

- metallami // Pochvovedenie. – 2002. – № 3. – S. 22–28.
7. Jelementnyj analiz pochv s ih predvaritel'noj destrukciej himicheskimi metodami / A.G. Kornilova, T.Z. Lygina, A.A. Shinkarev [i dr.] // Vestn. Kazan. tehnol. un-ta. – 2011. – № 4. – S. 108–112.
8. *Krupkin P.I.* Puti racional'nogo ispol'zovanija pochv, zagriznennyh ftorom // Agrohimiya. – 2005. – № 3. – S. 78–87.
9. *Motuzova G.V.* Jekologicheskij monitoring pochv. – M.: Gaudeamus, 2007. – S. 93–99.
10. *Tandelov Ju.P.* Ftor v sisteme pochva-rastenie. – M.: Izd-vo MGU, 2004.



УДК 581.174

**С.С. Алиева, С.М. Аббасова,
Е.Дж. Сулейманова**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКОСИСТЕМНОГО ПОТОКА CO₂
В РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛЯХ НА МАССУ ВЫРАЩЕННОЙ БИОМАССЫ В АКВАМОДЕЛИ FAO**

**S.S. Alieva, S.M. Abbasova,
E.Dzh. Suleymanova**

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF ECOSYSTEM STREAM OF CO₂ IN VEGETABLE FIELDS
ON THE MASS OF THE BIOMASS GROWN-UP IN AKWA MODEL OF FAO**

Алиева С.С. – асп. Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства Азербайджана, Азербайджанская Республика, г. Баку. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Аббасова С.М. – диссертант, ст. преп. каф. инженерного приборостроения Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, Азербайджанская Республика, г. Баку. E-mail: abbasova.s.85@mail.ru

Сулейманова Е.Дж. – диссертант Национального аэрокосмического агентства Азербайджана, Азербайджанская Республика, г. Баку. E-mail: suleymanova.egana@rambler.ru

Alieva S.S. – Post-Graduate Student, Institute for Aerospace Research of Natural Resources, National Aerospace Agency of Azerbaijan, Azerbaijan Republic, Baku. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Abbasova S.M. – Cand. for a Degree, Asst, Chair of Engineering Instrument Making, Azerbaijan State Oil and Industrial University, Azerbaijan Republic, Baku. E-mail: abbasova .s.85@mail.ru

Suleymanova E.Dzh. – Cand. for a Degree, National Space Agency of Azerbaijan, Azerbaijan Republic, Baku. E-mail: suleymanova.egana@rambler.ru

Процесс испарения (транспирации) растений происходит на протяжении всей их жизни растений днем и ночью. В течение дня растения как поглощают CO₂ для фотосинтеза, так и высвобождают его посредством испарения. Следует отметить, что роль CO₂ в развитии растений наиболее полно проявляется в процессе производства биомассы. Специфика влияния атмосферной концентрации CO₂ на рост растений заключается в том, что между верхним слоем земли и нижним сло-

ем тропосферы всегда существуют потоки CO₂. В зоне растительности эти потоки обусловлены такими факторами, как микробиальная активность в земле, вдыхание растениями CO₂ в дневное время для фотосинтеза, генерация растениями CO₂ и O₂ днем а также CO₂ в ночное время. Цель исследований – построение модели, позволяющей осуществить обработку результатов измерения концентрации CO₂ в непосредственной близости зоны посадки растений путем исключения

погрешностей, возникающих из-за вышеуказанных экосистемных потоков CO_2 , а также калибровку полевого измерителя концентрации CO_2 непосредственно вблизи поля растений по региональному эталонному измерителю. Сформулирована и решена задача точного определения концентрации CO_2 над растительными полями, что необходимо для учета влияния CO_2 на массу выращенной биомассы согласно модели FAO «Aqua Crop». Предложена процедура калибровки DOAS измерителя, осуществляющего измерение концентрации CO_2 в непосредственной близости от растительных полей, с учетом экосистемных потоков CO_2 . Сформулирована и решена оптимизационная задача, позволяющая учесть температурную зависимость экосистемных потоков CO_2 при калибровке измерителя.

Ключевые слова: биомасса, моделирование, экосистемный поток, растительность, оптимизация.

