

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО



УДК 630*231

В.А. Усольцев, К.С. Субботин, В.В. Терентьев, А.А. Маленко
V.A. Usoltsev, K.S. Subbotin, V.V. Terentyev, A.A. Malenko

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОГРАФИИ

BIOLOGICAL PRODUCTION OF NATURAL PINE FORESTS OF NORTHERN EURASIA: GEOGRAPHIC FEATURES

Ключевые слова: фитомасса насаждений, годичная продукция, фракции фитомассы, пробные площади, региональные различия, географические закономерности, блоковые фиктивные переменные, рекурсивный принцип.

Выполнен анализ географических закономерностей распределения фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) естественных сосняков на территории Северной Евразии, определяющих энергетический потенциал и являющихся важнейшими критериями количественной оценки их функционирования. Для этого сформирована база данных о фитомассе и ЧПП сосновых насаждений в количестве, соответственно, 1223 и 316 определений на пробных площадях, заложенных на территории от Западной Европы до Японии. Первая из них включает 1202 определения для сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (провинции Средне-Европейская, Скандинавско-Русская, Восток Русской равнины, Уральская, Западно-Сибирская, Средне-Сибирская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Алтае-Саянская), 11 – для сосны черной *P. nigra* Arn. (Средне-Европейская провинция), 2 – для сосны приморской *P. pinaster* (Sol.) Ait. (Средне-Европейская провинция); 5 – для сосны крючковой *P. hamata* D. Sosn. (Причерноморская провинция) и 3 – для сосны густоцветной *P. densiflora* S. et Z. (Япония). Вторая включает 313 определений для сосны обыкновенной, 2 – для сосны густоцветной в Японии и 1 – для сосны приморской в Средне-Европейской провинции. Разработана методика географического ана-

лиза данных – процедура приведения к сопоставимому виду фактических данных о биопродуктивности насаждений Северной Евразии с последующим выявлением географических закономерностей ее распределения на основе метода блоковых фиктивных переменных, включаемых в многофакторное оценочное уравнение фитомассы или ЧПП наряду с массообразующими независимыми переменными. Установлено, что фитомасса и ЧПП естественных сосняков в пределах Северной Евразии на статистически значимом уровне снижаются в направлении с юга на север и от атлантического и тихоокеанского побережий – к полюсу континентальности в Якутии.

Keywords: forest biomass, annual production, biomass components, sample plots, regional differences, geographical patterns, block dummy variables, recursive principle.

The geographic patterns of distribution of biomass and net primary production (NPP) of natural pine forests in the Northern Eurasia are analyzed; they determine the energy potential and are the most important criteria of the quantitative evaluation of forest functioning. For this purpose, databases of the biomass and NPP of natural pine forests consisting of 1223 and 316 definitions respectively on the sample plots established in the area from the Western Europe to Japan was compiled. The first database includes 1202 definitions for *Pinus sylvestris* L. (provinces: Central European, Scandinavian-Russian, the East of Russian Plain, Urals, West Siberian, Cen-

tral Siberian, East Siberian, Trans-Baikal, Altai-Sayan), 11 for *P. nigra* Arn. (Central European province), 2 for *P. pinaster* (Sol) Ait. (Central European province); 5 for *P. hamata* D. Sosn. (Black Sea province) and 3 for *P. densiflora* S. et Z. (Japan). The second database includes 313 definitions for *Pinus sylvestris*, 2 for *P. hamata* and 1 for *P. pinaster*. A technique of geographical data analysis has been developed, namely, the procedure of reduction of the biomass and NPP data of the Northern Eurasia to a compara-

ble form, followed by the identification of their geographic distribution patterns using the method of block dummy variables that are included in the multifactorial equation of biomass or NPP together with volume forming independent variables. It is found that the biomass and NPP of natural pine forests in Northern Eurasia at the statistically significant level are decreasing from South to North, as well as from the Atlantic and Pacific coasts to the continentality pole in Yakutia.

Усольтцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., проф., каф. менеджмента, Уральский государственный лесотехнический университет; гл. н.с., Ботанический сад УрО РАН; г. Екатеринбург. Тел.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Субботин Константин Сергеевич, соискатель степени к.с.-х.н., Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург. E-mail: kos96@bk.ru.

Терентьев Виталий Викторович, к.с.-х.н., доцент, каф. пожарной техники, Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: TerentevV@rambler.ru.

Маленко Александр Анатольевич, д.с.-х.н., зав. каф. лесного хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел. (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

Usoltsev Vladimir Andreyevich, Dr. Agr. Sci., Prof., Chair of Management, Ural State Forestry Engineering University; Chief Staff Scientist, Botanical Garden, Ural Branch, Rus. Acad. of Sci., Yekaterinburg. Ph.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Subbotin Konstantin Sergeevich, Degree Applicant, Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg. E-mail: kos96@bk.ru.

Terentyev Vitaliy Viktorovich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Fire-Fighting Equipment, Ural Institute of State Fire-Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. E-mail: TerentevV@rambler.ru.

Malenko Aleksandr Anatolyevich, Dr. Agr. Sci., Head, Chair of Forestry, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

Введение

Оценка биологической продуктивности лесов является одной из наиболее приоритетных задач лесной экологии. Леса играют важную роль в поддержании глобального углеродного баланса и климата планеты. Для оценки приходной части углеродного цикла лесных экосистем необходима база данных о их фитомассе и чистой первичной продукции (ЧПП), полученных на пробных площадях. Обычно исследователи определяли только фитомассу, менее трудоемкую по сравнению ЧПП. В итоге в сформированной сводке по лесам Евразии [1] данные о фитомассе (более 8 тыс. пробных площадей) втрое превышают соответствующие данные о их ЧПП и фитомассе (около 2600 пробных площадей). Если считать упомянутые пробные площади репрезентативными, то можно сделать предварительный анализ географических закономерностей биопродуктивности лесных насаждений. Дан анализ географии фитомассы и годичной продукции естественных сосняков на территории Северной Евразии.

Объекты и методы исследования

Для анализа географических закономерностей распределения фитомассы и ЧПП естественных сосновых лесов из упомянутой сводки извлечены и использованы фактические данные фитомассы и ЧПП двухвойных видов рода *Pinus* L. Для географического анализа фитомассы нами привлечены

материалы базы данных в количестве 1223 пробных площадей, в том числе: 1202 определения для сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (провинции Средне-Европейская, Скандинавско-Русская, Восток Русской равнины, Уральская, Западно-Сибирская, Средне-Сибирская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Алтае-Саянская), 11 – для сосны черной *P. nigra* Arn. (Средне-Европейская провинция), 2 – для сосны приморской *P. pinaster* (Sol.) Ait. (Средне-Европейская провинция); 5 – для сосны крючковатой *P. hamata* D. Sosn. (Причерноморская провинция) и 3 – для сосны густоцветной *P. densiflora* S. et Z. (Япония). Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления распределились по 31 региону (рис. 1).

ЧПП насаждений определяет энергетический потенциал лесных экосистем и является одним из важнейших критериев количественной оценки их функционирования [2]. Для географического анализа ЧПП использованы материалы базы данных в количестве 316 пробных площадей, в том числе 313 определений для сосны обыкновенной, 2 – для сосны густоцветной в Японии и 1 – для сосны приморской в Средне-Европейской провинции. Экспериментальные данные 316 определений ЧПП для сосняков после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории распределились по 16 регионам (рис. 2).

