

provenance experiments // *Silvae Genetica*. – 1979. – Vol. 28 (4). – P. 136-152.

9. Paule L., Laffers A., Korpel S. Ergebnisse der Provenienzversuche mit der Tanne in der Slowakei. – Zvolen (Forschungsbericht), 1985. – S. 137-159.

10. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Итог тридцати вегетаций в географических культурах ели Сергиево-Посадского опытного лесхоза // Научные труды Московского государственного университета леса. – М.: МГУЛ, 1995. – Вып. 274. – С. 64-77.

11. Мерзленко М.Д. Лесокультурное дело: учеб. пособие для студентов специальностей 250201 Лесное хозяйство и 250100 Лесное дело. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 124 с.

12. Попов П.П. Ель европейская и сибирская: структура, интеграция и дифференциация популяционных систем. – Новосибирск: Наука, 2005. – 231 с.

13. Наквасина Е.Н., Бедрицкая Т.В., Гвоздухина О.А. Селекционная оценка климатипов сосны обыкновенной в географических культурах Архангельской области // Изв. высш. учеб. заведений. Лесн. журн. – 2001. – № 3. – С. 27-35.

References

1. Mel'nik P.G., Pronina O.V., Stanko Ya.N., Dyuzhina I.A. Vliyaniye geograficheskoi izmenchivosti na produktivnost' i fiziko-mekhanicheskie svoystva drevesiny eli // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik. – 2014. – № 1 (100). – S. 45-52.

2. Schultze, V. Klimaänderung new Kriterien für Herkunftsempfehlungen: (Vortr) Symp. "Klimaänder. Österreich: Herausforder. Forestgenet. und Waldlau", Wien, 9 Nov., 1994 // FBVA – Ber. 1994. No. 81. p. 34-47.

3. Lesosemennoye raionirovaniye osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod v SSSR. – М.: Lesnaya promyshlennost', 1982. – 368 s.

4. Merzlenko M.D., Mel'nik P.G. Lesovodstvennaya ekskursiya v lesa Klinsko-Dmitrovskoi gryady. – М.: MGUL, 2002. – 93 s.

5. OST 56-69-83. Probnyye ploshchadi lesoustroitel'nyye. Metody zakladki. – М., 1983. – 59 s.

6. Obshchesoyuznyye normativy dlya taksatsii lesov / V.V. Zagreev, V.I. Sukhikh, A.Z. Shvidenko [i dr.]. – М.: Kolos, 1992. – 495 s.

7. Giertych M. Summary results of the IUFRO 1938 Norway spruce (*Picea abies* [L] Karst) provenance experiment Height growth // *Silvae Genetica*. – 1976. – Vol. 25 (5-6). – P. 154-164.

8. Giertych M. Summary of results on Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) height growth in IUFRO provenance experiments // *Silvae Genetica*. – 1979. – Vol. 28 (4). – P. 136-152.

9. Paule L., Laffers A., Korpel S. Ergebnisse der Provenienzversuche mit der Tanne in der Slowakei. Zvolen (Forschungsbericht), 1985. S. 137-159.

10. Merzlenko M.D., Mel'nik P.G. Itog tridtsati vegetatsii v geograficheskikh kul'turakh eli Sergievo-Posadskogo opytnogo leskhozа // Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. – Vyp. 274. – М.: MGUL, 1995. – S. 64-77.

11. Merzlenko M.D. Lesokul'turnoe delo: ucheb. posobie dlya studentov spetsial'nostei 250201 Lesnoe khozyaistvo i 250100 Lesnoe delo. – М.: GOU VPO MGUL, 2009. – 124 s.

12. Popov P.P. El' evropeiskaya i sibirskaya: struktura, integratsiya i differentsiatsiya populyatsionnykh sistem. – Novosibirsk: Nauka, 2005. – 231 s.

13. Nakvasina E.N., Bedritskaya T.V., Gvozdukhina O.A. Selektionnaya otsenka klimatipov sosny obyknovennoi v geograficheskikh kul'turakh Arkhangel'skoi oblasti // Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Lesn. zhurn. – 2001. – № 3. – S. 27-35.



