

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ НА ОСУШЕННОМ ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЗА 50 ЛЕТ НА ЗАПАДНОДВИНСКОМ ЛЕСОБОЛОТНОМ СТАЦИОНАРЕ В ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>1</sup>

© 2024 г. А. А. Егоров<sup>а, \*</sup>, Т. В. Глухова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., 143030 Россия

\*E-mail: egorovfta@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.03.2024 г.

После доработки 28.04.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Западнодвинский лесоболотный стационар Института лесоведения РАН расположен в подтайге Европейской России. На стационаре решают научные задачи, связанные с биогеоэкологическим изучением природы заболоченных лесов и болот. В период 1972–1973 гг. здесь были проведены лесомелиоративные работы. На осушенных участках заложили постоянные пробные площади, в т. ч. в 1974 г. на облесенном олиготрофном болоте. В 2023 г. выполнены исследования повторно. Цель исследования — оценка изменения структуры древостоя на облесенном олиготрофном болоте за 50 лет после осушения. Объектами исследования явились таксационные показатели по древесному ярусу на постоянных пробных площадях в 1974 и 2023 гг. Пробные площади были заложены в середине межканавья и в приканавье. В исследовании использованы общепризнанные таксационные полевые и камеральные методы. Для точного вычисления некоторых таксационных показателей строили регрессионные уравнения. Для статистического анализа сходства между пробными площадями по диаметрам, которые не подчиняются нормальному распределению, использовали рекомендуемый в таких случаях непараметрический критерий Манна–Уитни (Mann–Whitney U test). Динамику развития древостоя на пробных площадях изучали сравнением таксационных показателей древесного яруса за 1974 и 2023 гг. В связи с отсутствием контроля для осушенных объектов на 2023 г. для выявления степени эффективности осушения рассчитывали высоту на основе алгебраической модели роста древостоев, основанной на функции Митчерлиха. Сравнивая таксационные показатели и интенсивность осушения *сосняка андромедо-пушицево-сфагнового* за 50 лет, можно отметить следующее: в процессе осушения произошла смена типов леса на *сосняк багульниково-сфагновый осушенный*, расположенный в середине межканавья и подвергающийся экстенсивному осушению, и на *сосняк багульниково-зеленомошно-сфагновый осушенный*, расположенный в приканавье и подвергающийся нормальному осушению; улучшился класс бонитета с Vб на Va; таксационные показатели, характеризующие продуктивность древостоя, существенно изменились за 50 лет, в т. ч. запас древесины древостоя насаждения увеличился в 3.5 и 4.9 раза в осушенных сосняках. Сравниваемые древостои относятся к V классу возраста, однако из осушенных древостоев выпали более старые деревья. Статистический анализ показал незначительные, но достоверные отличия по диаметрам между сосняками с достаточным и экстенсивным осушением; эффект осушения показал существенное отличие средних высот в осушенных сосняках (более 36%) по сравнению с модельной высотой неосушенного сосняка. За 50 лет после осушения олиготрофных сосняков наблюдается определенный эффект от их осушения. Однако лесоводственная эффективность такого осушения невысокая.

**Ключевые слова:** олиготрофные сосняки, Западнодвинский лесоболотный стационар, осушение, постоянные пробные площади, структура древостоя, модели хода роста, функция Митчерлиха, критерий Манна–Уитни.

DOI: 10.31857/S0024114824060036, EDN: NVNLKE

<sup>1</sup> Работа частично выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. No 123030300031-6).

Западнодвинский лесоболотный стационар Института лесоведения РАН (ИЛАН РАН) расположен в подтайге Европейской России. Основная научная задача стационарных исследований — биогеоценологическое (экосистемное) изучение природы заболоченных лесов и болот, возможности повышения их продуктивности и средообразующих функций полезностей путем гидролесомелиорации. Экспериментальная база стационара охватывает как различные осушенные в 1972–1973 гг. болота (3006 га), так и неосушенные контрольные территории.

Разнообразие геоморфологических условий территории обусловили наличие здесь практически всех возможных зональных типов и вариантов болотообразования суши, а также зарастание озер от олиготрофных грядово-мочажинных и озерковых комплексов сфагновых верховых до эвтрофных черноольховых болот. Широко представлены мезотрофные и мезо-эвтрофные болотные леса с сосновыми и сосново-березовыми с примесью ели (*Picea abies* L.) древостоями. Все они сосредоточены на сравнительно небольшой площади в несколько десятков квадратных километров, что облегчает их сравнительное исследование, а сам стационар они делают своего рода уникальным.

В период 1972–1973 гг. заложили различные лесомелиоративные варианты в разных типах болот — от эвтрофных до олиготрофных, с разным расстоянием между осушительными канавами. В различных вариантах, начиная с 1974 г., заложили постоянные пробные площади (ПП) (Биогеоценологическое ..., 1982). В 2023 г. повторно провели исследования на ПП (на облесенном олиготрофном болоте).