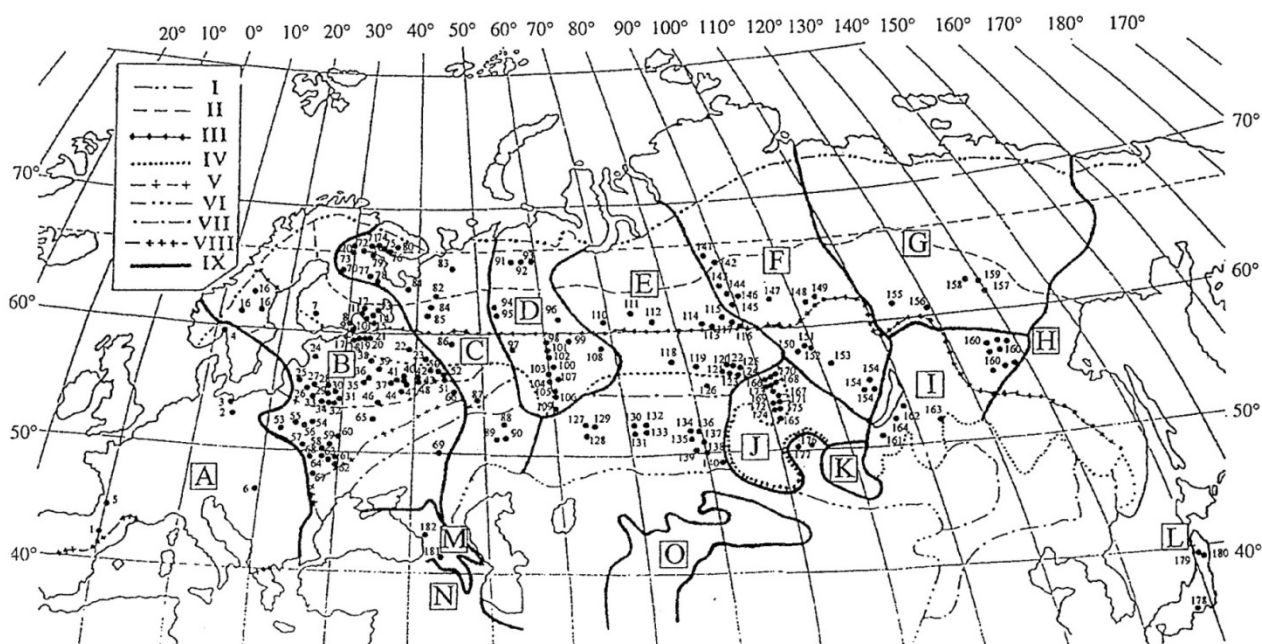


Рис. 1. География экспериментальных данных о фитомассе естественных сосняков (здесь и далее):

- I** – южная граница тундры; **II** – южная граница подзоны северной тайги;
 - III** – южная граница подзоны средней тайги; **IV** – южная граница подзоны южной тайги;
 - V** – южная граница хвойно-широколиственных лесов;
 - VI** – юго-восточная граница широколиственных лесов; **VII** – южная граница лесостепи;
 - VIII** – южная граница степи [1, 3]; **IX** – границы лесохозяйственных провинций Сибири.
- Выделены провинции [4]:** **A** – Средне-Европейская; **B** – Скандинавско-Русская (включая юг Русской равнины); **C** – Восток Русской равнины (включая Западно-Казахстанскую провинцию на юге); **D** – Уральская; **E** – Западно-Сибирская (включая Восточно-Казахстанскую провинцию на юге); **F** – Средне-Сибирская; **G** – Восточно-Сибирская; **H** – Дальний Восток; **I** – Забайкальская горная; **J** – Алтае-Саянская горная; **K** – Центрально-Хангайская; **L** – Японские острова; **M** – Причерноморская; **N** – Кавказско-Малоазиатская; **O** – Памиро-Тяньшаньская. Каждая точка на схеме соответствует одной или нескольким территориально сближенным пробным площадям

