

Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

В. В. Сысуев

**Об оптимизации природно-
антропогенных ландшафтов и
оптимальном управлении
природопользованием**

Москва, 2015

Введение в учение о природно-антропогенных ландшафтах

[Николаев, и др., 2008, с. 7]

Основаниями классификации (выделения) природно-антропогенных ландшафтов являются три критерия:

«...а) степень антропогенной трансформации природных ландшафтов...; б) наличие или отсутствие антропогенной регуляции; в) социально-экономические функции, выполняемые ландшафтами».

В соответствии с основными *видами природопользования* среди природно-антропогенных обоснованно выделяются ландшафты:

«...целенаправленно созданные, антропогенно регулируемые:

- 1) сельскохозяйственные, 2) лесохозяйственные,
- 3) водохозяйственные, 4) городские и другие селитебные,
- 5)...

«...для перехода земной цивилизации к устойчивому развитию необходимо решить две взаимосвязанные **ландшафтно-экологические задачи** планетарного масштаба. Первая состоит в **оптимизации** всех существующих **природно-антропогенных ландшафтов с целью преобразования** их **в истинно культурные** (ноосферные). Вторая – в сбережении, уходе и восстановлении естественных природных комплексов, наиболее надежно гарантирующих относительную стабильность природной среды за счет гомеостазиса...

Важнейшим **инструментом проектирования культурного ландшафта** признано **ландшафтное планирование**. Его суть в научном обеспечении **оптимальной природно-хозяйственной организации ландшафтного пространства на принципах геоэкологической адаптивности»**

[Николаев, 2013, с. 284].

I. ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

«Проектирование - это начало изменений в окружающей человека искусственной среде»

Дж. К. Джонс

Планирование, проектирование и управление устойчивым **природопользованием и задачи** условной **оптимизации** предполагают наличие одинаковых предпосылок: **имеется цель, которую нужно достичь, учитывая всевозможные ограничения.**

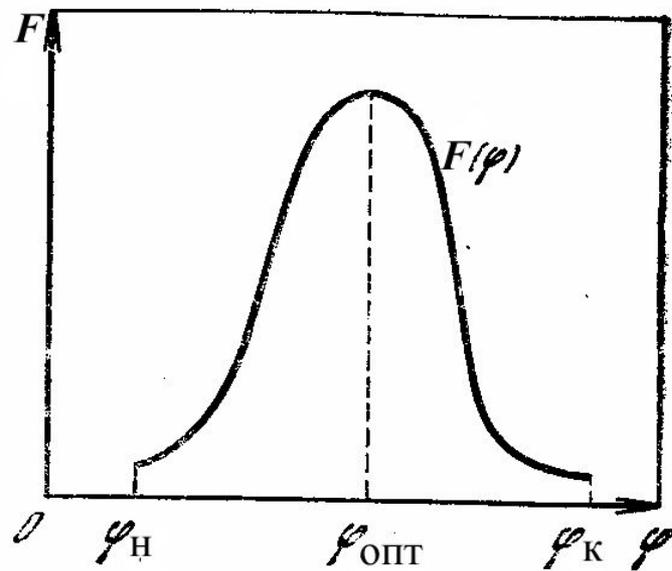
Мощный аппарат решения этих проблем имеет теория оптимизации (оптимального управления).

Выражения, связывающее цель со средствами ее достижения: критерий функционирования, критерий или показатель эффективности, целевая или критериальная функция, **функция цели**

Логический пример оптимизация:

настраивая радиоприемник, мы добиваемся максимальной громкости некоторой радиостанции:

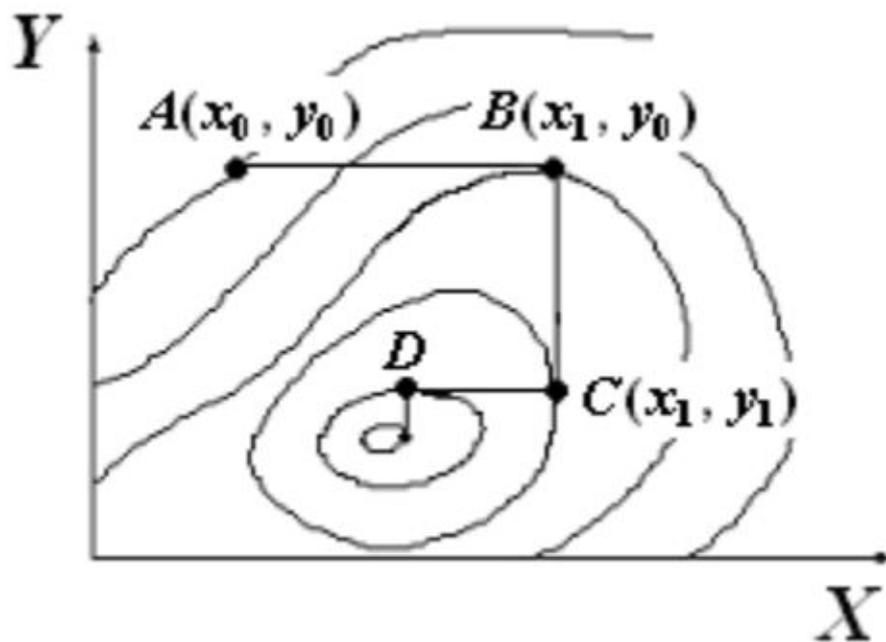
Допустимой областью X является интервал углов ϕ поворота ручки настройки между начальными ϕ_H и конечными значениями ϕ_K . **Целевая функция** — зависимость громкости F от угла ϕ . Путем измерений получим значения целевой функции $F(\phi)$ и начертим ее график. Из графика видно, что наибольшему значению целевой функции соответствует **оптимальный угол** ($\phi_{\text{ОПТ}}$). Математическое выражение (или алгоритм вычисления) целевой функции $F(\phi)$, график которой хорошо совпадает с экспериментальной кривой, и называют **математической моделью**.



Оптимизация - нахождение max (min) целевой функции

Если множество всех вариантов X , а его элементы – x , то сопоставив каждому варианту x из множества X ($x \in X$) число — критерий оптимальности, получим функцию $F(x)$, определенную в области X . Эта **функция, показывающая «качество» выбираемых вариантов, целевая функция**, а область X — **допустимая область**

Задача оптимизации - поиск минимума целевой функции:



$$F(x) \rightarrow \min_{x \in X}$$

Метод координатного спуска (метод Гаусса). Геометрический смысл поиска минимума функции 3-х переменных $F(x, y, z)$.

Линии уровня значений целевой функции напоминают изолинии высот

Для решения задач оптимизации необходимо:

- А) Составить математическую модель объекта оптимизации $F(X)$
- Б) Выбрать критерий оптимальности и составить целевую функцию
- В) Установить возможные ограничения, которые должны накладываться на переменные
- Г) Выбрать метод оптимизации для нахождения экстремальных значений искомым величин

Необходимо чтобы переменные X были управляемыми, мы должны иметь возможность реально изменить значение переменной до оптимальной величины. Например, если мы не можем управлять геологическими, климатическими и подобными не зависящими от нас факторами, нет смысла включать их в список переменных задачи оптимизации..

ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

исторически первый численный метод оптимизации [Канторович, [1939]

1. Задача об использовании сырья

Виды сырья	Запасы сырья	Виды продукции	
		Π_1	Π_2
S_1	b_1	a_{11}	a_{12}
S_2	b_2	a_{21}	a_{22}
S_3	b_3	a_{31}	a_{32}
S_4	b_4	a_{41}	a_{42}
Доход		c_1	c_2

Виды сырья	Запасы сырья	Виды продукции	
		Π_1	Π_2
S_1	19	2	3
S_2	13	2	1
S_3	15	0	3
S_4	18	3	0
Доход		7	5

Если предприятие выпускает x_1 единиц продукции вида Π_1 и x_2 единиц вида Π_2

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 \leq 19 \\ 2x_1 + x_2 \leq 13 \\ 3x_2 \leq 15 \\ 3x_1 \leq 18 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 \leq 19 - 2x_1 - 3x_2 \\ 0 \leq 13 - 2x_1 - x_2 \\ 0 \leq 15 - 3x_2 \\ 0 \leq 18 - 3x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{o}_3 = 19 - 2x_1 - 3x_2 \\ \tilde{o}_4 = 13 - 2x_1 - x_2 \\ \tilde{o}_5 = 15 - 3x_2 \\ \tilde{o}_6 = 18 - 3x_1 \end{cases}$$
$$F = 7x_1 + 5x_2$$

Найти $\min F = -7x_1 - 5x_2$

основная задача линейного программирования

Геометрический смысл основной задачи линейного программирования

Требую неотрицательности всех неизвестных приходим к системе неравенств

$$\begin{cases} x_1 \geq 0 \\ x_2 \geq 0 \\ 19 - 2x_1 - 3x_2 \geq 0 \\ 13 - 2x_1 - x_2 \geq 0 \\ 15 - 3x_2 \geq 0 \\ 18 - 3x_1 \geq 0 \end{cases}$$