УДК 581.552

Ф.Э. Гулиева
F.E. Guliyeva

НОВЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ БИОМАССЫ В ЧАСТИЧНО НОВОПОСАЖЕННЫХ ЛЕСНЫХ МАССИВАХ

A NEW METHOD OF REMOTE ASSESSMENT OF TOTAL BIOMASS IN PARTIALLY NEWLY PLANTED FOREST AREAS

Ключевые слова: биомасса, лесные массивы, дистанционное зондирование, регрессия, оптимизация.

Keywords: biomass, forest area, remote sensing, regression, optimization.

Общее количество биомассы в лесных массивах тесно связано с характеристиками и динамическими изменениями в экосистеме. Объем эмиссии углерода в атмосферу при дефорестации в основном определяется общим количеством биомассы в лесных массивах. Это указывает на необходимость верной оценки результатов влияния процесса дефорестации на происходящие экологические изменения в масштабах всей планеты. Для точной оценки общей биомассы растительности в настоящее время широко используются методы спутникового дистанционного зондирования, реализуемые с помощью бортовых спектрорадиометров. Проведенный анализ суммарного количества биомассы в частично новопосаженных лесных массивах показывает, что существующая конкуренция по приобретению необходимых для развития растительности жизненно важных ресурсов между взрослыми и новопосаженными деревьями обуславливает наличие оптимального режима проведения дистанционных измерений суммарной биомассы. Техническая реализация оптимального режима достигается соответствующими математическими вычислениями режима измерений исследуемого участка в лесном массиве. Предлагаемый метод характе-

ризуется наличием дополнительного контрольного признака для проверки достоверности полученных результатов измерений.

The total amount of biomass in large forests is closely linked with the characteristics and dynamic changes in the ecosystem. The amount of carbon emission to the atmosphere upon deforestation is determined mainly by the total amount of biomass in a forest area. This proves the need for correct evaluation of deforestation effects on the current global ecological changes. The methods of satellite remote sensing by satellite-borne spectroradiometers are widely used for accurate assessment of vegetation biomass. The conducted analysis of the total biomass amount in partially newly planted forests shows that there is a competition between the older and newly planted trees for the vital resources required for their development. This causes the presence of the optimum regime in conducting remote measurements of the total biomass. The optimum regime is achieved by corresponding mathematical calculations of the measurement regime in the studied plot of the forest area. The proposed method is characterized by the presence of additional control value used to verify the obtained measurement results.

Гулиева Фидан Эльхан гызы, аспирант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: fidash2013@mail.ru.

Guliyeva Fidan Elkhana gyzy, post-graduate student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: fidash2013@mail.ru.

Введение

Как отмечается в работе [1], изменения в общем количестве биомассы в растительности связано с важными функциональными характеристиками экосистемы и происходящими экологическими изменениями. Общий объем биомассы в лесных массивах определяет потенциальную величину эмиссий углерода, выпускаемую в атмосферу при дефорестации (уничтожении лесов). Следовательно, для должной оценки воздействия процесса дефорестации на происходящие глобальные изменения на планете и на деградацию окружающей среды необходимо разработать методы точной оценки биомассы растительности. Очевидно, что точная оценка биомассы растительности методом полевых экспедиций невыгодна и отнимает много времени и средств. С указанной целью в настоящее время широко используются спутниковые спектрорадиометры, например, аппаратура TM Landsat [2-4], а также SAR [5-7]. Основу таких измерений составляет статистическая связь между количеством биомассы в растениях и величиной измеряемого сигнала на выходе TM или SAR. Вместе с тем оптические спутниковые измерения биомассы имеют некоторые проблемы, т.к. спутниковый измеритель, в частности TM, воспринимает также информацию о состоянии листьев, тени кроны деревьев, стволе деревьев, а также о свойствах самой почвы и т.д.

Как отмечается в работе [1], существует возможность повышения точности спутниковых оценок биомассы путем уменьшения влияния вышеуказанных факторов путем учета различных пропорций этих факторов в пределах смешанных пикселей. В работе оценим влияние структуры леса на оценку биомассы, а также опишем предлагаемый метод оценки биомассы путем оценки индекса LAI основного структурного элемента частичного новопосаженного леса, подвергнувшегося частичному восстановлению.

Модельные представления объекта исследования и известные решения

Как отмечается в работе [1], частично новопосаженный участок леса, состоящий из новопосаженных и взрослых деревьев, моделировался следующим образом. Новопосаженными деревьями считались те, у которых показатель ДВН (диаметр ствола на высоте 1,37 м) находился в пределах 2-10 см. Растения с диаметром свыше 10 см считались взрослыми деревьями. Подучасток каждого взрослого дерева имел размеры 10x10 м, а новопосаженного – 3x3 м. Исследовались около сорока участков, содержащих несколько таких подучастков.

