

Анализируя полученные данные на основе таблиц и диаграммы, можно сделать следующие выводы.

Соединения ртути присутствуют практически во всех видах подвергшихся анализу биологических объектов, за исключением кондитерских изделий и яиц.

Наибольшее количество соединений ртути накапливается в следующих продуктах: рыба морская, рыба пресноводная, хлебобулочные изделия, говядина и превышает МДУ (максимально допустимый уровень).

Несколько меньшие количества ртутьсодержащих соединений обнаруживаются в таких продуктах, как грибы, колбаса, мясные изделия, рыба, свинина.

Ртуть и ее соединения поступают в организм на протяжении всей жизни и практически не выводятся из организма. Они оказывают особенно сильное субтоксическое действие на молодые особи. Поэтому в обязательном порядке необходимо проводить тщательные и постоянные химикотоксикологические исследования всех видов кормов, кормовых, пищевых добавок и продуктов питания в связи с вероятностью накопления и содержания в них данных соединений в количествах, опасных для здоровья и жизнедеятельности человека и сельскохозяйственных животных.



УДК 581.526.42 + 521.6

## ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ МЕТОДОМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*И.В. Малюгин*

В настоящее время существует ряд моделей для оценки первичной продуктивности (NPP – net primary production), т.е. прироста фитомассы на определенной площади за определенный период времени. Для вычисления этой величины используются наборы различных исходных данных, взятых за интересующий период. Более ранние и простые модели могут оперировать с набором климатических данных, современный подход основан на использовании спутниковых данных, в частности, полученных в рамках проекта NOAA-AVHRR. Традиционно строятся корреляционные или ассоциативные модели, основанные на экстрапо-

ляции по поверхности данных, полученных с контрольных точек. В качестве исходной величины берется нормализованный индекс озеленения NDVI (NDVI – normalized difference vegetation index), равный частному разницы и суммы инфракрасного (IR) и видимого (Vis) каналов отражения  $(IR-Vis)/(IR+Vis)$ . В качестве попытки продвинуться дальше простой статистической регрессионной связи рядом исследователей (Scott J. Goetz, Stephen D. Prince, Samuel N. Goward, Michel M. Thawley, Jennifer Small, Department of Geography, Laboratory for Global Remote Sensing Studies, College Park, Maryland 20742-8225, USA) была предложена

модель GLO-PEM2, где на основании спутниковых данных восстанавливается ряд переменных, напрямую влияющих на NPP, по которым строится регрессионная зависимость, вычисляющая искомую величину. Анализ и разбор данной модели посвящена эта статья.

Стандартная форма вычисления NPP, как известно, представляет из себя следующую зависимость:  $NPP = GPP - Ra$ , где GPP – валовая первичная продуктивность, Ra – потери на дыхание и рост. Зависимость между поглощенной солнечной энергией и приростом фитомассы нелинейная, иначе значение NDVI практически напрямую отражало бы значение NPP. Вдобавок на продуктивность напрямую влияет ряд ограничивающих факторов, к которым относятся температура окружающего воздуха ( $T_a$ ), дефицит давления пара (D), кумулятивный индекс влажности почвы (CSI), влияющие на физиологию устьичного дыхания.