многоугольник решений системы неравенств

$$\Rightarrow \begin{cases} x_1 = 0 & \text{(I)} \\ x_2 = 0 & \text{(II)} \\ 19 - 2x_1 - 3x_2 = 0 & \text{(III)} \\ 13 - 2x_1 - x_2 = 0 & \text{(IV)} \\ 15 - 3x_2 = 0 & \text{(V)} \\ 18 - 3x_1 = 0 & \text{(VI)} \end{cases}$$

$$C = -7x_1 - 5x_2$$

$$P_0(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$$

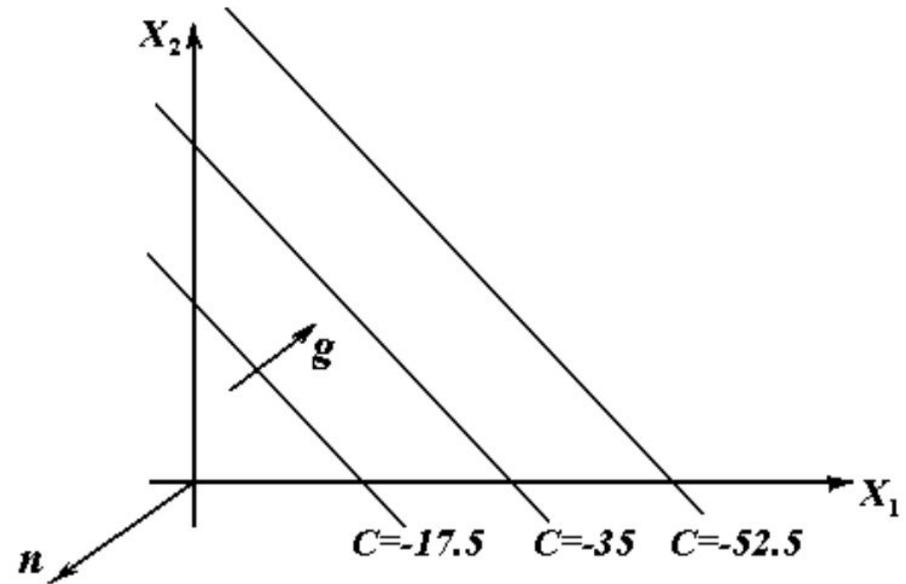
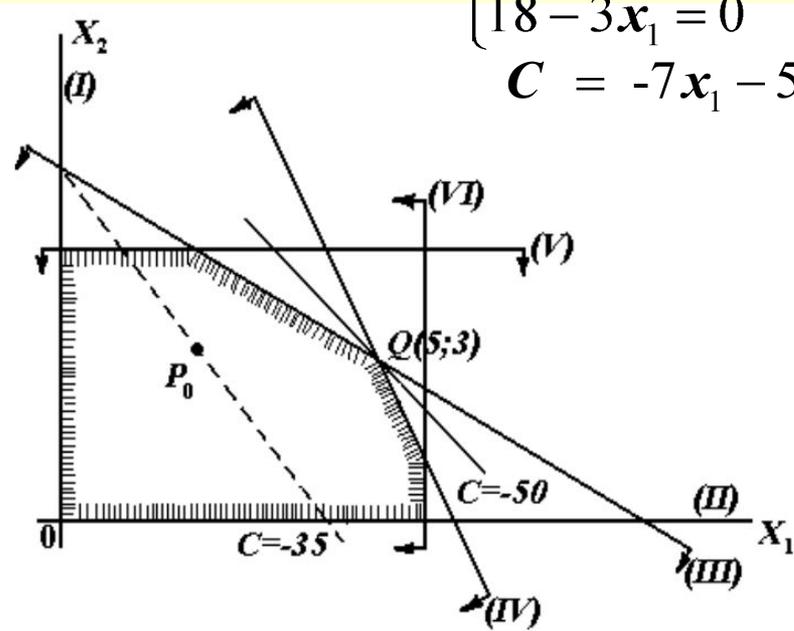
$$C_0 = -7x_1^{(0)} - 5x_2^{(0)}$$

Оптимальная точка Q(5, 3)

$$F_{1\min} = -7 \cdot 5 - 5 \cdot 3 = -50$$

Оптимальное решение задачи

$$x_1 = 5, x_2 = 3.$$



Задача рационального распределения пород

по соответствующим им ТУМ [].

Основная задача линейного программирования

Найти максимум целевой функции

$$F(x) = \sum_{j=1}^n c_j(\omega) x_j \Rightarrow \max \quad (1)$$

при условиях:

ограничения на имеющиеся природные ресурсы

$$\sum_{j=1}^n a_{pj}(\omega) x_j \leq b_p(\omega) \quad (2)$$

выполнения предъявляемых к насаждениям требований

$$\sum_{j=1}^n a_{kj}(\omega) x_j \geq b_k(\omega)$$

и неотрицательности переменных:

$c_j(\omega)$ – запас, прирост или другая специфическая функция j -ой породы в возрасте количественной спелости;

x_j – доля участия j -ой породы в данных ТУМ $x_j \geq 0, j = 1, \dots, n$,

$a_{pj}(\omega)$ – норма потребности j -ой породы в p -ом ресурсе;

$b_p(\omega)$ – количество имеющихся p -ых ресурсов;

$a_{kj}(\omega)$ – нормы требуемых от насаждения дополнительных специфических функций (средообразующих, биоразнообразия, защитных и др);

$b_k(\omega)$ – оценки требований к этим функциям;

ω – количество выделов.

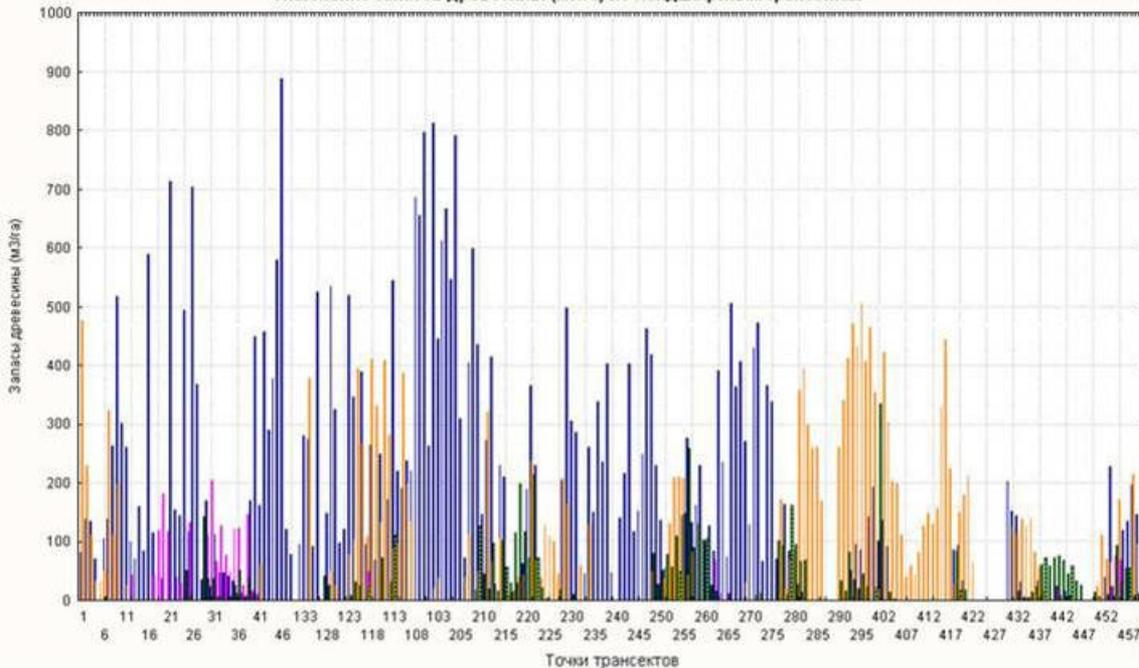
Географические ограничения по ресурсам в задачах оптимизации продукционных процессов

[Нестеров, Бредихин, 1970]

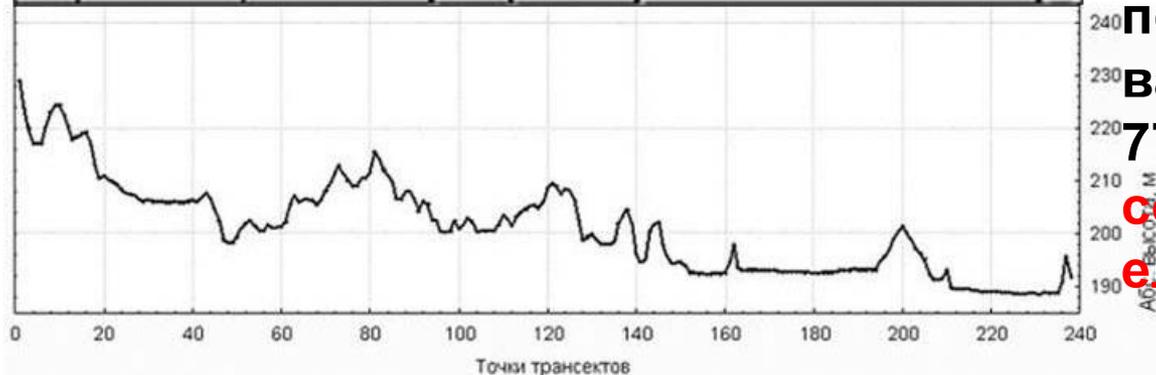
№	Наименование	Номера районов			
		1	2	3	4
1	Солнечная радиация, ккал/см² вегет. период	60	65	80	90
2	Доступная вода, сотни тонн/га	340	300	250	115
3	Азот, кг/га	54	60	100	50
4	Фосфор, кг/га	12	15	27	16
5	Калий, кг/га	50	54	60	60
6	Почвы	дерново- подзолист. супесчаная	дерново- подзолист среднесугл	чернозем выщелоч. легкосугл	Темнокаш тановая среднесугл
7	Σt^0	2150	2200	2750	3000
8	pH	5,2	5,5	6,3	7,5