Общее количество биомассы выше уровня земли оценивалось по формуле:

$$B_0 = \sum_{i=1}^m \frac{B_{1i}}{S_1} + \sum_{j=1}^n \frac{B_{2j}}{S_2}, \quad (1)$$

где m – количество взрослых деревьев;
 n – количество новопосаженных деревьев;

S_1 – площадь участка размерами 10×10 м;

S_2 – размерами 3×3 м;

B_{1i} – биомасса взрослых деревьев;

B_{2j} – биомасса новопосаженных деревьев.

Подробно не останавливаясь на технических особенностях проведения спутниковых измерений биомассы, отметим, что для реализации измерений используется метод нелинейного анализа спектральной смеси (LSMA). Как видно из вышеприведенной модели тестового участка, предложенного в [1], использованная в этой работе методика предполагает определение таких показателей, как DT, DS, H, что неизбежно приводит к значительной погрешности проводимых измерений. Ниже излагаются предлагаемая новая модель и метод измерения биомассы в частично новопосаженном участке леса.

Предлагаемый метод

Как отмечается в работе [8], существует сильно коррелированная взаимосвязь между такими показателями леса, как индекс листовой площади (LAI); крона дерева; биомасса выше уровня земли, плотность стволов, ДВН

и т.д. При этом для взрослых деревьев с высотой выше 150 см существует соотношение

$$LAI = 1,27 + 0,34 \ln B_1. \quad (2)$$

где B_1 – биомасса взрослых деревьев.

Однако в частично новопосаженных лесах между LAI взрослых деревьев и биомассой соседних новопосаженных имеется обратная зависимость.

Как отмечается в работе [9], при уменьшении расстояния между новопосаженными деревьями и взрослыми деревьями рост новопосаженного дерева ухудшается вследствие проявления эффекта конкуренции в приобретении жизненно важных ресурсов (солнечный свет и др.).

Проведенные в [9] экспериментальные исследования показали, что степень раскрытости кроны новопосаженных деревьев сильно зависит от расстояния до взрослых деревьев в диапазоне 0–8 м (рис. 1).

Согласно работе [10], проведенные экспериментальные исследования по выяснению статистической связи между показателем LAI конкурирующего взрослого дерева и биомассой новопосаженного дерева B_2 при неизменной плотности посадки показали наличие нелинейной регрессионной зависимости типа

$$\ln B_2 = 3,247 - 0,37LAI. \quad (3)$$

На рисунке 2 показана регрессионная линия зависимости биомассы новопосаженного дерева от значения LAI конкурирующего взрослого дерева.

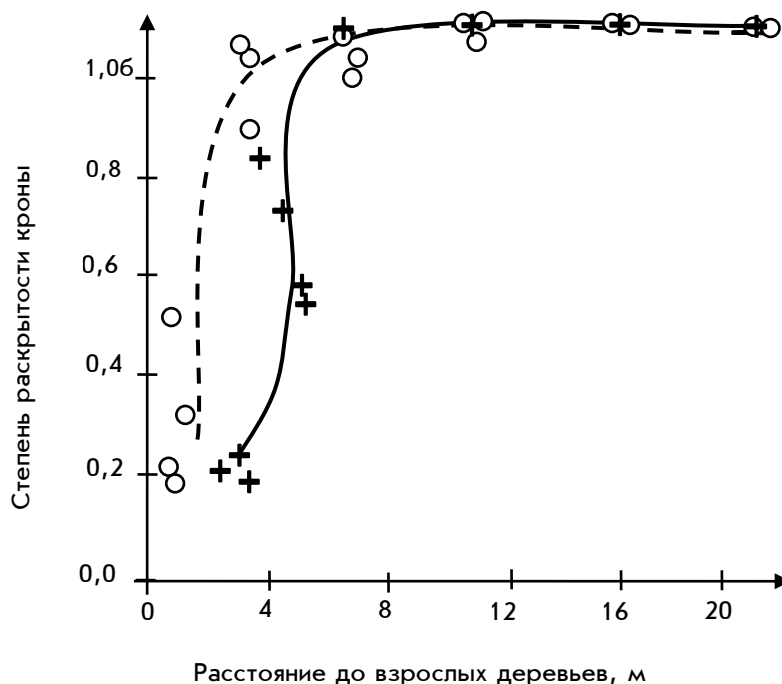


Рис. 1. Зависимость степени раскрытости кроны новопосаженного дерева от расстояния до взрослых деревьев. Пунктирами показана зависимость, полученная в условиях низкой кислотной среды, непрерывной линией – в условиях высокой кислотности (соответственно, $pH = 5,39 \pm 0,06$ и $5,42 \pm 0,03$)

