

УДК 630\*43:630\*434

# БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЛЕПОЖАРНЫХ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. И. А. Целитан<sup>а</sup>, \*, И. М. Данилин<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, Красноярск, 660036 Россия

\*E-mail: sjfs@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 23.08.2022 г.

Принята к публикации 18.10.2022 г.

Рассмотрены особенности послепожарного формирования чистых по составу лиственничных насаждений в северных (Эвенкия, среднее течение р. Нижней Тунгуски, географические координаты — 64°03' с.ш. 101°10' в.д.) и южных (Ермаковский р-н, географические координаты — 52°23' с.ш., 93°33' в.д.) районах Красноярского края. По материалам пробных площадей проанализированы строение, рост и биологическая продуктивность лесных восстановительных сукцессий. Наибольшее значение фитомассы (по общей продуктивности) лиственничных насаждений составило 1055.5 т абс. сух. вещества/га<sup>-1</sup> в возрасте 93 лет. Структурно соотношение фракций фитомассы древостоев закономерно изменяется с увеличением их среднего возраста и густоты. С увеличением среднего возраста древостоя повышается его надземная и корневая фитомасса, вместе с тем уменьшается относительная доля массы древесины крон и хвои относительно общей надземной фитомассы древостоя. В 38-летних лиственничниках на долю массы крон приходится 18%, а на долю стволов — 82%. В 60-летних древостоях на древесину крон с хвоей приходится 14%, а на массу стволов — 86%. В 93-летнем лиственничнике доля фитомассы стволов возрастает до 89%, а доля древесины крон с хвоей имеет минимальный показатель — 11%. Максимально ростовой потенциал лиственничное насаждение возрастом 56 лет по текущему приросту фитомассы (по общей продуктивности) реализует на уровне 14.69 т абс. сух. вещества/га<sup>-1</sup> в год. Сформировавшиеся на горях молодняки и средневозрастные лиственничники имеют более высокие показатели роста и накопления фитомассы, по количеству закрепленного углерода атмосферы превышают спелые и перестойные насаждения более чем в два раза.

**Ключевые слова:** лиственница сибирская, послепожарные восстановительные сукцессии, таксационное строение, структура фитомассы, корреляционные связи.

DOI: 10.31857/S0024114823040125, EDN: XUQBDI

Изучение закономерностей лесообразовательного процесса в связи с пожарами, вырубками, опасными природными явлениями является одним из важных направлений лесоведения и экологии леса. Вопросы лесовосстановительной динамики чрезвычайно актуальны для регионов Красноярского края (Абаимов и др., 1996; Валендик, 1996; Фуряев, 1996; Региональные проблемы ..., 2007; Динамика лесов ..., 2013; Буряк, 2015; Иванова и др., 2016).

Важным в этих исследованиях является изучение таксационного строения, роста и биологической продуктивности лесов послепожарного формирования как в плане теории формирования

лесных экосистем, так и практическом отношении решения вопросов ведения лесного хозяйства (Зиганшин, 1997; Ведрова и др., 2000; Исаев и др., 2001; Kuuluvainen, 2002; Бузыкин и др., 2002; Швиденко и др., 2004; Pilli et al., 2006; Таблицы ..., 2008; Динамика лесов ..., 2013; Кузьмичев, 2013; Швиденко, Щепашенко, 2014; Щепашенко и др., 2017; Усольцев, 2020). В горных районах Красноярского края имеются значительные площади лиственничных лесов послепожарного формирования (Абаимов и др., 1996; Буряк, 2015; Иванова и др., 2016; Лесной план ..., 2019). Эти насаждения выполняют важные почвозащитные, водорегулирующие, водоохраные биосферные функции в регионе (Региональные проблемы ..., 2007; Динамика лесов ..., 2013).

Цель исследования — провести лесоэкологическую оценку динамики послепожарного формирования и биологической продуктивности

<sup>1</sup> Работа выполнена по базовому проекту Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН "Научные основы сохранения ресурсного и экологического потенциала лесов Сибири в условиях кумулятивных антропогенных и природных рисков" № 0287-2021-0010, рег. НИОКТР № 121030900181-4.

лиственничных насаждений в горных районах Красноярского края.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в северных (Эвенкия, среднее течение р. Нижней Тунгуски, географические координаты —  $64^{\circ}03'$  с.ш.  $101^{\circ}10'$  в.д.) и южных (Ермаковский р-н, географические координаты —  $52^{\circ}23'$  с.ш.,  $93^{\circ}33'$  в.д.) районах Красноярского края, в лиственничниках, сформировавшихся естественным образом на гарях. В Ермаковском районе лиственничные леса представлены лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb). Это высокопродуктивные, чистые по составу, сомкнутые насаждения, расположенные, как правило, по северным склонам гор. В последние 70 лет лиственничные леса активно осваиваются и подвергаются рубкам и воздействиям пожаров, что существенно влияет на возрастную структуру древостоев. В результате огневого воздействия как в насаждениях, так и по вырубкам происходит минерализация почв, создаются благоприятные условия для восстановления леса (Абаимов и др., 1996; Фурьев, 1996; Фарбер, 2000). На небольших по площади (до 5 га) вырубках и гарях возобновление лиственницы обильное при достаточном количестве жизнеспособных семян. Количество семян достигает пятидесяти и более тысяч на гектаре в течение 5–6 лет после рубки, что обеспечивает последующее естественное восстановление лиственничного насаждения. В возрасте 15–20 лет в лиственничных молодняках происходит смыкание крон деревьев, восстанавливаются напочвенный покров, подстилка (Абаимов и др., 1996; Бузыкин и др., 2002; Цветков, 2005).

В период 2020–2021 гг. закладывались координатные пробные площади размером  $50 \times 50$  м в Ермаковском и Эвенкийском лесничествах Красноярского края с целью изучения таксационно-морфологической структуры и биологической продуктивности насаждений, с отбором и измерениями модельных деревьев по принципу ступенчатого представительства. Лесотаксационными методами на пробных площадях выполняли измерения стволов и крон деревьев сплошным перечетом, принимали во внимание надземную фитомассу (Самойлович, 1966; Уткин, 1975; Анучин, 1982; Усольцев, 1998; Швиденко и др., 2000; Shvidenko et al., 2000). Фитомассу древостоя определяли обмером и разделением на фракции модельных деревьев по ступеням толщины (7–10 модельных деревьев каждой породы на пробной площади). От каждой фракции отбирались образцы и навески на влажность, которые высушивались в сушильном шкафу при температуре  $105^{\circ}\text{C}$  до постоянного веса и взвешивались на электронных весах с точностью  $\pm 1$  г. Масса фракций выравнивалась аналитически, суммировалась по ступеням толщины ство-

лов и переводилась на гектар в абсолютно сухом состоянии. Массу корней определяли с использованием конверсионных коэффициентов расчетным путем по методике В.А. Усольцева (2020). Отпад и опад фракций фитомассы выявляли по методике А.З. Швиденко с соавт. (2004). Надземную фитомассу живого напочвенного покрова определяли на учетных площадках размером  $0.5 \times 0.5$  м срезаением всех растений на площадке на уровне поверхности почвы, разделением их по видам, взвешиванием и приведением к абсолютно сухому состоянию. Количество учетных площадок на каждой ПП составляло не менее 10 шт. для обеспечения точности определений не менее 10%. Фитомасса древесных видов подлеска определялась на учетных площадках размером  $2 \times 2$  м, закладываемых равномерно по ПП в количестве не менее 5 шт., с замером растений подлеска на высоте груди по 1 см ступеням толщины и взятием образцов. Полевые исследования проводили в августе, в период завершения активной вегетации растений.

Лиственничные насаждения возрастом 38–90 лет, чистые по составу, густотой 1000–5500 деревьев на га, различных рядов естественного формирования, разнотравных типов леса. Пробная площадь 7 заложена в березово-осиновом насаждении 82–90 лет, которое образовалось на пройденной пожаром лиственничной вырубке. Почвы на пробных площадях длительно-сезонно-мерзлотные, суглинистые, средней мощности, лесные дерновотрапные. В подлеске произрастают рябина сибирская (*Sorbus aucuparia* subsp. *sibirica* (Hedl.) Krylov), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), ива козья (*Salix caprea* L.), ольха кустарниковая (*Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus.), береза кустарниковая (*Betula fruticosa* Pall.), жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), шиповник майский (*Rosa majalis* Herrm.), единично смородина красная (*Ribes rubrum* L.).

