

6. В результате загрязнения почв наблюдается повышенное накопление сульфидов различных металлов, но их содержание не превышает ПДК. Наличие сульфидов косвенно способствует подщелачиванию среды вследствие протекающих процессов гидролиза.

7. Уровень содержания свинца в почвах парка высокий, но не превышает ПДК, т.е. составляет менее 6 мг/кг. Однако в местах максимального загрязнения (участок 23) он несколько выше (до 6,9 мг/кг), что обусловлено его попаданием вместе с выбросами автотранспорта.

9. В условиях антропогенеза в результате использования противогололедных материалов наблюдается незначительное повышение в химическом составе исследованных почв на участках 16, 18 и 23 хлорид-иона (до 0,01%), что не превышает ПДК и не является токсичным для большинства древесных растений.

10. В дальнейшем с учётом результатов агрохимических анализов почв необходимо при реконструкции лесопарка проводить комплексы мероприятий по снижению поступления токсичных веществ в почвы и их нейтрализации, а также по повышению плодородия, включая внесение удобрений и мелиорантов, формирование обогащённых субстратов для последующего использования их в посадочных ямах.

Библиографический список

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1970. – 491 с.
2. Бунькова Н.П., Залесов С.В., Зотеева Е.А., Магасумова А.Г. Основы фитомониторинга: учеб. пособие. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотех. ун-т, 2011. – 89 с.
3. Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотех. ун-т, 2015. – 152 с.

4. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов потенциометрическим методом.

5. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотех. ун-т, 2010. – 432 с.
6. Регламент на работы по инвентаризации и паспортизации объектов озелененных территорий 1-й категории г. Москвы. – М.: ГУП «Мосзеленхоз», 2007. – 54 с.
7. Федорец Н.Г., Медведева М.В. Методика исследования почв урбанизированных территорий: учеб.-метод. пособие. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. – 84 с.

References

1. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv. – M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1970. – 491 s.
2. Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zoteeva E.A., Magasumova A.G. Osnovy fitomonitoringa: ucheb. posobie: izd. 2-e, dop. i pererab. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekh. un-t, 2011. – 89 s.
3. Dancheva A.V., Zalesov S.V. Ekologicheskii monitoring lesnykh nasazhdenii rekreatsionnogo naznacheniya. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekh. un-t, 2015. – 152 s.
4. GOST 26951-86. Pochvy. Opredelenie nitratov potentsiometricheskim metodom.
5. Luganskii N.A., Zalesov S.V., Luganskii V.N. Lesovedenie. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekh. un-t, 2010. – 432 s.
6. Reglament na raboty po inventarizatsii i pasportizatsii ob"ektov ozelenennykh territorii 1-i kategorii g. Moskvy. – M.: GUP «Moszelenkhoz», 2007. – 54 s.
7. Fedorets N.G., Medvedeva M.V. Metodika issledovaniya pochv urbanizirovannykh territorii: uchebno-metodicheskoe posobie. – Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2009. – 84 s.



УДК 551.510:631.41

С.С. Алиева
S.S. Aliyeva

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ НАД ТЕКСТУРИРОВАННЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ГЕТЕРОГЕННЫМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ ПОЛЯМИ

THE OPTIMIZATION OF INTEGRATED MEASUREMENTS OF CO₂ CONCENTRATION OVER TEXTURED SPATIAL-HETEROGENEOUS AGRICULTURAL FIELDS

Ключевые слова: текстура, оптимизация, продуктивность экосистемы, гетерогенность, лидарные измерения.

Keywords: texture, optimization, ecosystem productivity, heterogeneity, lidar measurements.

Исследуются методологические вопросы проведения оптимального интегрированного измерения концентрации двуокиси углерода над сельскохозяйственными полями, обладающими текстурной структурой. Важность вопроса объясняется гипотезой о том, что двуокись углерода может выполнять роль своеобразного удобрения для растений, что, в свою очередь, может ослабить роль этого газа в формировании т.н. парникового эффекта. Предложена новая интегрально-статистическая мера текстуры, позволяющая проводить оптимальные интегрированные измерения в пределах текстурной ячейки. Разработаны методологические основы проведения оптимальных интегрированных измерений CO₂ над сельскохозяйственными полями, обладающими текстурной структурой.