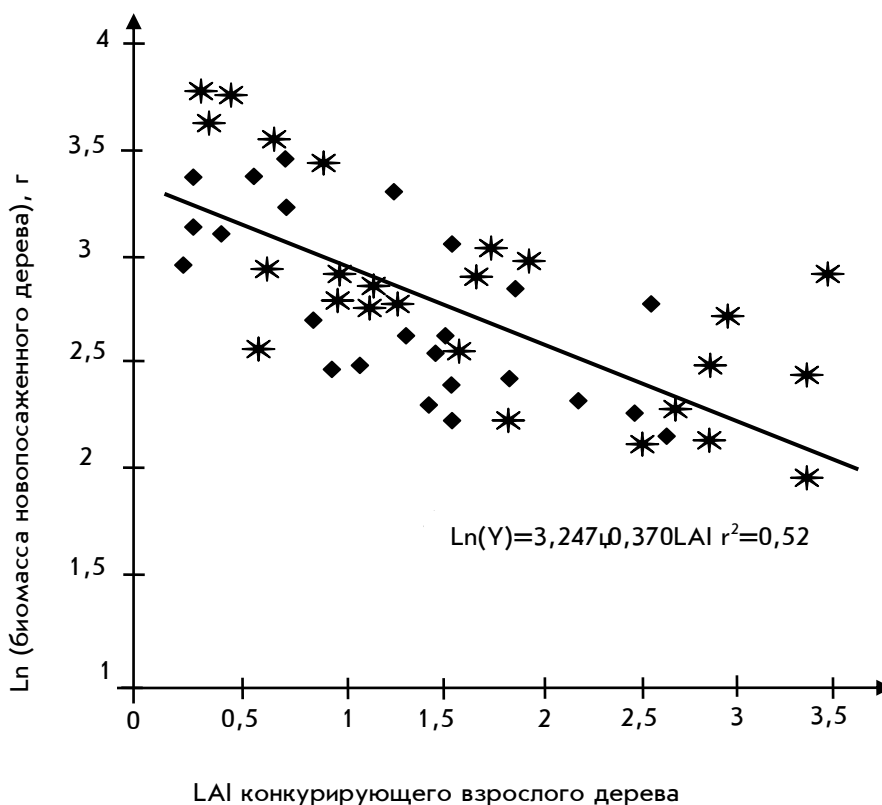


Рис. 2. Регрессионная линия зависимости количества биомассы выше уровня земли новопосаженного дерева (red pine) от LAI конкурирующего взрослого дерева (pin cherry)

Таким образом, сравнивая выражения (2) и (3), можно заключить, что зависимость биомассы взрослых деревьев и новопосаженных деревьев противофазно зависят от показателя LAI взрослых деревьев. Для математического обоснования предлагаемого метода в первом приближении примем, что биомассы всех взрослых деревьев, а также всех новопосаженных деревьев одинаковы и, соответственно, равны B_1 и B_2 . Суммарную биомассу всех деревьев вычислим по следующей формуле

$$B_{\Sigma} = mB_1 + nB_2, \quad (4)$$

где m – количество взрослых деревьев;

n – количество новопосаженных деревьев.

Относительное количество суммарной биомассы определим как

$$B_0 = \frac{B_{\Sigma}}{m+n}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) получим

$$B_0 = \left(\frac{m}{m+n}\right)B_1 + \left(\frac{n}{m+n}\right)B_2. \quad (6)$$