Цель данной работы — оценить изменение структуры древостоя на облесенном олиготрофном болоте за 50 лет после осушения в условиях подтайги Европейской России. Для выполнения цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) подготовить таксационные данные по ПП за 1974 и 2023 гг. для сравнения;
- 2) сравнить таксационные показатели за годы исследований, в т. ч. с использованием математических методов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

На Сосвятском болотном массиве центрально-олиготрофного хода развития, находившегося на стадии резко выпуклого болотного массива, в 1974 г. была заложена ПП 5-74 в *сосняке андромеда-пушицево-сфагновом* (Биогеоценологическое..., 1982). ПП 5-74 расположена в середине 106-метрового межканавного пространства (рис. 1). Позже для изучения влияния осушения в этом же

межканавье, но в непосредственной близости к осушительному каналу была заложена еще одна ПП 5а-74 (приканавная). Протяженность каждой ПП (вдоль канала) — 100 м, ширина ПП 5-74 составила 36 м, а ПП 5а-74 — 35 м (рис. 1).

В июле-сентябре 2023 г. проведено полевое обследование древостоя на ПП 5-74 и 5а-74 по методике, составленной в ЦЭПЛ РАН (Методика ..., 2023). Дополнительно увеличено количество учетных деревьев, у которых измеряли высоту и диаметр для составления регрессионных уравнений по вычислению высоты. В связи с тем, что данные для сравнения за 1974 г. (Биогеоценологическое ..., 1982) с нашими данными имели сокращенный формат, представленный в публикации, то при подготовке настоящего исследования мы приведем только необходимые методические аспекты, отражающие получение подобных данных в 2023 г. Это состав древостоя по ярусам, средний и максимальный возраст, число стволов на 1 га, средний диаметр, средняя высота, сумма площадей сечения, относительная полнота, запас древесины. Границы ПП на местности обозначали полипропиленовыми трубками (длиной 1.7 м, диаметром 5 см) по углам и деревянными вешками по периметру. Географическое положение ПП в виде координат измеряли по краям и центру площади с помощью GPS-навигатора Garmin GPSMAP 62. Центры ПП 5-74 и ПП 5а-74 — N 56.15464,

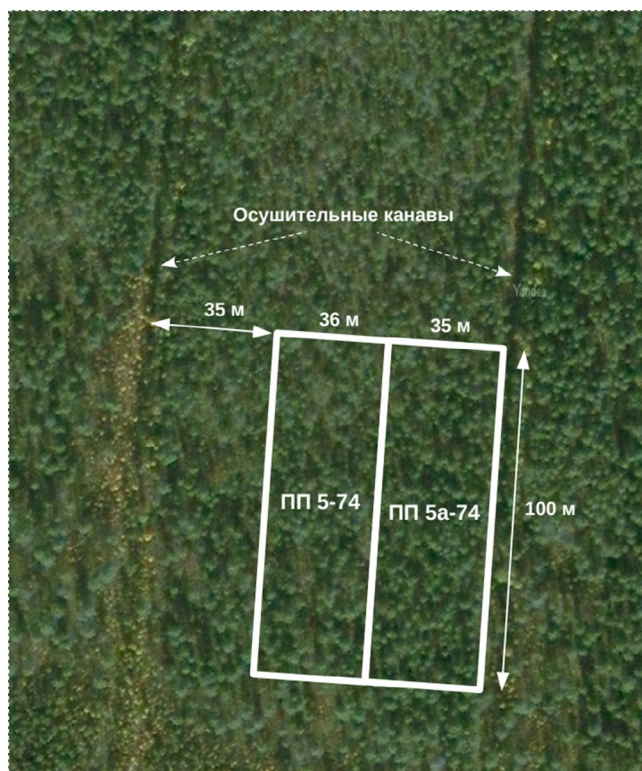


Рис. 1 Расположение пробных площадей 5-74 и 5а-74 относительно осушительных канав.

**Таблица 1.** Регрессионные уравнения зависимостей высоты от диаметра для деревьев 1 и 2 яруса ПП 5-74 и ПП 5а-74 и их основные статистики при уровне значимости  $\alpha = 0.05$

| № ПП  | Ярус | Регрессионное уравнение $h_{\text{mod}}$ (d) | $R^2$ | $N$ | $F_{\text{крит}}$ | $F_{\text{расч}}$ | $pF$   |
|-------|------|----------------------------------------------|-------|-----|-------------------|-------------------|--------|
| 5-74  | 1    | $0.3021 d + 4.5347$                          | 0.35  | 21  | 4.38              | 11.8828           | 0.0027 |
|       | 2    | $0.6784 d + 1.7498$                          | 0.54  | 9   | 5.59              | 10.4503           | 0.0144 |
| 5а-74 | 1    | $0.2477 d + 5.9603$                          | 0.39  | 20  | 4.38              | 13.2112           | 0.0019 |
|       | 2    | $0.4952 d + 2.5919$                          | 0.52  | 9   | 5.59              | 9.5491            | 0.0176 |

Примечание.  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $N$  – количество учетных деревьев,  $F_{\text{крит}}$  – критерий Фишера критический,  $F_{\text{расч}}$  – критерий Фишера расчетный,  $pF$  – значимость критерия Фишера ( $p$ -value).