Проективное покрытие напочвенного покрова 70–80%, представлено различными видами лесных травянистых растений, среди которых доминируют пырейник сибирский (*Elymus sibiricus* L.), герань луговая (*Geranium pratense* L.), горошек однопарный (*Vicia unijuga* A. Braun), осока амгунская (*Carex amgunensis* Fr. Schmidt.), осока ланцетная (*Carex lanceolata* Boott), подмаренник настоящий (*Galium verum* L.), иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), хризантема Завадского (*Chrysanthemum zawadskii* Herbach), полынь рассеченная (*Artemisia laciniata* Willd.), мятлик сибирский (*Poa sibirica* Roshev.), лапчатка пижмолистная (*Potentilla tanacetifolia* Willd. Ex Schldtl.).

В табл. 1 показаны таксационные показатели исследованных лиственничных насаждений. Отпад определялся по методике В.П. Воропанова (1966).

Таблица 1. Таксационная характеристика лиственных насаждений

| № пробной<br>площади | Состав    | Класс бонитета | Напочвенный<br>покров    | Древесная<br>порода | Возраст, лет | Средняя высота,<br>м | Средний диаметр,<br>см | Число деревьев,<br>шт./га | Сумма площадей<br>сечения, м <sup>2</sup> /га <sup>-1</sup> | Запас, м <sup>3</sup> /га <sup>-1</sup> | Изменение запаса,<br>м <sup>3</sup> /га/год <sup>-1</sup> |         | Общая<br>продуктивность,<br>м <sup>3</sup> /га <sup>-1</sup> | Прирост по общей<br>продуктивности,<br>м <sup>3</sup> /га/год <sup>-1</sup> |         | Отпад, м <sup>3</sup> /га/год <sup>-1</sup> |
|----------------------|-----------|----------------|--------------------------|---------------------|--------------|----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------|
|                      |           |                |                          |                     |              |                      |                        |                           |                                                             |                                         | текущее                                                   | среднее |                                                              | текущий                                                                     | средний |                                             |
| 1                    | 10Л       | III            | Разнотравье              | Л                   | 38           | 11.4                 | 10.6                   | 3484                      | 30.1                                                        | 180                                     | 5.03                                                      | 4.74    | 226                                                          | 7.21                                                                        | 5.95    | 2.18                                        |
| 2                    | 10Л       | III            | Разнотравье              | Л                   | 50           | 14.3                 | 14.0                   | 2238                      | 33.7                                                        | 239                                     | 4.62                                                      | 4.78    | 312                                                          | 6.85                                                                        | 6.24    | 2.23                                        |
| 3                    | 10Л       | II             | Разнотравье              | Л                   | 52           | 17.3                 | 18.4                   | 1437                      | 38.0                                                        | 321                                     | 5.63                                                      | 6.17    | 421                                                          | 8.52                                                                        | 8.10    | 2.89                                        |
| 4                    | 10Л       | III            | Разнотравье              | Л                   | 60           | 16.0                 | 16.3                   | 1757                      | 36.2                                                        | 284                                     | 4.20                                                      | 4.73    | 378                                                          | 6.36                                                                        | 6.30    | 2.16                                        |
| 5                    | 10Л       | III            | Разнотравье              | Л                   | 93           | 20.5                 | 21.8                   | 1105                      | 41.1                                                        | 397                                     | 2.89                                                      | 4.27    | 555                                                          | 4.49                                                                        | 5.97    | 1.60                                        |
| 6                    | 10Л       | III            | Зеленые мхи,<br>брусника | Л                   | 41           | 9.6                  | 7.9                    | 5141                      | 27.0                                                        | 142                                     | 3.81                                                      | 3.46    | 182                                                          | 5.46                                                                        | 4.44    | 1.65                                        |
| 7                    | 9Б<br>10с | II             | Разнотравье              | Б                   | 82           | 24.2                 | 22.8                   | 402                       | 16.4                                                        | 156                                     | 0.41                                                      | 1.90    | 300                                                          | 1.03                                                                        | 3.66    | 0.62                                        |
|                      |           |                |                          | Ос                  | 90           | 24.5                 | 26.5                   | 53                        | 2.9                                                         | 34                                      | 0.15                                                      | 0.38    | 49                                                           | 0.24                                                                        | 0.54    | 0.09                                        |

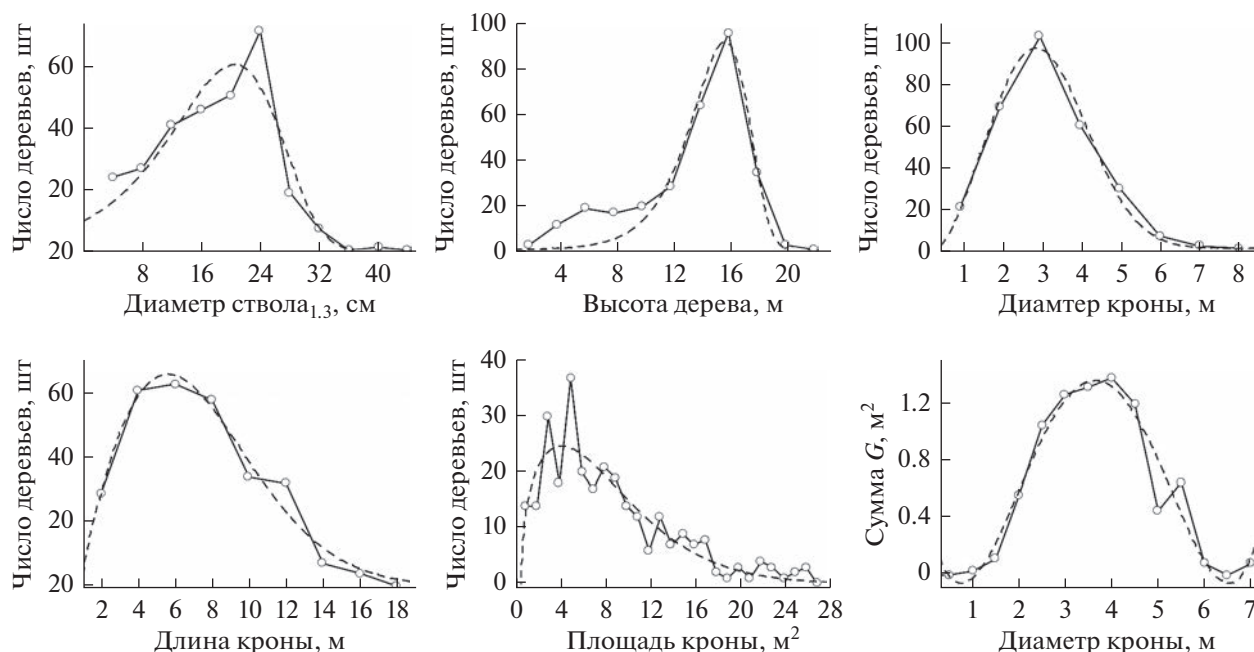


Рис. 1. Распределения деревьев лиственницы по таксационным показателям, сглаженные функцией Вейбулла (пробная площадь 3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Варьирование таксационных признаков древостоев находится в интервале 43–74%. Деревья значительно различаются по размерным биометрическим характеристикам, конкурируя в процессе роста за питательные вещества, влагу и свет. На начальных этапах формирования насаждений — в молодняках корреляционная связь таксационных признаков с высотами стволов относительно низкая. В табл. 2–3 показаны рассчитанные характеристики биологической продуктивности и корреляционные связи параметров исследованных лиственничных насаждений.

Распределение деревьев по таксационным показателям с высокой крутизной и правосторонней асимметрией, ряды растянуты, характерна автокорреляция. Для выравнивания эмпирических данных применена функция Вейбулла с тремя основными параметрами: масштаб ( $b$ ), форма ( $c$ ), сдвиг ( $\theta$ ), что позволило получить адекватное и эффективное сглаживание:

$$f(x) = c/b * [(x - \theta)/b]^{c-1} * e^{-[(x - \theta)/b]^c}$$

$$0 \leq x < \infty, b > 0, c > 0, \theta > 0,$$

где  $b$  — параметр масштаба;  $c$  — параметр формы; ( $\theta$ ) — параметр сдвига;  $e$  — основание натурального логарифма Эйлера (Bailey, Dell, 1973; Ганина, 1984; Statistica ..., 2022) (рис. 1).

Таксационные и продукционные показатели лиственничных насаждений тесно связаны между

собой. Зависимости между показателями аппроксимируются полиномиальными, экспоненциальными, логарифмическими и степенными функциями (табл. 4, 5). Фитомасса лиственничных насаждений тесно связана с размерами деревьев и густотой древостоев. Масса фракций и общая продуктивность фитомассы закономерно увеличиваются с повышением таксационных показателей. Коэффициенты корреляции ( $R$ ) таксационных показателей имеют следующие значения: возраст — 0.95; средний диаметр — 0.91; средняя высота — 0.85; запас — 0.73; число деревьев — 0.81. Все  $R$  значимы при доверительной вероятности 95%, уровень значимости  $\alpha < 0.05$ . Связи между массой отдельных фракций выше, чем с размерами деревьев ( $R^2 = 0.76–0.99$ ) (табл. 3).