Итак, структурно процесс описывается следующей последовательностью: солнечная энергия, количество которой отражает индекс NDVI, переходит в поглощенную солнечную энергию APAR (APAR – absorbed photosynthetically active radiation). Значение APAR, поглощенного за единицу времени (в данном случае день), определяется по формуле  $APAR_t = F_{par} PAR_t$  (MJ), где  $F_{par}$  – коэффициент, отражающий количество поглощенной солнечной энергии  $F_{par} = 1,67 NDVI - 0,08$  (безразмерная величина), где количество фотосинтетически активной солнечной радиации за день  $PAR_t$  определяется по показаниям спутниковых данных, полученных с TOMS (TOMS – total ozone mapping spectrometer) и GOES (GOES – geostationary environmental observation satellite). Безусловно, соотношение между количеством солнечной энергии, упавшей на листву и поглощенной ею, не может быть выражено прямой пропорциональностью в силу ряда факторов (геометрия обзора со спутника, спектральные свойства отражающей поверхности и т.д.), но в рамках данной модели, учитывая минимальную разрешающую способность 1км<sup>2</sup>, можно использовать с определенным приближением такое соотношение. В свою очередь зависимость между поглощенной солнечной энергией и приростом фитомассы уже нельзя отразить прямой пропорциональностью, поэтому в данной модели APAR переходит в GPP через коэффициент, который представляет собой регрессионную функцию от ограничивающих факторов, т.е.  $T_a$ , D, CSI. Таким образом,  $GPP = APAR * \epsilon_g$  (гС м<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>), где  $\epsilon_g = f(T_a, D, CSI) * \epsilon_g^*$  (гС MJ<sup>-1</sup>) и  $\epsilon_g^* = 55,2 * \alpha$  (гС MJ<sup>-1</sup>), где  $\epsilon_g^*$  – теоретический потенциал поглощения CO<sub>2</sub> по отношению к APAR, аппроксимирующий относительно инвариантный квантовый выход фотосинтеза (Prince and Goward, 1995; Goetz and Prince, 1998), измеряемый на уровне листвы биохимической емкости

фиксации CO<sub>2</sub> по отношению к плотности потока фотонов света.

Остальные переменные вычисляются в следующей последовательности: поверхностная радиометрическая температура  $T_s = 1,274 + (e/2)T_4 + (e/2)T_5$  (°C), где  $T_4$  и  $T_5$  – радиометрическая яркостная температура по 4 и 5 каналам AVHRR,  $e = ((1 - e^*)/0.6) * NDVI + (e^* - 0.05(1 - e^*)/0.6)$ , где  $e^*$  – определенная со спутника поверхностная спектральная эмиссия CERES (CERES – clouds and earth radiation energy systems, проект, использующий измерения Salisbury и D’Aria, 1992). Карта эмиссии CERES варьируется поверхностно от 0,82 до 1,0. Контекстуальный подход, известный как TvX, используется для определения поверхностных карт температуры окружающего воздуха посредством обычной регрессии NDVI на  $T_s$ . Этот подход предполагает, что  $T_s$  полностью озелененного полога аппроксимирует  $T_a$  благодаря сходной теплоемкости между плотно озелененным пологом и окружающим воздухом (Goward et al., 1994; Prihodko and Goward, 1997).  $T_a = a * NDVI_{max} + b$  (°C), где  $NDVI_{max}$  зависит от условий (обычно 0,7-0,9); a и b – обычные регрессионные коэффициенты.

Важный детерминант устьичного регулирования – дефицит давления пара D, вычисляемый от полученного значения  $T_a$  и температуры точки росы  $T_d$ , вычисляемой от количества выпавших атмосферных осадков (U), экстраполированных по поверхности. U оценивается по разнице в термической эмиссии, определенной по двум термическим каналам (канал 4 и 5,  $\Delta T$ ).

$U = (17,32 * ((\Delta T - 0,6831) / (T_s - 291,97))) + 0,5456$  (см). Исходя из этого, вычисляем  $T_d = (\ln(\lambda + 1) + \ln(U) - 0,1133) / 0,0393$  (°C), где  $\lambda$  – коэффициент, требующий коррекции в зависимости от сезона и высоты. Отсюда  $D = 611 * \exp(17,27 * T_a / (T_a + 237)) - \exp(17,27 * T_d / (T_d + 237))$  (мб). Кумулятивный индекс влажности почвы CSI вычисляются на основании наблюдающейся взаимосвязи между влажностью почвы и отношением NDVI/ $T_s$  (так называемый контекстуальный TvX подход).

Потери накопленного углерода на рост и дыхание вычисляются по формуле:

$Ra = 0,53 * (W / (W + 50)) * \exp(0,5 * ((T_c - T_a) / 25))$  (гС м<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>), где биомасса  $W = 7166,1 (\rho_{min}^{-2,6})$  (мг ha<sup>-1</sup>);  $T_c$  – климатологически определяемая температура окружающего воздуха;  $\rho_{min}$  – минимум по годовому отражению по 1-му каналу AVHRR.