The process of evaporation (transpiration) of plants happens throughout all life of plants by day and night. During the day plants both absorb CO_2 for photosynthesis and release it by means of evaporation. It should be noted that the role of CO_2 in the development of plants is most fully shown in the course of production of biomass. The specifics of influence of atmospheric concentration of CO_2 on plants growth are that between top layer of the earth and lower layer of the troposphere there are always CO_2 streams. In vegetation zone these streams are caused by such factors as microbial activity in the earth, the inhalation by CO_2 plants for photosynthesis, generation by plants of CO_2 and O_2 in day time and also CO_2 at night. The purpose of researches is the creation of the model allowing to carry out the processing of the results of concentration of CO_2 measurement in close proximity of the zone of plants growth by the exception of the errors arising because of above ecosystem streams of CO_2 , and also the calibration of the field measuring instrument of concentration of CO_2 directly near the field of plants using regional reference measuring instrument. The problem of exact determination of concentration of CO_2 over vegetable fields that is necessary for taking note of CO_2 on the mass of the grown-up biomass according to the FAO "Aqua Crop" model is formulated and decided. The procedure of calibration of DOAS measuring instrument which is carrying out measurement of concentration of CO_2 in close proximity to vegetable fields taking

into account ecosystem streams of CO_2 is offered. The optimizing task allowing considering temperature dependence of ecosystem streams of CO_2 at calibration of the measuring instrument is formulated and solved.

Keywords: biomass, modeling, ecosystem stream, vegetation, optimization.

Введение. Хорошо известно, что процесс испарения (транспирации) растений происходит на протяжении всей их жизни днем и ночью.

В модели Aqua Crop FAO (модель, поясняющая зависимость урожайности растения от воды) рассмотрены следующие процессы развития растения [1]: развитие; воздухообмен растительности; производство биомассы; формирование урожая (плода).

Как отмечается в работе [1], в модели Aqua Crop FAO для моделирования наземной биомассы в целях учета климатических условий используется нормализованная водяная продуктивность (WP^*). Нормализация для учета влияния CO_2 предусматривает доведение концентрации CO_2 до величины 369,41 ppm.

Для вычисления суточной величины наземной биомассы в модели AQUA CROP FAO используется следующее выражение:

$$B = k \cdot WP^* \cdot \sum_i \frac{T_{ri}}{ET_{0i}}, \quad (1)$$

где WP^* – нормализованная водяная продуктивность; ET_0 – опорная эвапотранспирация; T_r – транспирация; i – дни; k – коэффициент коррекции, учитывающий изменение концентрации CO_2 в атмосфере.

Согласно [1], порядок коррекции следующий: если концентрация CO_2 в атмосфере больше, чем 369,41 ppm, то $k > 1$; если ниже, то $k < 1$.

Следует отметить, что существует ряд других агроэкосистемных моделей, учитывающих влияние CO_2 на рост растительности.

Так, например, в работе [2] указывается, что в растениях типа С3 увеличение CO_2 приводит к повышению скорости фотосинтеза, а также уменьшает устьичную проводимость, увеличивая эффективность использования воды. В работе [3] устанавливается эмпирическая связь между CO_2 и удельной эффективностью использования радиации растительностью, а в работе [4] подчеркивается зависимость кривой фотосинтез – свет от концентрации CO_2 .

Вместе с тем основной проблемой в учете влияния атмосферного CO_2 является не выбор соответствующей модели, а своевременное получение точной информации о содержании CO_2 в атмосфере. Формально во многих исследованиях в качестве эталонной величины концентрации CO_2 в атмосфере принимается показатель, полученный в результате измерений, проведенных в калибровочной высокогорной станции NASA, расположенной на Мауне-Лоа [5]. Однако в реальном случае концентрация CO_2 в атмосфере сильно различна как по регионам мира, так и в зависимости от типа воздушной массы. Так, согласно [6], изменчивость по регионам с учетом сезонных флуктуаций может достичь 3–5 ppm, изменчивость по воздушным массам 4–5 ppm [7]. Указанное обстоятельство фактически лишает смысла учет данных калибровочной станции, расположенной на Мауне-Лоа, и указывает на целесообразность учета региональных измерительных данных. С другой