При уменьшении густоты древостоев увеличивается масса древесины крон и листвы (хвои), при этом масса древесины и коры стволов, отмерших ветвей изменяется незначительно. С увеличением среднего возраста древостоя повышается его надземная и корневая фитомасса (табл. 2, 3), вместе с тем уменьшается относительная доля массы древесины крон и хвои относительно общей надземной фитомассы древостоя. В 38-летних лиственничниках на долю массы крон приходится 18%, а на долю стволов — 82%. В 60-летних древостоях на древесину крон с хвоей приходится 14%, а на массу стволов — 86%. В 93-летнем лиственничнике доля фитомассы стволов возрастает до 89%, а доля древесины крон с хвоей имеет минимальный показатель — 11%.

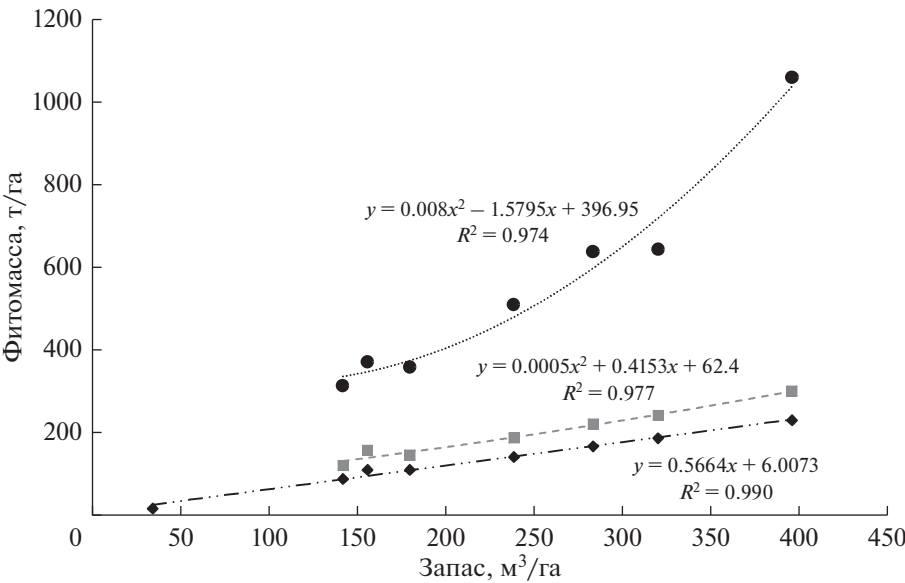
Таблица 2. Биологическая продуктивность лиственныхников

| № пробной площади | Состав | Древесная порода | Возраст, лет | Фитомасса насаждения, т/га <sup>-1</sup> |              |                 |               |                  |       |       |                   |                    |       | Продуктивность фитомассы общая, т/га <sup>-1</sup> | Прирост фитомассы текущий, т/га/год <sup>-1</sup> |       | Углерод фитомассы, т/га <sup>-1</sup> |       |       |       | Чистая первичная продукция, т С/га/год <sup>-1</sup> |                    |  |       |  |
|-------------------|--------|------------------|--------------|------------------------------------------|--------------|-----------------|---------------|------------------|-------|-------|-------------------|--------------------|-------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------------------------------|--------------------|--|-------|--|
|                   |        |                  |              | древостой                                |              |                 |               |                  |       |       | подрост и полесок |                    |       |                                                    |                                                   |       |                                       |       |       |       |                                                      | напочвенный покров |  | Всего |  |
|                   |        |                  |              | ствол                                    | кора в т. ч. | древесина кроны | хвоя (листья) | надземная, итого | корни | Всего | подрост и полесок | напочвенный покров | Всего |                                                    |                                                   |       |                                       |       |       |       |                                                      |                    |  |       |  |
|                   |        |                  |              |                                          |              |                 |               |                  |       |       |                   |                    |       |                                                    |                                                   |       |                                       |       |       |       |                                                      |                    |  |       |  |
| 1                 | 10Л    | Л                | 38           | 89.1                                     | 15.5         | 15.1            | 4.4           | 108.6            | 35.5  | 144.1 | 0.2               | 1.0                | 145.3 | 357.2                                              | 3.65                                              | 12.18 | 72.4                                  | 44.6  | 171.8 | 54.1  | 5.84                                                 |                    |  |       |  |
| 2                 | 10Л    | Л                | 50           | 118.7                                    | 20.1         | 16.6            | 4.7           | 140.0            | 44.5  | 184.5 | 0.4               | 1.1                | 186.0 | 507.4                                              | 3.30                                              | 12.59 | 92.7                                  | 59.4  | 243.8 | 74.8  | 6.03                                                 |                    |  |       |  |
| 3                 | 10Л    | Л                | 52           | 160.2                                    | 25.0         | 19.7            | 5.6           | 185.5            | 53.5  | 239.0 | 0.5               | 0.8                | 240.3 | 640.1                                              | 3.89                                              | 14.69 | 119.8                                 | 80.1  | 307.8 | 101.0 | 7.04                                                 |                    |  |       |  |
| 4                 | 10Л    | Л                | 60           | 143.1                                    | 23.7         | 17.8            | 5.1           | 166.0            | 51.9  | 217.9 | 0.6               | 1.3                | 219.8 | 634.5                                              | 3.01                                              | 12.84 | 109.3                                 | 71.7  | 304.8 | 92.1  | 6.15                                                 |                    |  |       |  |
| 5                 | 10Л    | Л                | 93           | 203.8                                    | 32.6         | 19.7            | 5.3           | 228.8            | 68.2  | 297.0 | 1.0               | 1.3                | 299.3 | 1055.5                                             | 2.03                                              | 12.62 | 149.2                                 | 101.9 | 505.4 | 136.9 | 6.00                                                 |                    |  |       |  |
| 6                 | 10Л    | Л                | 41           | 71.0                                     | 13.1         | 12.5            | 3.6           | 87.1             | 30.5  | 117.6 | 0.2               | 1.3                | 119.1 | 312.1                                              | 2.86                                              | 10.17 | 59.3                                  | 35.4  | 150.0 | 44.1  | 4.87                                                 |                    |  |       |  |
| 7                 | 9Б     | Б                | 82           | 89.6                                     | 13.5         | 16.2            | 2.8           | 108.6            | 20.3  | 128.9 | 3.2               | 4.1                | 156.6 | 369.3                                              | 0.40                                              | 9.12  | 77.8                                  | 44.8  | 184.2 | 84.5  | 4.69                                                 |                    |  |       |  |
|                   | 10Ос   | Ос               | 90           | 14.0                                     | 1.8          | 2.1             | 0.2           | 16.3             | 4.1   | 20.4  |                   |                    |       |                                                    |                                                   |       |                                       | 7.0   |       | 10.4  |                                                      |                    |  |       |  |

Таблица 3. Корреляционная структура связи (R) таксационных показателей и фитомассы лиственничников