Е 32.16945 и N 56.15463, Е 32.1700 соответственно. На ПП проводили следующие измерения древостоя: сплошной перерекрут деревьев по ярусам с измерением диаметра на высоте 1.3 м с помощью мерной вилки Haglорh; измерение высот и возраста учетных деревьев по элементам леса – с помощью лазерного дальномера-высотомера Nikon Forestry и возрастного бурава Haglорh соответственно. Для характеристики древостоя проводили вычисления по следующим таксационным показателям: для каждого дерева определяли площадь сечения ( $g$ , м<sup>2</sup>), высоту ( $h_{\text{mod}}$ , м), видовое число ( $Fh$ ) и объем ( $V$ , м<sup>3</sup>); для каждого древесного яруса и в целом для древостоя – таксационные характеристики, которые приведены в табл. 2.

Для расчета запаса древесины древостоя на 2023 г. по ярусам для каждого дерева вычисляли объем по следующей формуле:

$$M = g Fh,$$

где  $M$  – объем дерева, м<sup>3</sup>;  $g$  – площадь сечения дерева на высоте 1.3 м, м<sup>2</sup>;  $Fh$  – видовое число.

Видовое число ( $Fh$ ) рассчитывали на основе регрессионной линейной модели, составленной по таблице средних видовых высот древостоев по сосне (*Pinus sylvestris* L.), составленной В.В. Загреевым (Таксация ..., 2012, приложение 17) и имеющей следующий вид:

$$Fh = 0.4 h_{\text{mod}} + 1.4$$

Высоту ( $h_{\text{mod}}$ ) для каждого дерева рассчитывали по регрессионному линейному уравнению, составленному по учетным деревьям, у которых измеряли высоту и диаметр на высоте 1.3 м. В табл. 1 приведены эти уравнения и их статистики.

В табл. 1 приведены величины, которые указывают на то, что регрессионные модели в целом статистически значимы: критерий Фишера расчетный больше критического (табличного) ( $F_{\text{расч}} > F_{\text{крит}}$ ), значимость критерия Фишера меньше обычного уровня значимости ( $pF < \alpha = 0.05$ ).

Таксационные показатели в табл. 2 вычисляли стандартным образом, но некоторые показатели можно вычислять с помощью разных подходов и

таблиц. Так, средний возраст и средний диаметр всего древостоя для ПП, обследованных в 2023 г., вычислен как средневзвешенное по сумме площадей сечения по ярусам, средняя высота древостоя – как средневзвешенное по запасам каждого яруса. Полноту по ярусам рассчитывали с помощью стандартных таблиц сумм площадей сечений на 1 га ( $\Sigma G$  м<sup>2</sup>/га) и запасов ( $M$ , м<sup>3</sup>/га) насаждений при полноте 1.0, составленных для Московской области (Таксация ..., 2012, приложение 19).

Таксационные данные по ПП 5-74, обследованной в 1974 г., представлены в публикации (Биогеоэкологическое ..., 1982, таблица 18) в определенном виде, и поэтому для корректного сравнения некоторые данные были нами преобразованы: убран из III яруса древостоя элемент, который по высоте относится к подросту; суммированы число стволов, суммы площадей сечения, запасы и полноты по элементам леса в пределах яруса; средний диаметр по ярусу и древостою вычислен как средневзвешенное по элементам яруса через отношение сумм площадей сечения и числа стволов; средняя высота по ярусу и древостою вычислена через средневзвешенное по элементам яруса через запас. Полноту по ярусам рассчитывали с помощью уже указанных таксационных таблиц (Таксация ..., 2012, приложение 19).

На каждой ПП проводили по два кратких геоботанических описания с целью определения типа леса исходя из эколого-доминантного подхода, часто используемого в лесоводственных исследованиях.

Для изучения почвы торфяной залежи, которая имеет мощность более 4 м, при отборе образцов торфа с разных горизонтов применяли торфяной бур ТБГ–1.

Динамику древостоя на ПП изучали сравнением таксационных показателей за 1974 и 2023 гг. Однако за этот период имеются данные только по ПП 5-74, а по ПП 5а-74 – лишь за 2023 г. Так как ПП 5-74 и ПП 5а-74 на 1974 г. находились в близких условиях развития и примыкали друг

к другу, то для оценки динамики по ПП 5а-74 через 50 лет были использованы данные по ПП 5-74 на 1974 г. ПП 5-74 и ПП 5а-74 расположены на разном удалении от канавы (рис. 1), и, таким образом, их осушение в течении 50 лет происходит с разной интенсивностью. По интенсивности осушения ПП 5-74, расположенную в центре межканавы, отнесли к экстенсивному осушению, а ПП 5а-74 — к нормальному (достаточному). Для выявления значимости различий между древостоем на ПП по таксационным показателям (диаметр) за 2023 г. были использованы статистики. Результат обработки данных по диаметрам ПП 5-74 и ПП 5а-74 за 2023 г. показал, что измеренные показатели не подчиняются нормальному распределению, поэтому для анализа этих данных использовали рекомендуемый в таких случаях непараметрический критерий Манна-Уитни (Mann-Whitney U test): значимость (p-value), U- и Z-статистики. Размер эффекта (степень отличия сравниваемых выборок) вычисляли по формуле:

$$Z/\sqrt{(N_1+N_2)},$$

где  $Z$  — Z-статистика,  $N_1$  и  $N_2$  — количество измерений (в нашем случае — диаметров деревьев) в сравниваемых выборках (ПП 5-74 и ПП 5а-74).