стороны, специфика влияния атмосферной концентрации CO_2 на рост растений заключается в том, что между верхним слоем земли и нижним слоем тропосферы всегда существуют потоки CO_2 . Эти потоки обеспечивают существенную временную изменчивость потоков CO_2 , устремленных с растительности в атмосферу или из атмосферы в растительность. Согласно работе [8], в течение раннего периода, при малых значениях LAI (индекс листевой площади), экосистемный поверхностный поток CO_2 является положительным, и образцы дневного изменения концентрации CO_2 подобны тому, которые происходят в послеурожайный период. Общий вид дневных изменений этих потоков показаны на рисунке 1. В противовес этому в период роста растения, при высоком значении индекса LAI, указанный поток приобретает отрицательное значение из-за забора CO_2 растением в целях фотосинтеза, в то время как в ночное время этот поток становится положительным.

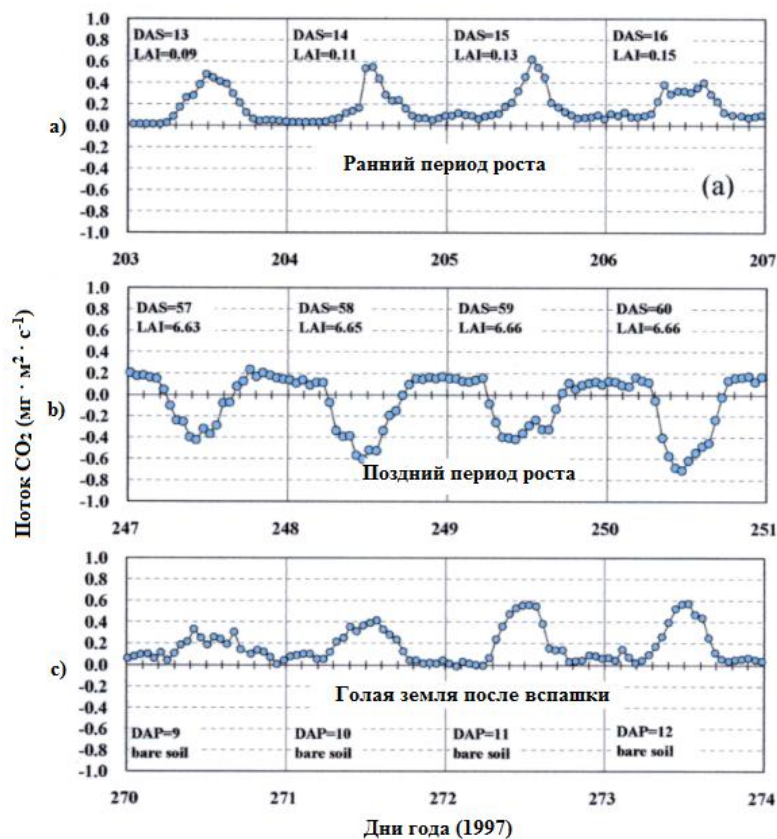


Рис. 1. Экосистемный поверхностный поток CO_2 в разных вегетационных периодах растений [8]: а – ранний период роста; б – поздний период роста; с – голая земля после вспашки

Цель исследований. Построение модели, позволяющей осуществить обработку результатов измерения концентрации CO_2 в непосредственной близости зоны посадки растений

путем исключения погрешностей, возникающих из-за вышеуказанных экосистемных потоков CO₂; калибровку полевого измерителя концентрации CO₂ непосредственно вблизи поля растений по региональному эталонному измерителю, находящегося в ведении центрального ведомства региональной гидрометеорологии.

Методы и результаты исследований. Для построения модели принимаются следующие предположения:

1. Известен результат эталонного измерения концентрации CO₂ в рассматриваемом регионе (районе), который отличен от данных, выдаваемых станцией, расположенной на Мауне-Лоа.

2. Известен тип растения, посаженного в поле.

3. Известен вид исследуемого вегетационного периода растения.

4. Известен вид функции временной зависимости экосистемного потока CO₂.

Для пояснения предлагаемой процедуры калибровки DOAS измерителя концентрации CO₂ в пределах растительного поля рассмотрим рисунок 2, где схематически указана модуляция из-за функционирования экосистемного двухполярного потока CO₂.