| Показатели                     | Фитомасса насаждения |                |                 |                |                                   |       |                      |       |       |                 |               |                   | Чистая первичная продукция |       |                 |                   |                    |                  |                      |
|--------------------------------|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|-------|----------------------|-------|-------|-----------------|---------------|-------------------|----------------------------|-------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------|----------------------|
|                                | Возраст              | Средняя высота | Средний диаметр | Число деревьев | Сумма площадей поперечных сечений | Запас | Общая продуктивность | ствол | кора  | древесина кроны | хвоя (листва) | итоговая наземная |                            | корни | всего древостой | подрост и подрост | напочвенный покров | всего насаждение | общая продуктивность |
| Возраст                        | 1.00                 | 0.89           | 0.91            | -0.75          | 0.03                              | 0.50  | 0.73                 | 0.58  | 0.52  | 0.56            | -0.02         | 0.58              | 0.32                       | 0.52  | 0.69            | 0.53              | 0.63               | 0.95             | -0.13                |
| Средняя высота                 | 0.89                 | 1.00           | 0.98            | -0.92          | -0.16                             | 0.36  | 0.61                 | 0.44  | 0.34  | 0.61            | -0.10         | 0.44              | 0.11                       | 0.37  | 0.85            | 0.69              | 0.50               | 0.85             | -0.05                |
| Средний диаметр                | 0.89                 | 0.98           | 1.00            | -0.95          | 0.04                              | 0.53  | 0.75                 | 0.61  | 0.51  | 0.75            | 0.10          | 0.61              | 0.30                       | 0.54  | 0.72            | 0.53              | 0.66               | 0.91             | 0.13                 |
| Число деревьев                 | -0.75                | -0.92          | -0.95           | 1.00           | -0.09                             | -0.52 | -0.70                | -0.58 | -0.50 | -0.80           | -0.20         | -0.59             | -0.30                      | -0.53 | -0.64           | -0.44             | -0.63              | -0.81            | -0.29                |
| Сумма пл. поперечных сечений   | 0.03                 | -0.16          | 0.04            | -0.09          | 1.00                              | 0.86  | 0.67                 | 0.81  | 0.86  | 0.64            | 0.97          | 0.81              | 0.96                       | 0.85  | -0.66           | -0.82             | 0.77               | 0.29             | 0.83                 |
| Запас                          | 0.50                 | 0.36           | 0.53            | -0.52          | 0.86                              | 1.00  | 0.96                 | 0.99  | 0.99  | 0.90            | 0.85          | 0.99              | 0.96                       | 0.99  | -0.19           | -0.42             | 0.99               | 0.73             | 0.73                 |
| Общая продуктивность           | 0.73                 | 0.61           | 0.75            | -0.70          | 0.67                              | 0.96  | 1.00                 | 0.98  | 0.95  | 0.93            | 0.67          | 0.98              | 0.85                       | 0.96  | 0.11            | -0.13             | 0.99               | 0.90             | 0.56                 |
| Ствол                          | 0.58                 | 0.44           | 0.61            | -0.58          | 0.81                              | 0.99  | 0.98                 | 1.00  | 0.99  | 0.92            | 0.80          | 0.99              | 0.94                       | 0.99  | -0.09           | -0.33             | 0.99               | 0.79             | 0.67                 |
| Кора                           | 0.52                 | 0.34           | 0.51            | -0.50          | 0.86                              | 0.99  | 0.95                 | 0.99  | 1.00  | 0.87            | 0.83          | 0.99              | 0.97                       | 0.99  | -0.19           | -0.42             | 0.98               | 0.73             | 0.68                 |
| Древесина кроны                | 0.56                 | 0.61           | 0.75            | -0.80          | 0.64                              | 0.90  | 0.93                 | 0.92  | 0.87  | 1.00            | 0.72          | 0.92              | 0.78                       | 0.90  | 0.11            | -0.15             | 0.93               | 0.78             | 0.74                 |
| Хвоя (листва)                  | -0.02                | -0.10          | 0.10            | -0.20          | 0.97                              | 0.85  | 0.67                 | 0.80  | 0.83  | 0.72            | 1.00          | 0.80              | 0.91                       | 0.84  | -0.61           | -0.78             | 0.76               | 0.27             | 0.94                 |
| Итого надземная                | 0.58                 | 0.44           | 0.61            | -0.59          | 0.81                              | 0.99  | 0.98                 | 0.99  | 0.99  | 0.92            | 0.80          | 1.00              | 0.94                       | 0.99  | -0.09           | -0.33             | 0.99               | 0.79             | 0.69                 |
| Корни                          | 0.32                 | 0.11           | 0.30            | -0.30          | 0.96                              | 0.96  | 0.85                 | 0.94  | 0.97  | 0.78            | 0.91          | 0.94              | 1.00                       | 0.96  | -0.42           | -0.62             | 0.91               | 0.55             | 0.75                 |
| Всего древостой                | 0.52                 | 0.37           | 0.54            | -0.53          | 0.85                              | 0.99  | 0.96                 | 0.99  | 0.99  | 0.90            | 0.84          | 0.99              | 0.96                       | 1.00  | -0.17           | -0.40             | 0.99               | 0.74             | 0.71                 |
| Подрост и подрост лесок        | 0.69                 | 0.85           | 0.73            | -0.64          | -0.66                             | -0.19 | 0.11                 | -0.09 | -0.19 | 0.11            | -0.61         | -0.09             | -0.42                      | -0.17 | 1.00            | 0.97              | -0.03              | 0.51             | -0.51                |
| Напочвенный покров             | 0.53                 | 0.69           | 0.53            | -0.44          | -0.82                             | -0.42 | -0.13                | -0.33 | -0.42 | -0.15           | -0.78         | -0.33             | -0.62                      | -0.40 | 0.97            | 1.00              | -0.27              | 0.30             | -0.69                |
| Всего насаждение               | 0.63                 | 0.50           | 0.66            | -0.63          | 0.77                              | 0.99  | 0.99                 | 0.99  | 0.98  | 0.93            | 0.76          | 0.99              | 0.91                       | 0.99  | -0.03           | -0.27             | 1.00               | 0.82             | 0.65                 |
| Общая продуктивность фитомассы | 0.95                 | 0.85           | 0.91            | -0.81          | 0.30                              | 0.77  | 0.90                 | 0.80  | 0.73  | 0.78            | 0.27          | 0.79              | 0.55                       | 0.74  | 0.51            | 0.30              | 0.82               | 1.00             | 0.17                 |
| Чистая первичная продукция     | -0.13                | -0.05          | 0.13            | -0.29          | 0.83                              | 0.73  | 0.56                 | 0.67  | 0.68  | 0.74            | 0.94          | 0.69              | 0.75                       | 0.71  | -0.51           | -0.69             | 0.65               | 0.17             | 1.00                 |

Примечание. Выделенные жирным коэффициенты значимы при доверительной вероятности 95% (уровень значимости  $\alpha < 0.05$ ).



**Рис. 2.** Зависимость между общей продуктивностью ( $P_{\text{общ}}$  ●), фитомассой лиственных насаждений ( $P_{\text{л}}$  ■) и древостоев ( $P_{\text{д}}$  ◆) и запасом.

Связь общей продуктивности, фитомассы насаждений и древостоев лиственных насаждений с их запасом достоверно и адекватно отображается линейными и полиномиальными уравнениями (рис. 2).

Максимально ростовой потенциал лиственное насаждение возрастом 56 лет по текущему приросту фитомассы (по общей продуктивности) реализует на уровне 14.69 т/га в год<sup>-1</sup> абсолютно

сухого вещества. Наибольшая чистая первичная продукция при этом составляет 7.04 т С/га в год<sup>-1</sup> (ПП 3). Общая продуктивность фитомассы лиственного насаждения в возрасте 93 лет достигает 1055.5 т/га<sup>-1</sup> (ПП 5).

Сравнение полученных результатов с данными др. авторов для лиственных насаждений регионов Сибири и Евразии (Поздняков, 1975а, б; Schulze et al., 1995; Шевелев, 1998; Выводцев, 1999; Ведрова

**Таблица 4.** Параметры уравнений взаимосвязи таксационных показателей лиственных насаждений при доверительной вероятности 95% (уровень значимости  $\alpha < 0.05$ )

| Коэфф. уравнения                                               | Величина коэфф. | Стандартная ошибка коэфф. | $t$ -критерий | $p$ -уровень | Нижний довер. порог | Верхний довер. порог |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------------|----------------------|
| $D_{1.3} = \exp(a + a_1 H + a_2 D_{\text{cr}}) \ (R^2 = 0.73)$ |                 |                           |               |              |                     |                      |
| $a$                                                            | 1.3826          | 0.081                     | 17.096        | 0.00         | 1.223               | 1.542                |
| $a_1$                                                          | 0.1079          | 0.005                     | 21.381        | 0.00         | 0.098               | 0.118                |
| $a_2$                                                          | -0.0141         | 0.008                     | -1.888        | 0.06         | -0.029              | 0.001                |
| $D_{1.3} = \exp(a + a_1 H + a_2 L_{\text{cr}}) \ (R^2 = 0.73)$ |                 |                           |               |              |                     |                      |
| $a$                                                            | 1.3801          | 0.081                     | 17.045        | 0.00         | 1.221               | 1.540                |
| $a_1$                                                          | 0.1076          | 0.005                     | 21.332        | 0.00         | 0.098               | 0.118                |
| $a_2$                                                          | -0.0051         | 0.003                     | -1.649        | 0.10         | -0.011              | 0.001                |
| $S_{\text{cr}} = \exp(a + a_1 D_{1.3} + a_2 H) \ (R^2 = 0.68)$ |                 |                           |               |              |                     |                      |
| $a$                                                            | 0.8289          | 0.091                     | 9.102         | 0.00         | 0.650               | 1.008                |
| $a_1$                                                          | 0.0764          | 0.004                     | 22.027        | 0.00         | 0.070               | 0.083                |
| $a_2$                                                          | -0.0171         | 0.003                     | -5.849        | 0.00         | -0.023              | -0.011               |