The methodological issues of carrying out optimum integrated measurements of CO₂ concentration over textured agricultural fields are discussed. The importance of the issue is explained by the hypotheses that CO₂ can play the role of a kind of fertilizer for plants, which in its turn may decrease the role of this gas in the generation of so called global greenhouse effect. A new integrated-statistical measure of texture is proposed which makes it possible to carry out the optimum integrated measurements within the texture cell. The methodological foundations for carrying out optimum integrated CO₂ measurements over agricultural fields of textured structure have been developed.

Алиева Севда Салман гызы, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com.

Aliyeva Sevda Salman qizi, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com.

Введение

Хорошо известно, что растения при своем развитии потребляют двуокись углерода в процессе фотосинтеза. С учетом этого в последнее время высказана гипотеза о возможности использования растущей процентности CO₂ в качестве «удобрения» для ускорения роста растений [1]. Все это приводит также к необходимости пересмотра прогнозных оценок роста двуокиси углерода в атмосфере, приводящего к так называемому эффекту глобального потепления [2]. Такая взаимосвязность вышеуказанных эффектов в первую очередь диктует необходимость проведения достоверных измерений суммарного количества двуокиси углерода над текстурированными растительными полями. Общепринятым мнением является то, что наиболее эффективными при решении данного вопроса являются методы дистанционного зондирования.

Согласно работе [3], при низкой спектральной разрешающей способности аппаратуры дистанционного зондирования улучшение точности классификации сельскохозяйственных полей может быть достигнуто путем использования текстурного признака. Показано, что добавление текстурного признака для анализа объектно-ориентированного изображения подобно изображениям попиксельной структуры приводит к повышению точности классификации объектов.

Сегментация топографических объектов, в частности структур и гетерогенных черт комплексных сцен, может быть значительно улучшена путем использования совместной обработки мультиспектральной и текстурной информации [4]. При этом для текстурного анализа используются матрицы совпадения уровня серого двух пикселей, находящихся в идентичных позициях на двух предполагаемых

ячейках текстуры. Каждая ячейка текстуры охватывается матрицей совпадения серого уровня (GLCM), состоящего из $n \times m$ количества элементов.

Для каждой такой матрицы, т.е. для соответствующей ячейки текстуры могут быть вычислены следующие меры текстуры: контраст

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} [g(i) - g(j)]^2 \cdot w(i, j); \quad (1)$$

корреляция

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \left[\frac{(i - \mu)(j - \mu)w(i, j)}{\sigma} \right]; \quad (2)$$

энергия

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} w(i, j); \quad (3)$$

энтропия

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} w(i, j) \cdot \log [w(i, j)]; \quad (4)$$

гомогенность

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \left\{ \frac{w(i, j)}{1 + [g(i) - g(j)]^2} \right\}, \quad (5)$$

где $w(i, j)$ – элементы матрицы совпадения; $g(i)$, $g(j)$ – значения элементов строк и колонн матрицы совпадения;

$$\mu = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} iw(i, j);$$

$n \cdot m$ – размерность матрицы совпадения.

Однако меры (1)-(5) хотя и позволяют определить текстурные ячейки изучаемой сцены, но не пригодны для проведения опти-

мальных интегрированных измерений в пределах выявленных текстурных ячеек.

Следовательно, имеет смысл предложить новую меру текстуры, которая могла бы решить указанную задачу.

Предлагается метод проведения оптимальных интегрированных измерений концентрации CO₂ над текстурированными участками путем введения новой интегрально-статистической меры текстуры.

Целью работы является разработка нового метода интегрированных измерений концентрации CO₂ над текстурированными растительными участками с использованием предлагаемой новой интегрально-статистической меры текстуры.

Задачами исследования являются:

1) разработка новой интегрально-статистической меры текстуры применительно к текстурированным растительным полям;

2) разработка нового метода интегрированных измерений концентрации CO₂ над растительными участками;

3) проведение теоретически-модельного исследования по применению предложенного метода для выявления оптимальной зависимости чистой продуктивности лесной экосистемы от высоты деревьев.

Основная часть

Прежде всего проанализируем известные статистические меры, используемые для определения разнообразия изучаемых объектов.

