи.

Согласно [5; 7], фенологическое состояние растительности P линейно связано с та-

ким показателем как FPAR (доля фотосинтетически активной радиации, принимаемая растительностью), то есть

$$P = f(FPAR), \quad (6)$$

где функция $f(x)$ определяется следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq x_{min} \\ \frac{x - x_{min}}{x_m - x_{min}}, & \text{если } x_{min} < x. \\ 1, & \text{если } x \geq x_{max} \end{cases} \quad (7)$$

Согласно работам [5; 7; 16], биофизическое состояние LAI м²м⁻² связано с FPAR через модель захвата световой радиации следующим уравнением:

$$LAI = \frac{\ln\left(1 - \frac{FPAR}{f_v}\right)}{\ln(1 - FPAR_{sat})} \cdot LAI_{max} f_v, \quad (8)$$

где f_v – показатель доли растительности; $FPAR_{sat}$ – значение FPAR при LAI = LAI_{max}.

Далее, с учетом вышеизложенного рассматриваются решения ряда оптимизационных задач, вытекаемых из предлагаемого энергоиндексного подхода фенологическому фазированию развития растительности.

Материалы и методы

Рассмотрим первую из вышеуказанных задач оптимизации. Введем на рассмотрение функцию

$$A_2 = f(m_1). \quad (9)$$

Физический смысл которой заключается в выборе крутизны перехода к фазе роста в зависимости от величины амплитуды v_2 .

В качестве целевого функционала рассмотрим следующее выражение:

$$F = \int_{t_{min}}^{t_{max}} A_2^2(t) \frac{dt}{1 + \exp[m_1(t - n_1)]}. \quad (10)$$

Для решения данной задачи применим к функции (9) следующее ограничительное условие:

$$\int_{t_{min}}^{t_{max}} A_2(t) dt = C_1; \quad C_1 = const. \quad (11)$$

Физический смысл ограничения (6) заключается в следующем. При возникновении крайне благоприятных условий роста растений показатели A_2 и t оказываются прямо пропорциональными, то есть чем больше скорость, тем больше A_2 . Однако, в реальном случае прямо пропорциональна линейная связь между t и A_2 часто нарушается в другую сторону вокруг указанных прямых линий (рис. 2).

С учетом выражений (10) и (11) составим целевой функционал безусловной вариационной оптимизации F_1 , условно приняв $t_{min} = 0$.

$$F_1 = \int_{t_{min}}^{t_{max}} A_2^2(t) \frac{dt}{1 + \exp[m_1(t - n_1)]} - \lambda \left[\int_{t_{min}}^{t_{max}} A_2(t) dt - C \right], \quad (12)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (12) должно удовлетворить условию

$$\frac{2A_2(t)}{1 + \exp[-m_1(t - n_1)]} - \lambda = 0. \quad (13)$$

Из выражения (13) получим

$$A_2(t) = \frac{\lambda [1 + \exp[-m_1(t - n_1)]]}{2}. \quad (14)$$

При решении (14) F_1 достигает минимума, так как производная выражения (13) по $A_2(t)$ оказывается положительной величиной. Таким образом, при решении типа (14) следует ожидать минимального объема выделяемой энергии, а следовательно, в этом случае можно рекомендовать выбор функций $A_2(t)$ из

группы 1, показанных на рисунке 2. Рассмотрим процесс перехода к фазе деактивации. В этом случае целевой функционал, соответствующий функционалу (7) будет иметь вид

$$F_2 = \int_{t_1}^{t_{max}} A_2^2(t) \frac{dt}{1 + \exp[-m_2(t - n_2)]} - \lambda_2 \left[\int_{t_1}^{t_{max}} A_2(t) dt - C_2 \right], \quad (15)$$

где $C_2 = \int_{t_1}^{t_{max}} A_2(t) dt$; t_1 – точка преломления на заднем фронте колоколообразного импульса, показанного на рисунке 1.