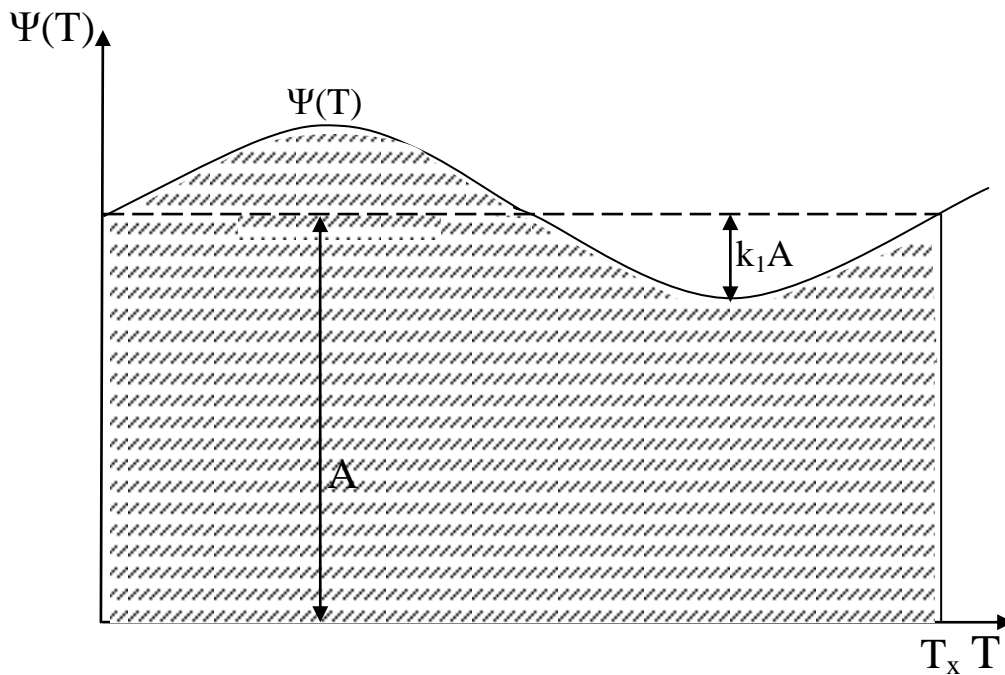


Рис. 2. Формирование предлагаемого метода калибровки полевого измерителя концентрации CO₂ в зоне растительного поля: $\psi(T)$ – функция изменения мощности потока CO₂ во времени; A – фоновая концентрация, т.е. концентрация CO₂ при отсутствии экосистемного двухполярного потока CO₂; $k_1 A$ – амплитуда функции $\psi(T)$, являющаяся функцией A

В первом приближении функцию $\psi(T)$, как это показано на рисунке 2, примем в качестве двухполярной периодической функции. В этом случае площадь S заштрихованной области на рисунке 2 определим как

$$S = \int_0^{T_x} [A + A \cdot k_1 \cdot \psi(T)] dT, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от типа растения; T_x – интервал времени, в течение которой проводятся измерения.

В целях калибровки измерителя выставляется следующее требование:

$$A = \frac{1}{k_2} \int_0^{T_x} [A + A \cdot k_1 \cdot \psi(T)] dT, \quad (3)$$

где k_2 – коэффициент формы кривой потока $\psi(T)$.

Из выражения (3) получаем следующее условие:

$$k_2 = \int_0^{T_x} [1 + k_1 \cdot \psi(T)] dT. \quad (4)$$

Таким образом, задаваясь значениями T_x , k_1 и $\psi(T)$, используя формулу (4), можно вычислить значение k_2 , позволяющее откалибровать измеритель по величине A .

С учетом влияния шумов в системе очевидно, что калибровка при больших значениях A должна получиться более точной, что равносильно требованию достижения минимального значения k_2 . Далее учитываем, что, согласно работе [8], экосистемный поток CO_2 является

функцией температуры поверхности почвы t_p . В формуле (4), представив $k_1\psi(T)$ в виде сепарабельной функции экосистемного потока, примем [8]

$$k_1 = a \cdot Q_{10}^{\frac{(t-20)}{10}} - b, \quad (5)$$

где $a, b = \text{const}$; Q_{10} – температурный коэффициент.