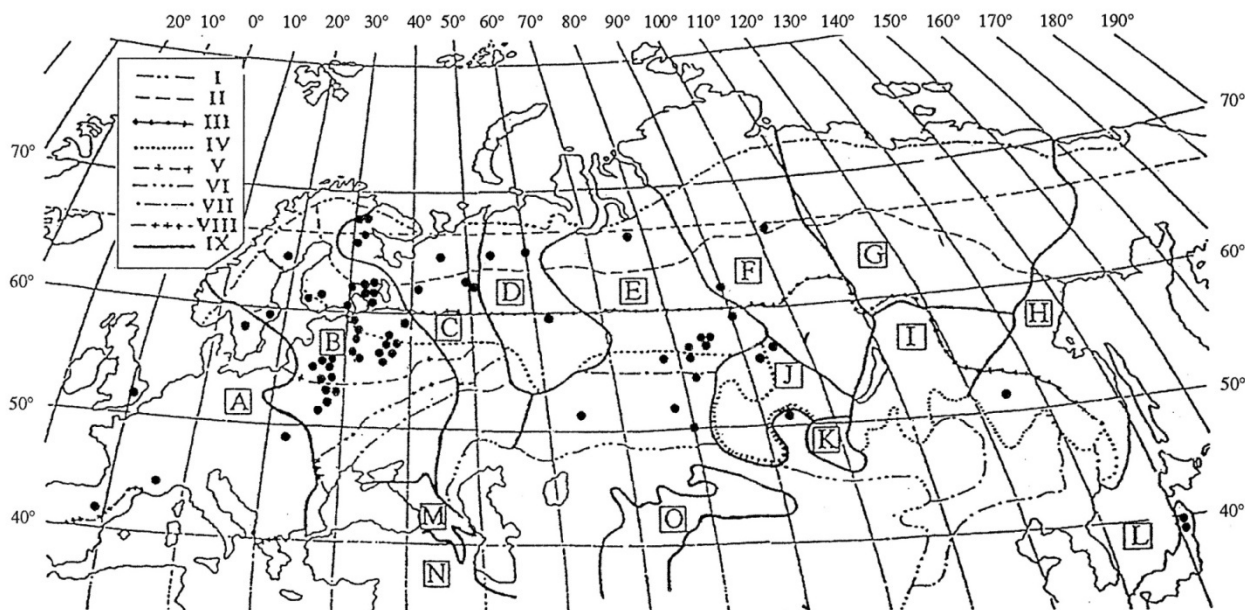


Рис. 2. География экспериментальных данных о ЧПП естественных сосняков Северной Евразии

Совместный анализ разных видов рода *Pinus* вызван невозможностью произрастания одного и того же древесного вида на всей территории Северной Евразии, в результате чего ареалы древесных видов в пределах рода приурочены к определенным экорегионам. Последнее явление известно в хорологии растений как замещение видов: замещающие, или викарирующие виды растений возникают в случаях геологически давнего разобщения когда-то сплошного ареала или вследствие климатически обусловленного морфогенеза [5]. Если мы хотим исследовать географию биологической продуктивности того или иного рода в максимально широких географических диапазонах, то с явлением замещения древесных видов мы сталкиваемся неизбежно.

Нами использована опубликованная ранее методика географического анализа данных – процедура приведения к сопоставимому виду фактических данных о фитомассе насаждений Северной Евразии с последующим выявлением географических закономерностей ее распределения на основе метода так называемых блоковых фиктивных переменных, включаемых в многофакторное оценочное уравнение фитомассы наряду с массообразующими независимыми переменными [6, 7].

Результаты и обсуждение

Для оценки региональных смещений в показателях биологической продуктивности сосняков применена регрессионная модель, структура которой получила обоснование в нашей предыдущей работе [7]:

$$\ln P_i = f(X_0, \dots, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M), \quad (1)$$

где P_i – фитомасса i -й фракции ($P_S, P_{SB}, P_F, P_B, P_R$ и P_U – соответственно, стволов с корой, коры стволов, хвои, ветвей, корней и нижнего яруса растительности, включающего живой напочвенный покров, подлесок и подрост) в абсолютно сухом состоянии, т/га;

D и H – соответственно, средние диаметр, см, и высота древостоя, м;

N – число стволов на 1 га, тыс. экз/га;

M – запас, м³/га;

X_0, \dots, X_{30} – блоковые фиктивные переменные.

Посредством блоковых переменных выполнена кодировка принадлежности локальных массивов данных о фитомассе сосняков, распределенных по экорегионам (рис. 1). Расчет уравнений (1) подтвердил их достаточную адекватность фактическим данным ($R^2 = 63-98\%$).