Так как отсутствовал контроль (неосушенные ПП), то для выявления степени эффективности осушения рассчитывали высоту на основе алгебраической модели роста древостоев. С помощью обобщенного алгебраического разностного подхода (GADA) к настоящему времени проанализировано 25 уравнений таких моделей (Cieszewski, Bailey, 2000; Лебедев, Кузьмичев, 2022). Сравнительный анализ показал, что наилучшее качество выравнивания данных обеспечивает уравнение, основанное на функции Митчерлиха с заменой параметров, отвечающих за предельные значения высоты и форму кривой (Лебедев, Кузьмичев, 2022). Модель полиморфна, имеет форму сигмовидной кривой и переменные асимптоты, т. е. учитывает большинство предъявляемых свойств к моделям хода роста по высоте. Модель зависимости высоты от возраста древостоя, основанная на функции Митчерлиха, имеет высокий коэффициент детерминации ( $R^2 = 0.999$ ) (Лебедев, Кузьмичев, 2022) и представлена в следующем виде:

$$y = \exp(X_0) (1 - \exp(-bt))^{(c_1 + c_2 X_0)},$$

где  $y$  — предсказанная по модели средняя высота в возрасте  $t$ ; вспомогательные переменные  $X_0 = (\ln(y_0) - c_1 F_0)/(1 + c_2 F_0)$ ,  $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$ ,  $y_0$  — начальное значение средней высоты в возрасте  $t_0$ ; параметры модели  $b = 0.01952$ ,  $c_1 = 2.957$ ,  $c_2 = -0.4793$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биогеоценоз, в котором были заложены ПП 5-74 и ПП 5а-74, сформировался на верхней части облесенного склона выпуклого болотного массива на мощных сфагновых торфах свыше 4 м и был определен в 1974 г. как *сосняк андромедо-пушицево-сфагновый* (с. андр.-пуш.-сф.) Vб класса бонитета (Биогеоценологическое ..., 1982). Торфяная почва характеризовалась постоянством ботанического состава торфообразователей до 3.5 м и была представлена верховым магелланикум-торфом (*Sphagnum magellanicum* Brid.) со степенью разложения 5–25%, глубже — сфагновым переходным (*Sph. girgensonii* Russ.) со степенью разложения до 30%. Содержание углерода в торфах — 48–50%,  $pH_{\text{сол}}$  не превышает 3.0, зольность составляет 2–5%. Для верховой торфяной почвы характерна низкая объемная масса (плотность): от 0.046 в верхних слоях до 0.090 г/см<sup>3</sup> — в нижних (Глухова, 1990).

Результаты исследования растительного сообщества в 2023 г. на ПП 5-74 и ПП 5а-74 показали, что здесь сформировались 2-ярусные древостои (табл. 2), основные таксационные характеристики которых приведем ниже.

На ПП 5-74 через 50 лет после осушения в 2023 г. сформировался *сосняк багульниково-сфагновый осушенный* (с. баг.-сф. осуш.). Древостой Va класса бонитета. I ярус: 10С, полнота — 0.4, средняя высота — 7.6 м, средний диаметр — 10.3 см, возраст — 86 лет, запас древесины — 44.2 м<sup>3</sup>/га. II ярус: 10С, полнота — 0.1, средняя высота — 4.7 м, средний диаметр — 4.3 см, возраст — 66 лет, запас древесины — 5.8 м<sup>3</sup>/га.

На ПП 5а-74 в 2023 г. развивается *сосняк багульниково-зеленомощно-сфагновый осушенный* (с. баг.-зел.-сф. осуш.) Va класса бонитета, полнота — 0.7. I ярус: 10С ед.Б, по С полнота — 0.5, средняя высота — 8.9 м, средний диаметр — 12.0 см, возраст — 93 года, запас — 60.1 м<sup>3</sup>/га; по Б запас 0.02 м<sup>3</sup>/га. II ярус: 10С ед.Б, по С полнота — 0.2, средняя высота — 5.0 м, средний диаметр — 4.9 см, возраст — 73 года, запас — 9.3 м<sup>3</sup>/га; по Б запас 0.06 м<sup>3</sup>/га.

В 1974 г. на ПП 5-74 были выделены три древесных яруса (Биогеоценологическое ..., 1982, таблица 18), таксационные характеристики которой вместе с данными на 2023 г. для ПП 5-74 и ПП 5а-74 приведены в табл. 2.

Сравнивая состав растительных сообществ на ПП за 1974 и 2023 гг. (табл. 2), можно отметить, что через 50 лет после осушения в 2023 г. на месте с. андр.-пуш.-сф. Vб класса бонитета с запасом 14.3 м<sup>3</sup>/га сформировался в центральной части межканавы с. баг.-сф. осуш. — древостой Va класса бонитета с запасом древесины 50.0 м<sup>3</sup>/га (ПП 5-74), а рядом с канавой — с. баг.-зел.-сф. осуш. Va класса бонитета с запасом древесины 69.4 м<sup>3</sup>/га (ПП 5а-74).