При решении задачи (1)-(2) с условиями ограничения на ресурсы и коэффициентами функционала цели «достижение максимального прироста» из таблиц получена **максимальная продуктивность 19,3 м³/га в год при оптимальном составе древостоя 85% ели и 15% осины.**

Изменение запасов древесины (м3/га) по ландшафтным трансектам



I			III	II	III			II
Ia	Ib	Ic	IIIa	IIa	IIIa			IIa



Решая ту же задачу на **максимальный доход** получили максимальную валовую продукцию на **77,8 у.е.** при наличие **состава древостоя 94,5% ели и 5,5% дуба.**

2. Задачи оптимального управления природопользованием

Система, точнее - **динамическая система** (которая развивается, эволюционирует во времени) в каждый момент времени **пребывает в одном из некоторого числа** возможных **состояний**.

Смена состояний системы с течением времени и составляет её **развитие или функционирование**.

Предполагается, что **состояние** динамической системы в каждый момент времени может быть **однозначно охарактеризовано** определенным конечным **набором *n* числовых параметров или функций состояния**.

Управление – это есть **воздействие, способное изменить текущее состояние**, а значит и все последующее развитие системы.

Функционированием многих **природно-антропогенных систем** можно (необходимо) управлять.

Постановка задачи оптимального управления включает:

- 1. Систему дифференциальных уравнений**, описывающих поведение (функционирование) данного объекта и
- 2. Критерий оптимальности (функционал)**, который следует максимизировать или минимизировать,
- 3. Выбор управляющих переменных.**
- 4. Введение ограничений на переменные и граничные условия**
- 5. Формулировка принципа максимума Л.С. Понтрягина.** Этот принцип - необходимое условие существования оптимального управления динамическими системами, принимает разный вид в зависимости от задачи. В его формулировке участвуют функции специального вида – гамильтониан и сопряженные переменные. Существует схема применения принципа максимума, однако в общем случае его использование требует высокой математической квалификации.

Решением задачи оптимального управления является **оптимальный процесс**, т.е. оптимальное управление ***и*** соответствующая ему **оптимальная траектория функционирования системы**.

Простая блок-схема динамической системы лесопользования



Постановка задачи оптимального управления лесопользованием

[Андреева, Шилова, 2014]

$$\begin{cases} \dot{x} = p(y, z) - \gamma(z)x - fx, \\ \dot{y} = fx - (q + d)y - u_1, \\ \dot{z} = qy - hz - u_2, \end{cases}$$

с краевыми условиями:

$$\begin{aligned} x(0) &= X_0, & y(0) &= Y_0, & z(0) &= Z_0; \\ x(T) &\geq X_T, & y(T) &\geq Y_T, & z(T) &\geq Z_T. \end{aligned}$$

Функции управления $u_1(t)$, $u_2(t)$ - скорость вырубki деревьев среднего и старшего возрастов: $0 \leq u_k(t) \leq \alpha_k$, $k = 1, 2$, $t \in [0, T]$;

$$0 \leq \sum_{k=1}^2 u_k(t) \leq \alpha_k, \quad t \in [0, T],$$

Цель управления - максимизация функционала $J(u)$ - прибыль, полученную от продажи вырубленного леса:

$$J(u) = \int_0^T \sum_{i=2}^3 [\rho_i(y, z) - c_i(y, z)] u_i dt + b_1 y(T) + b_2 z(T) \rightarrow \max,$$

где: $\rho_i(y, z)$, $c_i(y, z)$ - стоимость реализованной древесины и себестоимость затрат на выращивание и рубки

Решение задачи оптимального управления лесопользованием

Задача минимизации функционала с критериями выполнения конечных

условий:

$$J(\mathbf{u}) = - \int_0^T \sum_{i=2}^3 [\rho_i(y, z) - c_i(y, z)] u_i dt - b_1 y(T) - b_2 z(T) + I_1 \left(\max(0, X_T - x(T)) \right)^2 + M_2 \left(\max(0, Y_T - y(T)) \right)^2 + M_3 \left(\max(0, Z_T - z(T)) \right)^2 \rightarrow \min.$$

Строится функция Понтрягина из функций специального вида (гамильтониана H и сопряженных переменных p_i) и функция переключения

$$H(t, x, y, z, u, p(t), \lambda_0) = -\lambda_0 \left(\sum_{i=2}^3 [\rho_i(y, z) - c_i(y, z)] u_i \right) + (p_1(t), \rho z - \gamma(z)x - fx) + (p_2(t), fx - (q + d)y - u_1) + (p_3(t), qy - hz - u_2);$$

$$\varphi_k(t) = \rho_k + c_k(y, z) + p_{k+1}(t), \quad k = 1, 2.$$

Пусть $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{u}_1, \bar{u}_2)$ локально-оптимальный процесс сформулированной задачи, тогда оптимальное управление определяется условием:

$$\bar{u}_k = \begin{cases} 0, & \varphi_k(t) < 0 \\ \alpha_k, & \varphi_k(t) > 0 \\ [0, \alpha_k], & \varphi_k(t) = 0, \quad k = 2, 3, \end{cases}$$

Сопряженные функции $p_k, k=1, 2, 3$ являются решением системы

дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{p}_1(t) = p_1(t)(az^4 + b - f) - p_2(t)f; \\ \dot{p}_2(t) = -\mu_1 u_1 + p_2(t)(q + d) - p_3(t)q; \\ \dot{p}_3(t) = -\mu_2 u_2 - p_1(t)(\rho - 4az^3 x) - p_3(t)h \end{cases}$$

Заключение

1. В «Учении о природно-антропогенных ландшафтах» и в ландшафтном планировании сформулированы общие положения об оптимизации и управлении природопользованием.
2. В лесоведение и в теории оптимизации имеется ряд примеров корректно сформулированных задач оптимизации и оптимального управления природопользованием.
3. Математическая теория оптимизации и её раздел оптимальное управление, жестко связаны с экономико-математическими теориями и являются действенными и практическими инструментами современной экономической науки.
4. Содержательное и корректное использование вышеупомянутых понятий и методов в ландшафтном планировании и дисциплинах рационального природопользования будет способствовать синтезу физической и экономической географии, который «...наверняка станет новой парадигмой современной университетской географии» [Симонов Ю.Г., 2013, стр.7].
5. Методы теории оптимизации открывают новые перспективы развития и практического применения ландшафтного планирования