При расчете уравнений (1), включающих блоковые переменные, устанавливается степень «дистанцирования», или отличия показателей фитомассы каждого региона от исходного. Выводится и количественный критерий названного отличия, характеризуемый константой при блоковой переменной для того или иного региона. Каждая из констант значима на уровне P_{95} и выше. Уравнения (1) работают по принципу «Что будет, если...?» и обеспечивают сопоставимость фракционного состава фитомассы разных экорегионов, если в эти уравнения подставить цифровые значения A, H, D, N и M . Но значения названных массообразующих показателей древостоев не являются общими для всех экорегионов, а изменяются при переходе от одного к другому. Поэтому вначале необходимо выявить различия экорегионов по каждому из массообразующих показателей, объединенных в некоторую систему рекурсивных уравнений [6, 8].

Рекурсивный принцип построения регрессионной системы обеспечивает последовательное накопление региональных различий в возрастной динамике массообразующих показателей и запасов стволовой древесины по цепочке взаимозависимых уравнений:

$$\begin{aligned} \ln H &= f(X_0, \dots, X_{30}, \ln A) \rightarrow \ln D = \\ &= f(X_0, \dots, X_{30}, \ln A, \ln H) \rightarrow \\ &\rightarrow \ln N = f(X_0, \dots, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \\ &\rightarrow \ln M = f(X_0, \dots, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N). \quad (2) \end{aligned}$$

При расчете констант уравнений (2) установлено, что их независимые переменные объясняют 79-95% изменчивости массообразующих показателей и запаса древостоев. Если с помощью уравнений (1) оценивается степень региональных различий в структуре фитомассы при условии равенства массообразующих показателей, то система (2) определяет степень региональных различий самих массообразующих показателей, накапливая вклад каждого из них в конечный результат – запас стволовой древесины. Таким образом, региональные различия запасов фитомассы раскладываются на две составляющие, которым соответствуют две системы уравнений. Последовательным табулированием уравнений (2) по задаваемым значениям возраста и затем уравнений (1) по расчетным значениям их независимых переменных получены возрастные тренды всех массообразующих показателей и запасов фитомассы по каждому региону, которые здесь не приводятся по причине большого объема.

Для анализа географии распределения запасов фитомассы в естественных насаждениях сосны мы выбрали для провинциального градиента схему изоконт А.А. Борисова и для зонального – схему изотерм С. Тукканена [9, 10]. Путем наложения расчетных данных фитомассы сосняков в возрасте 100 лет, взятых из упомянутых расчетных возрастных трендов, на схемы изоконт и изотерм составлена двухвходовая таблица для фитомассы сосняков, в которой входами служат значения континентальности климата (IC) и суммы эффективных температур выше $+5^{\circ}C$ за вегетационный период в Северной Евразии (T). На ее основе рассчитаны уравнения:

$$\ln P_{abo} = -8,89 + 0,66(\ln IC) - 0,14(\ln IC)^2 + 6,4(\ln T) - 0,76(\ln T)^2, R^2 = 0,64; \quad (3)$$

$$\ln P_{tot} = -6,45 + 0,59(\ln IC) - 0,14(\ln IC)^2 + 5,4(\ln T) - 0,62(\ln T)^2, R^2 = 0,63, \quad (4)$$

где P_{abo} и P_{tot} – расчетные значения, соответственно, надземной и общей фитомассы естественных сосняков в возрасте 100 лет, т/га;

IC – индекс континентальности климата, значения которых взяты со схемы изоконт;

T – сумма эффективных температур выше $+5^{\circ}C$ за вегетационный период, значения которой взяты со схемы изотерм.

Оба климатических параметра статистически значимы. Графическая интерпретация уравнений (3) и (4) на рисунке 3 наглядно демонстрирует положительную зависимость фитомассы от суммы эффективных температур и отрицательную – от индекса континентальности.