**Таблица 2.** Таксационные показатели древостоев на пробных площадях 5-74 и ПП 5а-74 на 1974 г. (по Биогеоценотическое ..., 1982, таблица 18 с некоторыми уточнениями и обобщениями\*) и 2023 г. (наши данные)

| Показатели                                       | Номер пробной площади    |                          |                               |
|--------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
|                                                  | 5-74                     | 5-74                     | 5а-74                         |
| Год обследования                                 | 1974                     | 2023                     | 2023                          |
| Площадь, га                                      | 0.36                     | 0.36                     | 0.35                          |
| Тип леса                                         | <i>с. андр.-пуш.-сф.</i> | <i>с. баг.-сф. осуш.</i> | <i>с. баг.-зел.-сф. осуш.</i> |
| Класс бонитета                                   | Vб                       | Vа                       | Vа                            |
| Состав древостоя                                 |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 10С                      | 10С                      | 10С ед. Б                     |
| 2 ярус                                           | 10С                      | 10С                      | 10С ед. Б                     |
| 3 ярус                                           | 10С                      | —                        | —                             |
| Средний возраст, лет                             | 86                       | 83                       | 90                            |
| Число стволов, шт./га                            | 2638                     | 1966                     | 1937                          |
| Средний диаметр, см                              | 6.6                      | 9.4                      | 10.9                          |
| Средняя высота, м                                | 4.6                      | 7.2                      | 8.3                           |
| Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га       | 5.3                      | 11.0                     | 13.8                          |
| Относительная полнота                            | 0.3                      | 0.5                      | 0.7                           |
| Запас древесины, м <sup>3</sup> /га              | 14.3                     | 50.0                     | 69.4                          |
| Таксационные показатели по преобладающим породам |                          |                          |                               |
| Древесная порода                                 | С                        | С                        | С                             |
| Средний возраст, лет                             |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 106                      | 86                       | 93                            |
| 2 ярус                                           | 74                       | 66                       | 73                            |
| 3 ярус                                           | 44                       | —                        | —                             |
| Максимальный возраст, лет                        | >134                     | 127                      | 128                           |
| Средний диаметр, см                              |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 9.1                      | 10.3                     | 12.0                          |
| 2 ярус                                           | 5.1                      | 4.3                      | 4.9                           |
| 3 ярус                                           | 2.7                      | —                        | —                             |
| Средняя высота, м                                |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 5.6                      | 7.6                      | 8.9                           |
| 2 ярус                                           | 4.0                      | 4.7                      | 5.0                           |
| 3 ярус                                           | 2.5                      | —                        | —                             |
| Число стволов, шт./га                            |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 368                      | 1016                     | 966                           |
| 2 ярус                                           | 1173                     | 950                      | 940                           |
| 3 ярус                                           | 1097                     | —                        | —                             |
| Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га       |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 2.37                     | 9.4                      | 11.7                          |
| 2 ярус                                           | 2.39                     | 1.6                      | 2.1                           |
| 3 ярус                                           | 0.56                     | —                        | —                             |
| Относительная полнота                            |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 0.1                      | 0.4                      | 0.5                           |
| 2 ярус                                           | 0.2                      | 0.1                      | 0.2                           |
| 3 ярус                                           | 0.0                      | —                        | —                             |
| Запас древесины, м <sup>3</sup> /га              |                          |                          |                               |
| 1 ярус                                           | 6.7                      | 44.2                     | 60.1                          |
| 2 ярус                                           | 6.3                      | 5.8                      | 9.3                           |
| 3 ярус                                           | 1.3                      | —                        | —                             |

\* Из расчетов исключили возрастную группу 0-20, представленную в таблице 18 (из Биогеоценотическое ..., 1982), которую по высоте (0.8 м) отнесли к подросту; ряд показателей рассчитали как средневзвешенное соподчиненных элементов леса (подробнее см. в методике).

**Таблица 3.** Статистические показатели по диаметрам деревьев сосняков на ПП 5-74 и ПП 5а-74

| № | Тип леса                      | № ПП  | N (1, 2) | d <sub>m</sub> | SD  | Медиана | Кол-во выбросов (значение) | U        |
|---|-------------------------------|-------|----------|----------------|-----|---------|----------------------------|----------|
| 1 | <i>С баг.-сф. осуш.</i>       | 5-74  | 707      | 7.4            | 4.0 | 6.7     | 1 (21)                     | 270226.5 |
| 2 | <i>С. баг.-зел.-сф. осуш.</i> | 5а-74 | 667      | 8.5            | 4.4 | 8.0     | 0                          | 201342.5 |

Обозначения: N (1, 2) — количество измеренных диаметров в выборках N<sub>1</sub> и N<sub>2</sub>; d<sub>m</sub> — средний диаметр; SD — среднеквадратичное отклонение; U — U-статистика.

**Таблица 4.** Статистики значимости различий по диаметрам деревьев сосняков на ПП 5-74 и ПП 5а-74

| α    | p-value     | U-статистика |                       | Z-статистика |                | Размер эффекта Z/√(N <sub>1</sub> +N <sub>2</sub> ) |
|------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------|-----------------------------------------------------|
|      |             | расчетная    | [...]                 | расчетная    | [...]          |                                                     |
| 0.05 | 0.000002788 | 201342.5     | [221378.5 : 250190.5] | —4.69        | [—1.96 : 1.96] | 0.13                                                |

Обозначения: α — уровень значимости; [...] — доверительный интервал.