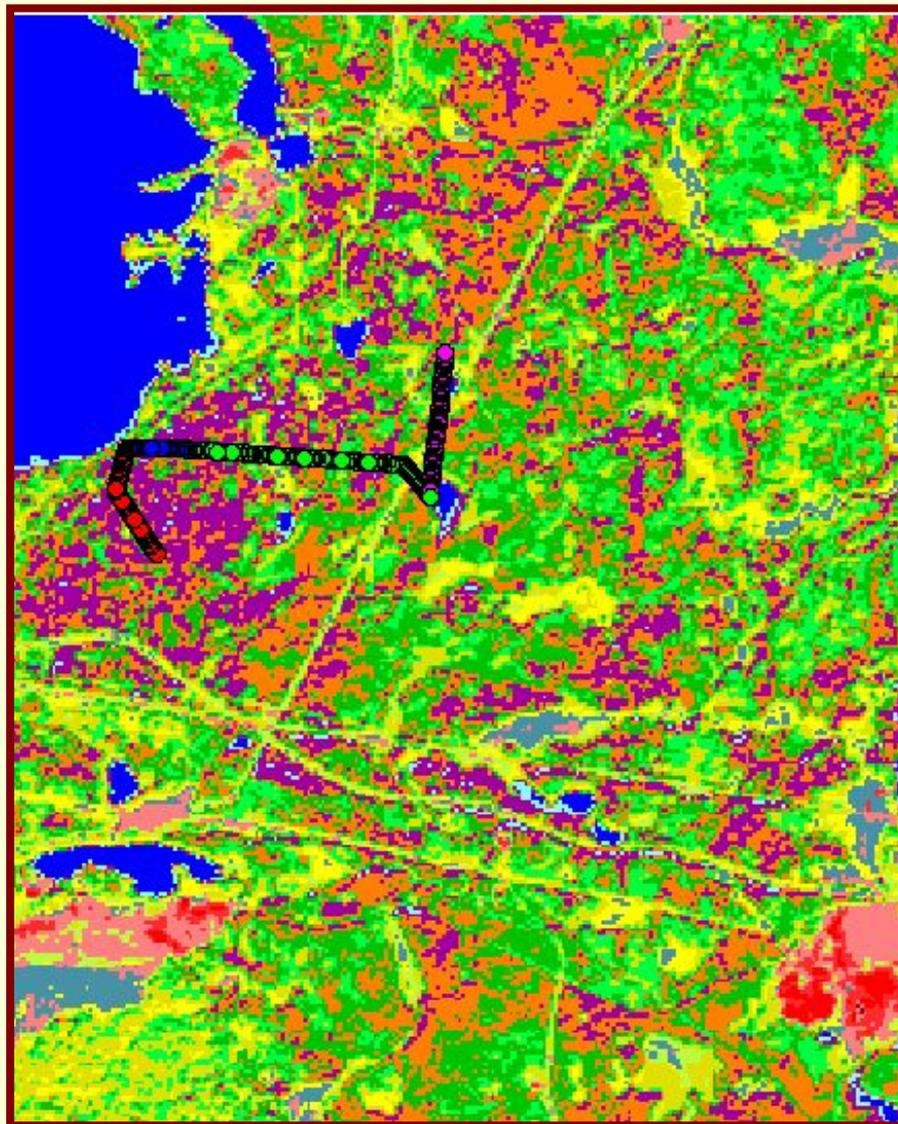
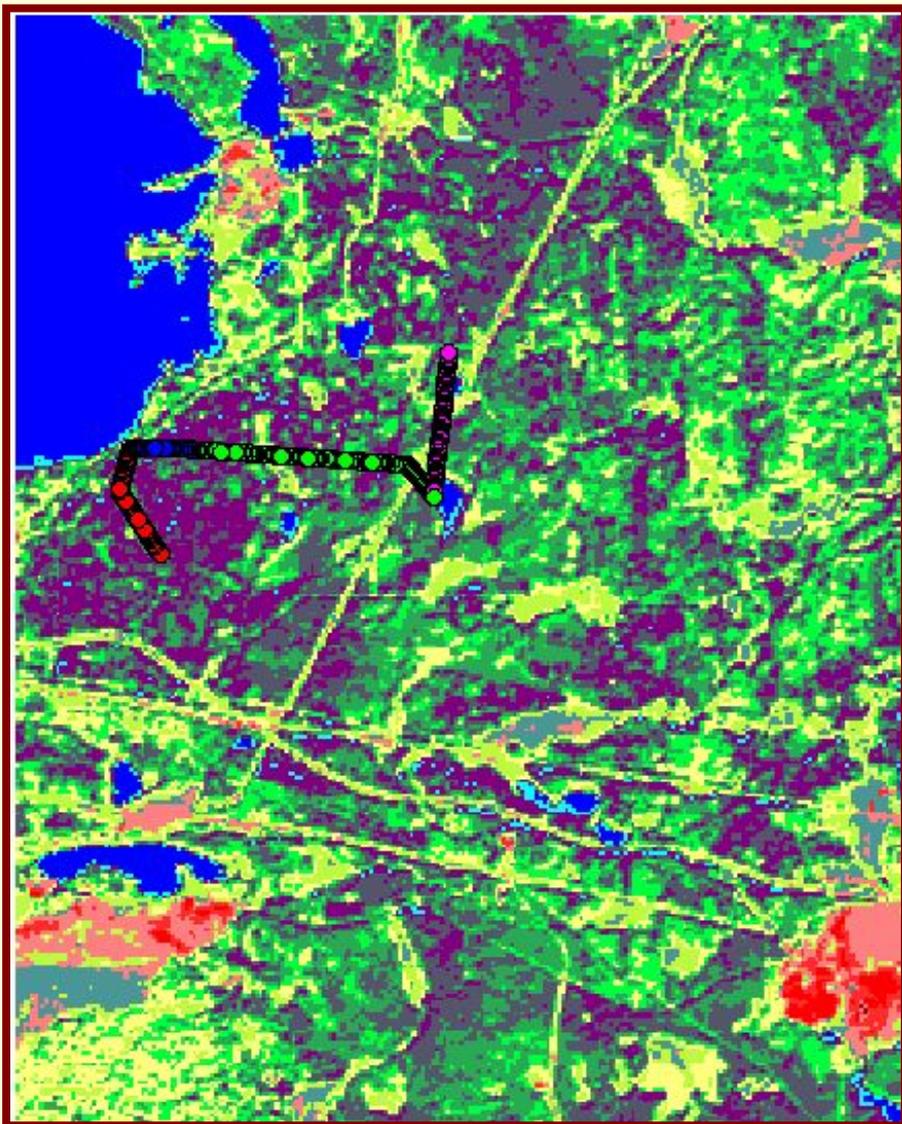
Схема прогнозно-аналитической системы для ландшафтного планирования долгосрочного устойчивого лесопользования



Структура геосистем - граничное условие моделирования динамики древостоя.

Лесопользование – управляющее воздействие

ОТОБРАЖЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА (полученных по ДДЗ) НА ПРОСТРАНСТВО КООРДИНАТ