В результате мы должны получить, используя последовательность снимков со спутников, последовательность значений, сумма которых за сезон роста дает GPP. Чтобы эта величина была верной, производится калибровка соответствующих коэффициентов модели с данными наземных измерений в контрольных точках.

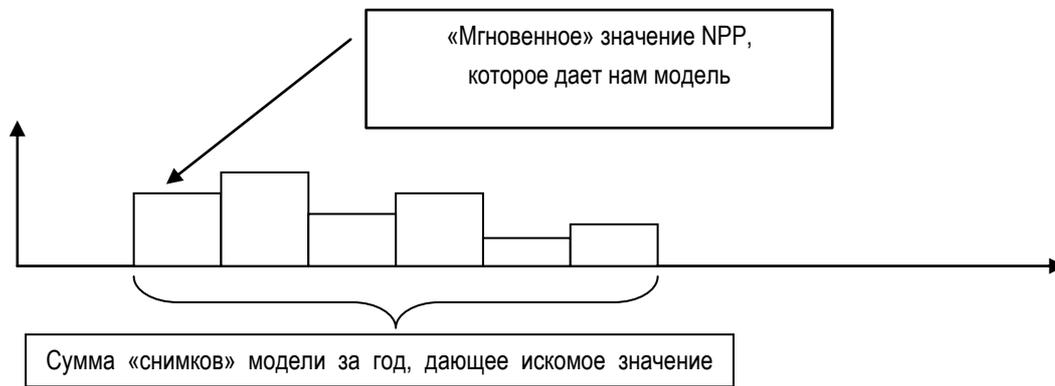


Рис. 1

Структурная схема модели (приводится по оригиналу)