Средний возраст трех сравниваемых древостоев относится к V классу возраста. Поэтому можно провести прямое сравнение таксационных характеристик этих древостоев по табл. 2. Осушение оказало существенное влияние на структуру древостоя сравниваемых биогеоценозов (проводится сравнение начального состояния ПП 5-74 на 1974 г. с осушенными вариантами через 50 лет в 2023 г. на ПП 5-74 и ПП 5а-74), которое выражается в следующих таксационных показателях:

- увеличился запас в 3.5 и 4.9 раза (с 14.3 м<sup>3</sup>/га до 50.0 и 69.4);
- увеличилась относительная полнота древостоя на 0.2 и 0.4 единицы (с 0.3 до 0.5 и 0.7);
- увеличилась высота древостоя, в т. ч. 1-го яруса на 36% и 54% (с 5.6 м до 7.6 и 8.9);
- увеличился средний диаметр, в т. ч. у 1-го яруса на 13% и 32% (с 9.1 см до 10.3 и 12.0);
- уменьшилось количество деревьев древесного яруса на 25% и 27% (с 2638 до 1966 и 1937 шт.);
- выпали старые деревья, имеющие возраст более 134 лет в 1974 г.

Необходимо отметить, что максимально полученный запас древесины после осушения в 69.4 м<sup>3</sup>/га в V классе возраста не представляет экономическую ценность для лесозаготовки.

Из таксационных данных (табл. 2) видно, что через 50 лет после осушения *с. баг.-зел.-сф. осуш.* оказался более продуктивным, чем *с. баг.-сф. осуш.*:

- по среднему возрасту старше на 8% (90 лет против 83 лет);
- по среднему диаметру 1-го яруса древостоя толще на 14% (12.0 против 10.3 см);
- по средней высоте 1-го яруса выше на 15% (8.9 против 7.6 м);
- по запасу больше на 28% (69.4 против 50.0 м<sup>3</sup>/га).

Для выявления значимости различий между этими двумя типами леса через 50 лет после осушения провели тест Манна-Уитни по диаметрам растущего леса на ПП 5-74 и ПП 5а-74. Результаты этого теста (табл. 3 и 4) показали следующее:

- выборки по диаметру для двух ПП отличаются друг от друга (из табл. 4: p-value (0.000002788) < α (0.05), расчетные статистики U и Z не попадают в доверительный интервал);
- вычисленный стандартизированный размер эффекта небольшой (Z/√(N<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>)=0.13) (табл. 4) и указывает на то, что отличия между выборками измеренных диаметров на ПП 5-74 и ПП 5а-74 существуют, но они невелики.

Анализ литературы показал, что бонитет в осушаемых олиготрофных сосняках может остаться прежним или измениться не более, чем на один класс в одну или другую сторону. Приведем примеры. В северотаежном сосняке сфагновом (Приморский район Архангельской области) с мощностью торфа около 2 м в центральной части верхового сфагнового болота площадью 30 га бонитет до осушения был Vб в 1964 г., после осушения через 10 лет и более — Va в 1974 и 1979 гг. (Изотов, 1983). Для сосняка багульниково-сфагнового, расположенного на территории Западнодвинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН, для 1-го яруса до осушения на 1974 г. приводится V бонитет, а после — через 10 лет в 1983 г. — IV, для 2-го яруса до осушения — Va бонитет, после — V/Va (Иванов, Бунин, 1986). В зауральских южнотаежных болотных сосняках олиготрофного ряда класс бонитета не меняется или даже ухудшается: так из 6 пробных площадей через 19 лет после осушения на 4 остается Va, на одной — V, и ещё на одной ухудшается с V до Va (Солнцев и др., 2014).

Как мы видим, для олиготрофных болотных лесов, к которым относятся наши и приводимые

**Таблица 5.** Сравнение модельного ненарушенного биогеоценоза с осушенными через 50 лет после осушения по средней высоте 1-го яруса соснового древостоя (расчет проведен на основе функции Митчерлиха по модели зависимости высоты от возраста древостоя (по Лебедев, Кузьмичев, 2022))

| Показатели                           | ПП 5-74 |           | ПП 5а-74 |           |
|--------------------------------------|---------|-----------|----------|-----------|
|                                      | модель  | осушенное | модель   | осушенное |
| Средний возраст, лет                 | 86      | 86        | 93       | 93        |
| Средняя высота, м                    | 4.9     | 7.6       | 5.1      | 8.9       |
| Бонитет                              | Vб      | Vа        | Vб       | Vа        |
| Эффект осушения по средней высоте, % | 36      |           | 43       |           |

для примера объекты, изменение бонитета несущественно, и их осушение не имеет или почти не имеет лесоводственной эффективности, что объясняется низкой зольностью этих торфяных почв (Вомперский, 1968).

И все же осушение олиготрофных сосняков хоть и неэффективно, но интересно с точки зрения изучения особенностей роста естественных и нарушенных древостоев. Интерес представляет сравнение структуры древостоя через 50 лет без осушения и после осушения. После осушения, через 50 лет, мы имеем эмпирические данные при экстенсивной (ПП 5-74) и нормальной (ПП 5а-74) интенсивности осушения. А для сравнения данные через 50 лет в контроле — в ненарушенном естественном биогеоценозе — получили с помощью моделирования. Для выявления различий использовали основанную на функции Митчерлиха модель зависимости высоты от возраста древостоя, показатели которых связаны с бонитетом (Лебедев, Кузьмичев, 2022). Модельный расчет высоты на ПП 5-74 при отсутствии нарушений через 50 лет проводили исходя из возраста древостоев на ПП 5-74 и ПП 5а-75 на 2023 г. (табл. 5). Входными данными для расчетов явились средний возраст и средняя высота 1-го яруса древостоя неосушенного насаждения на 1974 г. на ПП 5-74 (из табл. 2 — 106 лет и 5.6 м соответственно), а также средний возраст 1-го яруса на 2023 г. на ПП 5-74 и ПП 5а-74 (из табл. 2 — 86 лет и 93 года соответственно). Таким образом, появилась возможность сравнить высоты насаждений в возрасте 86 лет и 93 года на 2023 г., осушаемых с разной степенью интенсивности, с модельными высотами насаждения, которое развивалось бы без осушения в таких же возрастах древостоев.