Введем обозначение весового коэффициента α_1 , где

$$\alpha_1 = \frac{m}{m+n}. \quad (7)$$

В этом случае имеем

$$\frac{n}{m+n} = 1 - \alpha_1. \quad (8)$$

С учетом выражений (6), (7), (8) имеем

$$B_0 = \alpha_1 \cdot B_1 + (1 - \alpha_1) B_2. \quad (9)$$

При этом из выражения (2) имеем

$$B_1 = \exp\left[\frac{LAI - 1,27}{0,34}\right]. \quad (10)$$

Также из выражения (3) имеем

$$B_2 = \exp(3,247 - 0,37 \cdot LAI). \quad (11)$$

Как видно из выражений (9), (10), (11), линейная скалярная свертка (9), составленная из двух частных критериев (10) и (11), парафазно зависящих от общего аргумента LAI, представляет собой математическое выражение задачи многокритериальной оптимизации. Согласно теории многокритериальной оптимизации свертка в виде (9) имеет экстремум, при этом величина аргумента LAI, при котором B_0 проходит через экстремум, зависит от значения весового коэффициента α_1 . Таким образом, появляется возможность

проводить измерения общего количества биомассы в частично новопосаженных лесных участках в оптимальном режиме.

Модельное исследование

Целью проводимого модельного исследования является выявление возможности дистанционного определения суммарной биомассы в частично новопосаженных лесных массивах в оптимальном режиме с высокой достоверностью. Покажем это математически.

С учетом выражений (9), (10), (11) имеем

$$B_0 = \alpha_1 \cdot e^{\frac{LAI-1,27}{0,34}} + (1-\alpha_1) \cdot e^{3,247-0,37 \cdot LAI}. \quad (12)$$

Исследуем выражение (12) на экстремум от LAI. Имеем

$$\frac{dB_0}{d(LAI)} = \frac{d_1 \cdot e^{\left(\frac{LAI-1,27}{0,34}\right)}}{0,34} - \quad (13)$$

$$-(1-\alpha_1) \cdot 0,37 \cdot e^{3,247-0,37 \cdot LAI}$$

Из условия $\frac{dB_0}{dLAI} = 0$ из выражения (13) получаем

$$LAI = \frac{3,61 - \ln \frac{\alpha_1}{0,37(1-\alpha_1) \cdot 0,34}}{0,7} = \quad (14)$$

$$= 5,16 - 1,42 \cdot \ln \frac{\alpha_1}{0,126 \cdot (1-\alpha_1)}.$$

Нетрудно показать, что вторая производная выражения (12) всегда положительна, т.е. при выполнении условия (14) B_0 достигает минимальной величины.

Рассмотрим порядок практического применения предлагаемого метода дистанционной оценки биомассы.

Допустим, что имеется возможность дистанционным образом в некоторой степени грубо оценивать объемы биомассы на множестве участков с равной площадью, являющихся частично новопосаженными лесными зонами. На рисунке 3 показано множество таких участков с параметрами (α_i, LAI_i) .

При этом разделение лесного массива на квадраты происходит в технической аппаратуре дистанционного зондирования, установленного на носителе (самолете).

Тем или иным способом дистанционного зондирования осуществляется предварительная оценка суммарной биомассы в указанных квадратах. Согласно работе [11], в этих целях могут быть использованы следующие методы:

- 1) радарное зондирование;
- 2) лидарное зондирование;
- 3) микроволновое зондирование.

α_1 LAI ₁	α_2 LAI ₂	α_3 LAI ₃
α_4 LAI ₄	α_5 LAI ₅	α_6 LAI ₆
α_7 LAI ₇	α_8 LAI ₈	α_9 LAI ₉

Рис. 3. Множество участков с параметрами $(\alpha_i, LAI_i); i = \overline{1,9}$

По результатам предварительной оценки определяется квадрат, в котором суммарная биомасса минимальна. Далее, для выделенного квадрата дистанционно определяется величина индекса LAI. По величине LAI, используя формулу (14), можно определить значение α_1 . Используя вычисленные значения LAI и α_1 по формуле (12), определяется величина B_0 . Таким образом, используя средства предварительной дистанционной оценки и определения лесных участков с минимальной величиной суммарной биомассы, появляется возможность более точного определения этого показателя для исследуемого участка.

Заключение

Таким образом, предлагаемый метод дистанционной оценки суммарной биомассы в частично новопосаженных лесных участках позволяет путем предварительной грубой оценки и определения участка с минимальной биомассой определить более точную величину суммарной биомассы исследуемого участка. С этой целью используется выявленная закономерность появления экстремальных значений суммарной биомассы при обеспечении некоторого вида взаимосвязи между рассматриваемыми основными показателями лесных участков.