Решение задачи (15) удовлетворяет условию

$$\frac{2A_2(t)}{1 + \exp[-m_2(t - n_2)]} - \lambda_2 = 0. \quad (16)$$

Из выражения (16) находим

$$A_2(t) = \lambda_2 [1 + \exp[-m_2(t - n_2)]] \quad (17)$$

При решении (17) функционал F_2 достигает минимума, т.к. производная (16) по $A_2(t)$ оказывается положительной величиной. С точки зрения достижения высокого энергофенологического показателя F_2 должна иметь минимальную величину.

Следовательно, в фазе роста, то есть в промежутке $(0 - t_1)$ функция $A_2(t)$ должен иметь возрастающий вид, а в диапазоне $(t_1 - t_{max})$ убывающий. Такой порядок изменения амплитуды A_2 во времени может оптимизировать энергофенологическую активность растительности.

Таким образом, как видно из выражений (6)–(10) в интервале $(F_{PAR_{max}} - F_{PAR_{min}})$ по-

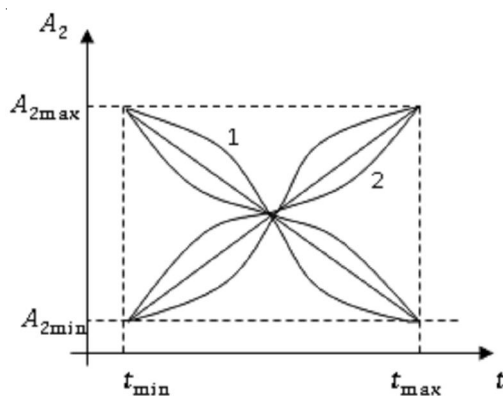


Рис. 2. Геометрическая интерпретация условия (11)

казатель «прогностическое фенологическое состояние» линейно зависит от FPAR, который инверсно-логарифмически определяет величину LAI. Следовательно, LAI может быть использован показателем фенологического состояния растительности. В выражении (8) примем:

$$\ln(1 - FPAR_{sat}) = C_1; \quad LAI_{max} = C_2.$$

В этом случае из (8) получаем

$$\ln(1 - FPAR/f_v) = \frac{LAI}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}. \quad (18)$$

Из выражения (18) находим

$$1 - \frac{FPAR}{f_v} = \exp\left(\frac{LAI}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right). \quad (19)$$

Из (19) получим

$$FPAR = f_v \left[1 - \exp\left(\frac{LAI}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)\right]. \quad (20)$$

С учетом (6) и (20) находим

$$P = f \left(f_v \left[1 - \exp\left(\frac{LAI}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)\right]\right). \quad (21)$$

Таким образом, с увеличением LAI показатель P прогностического фенологического состояния экспоненциально уменьшается.

Вместе с тем определенным интересом представляет следующий вопрос: Каким образом может повлиять на показатель P функциональная зависимость LAI от f_v . Следовательно, для исследования данного вопроса необходимо принять вероятностную модель и далее исследовать зависимость P от вводимой функции

$$LAI = \Psi(f_v). \quad (22)$$

Для упрощения математической записи в первую очередь примем равновероятную модель f_v , то есть

$$f_v = \begin{cases} 0; & \text{если } f_v = 0 \\ \frac{f_v - f_{v.min}}{f_{v.max} - f_{v.min}}; & \text{если } f_{min} < f_v < f_{v.max} \\ 1; & \text{если } f_v = f_{v.max} \end{cases}. \quad (23)$$

С учетом модели (11) среднюю величину (9) определим как

$$P_{cp} = \frac{1}{f_{v.max}} \int_0^{f_{v.max}} k \cdot f_v \left[1 - \exp\left(\frac{\Psi(f_v)}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)\right] df_v. \quad (24)$$

где $k = \text{const}$.