Таким образом, из табл. 5 видно, что при сравнении со смоделированным контролем экстенсивное осушение привело к увеличению высоты на 36%, а нормальное осушение — на 43%.

## ВЫВОДЫ

Сравнивая таксационные показатели древесного яруса и интенсивность осушения *с. андр.-пуш.-сф.* за 50 лет, можно отметить следующее. В процессе осушения:

- произошла смена типов леса на *с. баг.-сф. осуш.*, расположенный в середине межканавья и подвергающийся экстенсивному осушению, и на *с. баг.-зел.-сф. осуш.*, расположенный в приканавье и подвергающийся нормальному осушению;
- улучшился класс бонитета с Vб на Va;
- таксационные показатели, характеризующие продуктивность древостоя, существенно изменились за 50 лет, в т. ч. запас древостоев насаждения увеличился в 3.5 и 4.9 раза в осушенных сосняках;
- сравниваемые сосновые древостои относятся к V классу возраста, однако из осушенных древостоев выпали более старые деревья;
- статистический анализ показал незначительные, но достоверные отличия по диаметрам между нормально осушаемым *с. баг.-зел.-сф. осуш.* и экстенсивно осушаемым *с. баг.-сф. осуш.*;
- эффект осушения показал существенное отличие средних высот в осушенных сосняках (более 36%) по сравнению с модельной высотой неосушенного *с. андр.-пуш.-сф.*

Подводя итог, отметим, что наблюдается определенный эффект от осушения олиготрофных сосняков. Однако лесоводственная эффективность такого осушения невысокая. В дальнейшем при необходимости проведения гидромелиорации болотных сосняков целесообразно планировать частоту закладки осушительных канав, т. к. древостой в межканавье и в приканавье реагирует на осушение по-разному.

\*\*\*

Авторы выражают благодарность академику ИЛАН РАН С.Э. Вомперскому за ценные советы и рекомендации по анализу данных, а также

сотрудникам Западновинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН П.Ю. Зазнобину и О.Н. Денисову за помощь в проведении полевых исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биогеоценологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией / Под ред. А.А. Молчанова. М.: Наука, 1982, 208 с.
- Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесосушения: Рост древостоев в связи с важнейшими факторами среды осушаемых торфяных почв. М.: Наука, 1968. 312 с.
- Глухова Т.В. Химический состав почвенно-грунтовых вод лесных болот и вынос веществ со стоком при гидроресомелиорации: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. М., 1990. 18 с.
- Иванов А.И., Бунин М.А. Изменение структуры древостоев болотных сосняков в первые 10 лет после осушения // Лесоведение. 1986. № 2. С. 38–44.
- Изотов В.Ф. Изменения условий произрастания и роста северотаежного сосняка сфагнового в связи с осушением // Проблемы природопользования в условиях севера европейской части СССР. Вологда, 1983. С. 46–59.
- Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Построение бонитетной шкалы с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода // Сибирский лесной журнал. 2022. № 3. С. 48–58. DOI: 10.15372/SJFS20220306
- Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4 (рукопись). М.: ЦЭПЛ РАН, 2023.
- Солнцев Р.В., Чиндяев А.С., Нагимов З.Я. Влияние осушительной мелиорации на режим почвенно-грунтовых вод и прирост деревьев сосны по диаметру // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. Статья 744.
- Таксация леса: теоретические основы вычислений / Под ред. Л.В. Стоноженко. М.: МГУЛ, 2012. 182 с.
- Cieszewski C.J., Bailey R.L. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes // Forest Science. 2000. V. 46. № 1. P. 116–126.

## Changes in the Structure of a Stand on a Drained Oligotrophic Swamp for 50 Years on West Dvina Peatland-Forest Station in Tver Oblast

A. A. Egorov<sup>1</sup>, \* and T. V. Glukhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,  
Uspenskoe village, Odintsovo district, Moscow region, 143030 Russia