Библиографический список

1. Lu D., Batistella M., Moran E. Satellite Estimation of Aboveground Biomass and Impacts of Forest Stand Structure // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 71 (8). – pp. 967-974.
2. Steininger M.K. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia // International Journal of Remote Sensing. – 2000. – Vol. 21 (6 & 7). – pp. 1139-1157.
3. Foody G.M., Boyd D.S., Cutler M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 85 (4). – pp. 463-474.

4. Vieira I.C.G., de Almeida A.S., Davidson E.A., Stone T.A., de Carvalho C.J.R., Guerrero J.B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazonia // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 87. – pp. 470-481.

5. Luckman A., Baker J.R., Kuplich T.M., Yanasse C.C.F., Frery A.C. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for space borne SAR instrument // *Remote Sensing of Environment*. – 1997. – Vol. 60 (1). – pp. 1-13.

6. Luckman A., Baker J.R., Honzak M., Lucas R.M. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: seasonal variation, confidence limits and application to image mosaics // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – Vol. 63 (2). – pp. 126-139.

7. Santos J.R., Freitas C.C., Araujo L.S., Dutra L.V., Mura J.C., Gama F.F., Soler L.S., Sant'Anna S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 87. – pp. 482-493.

8. Feldpausch T.R., Riha S.J., Fernandes, E.C.M., Wandelli E.V. (2005) Development of forest structure and leaf area in secondary forests regenerating on abandoned pastures in Central Amazonia // *Earth Interactions*. – 2005. – Vol. 9. – pp. 1-22.

9. Dickie I.A., Schnitzer S.A., Reich P.B., Hobbie S.E. Spatially disjunct effects of co-occurring competition and facilitation // *Ecology Letters*. – 2005. – Vol. 8 (11). – pp. 1191-1200. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00822.x.

10. White A.S., Elliott K.J. Predicting the effects of hardwood competition on red pine seedling growth // *Can. J. For. Res.* – 1992. – Vol. 22 (10). – pp. 1510-1515.

11. Wertz-Kanounnikoff Sh. Monitoring forest emissions. A review of methods. Working Paper No. 39. November 2008. http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/yo/CIFOR_WP/39.pdf.

References

1. Lu D., Batistella M., Moran E. Satellite Estimation of Aboveground Biomass and Impacts of Forest Stand Structure // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 2005. – Vol. 71 (8). – pp. 967-974.

2. Steining M.K. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground bio-

mass: data from Brazil and Bolivia // *International Journal of Remote Sensing*. – 2000. – Vol. 21 (6 & 7). – pp. 1139-1157.

3. Foody G.M., Boyd D.S., Cutler M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 85 (4). – pp. 463-474.

4. Vieira I.C.G., de Almeida A.S., Davidson E.A., Stone T.A., de Carvalho C.J.R., Guerrero J.B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazonia // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 87. – pp. 470-481.

5. Luckman A., Baker J.R., Kuplich T.M., Yanasse C.C.F., Frery A.C. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for space borne SAR instrument // *Remote Sensing of Environment*. – 1997. – Vol. 60 (1). – pp. 1-13.

6. Luckman A., Baker J.R., Honzak M., Lucas R.M. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: seasonal variation, confidence limits and application to image mosaics // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – Vol. 63 (2). – pp. 126-139.

7. Santos J.R., Freitas C.C., Araujo L.S., Dutra L.V., Mura J.C., Gama F.F., Soler L.S., Sant'Anna S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 87. – pp. 482-493.

8. Feldpausch T.R., Riha S.J., Fernandes, E.C.M., Wandelli E.V. (2005) Development of forest structure and leaf area in secondary forests regenerating on abandoned pastures in Central Amazonia // *Earth Interactions*. – 2005. – Vol. 9. – pp. 1-22.

9. Dickie I.A., Schnitzer S.A., Reich P.B., Hobbie S.E. Spatially disjunct effects of co-occurring competition and facilitation // *Ecology Letters*. – 2005. – Vol. 8 (11). – pp. 1191-1200. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00822.x.

10. White A.S., Elliott K.J. Predicting the effects of hardwood competition on red pine seedling growth // *Can. J. For. Res.* – 1992. – Vol. 22 (10). – pp. 1510-1515.

11. Wertz-Kanounnikoff Sh. Monitoring forest emissions. A review of methods. Working Paper No. 39. November 2008. http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/yo/CIFOR_WP/39.pdf.