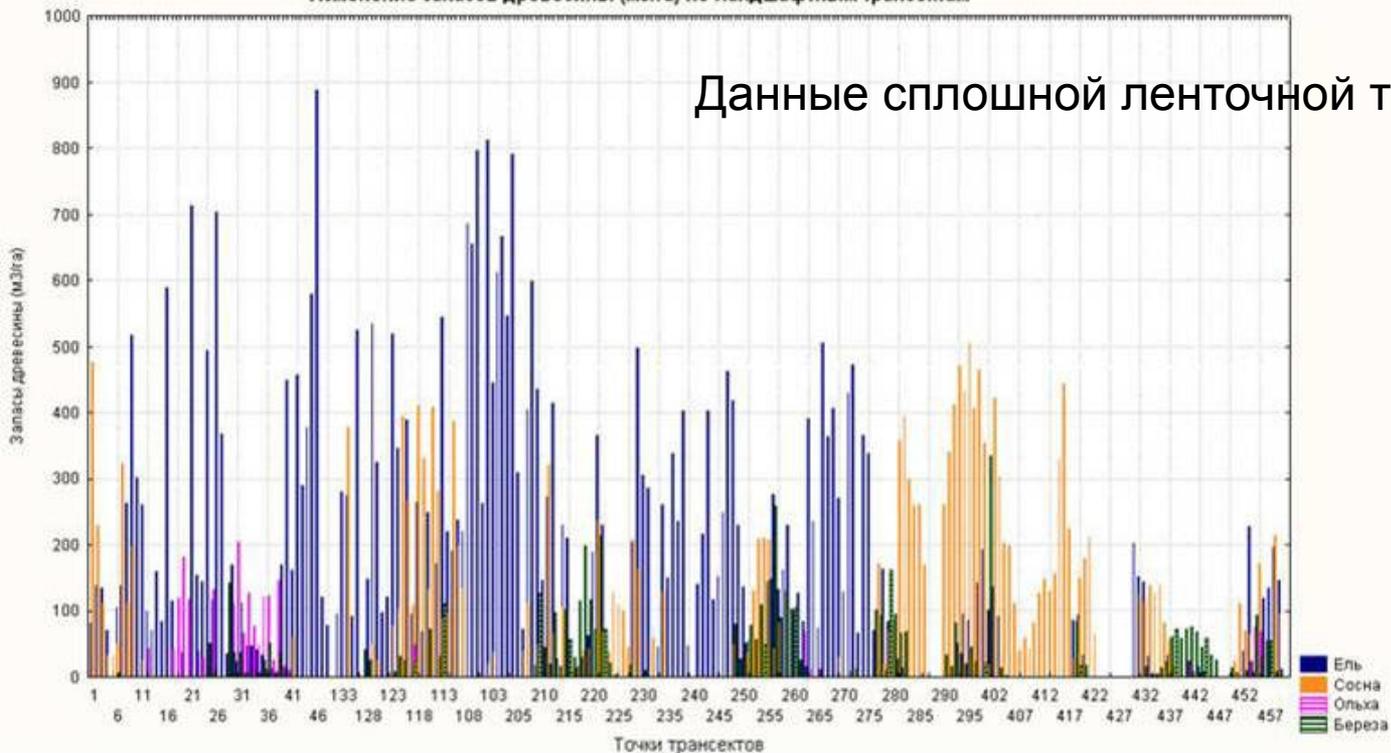


Интерпретация породного состава леса по априорным данным Lansat 7

Верификация классов по данным сплошной ленточной лесотаксации

Изменение запасов древесины (м3/га) по ландшафтным трансектам

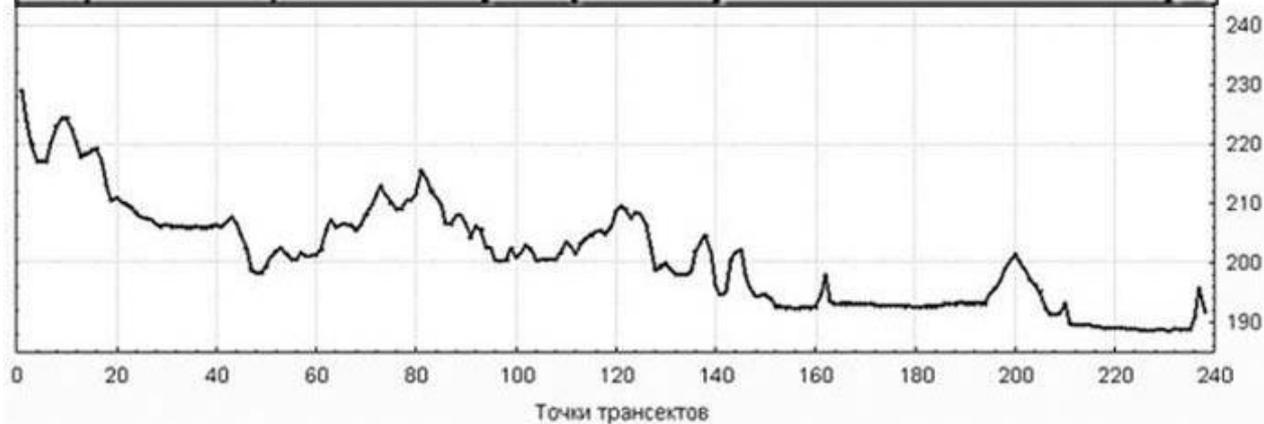
Данные сплошной ленточной таксации леса



I			III	II	III			II
I0	Iа	Iб	IIIа	IIа	IIIа			IIа

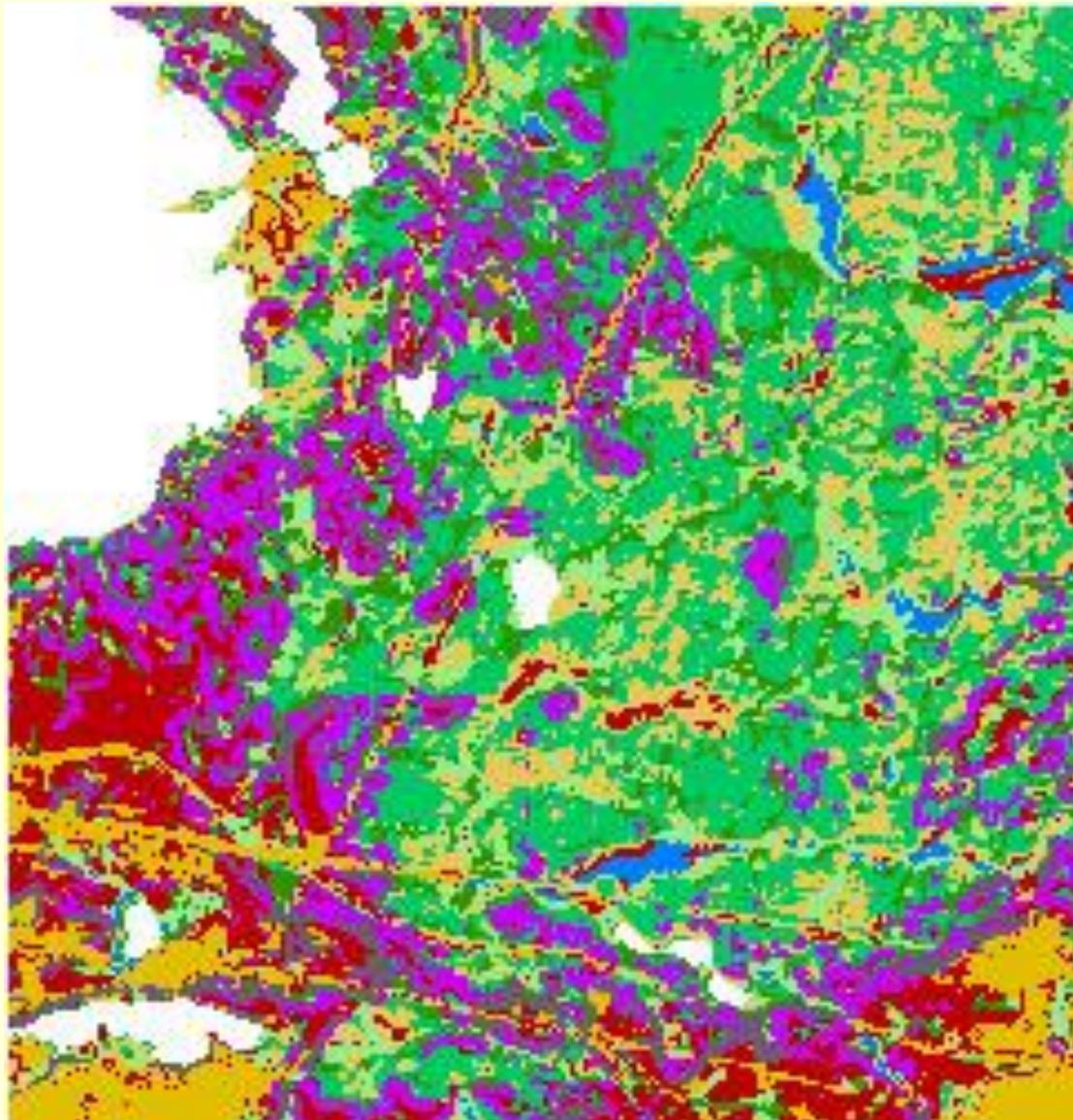
ландшафты

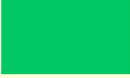
местности



Нивелировочный
профиль

Карта структуры ПТК на основе классификации рельефа по параметрам градиентов геофизических полей и космического снимка Landsat-7

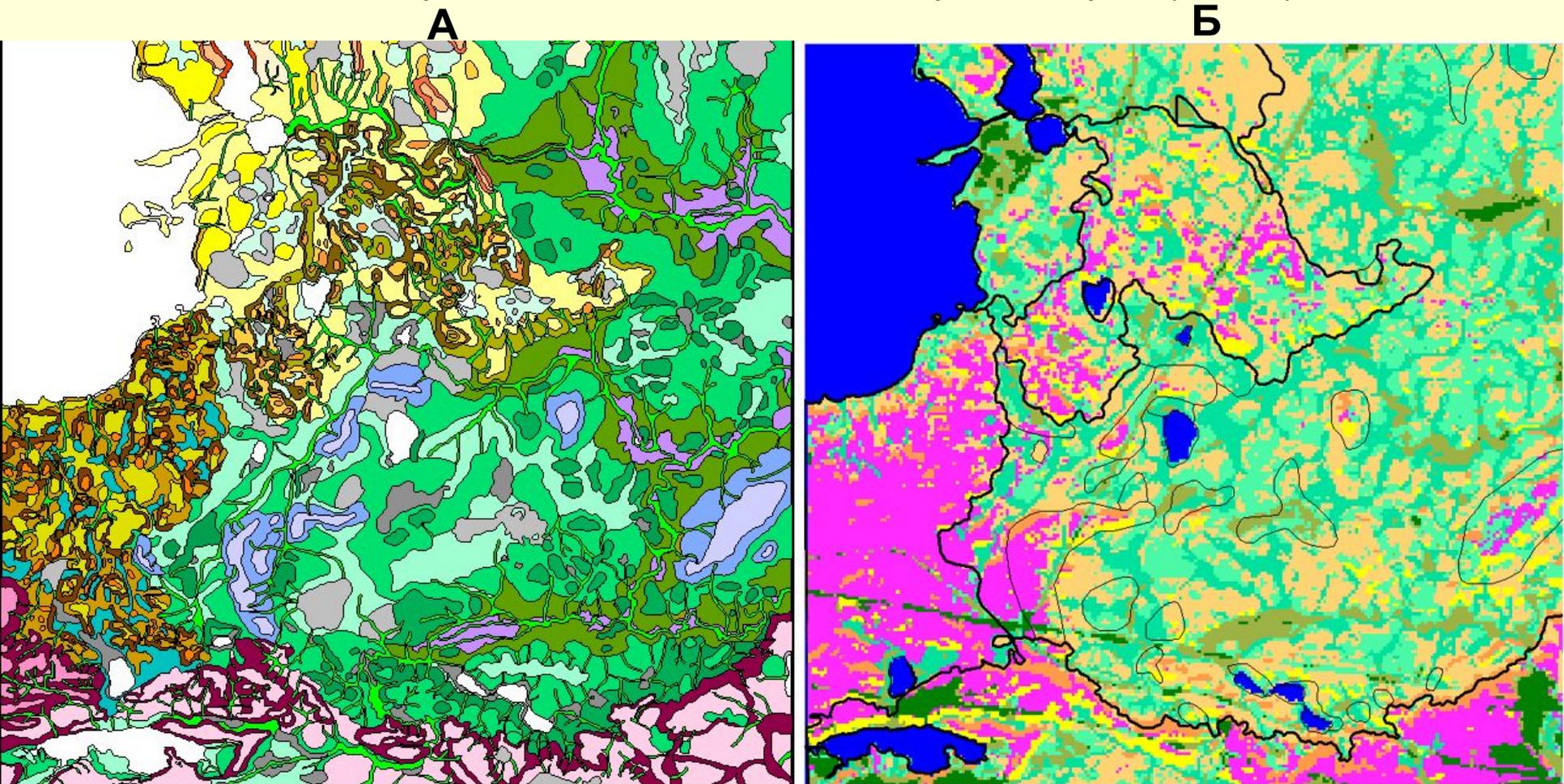


-  моренные гряды и камовые холмы с суглинистыми дерново-подзолистыми почвами под разнотравно-кисличными ельниками
-  вершины камовых холмов и дюнных гряд с песчаными дерново-подзолами под сосняками зеленомошными, беломошными и разнотравными
-  подножья холмов и плоские вогнутые ложбины с дерново-глеевыми и дерново-подзолистыми контактно отбеленными почвами под смешанными лесами
-  речные и озерные террасы с дерново- и торфяно-глеевыми почвами под ельниками и смешанными лесами
-  дюнные гряды и песчаные холмы с дерново-подзолистыми почвами под сосняками
-  плоские и выпуклые верховые болота с мощными торфами с редкостойными сосняками сфагновыми
-  речные поймы с дерново-глеевыми почвами под заливными лугами
-  крутые склоны холмов и гряд разного генезиса с дерновыми почвами под хвойными лесами
-  антропогенно измененные и антропогенные ландшафты (дороги, просеки ЛЭП, карьеры, сельхозугодья, лесопитомники и селитебные)

Ландшафтная карта исследованной территории.