$$t = t(T) \quad (6)$$

А также если допустить следующее ограничение на функцию (6):

$$\int_0^{T_x} t(T) dT = C_1; \quad (7)$$

где $C_1 = \text{const}$, то с учетом выражений (4), (5), (7) можем сформировать следующую задачу вариационной оптимизации по нахождению такой функции $t(T)$, при которой k_2 достигает минимума

$$k_2 = \int_0^{T_x} \left[1 + \left[a \cdot Q_{10}^{\frac{(t(T)-20)}{10}} - b \right] \cdot \psi(T) \right] dT + \lambda \int_0^{T_x} t(T) dT. \quad (8)$$

Решение оптимизационной задачи (7), (8) с применением уравнения Эйлера – Лагранжа дало следующую оптимальную функцию $t(T)$, при которой k_2 достигает минимума:

$$t(T) = 10 \ln \frac{\lambda_0}{1,9 \cdot C \cdot (\ln Q) \cdot A \cdot \psi(T)}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), минимальная величина k_2 достигается в том случае, если увеличение $\psi(T)$ из-за роста T будет сопровождаться уменьшением t по аргументу T .

Таким образом, выявлена следующая закономерность взаимного изменения показателей t от T , при которой достигается высокое значение A , т.е. обеспечивается более точная калибровка:

1) при росте функции $\psi(T)$ по T функция $t(T)$ должна быть спадающей;

2) при убывании функции $\psi(T)$ по T функция $t(T)$ должна быть растущей.

Обеспечение этих условий позволит реализовать калибровку с более высокой величиной показателя A и, осуществив точную калибровку DOAS измерителя, более точно учесть воздействие концентрации CO_2 на вычисленную величину биомассы по формуле (1).

Выводы

1. Сформулирована и решена задача точного определения концентрации CO_2 над растительными полями, что необходимо для учета влияния CO_2 на массу выращенной биомассы согласно модели FAO «Aqua Crop».

2. Предложена процедура калибровки DOAS измерителя, осуществляющего измерение концентрации CO₂ в непосредственной близости от растительных полей с учетом экосистемных потоков CO₂.

3. Сформулирована и решена оптимизационная задача, позволяющая учесть температурную зависимость экосистемных потоков CO₂ при калибровке измерителя.

Литература

1. Chapter 1.FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. – URL: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
2. Manderscheid R., Weigel H.J., 2007: Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *Argon. Sust. Dev.* 27(2), 79–87.
3. Bindi M., Fibbi L., Gozzini B., Orlandini S., Miglietta F., 1996: Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Res.* 7, 213–224.
4. Porter J., 1993: AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2(2), 69–82.
5. Potter Ch.S., Randerson J.T., Field Ch.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on glona; satellite and surface data // *Global Biogeochemical cycles.* – 1993. – Vol. 7. – № 4. – P. 811–841.
6. Bai W.G., Zhang X.Y., Zhang P. Temporal and spatial distribution on tropospheric CO₂ over China based on satellite observations.
7. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г. [и др.] // *Chinese Science Bulletin.* – 2010. – Vol. 55. – № 31. – P. 3612–3618.
8. Inoue Y., Oliosio A. Estimating Dynamics of

CO₂ Flux in Agro-Ecosystems based on Synergy of remote Sensing and Process Modeling - A Methodological Study. *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Eds., M., Shiyomi et. al. – P. 375–390.

Literatura

1. Chapter 1.FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. – URL: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
2. Manderscheid R., Weigel H.J., 2007: Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *Argon. Sust. Dev.* 27(2), 79–87.
3. Bindi M., Fibbi L., Gozzini B., Orlandini S., Miglietta F., 1996: Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Res.* 7, 213–224.
4. Porter J., 1993: AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2(2), 69–82.
5. Potter Ch.S., Randerson J.T., Field Ch.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on glona; satellite and surface data // *Global Biogeochemical cycles.* – 1993. – Vol. 7. – № 4. – P. 811–841.
6. Bai W.G., Zhang X.Y., Zhang P. Temporal and spatial distribution on tropospheric CO₂ over China based on satellite observations.
7. Antohin P.N., Arshinov M.Ju., Arshinova V.G. [i dr.] // *Chinese Science Bulletin.* – 2010. – Vol. 55. – № 31. – P. 3612–3618.
8. Inoue Y., Oliosio A. Estimating Dynamics of CO₂ Flux in Agro-Ecosystems based on Synergy of remote Sensing and Process Modeling - A Methodological Study. *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Eds., M., Shiyomi et. al. – P. 375–390.