Для анализа географии ЧПП последовательно рассчитана система следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \ln Z_S &= f(X_0, \dots, X_{15}, \ln P_F, \ln A, \ln D, \ln H, \ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Z_{SB} &= f(X_0, \dots, X_{15}, \ln Z_S, \ln A, \ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Z_B &= f(X_0, \dots, X_{15}, \ln P_F, \ln Z_S, \ln A, \\ \ln D, \ln H) &\rightarrow \ln Z_F = f(X_0, \dots, X_{15}, \ln P_F, \ln A, \\ \ln D, \ln N) &\rightarrow \ln Z_R = \\ &= f(X_0, \dots, X_{15}, \ln P_R, \ln Z_S, \ln H, \ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Z_U &= f(X_0, \dots, X_{15}, \ln P_U), \quad (5) \end{aligned}$$

где Z_i – годовая первичная продукция (ЧПП, или годичный прирост) фитомассы i -й фракции (стволов в коре, коры стволов, ветвей, хвои, корней и нижнего яруса, соответственно, $Z_S, Z_{SB}, Z_B, Z_F, Z_R$ и Z_U) в абсолютно сухом состоянии, т/га.

Все константы в (5) значимы на уровне P_{95} и выше, значения R^2 находятся в пределах от 0,84 до 0,90.

В результате последовательного табулирования уравнений (2), (1) и (5) получены возрастные тренды ЧПП фитомассы по полному фракционному составу, которые здесь не приведены из-за большого объема. Из них взяты значения общей ЧПП сосняков для возраста 100 лет (Z_{tot}) и получено уравнение

$$Z_{tot} = -1,910 - 0,0422IC + 0,3353T - 0,0026T^2; R^2 = 0,809, \quad (6)$$

константы которого статистически значимы на уровне P_{95} . Графическая интерпретация зависимости (6) на фоне экспериментальных данных (рис. 4) показывает, что общая ЧПП естественных сосняков изменяется прямо пропорционально сумме эффективных температур и обратно пропорционально индексу континентальности.

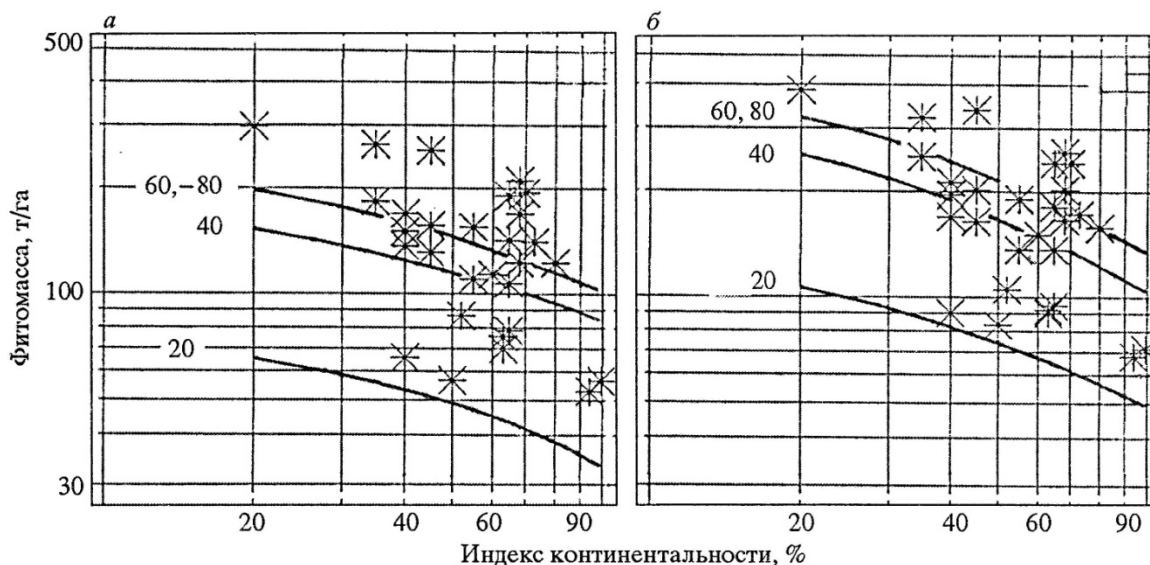


Рис. 3. Связь расчетных показателей надземной (а) и общей (б) абсолютно сухой фитомассы естественных сосняков с индексом континентальности климата (%) и суммой эффективных температур (здесь и далее цифры у кривых – $^{\circ}C$)