\*E-mail: egorovfta@yandex.ru

West Dvina peatland-forest station of the Institute of Forestry Sciences of the Russian Academy of Sciences is located in the sub-taiga of European Russia. Scientific tasks related to the biogeocoenological study of the nature of swampy forests and swamps are solved at the station. In the period during 1972–1973, forest reclamation works were carried out here. Permanent sample plots were laid on the drained areas, including one in 1974 on a forested oligotrophic swamp. In 2023, the research was carried out again. The purpose of the study was to evaluate changes in the structure of a forest stand on a forested oligotrophic swamp over 50 years after drainage. The objects of the study were the forest inventory data for the tree layer on permanent sample plots in 1974 and 2023. Sample plots were laid in the middle of the space between the drainage channels and near them. The study uses generally recognized field and laboratory inventory methods. Regression equations were constructed to accurately calculate certain indicators. For statistical analysis of the similarity between the diameters on the sample plots that do not obey the normal distribution, the nonparametric Mann-Whitney U test, recommended in such cases, was used. The development dynamics of the stands on the sample plots was studied by comparing the inventory indicators for 1974 and 2023. Due to the lack of control for the drained object in 2023, in order to identify the degree of drainage efficiency, tree height was calculated based on an algebraic model of stand growth based on the Mitcherlich function. Comparing the inventory indicators and the intensity of drainage of *Pinetum andromedo-eriphorosum-sphagnosum* over 50 years, it can be noted that in the process of drainage there was a change in forest types to *Pinetum ledoso-sphagnosum turfosum*, located in the middle of the inter-channel space and undergoing extensive drainage, and to *Pinetum ledoso-hylocomiosum-sphagnosum turfosum*, located near the channel and being subjected to normal drainage. The yield class has improved from Vb to Va. The inventory indicators characterising the productivity of the stand have changed significantly over 50 years, including the wood stock of the stand that has increased 3.5 and 4.9 times in drained pine forests. The compared stands belong to the age class V, however, older trees died out in the drained stands. Statistical analysis showed minor but significant differences in diameters between normally drained and extensively drained pine forests. The effect of drainage showed there is a significant difference in the average

heights in the drained pine forests (more than 36%) compared to the model height of the undrained pine forests. For 50 years after the drainage of oligotrophic pine forests, a certain effect of their drainage can be observed. However, the overall impact of such drainage on forest management is low.

**Keywords:** oligotrophic pine forests, West Dvina peatland-forest station, drainage, permanent sample plots, stand structure, growth patterns, Mitcherlich function, Mann-Whitney criterion.

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to the academician S.E. Vompersky for valuable advice and recommendations on data analysis, as well as to the staff of the West Dvina peatland-forest station P.Y. Zaznabin and O.N. Denisov for their assistance in conducting field research.

## REFERENCES

- Biogeotsenologicheskoe izuchenie bolotnykh lesov v svyazi s opytnoi gidromelioratsiei* (Biogeocoenological study of bog forests related to experimental hydrotechnical amelioration), Moscow: Nauka, 1982, 208 p.
- Cieszewski C.J., Bailey R.L., Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes, *Forest Science*, 2000, Vol. 46, No. 1, pp. 116–126.
- Glukhova T.V., *Khimicheskii sostav pochvenno-gruntovykh vod lesnykh bolot i vynos veshchestv so stokom pri gidrolesomelioratsii. Avtoreferat diss. kand. biol. nauk* (Chemical composition of soil and groundwater of forest swamps and removal of substances from runoff during hydroforestry. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Moscow: 1990, 18 p.
- Ivanov A.I., Bunin M.A., *Izmenenie struktury drevostoev bolotnykh sosnyakov v pervye 10 let posle osusheniya* (Changes in the structure of swamp pine forest stands in the first 10 years after drainage), *Lesovedenie*, 1986, No. 2, pp. 38–44.
- Izotov V.F., *Izmeneniya uslovii proizrastaniya i rosta severotaezhnogo sosnyaka sfagnovogo v svyazi s osusheniem* (Changes in the conditions of place and growth of North Taiga sphagnum pine in connection with drainage), In: *Problemy prirodopol'zovaniya v usloviyakh severa evropeiskoi chasti SSSR* (Problems of nature management in the conditions of the north of the European part of the USSR), Vologda: 1983, pp. 46–59.
- Lebedev A.V., Kuz'michev V.V., *Postroenie bonitetnoi shkaly s ispol'zovaniem obobshchennogo algebraicheskogo raznostnogo podkhoda* (Stand site index scale development using the generalized algebraic difference approach), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2022, No. 3, pp. 48–58. DOI: 10.15372/SJFS20220306
- Metodika polevykh rabot po taksatsii lesa na postoyannykh probnykh ploshchadyakh v ramkakh realizatsii innovatsionnogo proekta gosudarstvennogo znacheniya "Uglerod v ekosistemakh: monitoring"* (The methodology of field work on forest taxation on permanent test areas of intensive test sites within the framework of the implementation of an innovative project of national importance "Carbon in ecosystems: monitoring"), Moscow: TsEPL RAN, 2023.
- Solntsev R.V., Chindyaev A.S., Nagimov Z.Y., *Vliyanie osushitel'noi melioratsii na rezhim pochvenno-gruntovykh vod i prirost derev'ev sosny po diametru* (The influence of drainage reclamation on the mode of soil and groundwater and the growth of pine trees by diameter), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, No. 5, Article 744.
- Taksatsiya lesa: teoreticheskie osnovy vychislenii* (Forest taxation: theoretical foundations of computing), Moscow: MGUL, 2012, 182 p.
- Vomperskii S.E., *Biologicheskie osnovy effektivnosti lesoosusheniya: rost drevostoev v svyazi s vazhneishimi faktorami sredy osushaemykh torfyanykh pochv* (Biological basis of forest draining efficiency: the growth of stands in connection with the most important environmental factors of the drained peat soils), Moscow: Nauka, 1968, 312 p.