А - карта (урочища, местности и ландшафты), составленная классическим методом по полевым данным и материалам ДДЗ [Сысуев, Солнцев, 2006].

Б - карта, полученная методом К-средних для 8 кластеров по геофизическим параметрам (6 каналов+NDVI, Landsat-7 и ЦМР – Z, SCA, RadB, Slope), с границами местностей и ландшафтов наложенных с ландшафтной карты (слева)



II.4. Проблема совмещение лесохозяйственных выделов и ПТК

Лесной квартал – отграниченная на местности просеками (шириной до 4 м) или иными естественными или искусственными рубежами (натурными границами) часть лесного массива, являющегося постоянной учетной и организационно-хозяйственной единицей в лесу.

Выдел – участок квартала **однородный по таксационной характеристике и территориально-хозяйственному значению**, отличающийся от соседних с ним участков **и требующий единых мер хозяйственного воздействия - обособляется «если**: 1) в двух смежных насаждениях преобладают разные древесные породы; 2) разница в составе древостоя равна двум и более десятым единицы; 3) в возрасте преобладающей породы спелых и перестойных насаждений имеется разница на два класса возраста, а у насаждений остальных возрастных категорий - на один класс; 4) условия местопроизрастания различаются на один класс бонитета; 5) разница в полноте составляет две десятых; 6) разница между средними диаметрами ...» и т.д., и т.п. [стр. 50, Анучин, 1998, издание 6-е])

Т.е. **выдел обособляется, главным образом, по хозяйственным характеристикам**

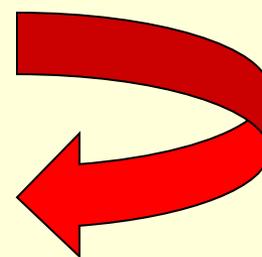
Размер среднего выдела зависит от разряда лесоустройства (степени подробности, детализации и точности лесоустройства).

Классификация типов условий местообитаний - ТУМ (Погребняк, 1963)

Группа типов по трюности	Индексы типов леса	Влажность почвы	Сухая	Свежая	Влажная	Сырая	Мокрая
Олиготрофы	А	Индекс эдафотопы	A1	A2	A3	A4	A5
		Тип леса	Сосняк-лишайниковый	Сосняк-брусничник	Сосняк-черничник	Сосняк-чернично-долгомошный	Сосняк-сфагновый
Мезотрофы	В	Индекс эдафотопы	B1	B2	B3	B4	B5
		Тип леса	Сосняк-разнотравно-лишайниковый	Сосняк-разнотравно-зеленомошный	Сосняк-влажнотравно-черничный	Сосняк-влажнотравно-долгомошный	Сосняк-пушицево-сфагновый
Мезомегатрофы	С	Индекс эдафотопы	C1	C2	C3	C4	C5
		Тип леса	Ельник-неморально-разнотравный	Ельник-кисличник	Ельник-кислично-папоротниковый	Ельник-таволгово-хвоощовый	Ельник-болотнотравный

Олиготрофы	Условное обозначение местообитания	A1	A2	A3	A4	A5
	Потенциальный бонитет	4	2	3	5	--
Мезотрофы	Условное обозначение местообитания	B1	B2	B3	B4	B5
	Потенциальный бонитет	4	2	1	2	5
Мегатрофы	Условное обозначение местообитания	C1	C2	C3	C4	C5
	Потенциальный бонитет	2	1a	1	3	4

Потенциальные бонитеты еловых древостоев



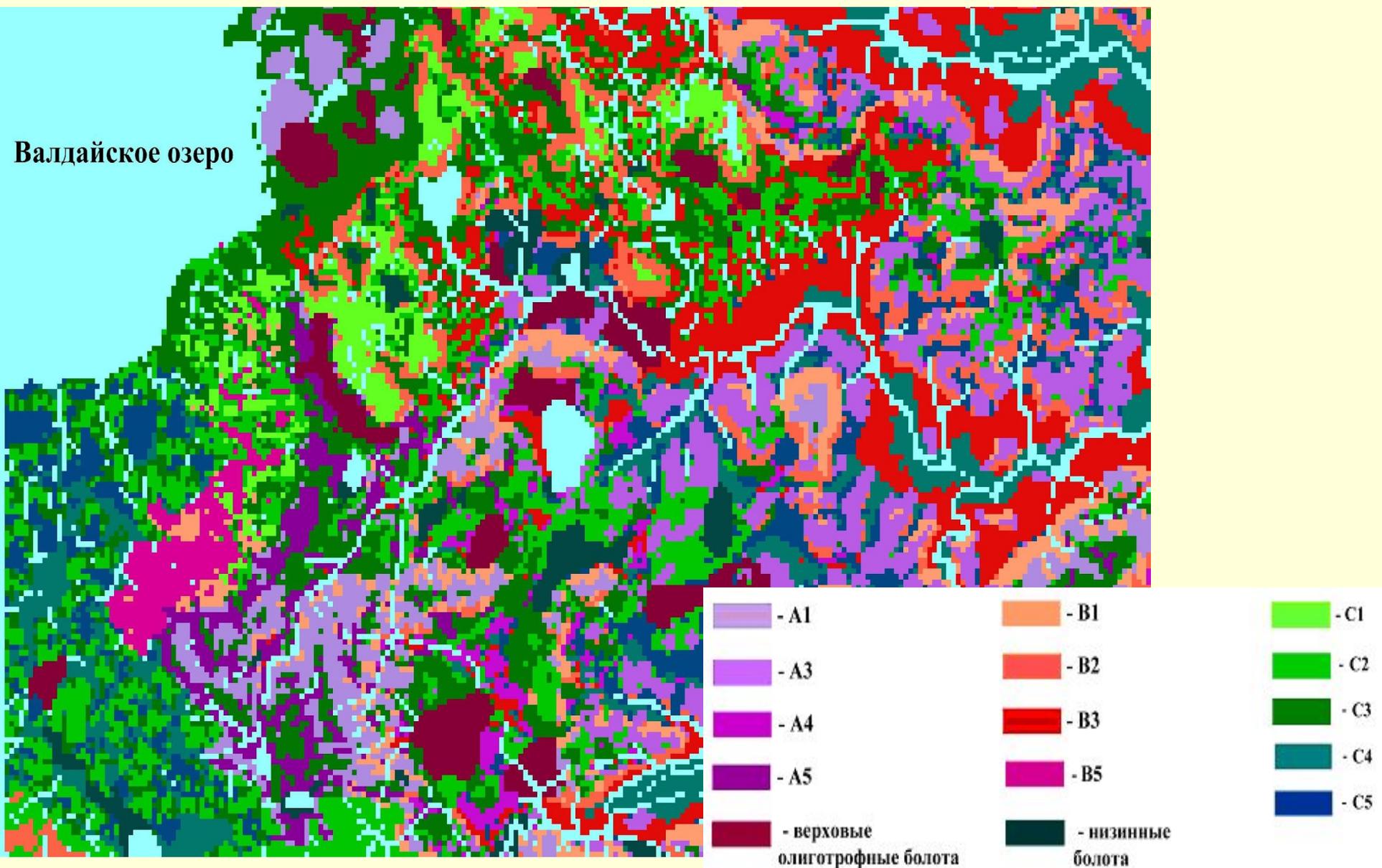
Основные диагностическими признаками ТУМ :
элемент рельефа и состав поверхностных отложений,
глубина грунтовых вод, травяной покров, содержание
гумуса и вид почв.

На ландшафтном уровне дифференциация ТУМ
определяется **формами рельефа и составом отложений**.
На внутриландшафтном уровне основными факторами
дифференциации ТУМ являются **грунтовые воды и
плодородие почв**.

Моделирование для каждого ландшафта методом
дискриминантного анализа показало достоверность (>60%)
обусловленности ТУМ морфометрическими параметрами
градиентов геофизических полей тяготения и инсоляции.