**Таблица 5.** Параметры уравнений множественной регрессии таксационных показателей и фитомассы деревьев в лиственничниках

| Функция                                   | Параметр | Расчетные значения параметров | Стандартная ошибка | <i>t</i> -критерий | <i>p</i> -уровень | Доверительный порог |         |
|-------------------------------------------|----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------|
|                                           |          |                               |                    |                    |                   | нижний              | верхний |
| $VfD; H$<br>( $R^2 = 0.96$ )              | $a$      | −3.8370                       | 0.147              | −26.136            | 0.00              | −4.133              | −3.541  |
|                                           | $a_1$    | 0.1016                        | 0.005              | 21.845             | 0.00              | 0.092               | 0.111   |
|                                           | $a_2$    | 0.0239                        | 0.005              | 4.489              | 0.00              | 0.013               | 0.035   |
| $VfH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.92$ )         | $a$      | −5.3264                       | 0.369              | −14.433            | 0.00              | −6.071              | −4.582  |
|                                           | $a_1$    | 0.2453                        | 0.020              | 12.324             | 0.00              | 0.205               | 0.286   |
|                                           | $a_2$    | −0.0153                       | 0.021              | −0.719             | 0.48              | −0.058              | 0.028   |
| $P_{общ}fD; H$<br>( $R^2 = 0.95$ )        | $a$      | 2.4268                        | 0.158              | 15.378             | 0.00              | 2.108               | 2.745   |
|                                           | $a_1$    | 0.1010                        | 0.005              | 20.152             | 0.00              | 0.091               | 0.111   |
|                                           | $a_2$    | 0.0209                        | 0.006              | 3.591              | 0.00              | 0.009               | 0.033   |
| $P_{общ}fH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.87$ )   | $a$      | 1.0807                        | 0.437              | 2.473              | 0.02              | 0.199               | 1.962   |
|                                           | $a_1$    | 0.2344                        | 0.024              | 9.893              | 0.00              | 0.187               | 0.282   |
|                                           | $a_2$    | −0.0177                       | 0.027              | −0.654             | 0.52              | −0.072              | 0.037   |
| $P_{древ}fD; H$<br>( $R^2 = 0.94$ )       | $a$      | 2.0532                        | 0.185              | 11.117             | 0.00              | 1.681               | 2.426   |
|                                           | $a_1$    | 0.1001                        | 0.006              | 17.041             | 0.00              | 0.088               | 0.112   |
|                                           | $a_2$    | 0.0261                        | 0.007              | 3.858              | 0.00              | 0.013               | 0.040   |
| $P_{древ}fH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.89$ )  | $a$      | 0.693                         | 0.423              | 1.638              | 0.11              | −0.161              | 1.547   |
|                                           | $a_1$    | 0.237                         | 0.023              | 10.346             | 0.00              | 0.191               | 0.284   |
|                                           | $a_2$    | −0.014                        | 0.026              | −0.538             | 0.59              | −0.065              | 0.038   |
| $P_{кор}fD; H$<br>( $R^2 = 0.96$ )        | $a$      | 0.4554                        | 0.155              | 2.944              | 0.01              | 0.143               | 0.768   |
|                                           | $a_1$    | 0.1015                        | 0.005              | 20.753             | 0.00              | 0.092               | 0.111   |
|                                           | $a_2$    | 0.0277                        | 0.006              | 4.994              | 0.00              | 0.017               | 0.039   |
| $P_{кор}fH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.95$ )   | $a$      | −1.5044                       | 0.3310             | −4.5455            | 0.00              | −2.172              | −0.837  |
|                                           | $a_1$    | 0.2718                        | 0.0177             | 15.3824            | 0.00              | 0.236               | 0.307   |
|                                           | $a_2$    | −0.0037                       | 0.0161             | −0.2267            | 0.82              | −0.036              | 0.029   |
| $P_{кр}fD; H$<br>( $R^2 = 0.84$ )         | $a$      | 0.7984                        | 0.264              | 3.023              | 0.00              | 0.266               | 1.331   |
|                                           | $a_1$    | 0.1011                        | 0.009              | 11.832             | 0.00              | 0.084               | 0.118   |
|                                           | $a_2$    | −0.0124                       | 0.012              | −1.082             | 0.29              | −0.036              | 0.011   |
| $P_{кр}fH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.56$ )    | $a$      | 0.0152                        | 0.6463             | 0.023              | 0.98              | −1.289              | 1.320   |
|                                           | $a_1$    | 0.1846                        | 0.0360             | 5.128              | 0.00              | 0.112               | 0.257   |
|                                           | $a_2$    | −0.0658                       | 0.0626             | −1.051             | 0.30              | −0.192              | 0.061   |
| $P_{в.кр.}fD; H$<br>( $R^2 = 0.77$ )      | $a$      | −0.0399                       | 0.3992             | −0.100             | 0.92              | −0.845              | 0.766   |
|                                           | $a_1$    | 0.1109                        | 0.0125             | 8.892              | 0.00              | 0.086               | 0.136   |
|                                           | $a_2$    | −0.0123                       | 0.0152             | −0.814             | 0.42              | −0.043              | 0.018   |
| $P_{в.кр.}fH; D_{кр}$<br>( $R^2 = 0.47$ ) | $a$      | −0.6685                       | 0.829              | −0.807             | 0.42              | −2.341              | 1.004   |
|                                           | $a_1$    | 0.1919                        | 0.046              | 4.213              | 0.00              | 0.100               | 0.284   |
|                                           | $a_2$    | −0.0860                       | 0.078              | −1.100             | 0.28              | −0.244              | 0.072   |
| $P_{в.м.}fD; H$<br>( $R^2 = 0.91$ )       | $a$      | −0.6022                       | 0.175              | −3.452             | 0.00              | −0.954              | −0.250  |
|                                           | $a_1$    | 0.0963                        | 0.006              | 16.857             | 0.00              | 0.085               | 0.108   |
|                                           | $a_2$    | −0.0019                       | 0.008              | −0.246             | 0.81              | −0.017              | 0.014   |



Таблица 5. Окончание

| Функция                                                  | Параметр | Расчетные значения параметров | Стандартная ошибка | <i>t</i> -критерий | <i>p</i> -уровень | Доверительный порог |         |
|----------------------------------------------------------|----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------|
|                                                          |          |                               |                    |                    |                   | нижний              | верхний |
| $P_{\text{в.м.}}fH; D_{\text{кр}}$<br>( $R^2 = 0.72$ )   | $a$      | −1.7901                       | 0.534              | −3.350             | 0.00              | −2.868              | −0.712  |
|                                                          | $a_1$    | 0.2033                        | 0.030              | 6.878              | 0.00              | 0.144               | 0.263   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0255                       | 0.042              | −0.613             | 0.54              | −0.110              | 0.059   |
| $P_{\text{п.т.г.}}fD; H$<br>( $R^2 = 0.65$ )             | $a$      | −2.6951                       | 0.250              | −10.763            | 0.00              | −3.200              | −2.190  |
|                                                          | $a_1$    | 0.0797                        | 0.010              | 8.314              | 0.00              | 0.060               | 0.100   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0344                       | 0.017              | −1.979             | 0.05              | −0.070              | 0.001   |
| $P_{\text{п.т.г.}}fH; D_{\text{кр}}$<br>( $R^2 = 0.42$ ) | $a$      | −3.2903                       | 0.486              | −6.774             | 0.00              | −4.271              | −2.310  |
|                                                          | $a_1$    | 0.1327                        | 0.029              | 4.546              | 0.00              | 0.074               | 0.192   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0873                       | 0.079              | −1.105             | 0.28              | −0.247              | 0.072   |
| $P_{\text{хв.}}fD; H$<br>( $R^2 = 0.76$ )                | $a$      | −0.3471                       | 0.220              | −1.576             | 0.12              | −0.792              | 0.097   |
|                                                          | $a_1$    | 0.0827                        | 0.008              | 10.320             | 0.00              | 0.067               | 0.099   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0213                       | 0.013              | −1.602             | 0.12              | −0.048              | 0.006   |
| $P_{\text{хв.}}fH; D_{\text{кр}}$<br>( $R^2 = 0.53$ )    | $a$      | −1.0482                       | 0.470              | −2.229             | 0.03              | −1.997              | −0.099  |
|                                                          | $a_1$    | 0.1464                        | 0.028              | 5.288              | 0.00              | 0.091               | 0.202   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0493                       | 0.062              | −0.790             | 0.43              | −0.175              | 0.077   |
| $P_{\text{отм.}}fD; H$<br>( $R^2 = 0.76$ )               | $a$      | −0.4631                       | 0.468              | −0.989             | 0.33              | −1.408              | 0.482   |
|                                                          | $a_1$    | 0.1138                        | 0.014              | 7.893              | 0.00              | 0.085               | 0.143   |
|                                                          | $a_2$    | 0.0107                        | 0.015              | 0.699              | 0.49              | −0.020              | 0.042   |
| $P_{\text{отм.}}fH; D_{\text{кр}}$<br>( $R^2 = 0.52$ )   | $a$      | −1.0287                       | 0.870              | −1.183             | 0.24              | −2.784              | 0.727   |
|                                                          | $a_1$    | 0.2012                        | 0.048              | 4.178              | 0.00              | 0.104               | 0.298   |
|                                                          | $a_2$    | −0.0301                       | 0.070              | −0.433             | 0.67              | −0.170              | 0.110   |