Для вычисления оптимальной функции $\Psi(f_v)$ наложим на эту функцию следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{f_{v.max}} \Psi(f_v) df_v = C_0; \quad C_0 = \text{const}. \quad (25)$$

С учетом выражений (24) и (25) можно сформировать задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал которой имеет вид

$$P_{cp} = \frac{1}{f_{v.max}} \int_0^{f_{v.max}} k f_v \left[1 - \exp\left(\frac{\Psi(f_v)}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)\right] df_v + \lambda \left[\int_0^{f_{v.max}} \Psi(f_v) df_v - C_0 \right], \quad (26)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (26) должно удовлетворить условию

$$d \left\{ \frac{k}{f_{v.max}} f_v \left[1 - \exp\left(\frac{\Psi(f_v)}{f_v} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)\right] + \lambda \Psi(f_v) \right\} / d\Psi(f_v) = 0; \quad (27)$$

$$- \frac{k \cdot f_v}{f_{v.max}} \exp\left(\frac{\Psi(f_v) C_1}{f_v C_2}\right) \cdot \frac{C_1}{C_2 \cdot f_v} + \lambda = 0. \quad (28)$$

Из выражения (28) получим

$$\exp\left(\frac{\Psi(f_v) \cdot C_1}{f_v \cdot C_2}\right) = \frac{\lambda \cdot f_{v.max}}{k} \cdot \frac{C_2}{C_1}. \quad (29)$$

Логарифмируя (29), находим

$$\Psi(f_v) = \frac{f_v \cdot C_2}{C_1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda \cdot f_{v.max}}{k} \cdot \frac{C_2}{C_1}\right) = C_3 f_v, \quad (30)$$

где

$$C_3 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda \cdot f_{v.max}}{k} \cdot \frac{C_2}{C_1}\right).$$

Таким образом, при решении (30) показатель P_{cp} достигает экстремальной величины.

Для определения типа экстремума функционала (26) можно вычислить производную выражения (28) по искомой функции и убедиться, что этот экстремум является максимумом. С учетом выражений (24) и (30) вычислим максимально возможную величину P_{cp} . Имеем

$$P_{cp,max} = \int_0^{f_{v,max}} \frac{k}{f_{v,max}} \cdot f_v \left[1 - \exp \frac{C_3 C_1}{C_2} \right] df_v = \frac{C_4 \cdot f_{v,max}^2}{2}, \quad (31)$$

где

$$C_4 = \frac{k \cdot \left[1 - \exp \frac{C_3 C_1}{C_2} \right]}{f_{v,max}}. \quad (32)$$

Таким образом, максимальная величина P_{cp} находится в квадратической зависимости от $f_{v,max}$.

Заключение

Предложен энергоиндексный подход к фазированию этапов развития и деактивации растительности, базирующийся сдвоенном сигмоидальном модельном представлении фенологического цикла.

Определены оптимальные законы изменения амплитуды модели в фазах развития и деактивации при которых выделяемая растительностью энергия в окружающую среду может достичь максимума.

Исследование связи LAI с фенологическими показателями растений, в частности прогностическим фенологическим состоянием растительности P показало, что несмотря на инверсно-логарифмическую связь между LAI и $\frac{FPAR}{f_v}$, благодаря прямой зависимости P и FPAR, усредненная по всевозможным значениям f_v значение P растет при наличии прямой связи между LAI и f_v .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Чаабави, М. Р. А. Полевое эталонирование космоснимков агроландшафтов на территории южной части Месопотамской низменности / М. Р. А. Аль-Чаабави, Е. А. Иванцова // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 7–13.

2. Овсянкин, Р. В. Компьютерное картографирование сохранности зеленых насаждений в городских ландшафтах / Р. В. Овсянкин, Е. А. Иванцова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : Наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 2 (42). – С. 134–140.

3. Ряснов, В. А. Применение метода дешифрирования космоснимков при оценке состояния лесных ценозов Волго-Ахтубинской поймы / В. А. Ряснов, Е. А. Иванцова // Экологическая безопасность и охрана окружающей среды в регионах России: теория и практика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2015. – С. 204–209.

4. A Dataset of 30 m Annual Vegetation Phenology Indicators (1985–2015) in Urban Areas of the Conterminous United States / X. Li [et al.] // Earth Syst. Sci. Data. – 2019. – Vol. 11, № 2. – P. 881–894.

5. A Global 9-yr Biophysical Land Surface Dataset from NOAA AVHRR Data / S. O. Los [et al.] // J. Hydrometeorol. – 2000. – Vol. 1. – P. 183–199.

6. A Global Reanalysis of Vegetation Phenology / R. Stöckli [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 2011. – Vol. 116. – G03020.

7. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. 1. Model Formulation / P. J. Sellers [et al.] // J. Clim. – 1996. – № 9. – P. 676–705.

8. Canisius, F. Comparison Andevaluation of Medium Resolution Imaging SpectrometerleafArea Index Products Across a Range of Land Use / F. Canisius, R. Fernandes, J. Chen // Rem. Sens. Environ. – 2010. – Vol. 114. – P. 950–960.

9. Carrao, H. A Nonlinear Harmonic Model for Fitting Satellite Image Time Series: Analysis and Prediction of Land Cover Dynamics / H. Carrao, P. Goncalves, M. Caetano // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2010. – Vol. 48. – P. 1919–1930.

10. Climate Change, Phenology and Phenological Control of Vegetation Feedbacks to the Climate System / A. D. Richardson [et al.] // Agric. For. Meteorol. – 2013. – Vol. 169. – P. 156–173.

11. Guerif, G. Calibration of the SUCROS Emergence and Early Growth Module for Sugar Beet Using Optical Remote Sensing Data Assimilation / G. Guerif, C. Duke // Eur. J. Agron. – 1998. – Vol. 9. – P. 127–136.

12. Interactions Between Urban Vegetation and Surface Urban Heat Islands: A Case Study in the Boston Metropolitan Region / E. K. Melaas [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2016. – Vol. 11, № 5. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054020>

13. Liu, J. Retrieval of Leaf Area Index From Top-Of-Canopy Digital Photography Over Agricultural Crops / J. Liu, E. Pattey // Agric. For. Meteorol. – 2010. – Vol. 150. – P. 1485–1490.

14. Measuring Leaf Area Index From Colour Digital Image of Wheat Crop / R. N. Bappa Das [et al.]

// Journal of Agrometeorology. – 2016. – Vol. 18, № 1. – P. 22–28. – DOI: <https://doi.org/10.54386/jam.v18i1.885>

15. Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS / X. Zhang [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 84, № 3. – P. 471–475.

16. Monsi, M. On the Factor Light in Plant Communities and Its Importance for Matter Production / M. Monsi, T. Saeki // Ann. Bot. – 2005. – № 95. – P. 549.

17. Phenocams Bridge the Gap Between Field and Satellite Observations in an Arid Grassland Ecosystem / D. Browning [et al.] // Remote Sens. – 2017. – Vol. 9, № 10. – P. 1071. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs9101071>

18. Tracking Forest Phenology and Seasonal Physiology Using Digital Repeat Photography: A Critical Assessment / T. F. Keenan [et al.] // Ecol. Appl. – 2014. – Vol. 24, № 6. – P. 1478–1489.

REFERENCES

1. Al-Chaabavi M.R.A., Ivantsova E.A. Polevoye etalonirovaniye kosmosnimkov agrolandshaftov na territorii yuzhnoy chasti Mesopotamskoy nizmennosti [Field Etching of Satellite Images of Agricultural Landscapes on the Territory of the Southern Part of the Mesopotamian Lowland]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2022, no. 9, pp. 7-13.

2. Ovsyankin R.V., Ivantsova E.A. Kompyuternoye kartografirovaniye sokhrannosti zelenykh nasazhdeniy v gorodskikh landshaftakh [Computer Mapping of Green Plantings Preservation in Urban Landscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye* [Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.], 2016, no. 2 (42), pp. 134-140.

3. Ryasnov V.A., Ivantsova E.A. Primeneniye metoda deshifirovaniya kosmosnimkov pri otsenke sostoyaniya lesnykh tsenozov Volgo-Akhtubinskoy poymy [Application of the Method of Decoding Satellite Images in Assessing the State of Forest Cenoses of the Volga-Akhtuba Floodplain]. *Ekologicheskaya bezopasnost i okhrana okruzhayushchey sredy v regionakh Rossii: teoriya i praktika: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Environmental Safety and Environmental Protection in the Regions of Russia: Theory and Practice. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Volgograd, Izd-vo VolGU, 2015, pp. 204-209.