Карта потенциальных ТУМ растительности

Построена по обучающей выборке методами дискриминантного анализа



Совмещение лесотаксационных выделов с потенциальными ТУМ

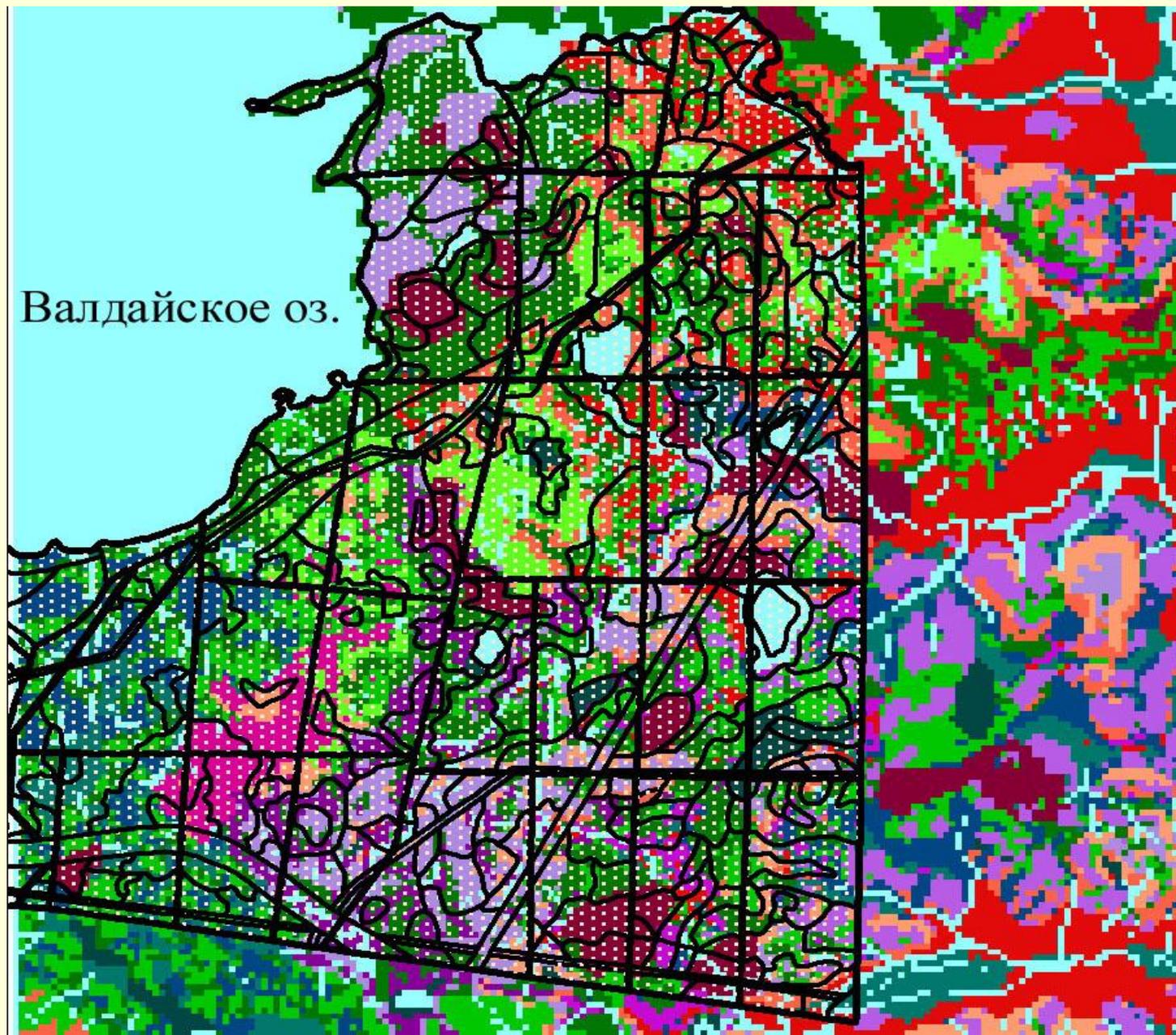


Таблица совмещения лесотаксационных выделов и ТУМ

ПТК		ТУМ	выдела (KV/VD)
100	Местность холмисто-грядово-западинной конечно-моренной суглинистой равнины с ельниками папоротниково-разнотравно-кислично-кустарничковыми на дерново-палевоподзолистых почвах		
	выпуклые вершинные поверхности холмов с ельниками разнотравно-черничными и папоротниковыми на дерново-палевоподзолистых остаточно-карбонатных и контактно-отбеленных почвах;	С1 и С2	1-4001
	крутые и крутопокатые склоны холмов с ельниками чернично-зеленомошными и разнотравно-кисличными на смытых дерново-скрытоподзолистых контактно-отбеленных почвах ;	С2	1-7001 3-2003 3-4003
	пологие и пологопокатые склоны холмов с сосново-березово-еловыми чернично-майниковыми и кисличными лесами на дерново-скрытоподзолистых контактно-отбеленных глееватых почвах	С3	1-5001 1-7001 3-3003
	пологонаклонные ровные поверхности с размытой супесчаной моренной с осиново-березово-еловыми кислично-зеленомошными лесами на дерново-скрытоподзолистых контактно-отбеленных глееватых и глеевых почвах	С4	1-3001 1-8001

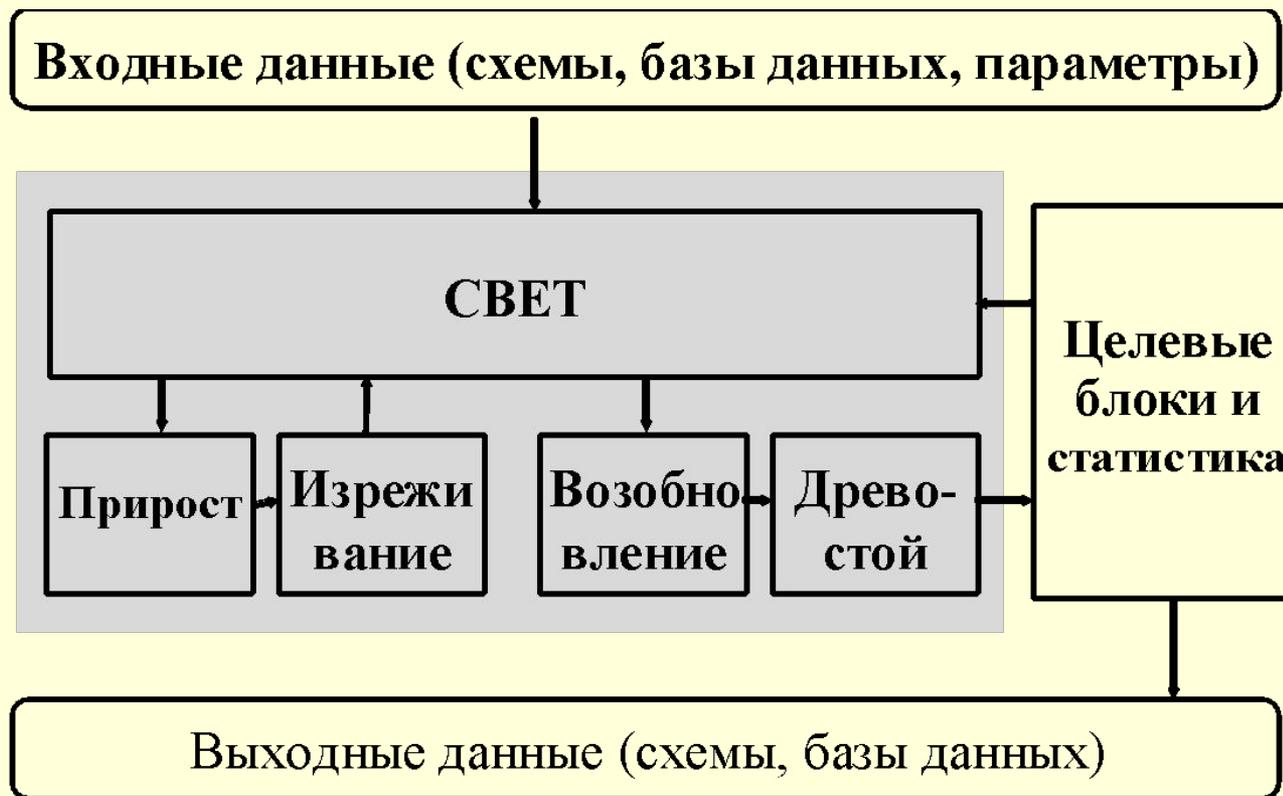
III. Моделирование продуктивности лесных ландшафтов.

Продукционные процессы рассматриваются *с позиций физико-математического моделирования*, на основе моделей переноса излучения, тепла, влаги, элементов питания и моделей фотосинтеза, дыхания и перераспределения ассимилятов.