Как указывается в работе [5], для оценки относительной доли какого-либо вида в выборке используются различные индексы, в том числе индексы разнообразия в экологических системах. Основу всех индексов

разнообразия составляет показатель относительного количества *i*-го вида в общей выборке P_i , т.е.

$$P_i = \frac{N_i}{N}, \tag{6}$$

где N – количество элементов выборки;

N_i – количество элементов, соответствующих выбранному виду;

N_i – количество *i*-го вида в общей выборке, состоящей из N элементов.

При этом

$$N = \sum_{i=1}^s N_i, \tag{7}$$

где s – общее количество видов в выборке.

Рассмотрим вопросы графического представления зависимости P_i от N_i . Согласно [5], кривая содержания ранжированных видов составляется на двухмерной координатной системе, где на оси ординат отсчитывается значение P_i , а на оси абсцисс – ранг вида, т.е. *i*. В графических построениях вводится понятие «ранг» (*r*), которое в данном случае совпадает с позиционным номером вида *i*. При этом вид первого ранга является тем видом, который преобладает в данной выборке, а вид *s*-ранга является тем видом, который в наименьшем количестве встречается в выборке. Возможные варианты представления зависимости P_i от ранга *r* приведены на рисунке 1 А, В, С, D.

Специфика рассматриваемого текстурного объекта такова, что одна текстурная ячейка состоит из *n* числа подячеек, в каждом из которых растет *i*-й биовид (дерево).

Каждый из биовидов генерирует показатель V_{i0} , каковым в настоящей работе далее рассматривается двуокись углерода (CO₂).

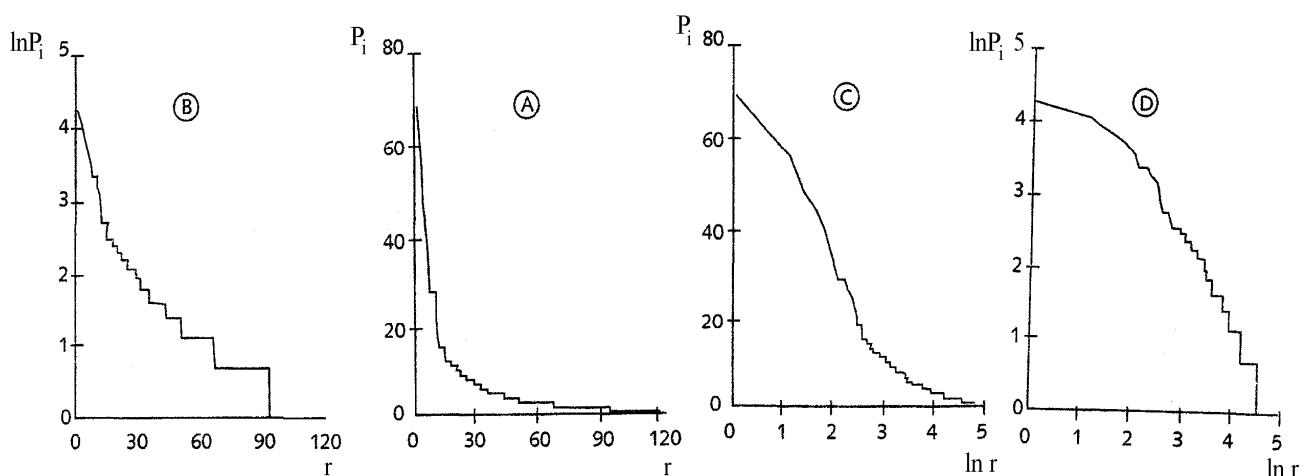


Рис. 1. Возможные варианты, используемые для графического представления зависимости относительного количества вида (P_i) от ранга вида (*r*)

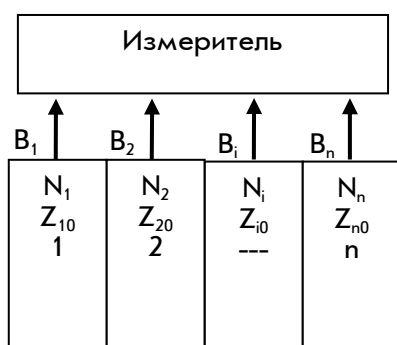


Рис. 2. Структура текстурной ячейки

При этом измеряемый параметр биовида z_i функционально связан с B_{i0} как

$$B_{i0} = \phi(Z_i),$$

где z_i – высота дерева;

B_{i0} – концентрация CO_2 газа.