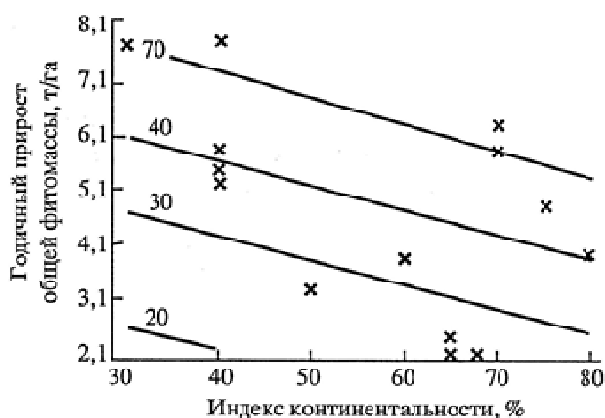


Рис. 4. Зависимость ЧПП общей фитомассы естественных сосняков от индекса континентальности и суммы эффективных температур, рассчитанная по уравнению (6)

Заклучение

Таким образом, установлено, что фитомасса и ЧПП естественных сосняков в пределах Северной Евразии на статистически значимом уровне снижаются в направлении с юга на север и от атлантического и тихоокеанского побережий – к полюсу континентальности в Якутии.

Библиографический список

1. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and reharmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
2. Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. – М.: Наука, 1986. – 297 с.
3. Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Картосхемы продуктивности и биологического круговорота главных типов растительности суши // Изв. ВГО. – 1967. – Т. 99. – № 3. – С. 190-194.
4. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. – М.: Наука, 1973. – 203 с.
5. Толмачев А.И. Основы учения об ареалах: Введение в хорологию растений. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1962. – 100 с.
6. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 541 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).
7. Усольцев В.А., Гаврилин Д.С., Маленко А.А., Борников А.В. Биологическая продуктивность лиственницы в разных регионах Евразии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. –

№ 2 (112). – С. 70-74 (<http://www.asau.ru/files/vestnik/2014/2/070-074.pdf>).

8. Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1997. – Vol. 12. – № 3. – P. 273-279 (http://www.wsl.ch/walddyn/lwf_publ_abstract.php?ref=16581#top).

9. Борисов А.А. Климаты СССР. – М.: Просвещение, 1967. – 296 с.

10. Tuhkanen S.A. Circumboreal system of climatic-phytogeographical regions // Acta Botanica Fennica. – 1984. – Vol. 127. – P. 1-50.

References

1. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and reharmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
2. Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A. Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem. – М.: Nauka, 1986. – 297 s.
3. Bazilevich N.I., Rodin L.E. Kartoskhemy produktivnosti i biologicheskogo krugovorota glavneishikh tipov rastitel'nosti суши // Izv. VGO. – 1967. – Т. 99. – № 3. – S. 190-194.
4. Kurnaev S.F. Lesorastitel'noe raionirovanie SSSR. – М.: Nauka, 1973. – 203 s.
5. Tolmachev A.I. Osnovy ucheniya ob arealakh: Vvedenie v khorologiyu rastenii. – L.: Izd-vo LGU, 1962. – 100 s.
6. Usoltsev V.A. Formirovanie bankov dannykh o fitomasse lesov. – Ekaterinburg: UrO RAN, 1998. – 541 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).
7. Usoltsev V.A., Gavrilin D.S., Malenko A.A., Bornikov A.V. Biologicheskaya produktivnost' listvennitsy v raznykh regionakh Evrazii // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 2 (112). – S. 70-74. (<http://www.asau.ru/files/vestnik/2014/2/070-074.pdf>).
8. Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1997. – Vol. 12. – No. 3. – P. 273-279. (http://www.wsl.ch/walddyn/lwf_publ_abstract.php?ref=16581#top).
9. Borisov A.A. Klimaty SSSR. – М.: Prosveshchenie, 1967. – 296 s.
10. Tuhkanen S.A. Circumboreal system of climatic-phytogeographical regions // Acta Botanica Fennica. – 1984. – Vol. 127. – P. 1-50.