Примечание.  $V$  — объем ствола в коре;  $P_{\text{общ}}$  — общая надземная фитомасса дерева;  $P_{\text{древ.}}$  — фитомасса древесины ствола;  $P_{\text{кор.}}$  — фитомасса коры ствола;  $P_{\text{кр.}}$  — фитомасса кроны ствола;  $P_{\text{в.кр.}}$  — фитомасса ветвей  $\varnothing > 1$  см;  $P_{\text{в.м.}}$  — фитомасса ветвей  $\varnothing < 1$  см;  $P_{\text{п.т.г.}}$  — фитомасса побегов текущего года;  $P_{\text{хв.}}$  — фитомасса хвои;  $P_{\text{отм.}}$  — фитомасса отмерших ветвей;  $D$  — диаметр ствола на высоте 1.3 м от уровня земли;  $H$  — высота дерева;  $D_{\text{кр}}$  — диаметр кроны дерева;  $R^2$  — индекс детерминации.

и др., 2000, 2002а, б; Швиденко и др., 2000, 2001; Shvidenko et al., 2000, 2001; Лесные экосистемы ..., 2002; Таблицы ..., 2008; Цогт и др., 2012; Швиденко, Щепашенко, 2014; Щепашенко и др., 2017; Усольцев, 2020) показало, что исследованные насаждения в возрасте 30–100 лет имеют более высокие темпы продукции органического вещества, но уступают по продукционной динамике лиственничным насаждениям северо-восточных районов Китая примерно в два раза (Wang et al., 2001; Fuchen et al., 2002; Zhou et al., 2002; Усольцев, 2020).

Это обстоятельство позволяет высказать научную гипотезу о том, что лиственничники на южных границах их распространения обладают повышенной энергией роста, аккумулируя большую надземную фитомассу за равный промежуток

времени, по сравнению с близкими по возрасту и условиям типов места произрастания лиственничниками других регионов Сибири.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Количественные показатели фитомассы послепожарных лиственничников в Красноярском крае тесно связаны с их таксационными характеристиками — возрастом, густотой и продуктивностью. Общая продуктивность фитомассы лиственничных насаждений к возрасту 90 лет превышает 1000 т/га<sup>−1</sup>. На древесный ярус приходится от 75 до 92% фитомассы лиственничных насаждений. Основная часть отмершей растительной массы накапливается в подстилке, с увеличением возраста дре-

востоя ее доля изменяется от 24 до 7%. Доля массы растений напочвенного покрова не превышает 1% и стабильна с изменением возраста древостоя.

В средневозрастном 56-летнем лиственничном насаждении чистая первичная продукция составляет порядка 7 т С/га в год<sup>-1</sup>, что является максимальным показателем для исследованных лиственничников.

Фитомасса лиственничников увеличивается по зональному градиенту от лесотундры до южной тайги и северных райнов Монголии, что согласуется с результатами исследований других авторов (Таблицы ..., 2008; Цогт и др., 2012; Усольцев, 2020).

Сформировавшиеся на гарях и вырубках молодняки и средневозрастные лиственничники имеют более высокие показатели роста и накопления фитомассы, по количеству закрепленного углерода атмосферы превышают спелые и перестойные насаждения более чем в два раза.

Содействие естественному возобновлению лиственничников и повышение их устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды достигается минерализацией почвы путем ее поверхностного рыхления на 12–15 см, проведением контролируемых выжиганий низших ярусов лесной растительности, подстилки и мортмассы, что ускоряет лигнификацию и гумификацию отмершей органики, существенно уменьшает количество горючих материалов, накапливающихся в виде отпада и опада, сокращает риски возникновения пожаров. Целесообразно также формирование рубками ухода насаждений различного породного состава и густоты, с мозаичной структурой и групповым размещением деревьев, что обеспечивает повышение общей продуктивности насаждения, текущего прироста фитомассы, чистой первичной продукции.

Вместе с тем в засушливые и неурожайные сезоны года при частом возникновении лесных пожаров, когда естественное возобновление лиственницы отсутствует, восстановительные сукцессии могут развиваться путем формирования березовых, луговых или остепненных фитоценозов, что приводит к значительному сокращению лесопокрытой площади и существенному снижению запасов фитомассы и интенсивности звеньев цикла углерода — продукционного и деструкционного. Это способствует значительному снижению защитных и средообразующих функций лесных экосистем, негативно в экологическом и экономическом отношениях.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доктору с.-х. наук профессору В.А. Усольцеву, а также двум анонимным рецензентам за обсуждение, конструктивные замеча-

ния и предложения, позволившие значительно улучшить содержание статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А. Эколого-фитоценотическая оценка воздействия пожаров на леса криолитозоны Средней Сибири. // Сибирский экологический журн. 1996. Т. 3. № 1. С. 51–60.
- Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. С. 88–89.
- Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С., Суховольский В.Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 151 с.
- Буряк Л.В. Лесообразовательный процесс в нарушенных пожарами светлостойных насаждениях юга Сибири: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: СибГТУ, 2015. 37 с.
- Валендик Э.Н. Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири // Сибирский экологический журн. 1996. № 1. С. 1–8.
- Ведрова Э.Ф., Плешиков Ф.И., Каплунов В.Я. Структура органического вещества северотаежных экосистем Средней Сибири // Лесоведение. 2002а. № 6. С. 3–12.
- Ведрова Э.Ф., Спиридонова Л.В., Стаканов В.Д. Круговорот углерода в молодняках основных лесообразующих пород Сибири // Лесоведение. 2000. № 3. С. 40–48.
- Ведрова Э.Ф., Шугалей Л.С., Стаканов В.Д. Баланс углерода в естественных и нарушенных южнотаежных лесах Средней Сибири // География и природные ресурсы. 2002б. № 4. С. 92–99.
- Воропанов В.П. Метод расчета общей продуктивности насаждений при построении таблиц хода роста. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 128 с.
- Выводцев Н.В. Продуктивность лиственничников Дальнего Востока (оценка, прогноз и управление): автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: СибГТУ, 1999. 43 с.
- Ганина Н.В. Распределение деревьев по диаметру с помощью функции Вейбулла // Лесоведение. 1984. № 2. С. 65–70.
- Динамика лесов Красноярского края / О.П. Втюрина, В.М. Скудин, В.А. Соколов. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2013. 103 с.
- Зиганшин Р.А. Таксация горных лесов на природной основе. Новосибирск: СО РАН, 1997. 204 с.
- Иванова Г.А., Жила С.В., Кукавская Е.А., Иванов В.А. Постпирогенная трансформация фитомассы древостоя в насаждениях Нижнего Приангарья // Лесной журн. 2016. № 6(354). С. 17–32.
- Исаев А.С., Уткин А.И., Молодчиков Д.Г., Честных О.В., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
- Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с.
- Лесной план Красноярского края, 2019. <http://mlx.krskstate.ru/lesplan>

- Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Ф.И. Плешикова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.
- Поздняков Л.К. Даурская лиственница. М.: Наука, 1975а. 312 с.
- Поздняков Л.К. Продуктивность лесов Сибири // Ресурсы биосферы: Итоги советских исследований по Международной биологической программе. Вып. 1. Л.: Наука, 1975б. С. 43–55.
- Региональные проблемы экосистемного лесоводства / Под ред. А.А. Онучина. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 330 с.
- Самойлович Г.Г. Изучение морфологии лесов – основа для их дешифрирования по аэроснимкам // Докл. комис. аэросъемки и фотограмметрии. Вып. 2. Л.: Геогр. об-во СССР, 1966. С. 68–73.
- Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / Под ред. А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссона, Ю.И. Булая. М.: Фед. агентство лесн. хоз-ва; Междунар. ин-т прикл. сист. анализа (IIASA), 2008. 886 с.
- Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УГЛУТУ, 2020 (электронное издание). <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9648>
- Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 543 с.
- Уткин А.И. О показателях лесных биогеоценозов // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 1975. Т. 80. № 2. С. 95–107.
- Фарбер С.К. Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: СО РАН, 2000. 432 с.
- Фуряев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 253 с.
- Цветков П.А. Пирогенные свойства лиственницы Гмелина в северной тайге Средней Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.03. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2005. 40 с.
- Цогт З., Доржсүрэн Ч., Слемнев Н.Н., Ярмишко В.Т. Опыт оценки биологической продуктивности псевдотайжных лиственничников Центрального Хангая (Монголия) // Растительные ресурсы. 2012. Т. 48. № 2. С. 303–310.
- Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С., Глюк М., Щепашенко Д.Г., Рожков В.А. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 1. Запасы растительной органической массы // Экология. 2000. № 6. С. 403–410.
- Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С., Глюк М., Щепашенко Д.Г., Рожков В.А. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем // Экология. 2001. № 2. С. 83–90.
- Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булай Ю.И. Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы биологической продуктивности) // Лесное хозяйство. 2004. № 2. С. 40–44.
- Шевелев С.Л. Многоцелевое лесопользование в лиственничниках Средней Сибири: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: СибГТУ, 1998. 36 с.
- Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Пергер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П., Мухортова Л.В., Усольцев В.А., Бобкова К.С., Осипов А.Ф., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Щепашенко М.В., Кракснер Ф. Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сибирский лесной журн. 2017. № 4. С. 3–11.
- Bailey R.L., Dell T.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull distribution // Forest Science. 1973. V. 19. P. 97–104.
- Fuchen S., Laiye Q., Wenjie W., Yojiro M., Takayoshi K., Kaichiro S. Aboveground biomass and productivity of Larix gmelinii forests in Northeast China // European J. Forest Research. 2002. № 5. P. 23–32.
- Kuuluvainen T. Disturbance dynamics in boreal forests: defining the ecological basis of restoration and management of biodiversity // Silva Fennica. 2002. V. 36. № 1. P. 5–11.
- Pilli R., Anfodillo T., Carrer M. Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass // Forest Ecology and Management. 2006. V. 237. № 1–3. P. 583–593.
- Schulze E.D., Schulze W., Kelliher F.M., Vygodskaya N.N., Ziegler W., Kobak I., Koch H., Arneth A., Kusnetsova W.A., Sogatchev A., Isaev A., Bauer G., Hollinger D.Y. Aboveground biomass and nitrogen nutrition in a chronosequence of pristine Dahurian Larix stands in Eastern Siberia // Canadian J. Forest Research. 1995. V. 25. № 6. P. 943–960.
- Shvidenko A.Z., Nilsson S., Stolbovoi V.S., Gluck M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A. Aggregated estimation of basic parameters of biological production and carbon budget of Russian terrestrial ecosystems. 1. Stocks of plant organic mass // Russian Journal of Ecology. 2000. V. 31. № 6. P. 371–378 (Original Rus. text © 2000 A.Z. Shvidenko, S. Nilsson, V.S. Stolbovoi, M. Gluck., D.G. Shchepashchenko, V.A. Rozhkov, publ. in Ekologiya. 2000. № 6. P. 403–410).
- Shvidenko A.Z., Nilsson S., Stolbovoi V.S., Gluck M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A. Aggregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 2. Net primary production // Russian Journal of Ecology. 2001. V. 32. № 2. P. 71–77 (Original Rus. text © 2001 A.Z. Shvidenko, S. Nilsson, V.S. Stolbovoi, M. Gluck., D.G. Shchepashchenko, V.A. Rozhkov, publ. in Ekologiya. 2001. № 2. P. 83–90).
- Statistica Advanced (Multivariate Exploratory Techniques), 2022. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)
- Wang Y.H., Zhou G.S., Jiang Y.L., Yang Z.Y. Determination of biomass and NPP in larch forests with the use of forest inventory data (FID) // Acta Phytocol. Sin. 2001. V. 25. № 4. P. 420–425.
- Zhou G., Wang Y., Jiang Y., Yang Z. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests // Forest Ecology and Management. 2002. V. 169. № 1–2. P. 149–157.

## Biological Productivity of the Post-Fire Larch Forests in the Mountain Regions of Krasnoyarsk Krai

I. A. Tselitan<sup>1</sup>, \* and I. M. Danilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

\*E-mail: *sjfs@ksc.krasn.ru*

Peculiarities of the compositionally pure larch stands formation following forest fires were studied in the northern (Evenkia, middle course of the Nizhnyaya Tunguska river, geographic coordinates 64°03' N 101°10' E) and southern (Ermakovskiy district, geographic coordinates – 52°23' N, 93°33' E) areas of Krasnoyarsk Krai. The structure, growth and biological productivity of the forest restoration successions were analyzed based on the materials from the sample plots. The highest value of phytomass (in terms of total productivity) in larch stands registered was 1055.5 t abs. dry substances/ha at the age of 93 years. The structural ratio of the forest stands phytomass fractions naturally changes with an increase in their average age and density. With an increase in the average age of a stand, its above-ground and root phytomasses increase; at the same time, the relative share of crown and needle wood mass in the total above-ground phytomass of a stand decreases. In 38-year-old larch forests, the share of crown mass is 18%, and the share of stems is 82%. In 60-year-old forest stands, crown wood with needles accounts for 14%, and the rest 86% are stem weight. In the 93-year-old larch forest, the proportion of stem phytomass increases to 89%, and the proportion of crown wood with needles falls up to a minimum share of 11%. The maximum growth potential of the 56-year old larch stands, according to the current increase in phyomass (in terms of total productivity), is realised at about 14.69 t abs. dry substances/ha per year. The young and middle-aged larch forests formed on the burnt areas have higher rates of growth and phytomass accumulation; in terms of the amount of fixed atmospheric carbon, they exceed the mature and overmature stands by more than two times.

**Keywords:** *Siberian larch, post-fire restoration successions, forest inventory structure, phytomass structure, correlations.*

**Acknowledgements:** The study has been carried out according to the basic research plan of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS “Scientific foundations for the conservation of the resource and ecological potential of Siberian forests under conditions of cumulative anthropogenic and natural risks” No. 0287-2021-0010, reg. NIOKTR No. 121030900181-4.

### REFERENCES

- Bailey R.L., Dell T.R., Quantifying diameter distributions with the Weibull distribution, *Forest Science*, 1973, Vol. 19, pp. 97–104.
- Fuchen S., Laiye Q., Wenjie W., Yojiro M., Takayoshi K., Kaichiro S., Aboveground biomass and productivity of *Larix gmelinii* forests in Northeast China, *European J. Forest Research*, 2002, No. 5, pp. 23–32.
- Kuuluvainen T., Disturbance dynamics in boreal forests: defining the ecological basis of restoration and management of biodiversity, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36, No. 1, pp. 5–11.
- Pilli R., Anfodillo T., Carrer M., Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass, *Forest Ecology and Management*, 2006, Vol. 237, No. 1–3, pp. 583–593.
- Schulze E.D., Schulze W., Kelliher F.M., Vygodskaya N.N., Ziegler W., Kobak I., Koch H., Arneth A., Kusnetsova W.A., Sogatchev A., Isaev A., Bauer G., Hollinger D.Y., Aboveground biomass and nitrogen nutrition in a chronosequence of pristine Dahurian *Larix* stands in Eastern Siberia, *Canadian J. Forest Research*, 1995, Vol. 25, No. 6, pp. 943–960.
- Shvidenko A.Z., Nilsson S., Stolbovoi V.S., Gluck M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A., Aggregated estimation of basic parameters of biological production and carbon budget of Russian terrestrial ecosystems. 1. Stocks of plant organic mass, *Russian J. Ecology*. 2000, Vol. 31, No. 6, pp. 371–378
- Shvidenko A.Z., Nilsson S., Stolbovoi V.S., Gluck M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A., Aggregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 2. Net primary production, *Russian J. Ecology*, 2001, Vol. 32, No. 2, pp. 71–77.
- Statistica Advanced (Multivariate Exploratory Techniques)*, 2022, available at: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)
- Wang Y.H., Zhou G.S., Jiang Y.L., Yang Z.Y., Determination of biomass and NPP in larch forests with the use of forest inventory data (FID), *Acta Phytocol. Sin.*, 2001, Vol. 25, No. 4, pp. 420–425.
- Zhou G., Wang Y., Jiang Y., Yang Z., Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's *Larix* forests, *Forest Ecology and Management*, 2002, Vol. 169, No. 1–2, pp. 149–157.
- Abaimov A.P., Prokushkin S.G., Zyryanova O.A., Ekologo-fitotsenoticheskaya otsenka vozdeistviya pozharov na lesa kriolitozony Srednei Sibiri (Ecological and phytocenotic assessment of the impact of fires on forests in the permafrost zone of Central Siberia), *Sibirskii Ekologicheskii zhurnal*, 1996, No. 1, pp. 51–60.
- Anuchin N.P., *Lesnaya taksatsiya* (Forest taxation), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1982, 552 p.
- Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sukhovol'skii V.G., *Gustota i produktivnost' drevesnykh tsenozov* (The density