Суммарный показатель B_n определится следующим образом

$$B_{i0\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_i} \phi(Z_j) = N_i \phi(Z_i), \quad (8)$$

т.к. все $\phi_j(Z_j)$; $j = \overline{1, N_i}$ одинаковы.

В непрерывном случае выражение (8) имеет вид

$$B_o = \int_0^{N_{max}} N \cdot \phi(Z) dN. \quad (9)$$

Графическое представление зависимости Z_{i0} от N_i в данном случае может иметь вид кривой как возрастающего, так и убывающего типа, а также треугольного вида (рис. 3).

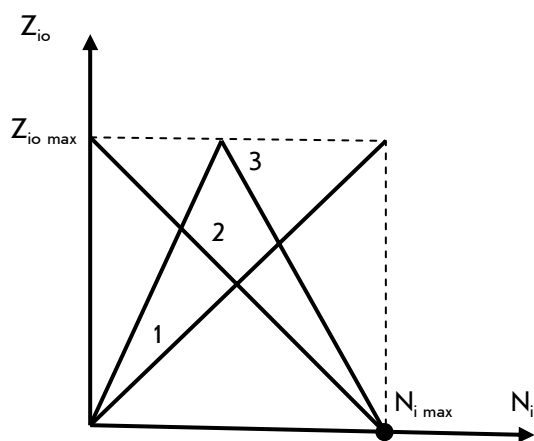


Рис. 3. Графическое представление

зависимости $Z_{i0} = f(N_i)$:

1 – возрастающая линия;

2 – убывающая линия; 3 – ломаная линия

Как нетрудно заметить, графики, показанные на рисунке 3, являются огибающими смещенных гистограмм зависимости N_i от Z_{i0} .

Такое представление статистических данных исследуемых видов позволяет получить следующие новые качественные результаты:

1. В некоторых случаях может быть выработана новая мера текстурности в дополнении к мерам, представленным формулами (1)-(5).

2. Может быть оптимизирован весь процесс интегральных измерений в пределах одной ячейки текстурности.

Поясним вышеуказанное математически. Как видно из графиков, представленных на рисунке 3, при $B_{i0max} = const$; $N_{imax} = const$ всегда имеет место следующее равенство

$$\chi = \int_0^{N_{max}} Z_0(N) dN = c ; c = const. \quad (10)$$

Показатель χ может быть назван интегральной мерой текстурности. Квазигетерогенным текстурным объектом будем называть такой объект, у которого все текстурные ячейки имеют одинаковый показатель χ .

Рассмотрим вопрос об оптимизации интегральных измерений, проводимых в пределах одной текстурной ячейки квазигетерогенного текстурного объекта, состоящего из множества подячеек.

С учетом выражения (8) выходной сигнал измерителя, показанного на рисунке 3 в условно непрерывном случае, определим как

$$S_1 = \int_0^{N_{max}} N \cdot \phi(Z(N)) dN. \quad (11)$$

Функцию $\phi(z)$ представим в виде двух первых членов ряда Тейлора

$$\phi(Z) = \phi_0 + \phi'_z \cdot (Z - Z_0) + \frac{\phi''_z (Z - Z_0)^2}{2!}. \quad (12)$$

Примем $\phi_0 = 0$; $z_0 = 0$; в этом случае выражение (12) принимает следующий вид

$$\phi(Z) = \phi'_z \cdot Z + \frac{\phi''_z \cdot Z^2}{2!}. \quad (13)$$

С учетом выражений (11) и (13) получаем

$$S_1 = \int_0^{N_{max}} N \cdot \left[\phi'_z \cdot Z(N) + \frac{\phi''_z \cdot Z(N)^2}{2!} \right] dN. \quad (14)$$

Составим задачу вариационной безусловной оптимизации с учетом выражений (10) и (14):

$$S_1 = \int_0^{N_{max}} N \cdot \left[\phi'_z \cdot Z(N) + \frac{\phi''_z \cdot Z(N)^2}{2!} \right] dN + \lambda \int_0^{N_{max}} Z(N) dZ. \quad (15)$$

Таким образом, решение сформулированной вариационной оптимизационной задачи позволит получить оптимальную функцию $z(N)$, при которой S_0 достиг бы экстремального значения. Пример конкретного решения задачи оптимизации изложен в нижеприве-

денных результатах модельного исследования.