4. Li X., Zhou Y., Meng L. et al. A Dataset of 30 m Annual Vegetation Phenology Indicators (1985–2015) in Urban Areas of the Conterminous United States. *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 881-894.

5. Los S.O., Pollack N.H., Parris M.T. A Global 9-Yr Biophysical Land Surface Dataset from NOAA AVHRR Data. *J. Hydrometeorol*, 2000, vol. 1, pp. 183-199.

6. Stuckli R., Rutishauser T., Baker I. et al. A Global Reanalysis of Vegetation Phenology. *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116, G03020.

7. Sellers P.J., Randall D.A., Collatz G.J. et al. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. 1. Model Formulation. *J. Clim.*, 1996, no. 9, pp. 676-705.

8. Canisius F., Fernandes R., Chen J. Comparison and Evaluation of Medium Resolution Imaging Spectrometer Leaf Area Index Products Across a Range of Land Use. *Rem. Sens. Environ.*, 2010, vol. 114, pp. 950-960.

9. Carrao H., Goncalves P., Caetano M. A Nonlinear Harmonic Model for Fitting Satellite Image Time Series: Analysis and Prediction of Land Cover Dynamics. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, vol. 48, pp. 1919-1930.

10. Richardson A.D., Keenan T.F., Migliavacca M. et al. Climate Change, Phenology and Phenological Control of Vegetation Feedbacks to the Climate System. *Agric. For. Meteorol.*, 2013, vol. 169, pp. 156-173.

11. Guerif G., Duke C. Calibration of the SUCROS Emergence and Early Growth Module for Sugar Beet Using Optical Remote Sensing Data Assimilation. *Eur. J. Agron.*, 1998, vol. 9, pp. 127-136.

12. Melaas E.K., Wang J.A., Miller D.L., Friedl M. Interactions Between Urban Vegetation and Surface Urban Heat Islands: A Case Study in the Boston Metropolitan Region. *Environ. Res. Lett.*, 2016, vol. 11, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054020>

13. Liu J., Pattey E. Retrieval of Leaf Area Index from Top-Of-Canopy Digital Photography over Agricultural Crops. *Agric. For. Meteorol.*, 2010, vol. 150, pp. 1485-1490.

14. Bappa Das R.N., Sahoo S.P., Gopal Krishna V.K. et al. Measuring Leaf Area Index from Colour Digital Image of Wheat Crop. *Journal of Agrometeorology*, 2016, no. 18 (1), pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.54386/jam.v18i1.885>

15. Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B. et al. Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 84, no. 3, pp. 471-475.

16. Monsi M., Saeki T. On the Factor Light in Plant Communities and Its Importance for Matter Production. *Ann. Bot.*, 2005, no. 95, p. 549.

17. Browning D., Karl J., Morin D. et al. Phenocams Bridge the Gap Between Field and Satellite Observations in an Arid Grassland Ecosystem. *Remote Sens.*, 2017, vol. 9 (10), p. 1071. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs9101071>

18. Keenan T.F., Darby B., Felts E. et al. Tracking Forest Phenology and Seasonal Physiology Using Digital Repeat Photography: A Critical Assessment. *Ecol. Appl.*, 2014, vol. 24, no. 6, pp. 1478-1489.

Information About the Authors

Fakhraddin G. oglu Agaev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director, Research Institute for Space Research of Natural Resources of the National Aerospace Agency, S.S. Akhundova St, 1, AZ1115 Baku, Republic of Azerbaijan, director.tehti@mail.ru

Hikmet H. oglu Asadov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department, Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency, S.S. Akhundova St, 1, AZ1115 Baku, Republic of Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

Meraj E. oglu Omarov, Doctoral Student, National Aerospace Agency, S.S. Akhundova St, 1, AZ1115 Baku, Republic of Azerbaijan, meracomarov@gmail.com

Информация об авторах

Фахрадин Гульали оглы Агаев, доктор технических наук, профессор, директор, НИИ космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджанская Республика, director.tehti@mail.ru

Хикмет Гамид оглы Асадов, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, НИИ аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджанская Республика, asadzade@rambler.ru

Мерадж Эльдар оглы Омаров, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство, ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджанская Республика, meracomarov@gmail.com