- and productivity of stand coenoses), Novosibirsk: Nauka, 2002, 150 p.
- Buryak L.V., *Lesoobrazovatel'nyi protsess v narushennykh pozharami svetlokhvoynykh nasazhdeniyakh yuga Sibiri. Avtoref. diss. d-ra s.-kh. nauk* (Forest forming process of light coniferous forests disturbed by fire in southern Siberia. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Krasnoyarsk: SibGTU, 2015, 37 p.
- Vedrova E.F., Spiridonova L.V., Stakanov V.D., Krugovorot ugleroda v molodnyakakh osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sibiri (Carbon cycle in young growth of the widespread forest forming species in Siberia), *Lesovedenie*, 2000, No. 3, pp. 40–48.
- Vedrova E.F., Shugalei L.S., Stakanov V.D., Balans ugleroda v estestvennykh i narushennykh yuzhnataezhnykh lesakh Srednei Sibiri (The carbon balance in natural and disturbed boreal forests in Central Siberia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 20026, No. 4, pp. 92–99.
- Voropanov P.V., *Metod rascheta obshchei produktivnosti nasazhdenii pri postroenii tablits khoda rosta* (A method of calculation of the total productivity of stands for the yield tables compilation), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1966, 128 p.
- Ganina N.V., Raspredelenie derev'ev po diametru s pomoshch'yu funktsii Veibulla (Classification of trees diameter using the Weibull function), *Lesovedenie*, 1984, No. 2, pp. 65–70.
- Ziganshin R.A., *Tsaksatsiya gornyykh lesov na prirodnoi osnove* (Environmentally-based forest taxation in mountain forests), Krasnoyarsk - Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 1997, 203 p.
- Isaev A.S., Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Zukert N.V., Lesa Rossii kak rezervuar organicheskogo ugleroda biosfery (Forests of Russia – a storage of carbon in biosphere), *Lesovedenie*, 2001, No. 5, pp. 8–23.
- Kuz'michev V.V., *Zakonomernosti dinamiki drevostoev: printsipy i modeli* (Patterns in dynamics of forest stands: principles and models), Novosibirsk: Nauka, 2013, 207 p.
- Lesnye ekosistemy Eniseiskogo meridiana* (Forest ecosystems of the Yenisei longitude), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002, 356 p.
- Pozdnyakov L.K., *Dauruskaya listvennitsa* (Dahurian larch), Moscow: Nauka, 1975a, 310 p.
- Pozdnyakov L.K., Produktivnost' lesov Sibiri (Productivity of forests in Siberia), In: *Resursy biosfery (itogi sovetskikh issledovaniy po Mezhdunarodnoi biologicheskoi programme)* (Resources of biosphere: outcomes of Soviet studies in the framework of the International biological program), Leningrad: Nauka, 1975b, Vol. 1, pp. 43–55.
- Regional'nye problemy ekosistemnogo lesovodstva* (Regional problems of ecosystem forestry), Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, 2007, 330 p.
- Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii: normativno-spravochnye materialy* (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia), Moscow: Izd-vo Rosleskhoz, IASA, 2008, 886 p.
- Utkin A.I., O pokazatelyakh lesnykh biogeotsenozov, *Byul. MOIP. Otd. biol.*, 1975, Vol. 80, No. 2, pp. 97–107.
- Farber S.K., *Formirovanie drevostoev Vostochnoi Sibiri* (Formation of crops of Eastern Siberia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, 432 p.
- Furyaev V.V., *Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya*, Novosibirsk: Nauka, 1996, 253 p.
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzhet lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Perger C., Dresel C., Fritz S., Lakyda P.I., Mukhortova L.V., Usoltsev V.A., Bobkova K.S., Osipov A.F., Martynenko O.V., Karminov V.N., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V., Kraxner F., Izuchenie fitomassy lesov: tekushchee sostoyanie i perspektivy (Forest biomass observation: current state and perspective), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 4, pp. 3–11.
- Valendik E.N., Ekologicheskie aspekty lesnykh pozharov v Sibiri (Ecological aspects of forest fires in Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1996, No. 1, pp. 1–8.
- Vedrova E.F., Pleshikov F.I., Kaplunov V.Y., Struktura organicheskogo veshchestva severotaezhnykh ekosistem Srednei Sibiri (Structure of organic matter in the northern taiga ecosystems of Central Siberia), *Lesovedenie*, 2002a, No. 6, pp. 3–12.
- Vyvodtsev N.V., *Produktivnost' listvennichnikov Dal'nego Vostoka (otsenka, prognoz i upravlenie). Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk*: (Productivity of larch forests of the Far East (assessment, forecast and management), Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Krasnoyarsk: SibGTU, 1999, 43 p.
- Dinamika lesov Krasnoyarskogo kraia*, (Dynamics of forests in the Krasnoyarsk Krai), Krasnoyarsk: In-t lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN, 2013, 103 p.
- Ivanova G.A., Zhila S.V., Kukavskaya E.A., Ivanov V.A., Postpirogennaya transformatsiya fitomassy drevostoya v nasazhdeniyakh Nizhnego Priangar'ya (Post-pyrogenic transformation of forest stand phytomass in plantations of the Lower Angara region), *Lesnoi zhurnal*, 2016, No. 6 (354), pp. 17–32.
- Lesnoi plan Krasnoyarskogo kraia* (Forest plan of the Krasnoyarsk Krai), 2019, available at: <http://mlx.krskstate.ru/lesplan>
- Samoilovich G.G., Izuchenie morfologii lesov – osnova dlya ikh deshifirovaniya po aerosnimkam (The study of forest morphology is the basis for their interpretation from aerial photographs), In: *Dokl. komis. aeros'emki i fotogrammetrii* (Reports of the commission of aerial photography and photogrammetry), Leningrad: Geogr. ob-vo SSSR, 1966, Vol. 2, pp. 68–73.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* (Eurasian forest biomass and primary production data), Ekaterinburg: UGLTU, 2020, available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9648> (April 12, 2022)
- Usoltsev V.A., *Formirovanie bankov dannykh o fitomasse lesov* (Compiling forest biomass data banks. Scientific issue), Ekaterinburg: UrO RAN, 1998, 543 p.
- Tsvetkov P.A., *Pirogennyye svoystva listvennitsy Gmelina v severnoi taige Srednei Sibiri. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk* (Pyrogenic properties of Gmelin larch in the northern taiga of Central Siberia. Extended abstract of Doctor's biol. sci. thesis), Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2005, 40 p.
- Tsogt Z., Dorzhsuren C., Slemnev N.N., Yarmishko V.T., Opyt otsenki biologicheskoi produktivnosti psevdotaezhnykh listvennichnikov Tsentral'nogo Khangaya (Mongoliya) (About the bioproductivity of pseudotaiga larch for-

est stands in Central Khangai Province (Mongolia)), *Rastitel'nye resursy*, 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 303–310.

Shvidenko A.Z., Nil'sson S., Stolbovoi V.S., Glyuk M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A., Opyt agregirovanoi otsenki osnovnykh pokazatelei bioproduktsionnogo protsessa i uglerodnogo byudzheta nazemnykh ekosistem Rossii. 1. Zapasy rastitel'noi organicheskoi massy (Aggregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 1 Stocks of plant organic matter), *Ekologiya*, 2000, No. 6, pp. 403–410.

Shvidenko A.Z., Nil'sson S., Stolbovoi V.S., Glyuk M., Shchepashchenko D.G., Rozhkov V.A., Opyt agregirovanoi otsenki osnovnykh pokazatelei bioproduktsionnogo protsessa i uglerodnogo byudzheta nazemnykh ekosistem Rossii. 2. Netto-pervichnaya produktsiya ekosistem (Ag-

gregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 2. Net primary production), *Ekologiya*, 2001, No. 2, pp. 83–90.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Y.I., Sistema modelei rosta i dinamiki produktivnosti lesov Rossii (tablitsy biologicheskoi produktivnosti) (System of growth models and dynamics of forest productivity in Russia (tables of biological productivity)), *Lesnoe khozyaistvo*, 2004, No. 2, pp. 40–44.

Shevelev S.L., *Mnogotselevoe lesopol'zovanie v listvennikakh Srednei Sibiri. Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk* (Multi-purpose forest management in larch forests of Central Siberia. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Krasnoyarsk: SibGTU, 1998, 36 p.