Как указывается в работе [6], решение задачи распределения показателя чистой продуктивности экосистемы (NEP) по пространственно гетерогенным комплексным ландшафтам может быть решена в следующей последовательности:

1. С помощью лидара, установленного на башне, определяется кумулятивный поток CO₂, исходящий от сельскохозяйственных полей путем сканирования.

2. Считается, что результаты измерения потока CO₂ по пространству соответствуют значению показателя NEP в пределах комплексного ландшафта.

3. Ландшафт характеризуется гетерогенностью в отношении NEP, т.к. вклад биологических объектов в генерирование суммарного потока CO₂ неодинаков.

4. Показатель NEP может быть определен теоретически как

$$NEP = GPP - R_A - R_B, \quad (16)$$

где GPP – общий первичный продукт;

R_A – респирация биообъектов (деревьев) выше уровня земли;

R_B – респирация биообъектов (деревьев) ниже уровня земли.

5. Измерение R_B осуществляется с помощью специальных камер, детектирующих поток CO₂ исходящий из почвы. Технология таких измерений подробно описана в [6].

6. Показатель биообъектов (например, высота деревьев) Z находится в связи с GPP и R_A по следующему выражению

$$GPP - R_D = k \cdot Z^b, \quad (17)$$

где k – количественный показатель;

b – показатель нелинейности.

Таким образом, проводя лидарные измерения на гетерогенных участках показателя NEP и камерных измерений R_B, по формуле (17) можно установить определенные показатели биообъектов (например, высоту деревьев, индекс LAI и т.д. [6]).

В настоящем модельном исследовании ставится задача оптимизации процесса определения показателя Z с учетом гетерогенности сельхозполей. Для получения наиболее общего решения далее рассматривается наиболее общий вид зависимости NEP, а сельскохозяйственные поля представляются в качестве текстурных объектов, обладающих свойством квазигетерогенности.

Согласно формуле (17) имеем

$$B = k \cdot Z(N)^b, \quad (18)$$

где

$$\int_0^{N_{\max}} Z(N)dN = C; \quad C = const. \quad (19)$$

Суммарную генерацию CO₂ со всех подячек оценим как

$$B_{\Sigma} = \int_0^{N_{\max}} k \cdot N \cdot Z(N)^b dN = C. \quad (20)$$

С учетом выражений (18) и (19) составим вариационную задачу безусловной оптимизации:

$$B_0 = \int_0^{N_{\max}} k \cdot N \cdot Z(N)^b dN + \lambda \int_0^{N_{\max}} Z(N)dN. \quad (21)$$

Согласно методу Эйлера [7] оптимальная функция Z(N) должна удовлетворить условию

$$\frac{d \{k \cdot N \cdot Z(N)^b + \lambda \cdot Z(N)\}}{dZ(N)} = 0. \quad (22)$$

Из выражения (22) получаем

$$b \cdot k \cdot N \cdot Z(N)^{b-1} + \lambda = 0. \quad (23)$$

Из выражения (23) находим

$$Z(N) = b^{-1} \sqrt{\frac{-\lambda}{b \cdot k \cdot N}}. \quad (24)$$

Из выражения (24) находим

$$\lambda = \frac{1}{b^{-1} \sqrt{\int_0^{N_{\max}} b^{-1} \frac{1}{b \cdot k \cdot N} dN}} = -\lambda_0. \quad (25)$$

С учетом (25) из выражения (23) имеем

$$Z(N) = b^{-1} \sqrt{\frac{\lambda}{b \cdot k \cdot N}}. \quad (26)$$

Следовательно, при удовлетворении условия (26) B₀ достигает экстремальной величины.

Таким образом, при b>1, Z(N) является убывающей функцией N; при b<1, Z(N) является возрастающей функцией N.