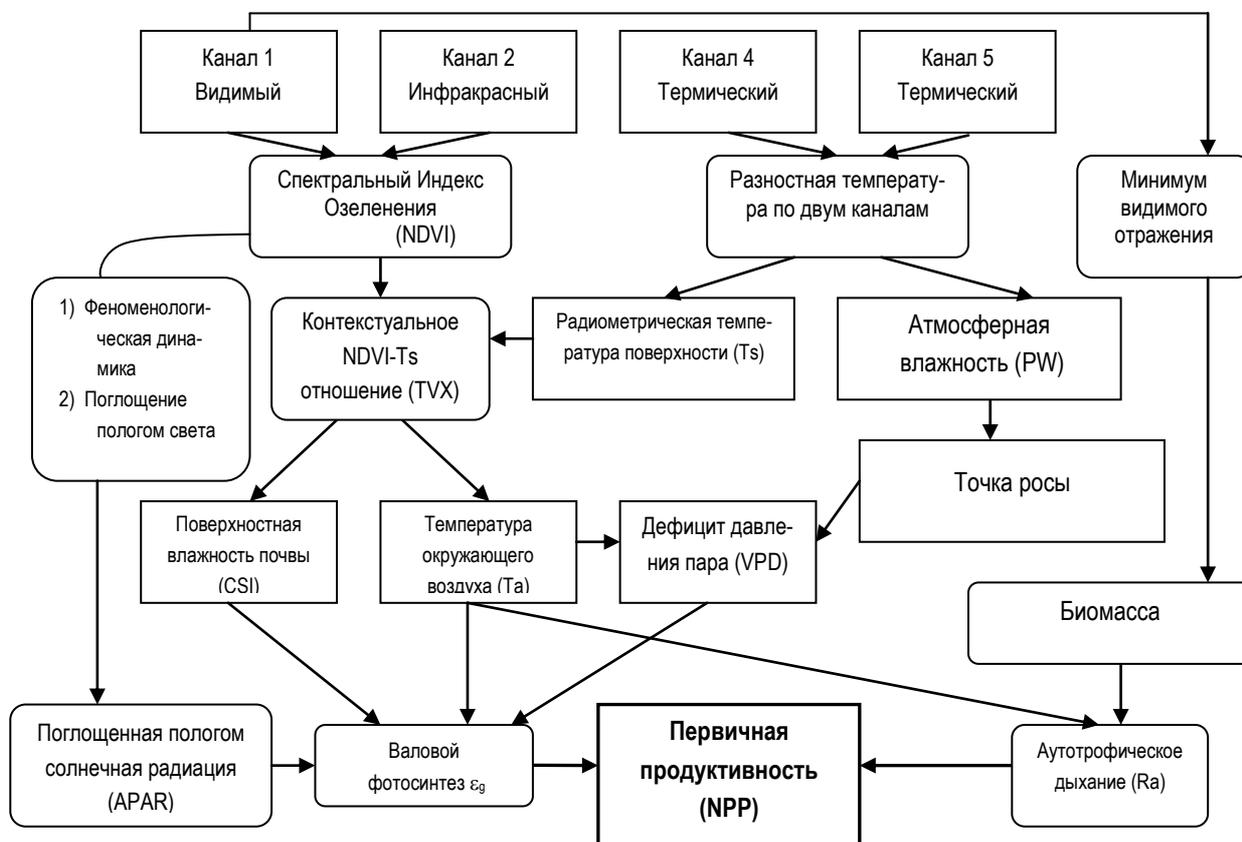


Рис. 2

Схема модели GLO-PEM2 (по источникам данных и последовательности вычисления)

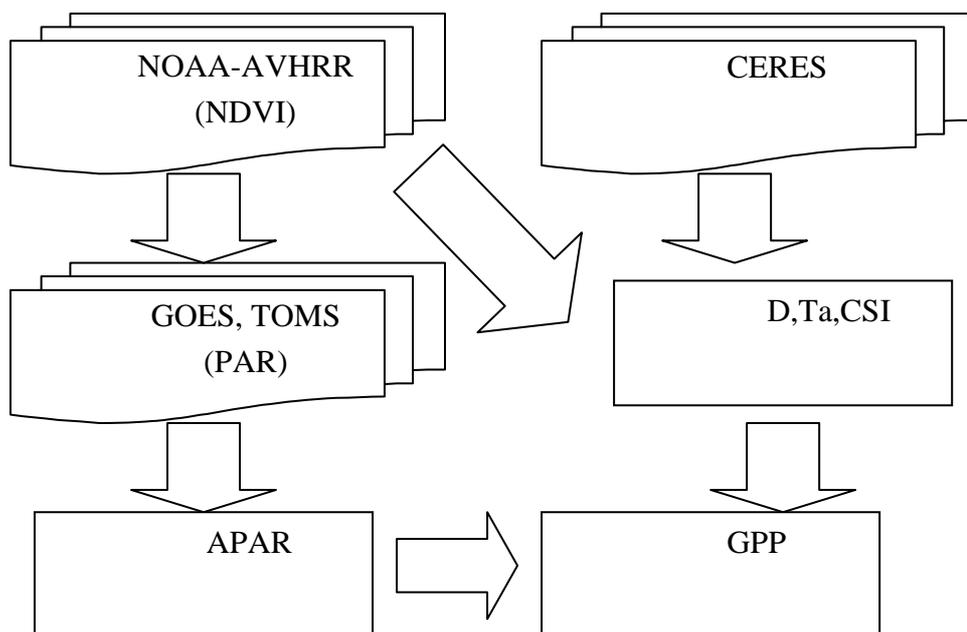


Рис. 3

### Выводы

Одной из целей построения GLO-PEM2 была попытка уйти от чисто регрессионной модели к более механистической, где искомые величины определялись бы более конкретно, но даже самый беглый взгляд показывает, что эта модель практически целиком и полностью регрессионная, что по большому счету признает и сам автор. К тому же коэффициенты, соотношения, многие формулы, по которым вычисляются величины, имеют полуэмпирический характер, что не играет в пользу модели.

Еще одним недостатком может показаться отсутствие ориентации на конкретные особенности фотосинтеза по различным видам растений, но в действительности сам автор и создавал эту модель для оценки NPP на больших площадях с минимальной разрешающей способностью 1 км<sup>2</sup>, что делает крайне затруднительным учет растений по отдельным видам. Тем не менее, как указывается, данная модель в зависимости от условий применения имеет точность 10-30%, что можно считать неплохим практическим результатом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Scott J. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach // Ecological Modelling. 1999. - 122. - P. 239-255.

Много интересных статей по данной тематике находится на сайте [www.elsevier.com/locate/ecolmodel](http://www.elsevier.com/locate/ecolmodel).