Для определения типа экстремума вычислим вторую производную подынтегрального выражения функционала (21), которая при b>1 оказывается положительной величиной, а при b<1 – отрицательной.

Следовательно, при b<1, Z(N) является возрастающей функцией, и функционал (21) достигает максимума.

При b>1 Z(N) является убывающей функцией, а функционал (21) достигает минимума.

Заключения и выводы

Таким образом, результат, полученный при модельном исследовании, логически может быть истолкован следующим образом. При возрастающем характере функции Z(N) можно считать, что в ячейке текстурного объекта преобладают биотипы с высокой величиной Z при b<1, что приводит к достижению функционалом (21) максимальной величины.

При убывающем характере функции $Z(N)$ функционал (21) достигает минимума при $b > 1$. В этом случае можно считать, что в ячейке текстурного объекта преобладают биотипы с низкой величиной Z . В этих условиях функционал (21) достигает минимального значения. Следовательно, заявленная цель настоящего исследования, заключающаяся в оптимизации интегрированного измерения биологических показателей деревьев, достигается при возрастающем характере функции $Z(N)$ при $b < 1$.

Сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Предложена новая интегрально-статистическая мера текстуры, позволяющая проводить оптимальные интегрированные измерения в пределах всей текстурной ячейки.

2. Сформулирован и показан путь решения общей задачи оптимизации интегрированного измерения показателей биообъектов (деревьев), количество которых в подячейках находятся в монотонной функциональной зависимости от величины измеряемого показателя.

3. Сформулирована и решена задача оптимизации интегрированного измерения биопоказателей (высоты дерева или индекса LAI) по всем подячейкам ячейки текстурного объекта, при измерении с помощью лазера концентрации CO_2 и респирации вегетации под уровнем земли с помощью специальных камер.

4. Показано, что оптимальный режим интегрированных измерений достигается при возрастающей зависимости величины биопоказателя от количества деревьев в подячейке.

Библиографический список

1. Watts A. Plants gobbling up CO_2 – 45% more than thought. <http://wattsupwiththat.com/2011/09/29/plants-gobbling-up-co2-45-more-than-thought/>. (Дата обращения 05.12.2015).

2. The Habitable Planet. Unit 4. Ecosystems. <https://www.learner.org/courses/envsci/unit/text.php?unit=4>.

3. Laliberte A.S., Rango A. Texture and Scale in Object-Based Analysis of Subdecimeter Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Im-

agery // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47 (3). – P. 761-770.

4. Kiema J.B.K. Texture analysis and data fusion in the extraction of topographic object from satellite imagery // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – Vol. 23 (4). – P. 767-776.

5. Heip C.H.R., Herman P.M.J., Soetaert K. Indices of diversity and evenness // Oceanis. 1998. – Vol. 24 (4). – P. 67-87.

6. Emanuel R.E., Riveros-Iregui D.A., McGlynn B.L., Epstein H.E. On the spatial heterogeneity of net ecosystem productivity in complex landscapes // Ecosphere. – 2011. – Vol. 2 (7). – Art. 86.

7. Эльсгольц Л.П. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1979. – 340 с.

References

1. Watts A. Plants gobbling up CO_2 – 45% more than thought. <http://wattsupwiththat.com/2011/09/29/plants-gobbling-up-co2-45-more-than-thought/>. (Дата обращения 05.12.2015).

2. The Habitable Planet. Unit 4. Ecosystems. <https://www.learner.org/courses/envsci/unit/text.php?unit=4>.

3. Laliberte A.S., Rango A. Texture and Scale in Object-Based Analysis of Subdecimeter Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47 (3). – P. 761-770.

4. Kiema J.B.K. Texture analysis and data fusion in the extraction of topographic object from satellite imagery // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – Vol. 23 (4). – P. 767-776.

5. Heip C.H.R., Herman P.M.J., Soetaert K. Indices of diversity and evenness // Oceanis. 1998. – Vol. 24 (4). – P. 67-87.

6. Emanuel R.E., Riveros-Iregui D.A., McGlynn B.L., Epstein H.E. On the spatial heterogeneity of net ecosystem productivity in complex landscapes // Ecosphere. – 2011. – Vol. 2 (7). – Art. 86.

7. El'sgol'ts L.P. Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie. – М.: Nauka, 1979. – 340 с.