Требования к модели пространственной динамики древостоя:

- используются **стандартные данные** лесного хозяйства;
- в основе известные **биоэкологические характеристики процессов**, протекающих в реальных лесных сообществах;
- моделируется **динамика лесного сообщества в целом** (полог леса);
- прямой учет **пространственного распределения древостоя и неоднородности условий произрастания**
- **воздействие хозяйственной деятельности** на конкретные участки лесного фонда прогнозируется **в соответствии с нормативами**
- базовым является **повыдельный уровень**, на котором планируются и реализуются все лесохозяйственные воздействия,
- **прогноз развития древостоя и моделирование разных вариантов хозяйственных воздействий** проводится **для уровня лесничества.**
- блочная **открытая структура построения модели**, позволяющая модифицировать и дополнять учитываемые процессы и воздействия

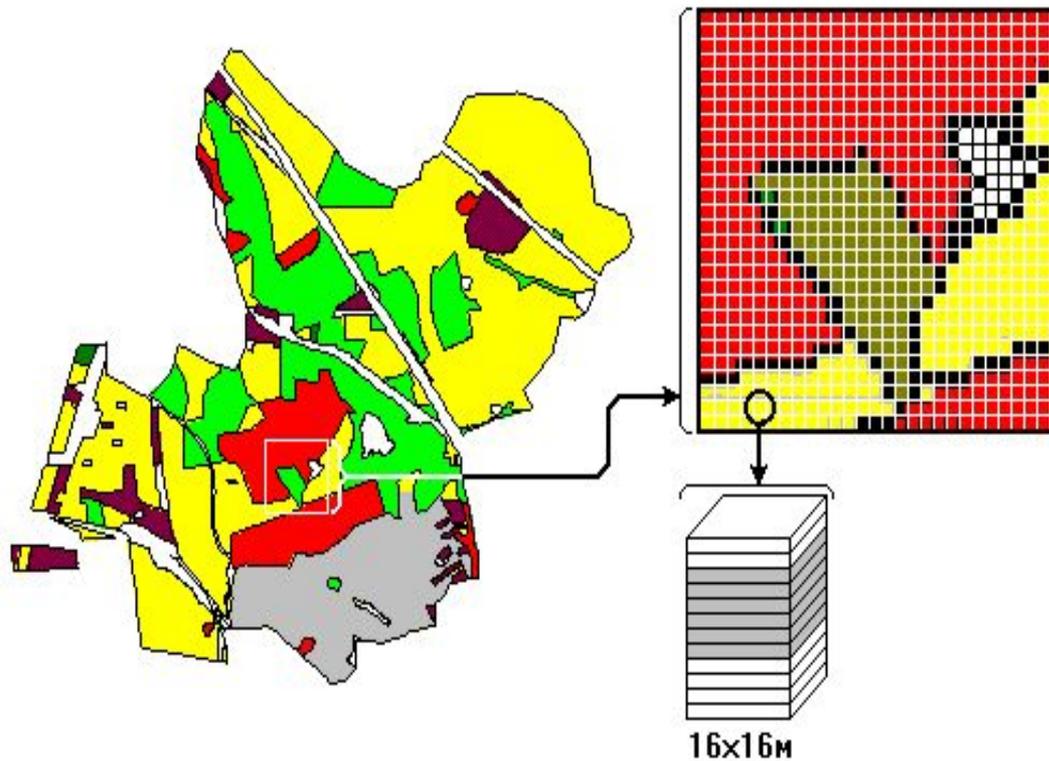
III.1. Структура и схема работы модели динамики древостоя



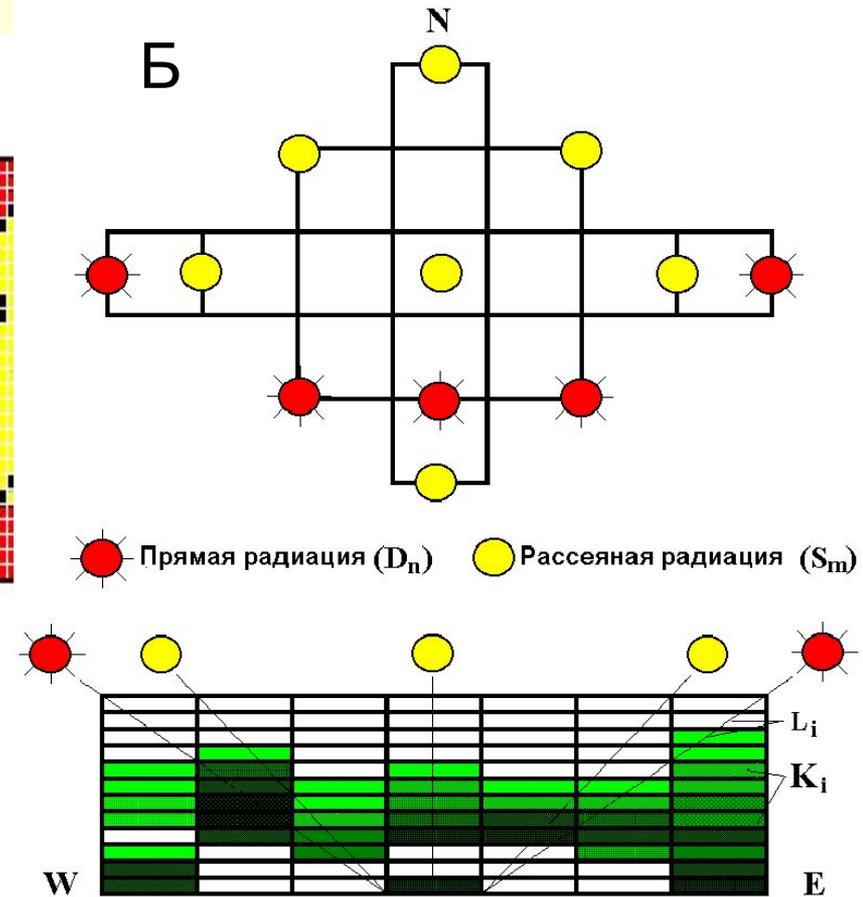
Выделения пространственных элементов (А) и расчет суммарной освещенности для каждой трехмерной ячейки (Б).

Показаны точки фиксации положения солнца по азимуту и порядок прохождения луча солнца через ячейки при расчете освещенности под пологом леса

А



Б

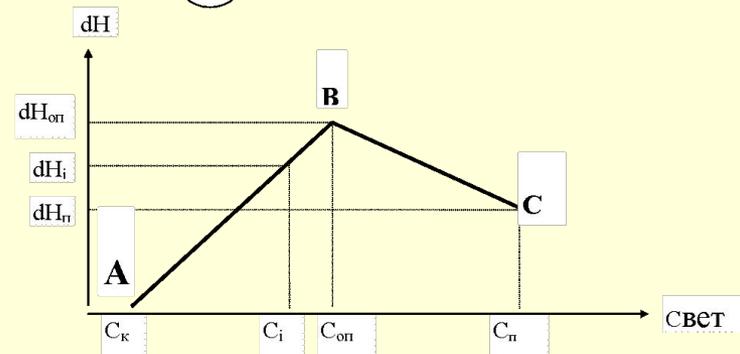
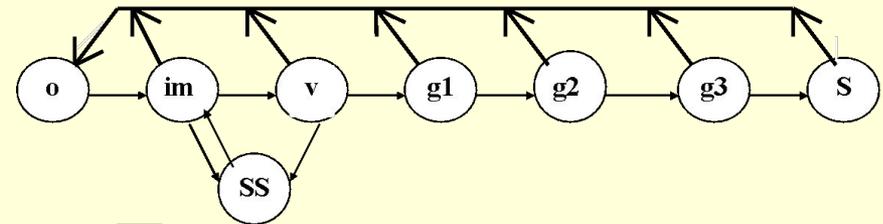
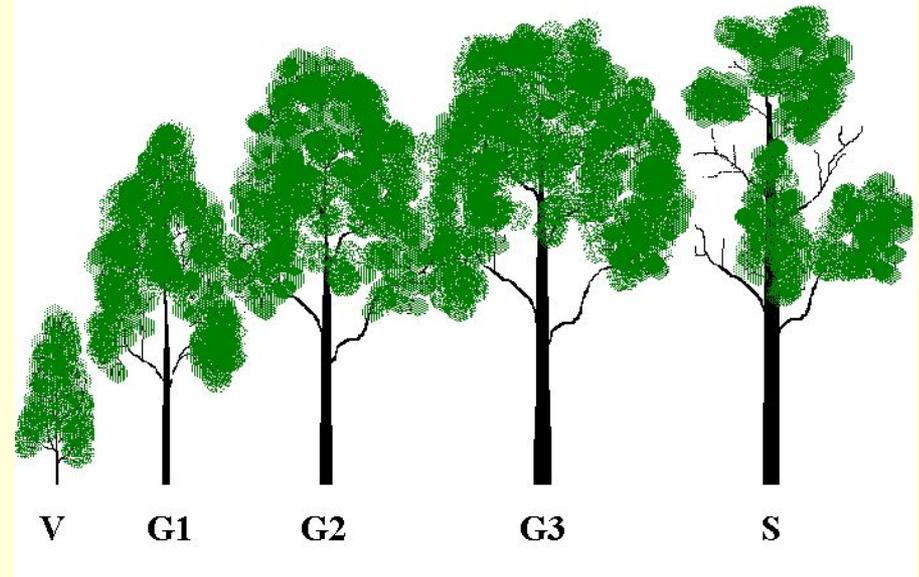


$$C = \sum_n D_n \prod_i K_i^L + \sum_m S_m \prod_i K_i^L$$

III.2. Основные положения модели динамики разновозрастного

многопородного древостоя [С. И. Чумаченко 2004].

- моделируемое пространство древостоя расчленяется на трехмерные ячейки конечного размера;
- биологические свойства древесных особей изменяются во времени дискретно, в соответствии с периодизацией онтогенеза;
- временной ряд состояний каждой ячейки составляет всегда замкнутый цикл;
- переход каждой ячейки из одного состояния в другое определяется текущим состоянием ячейки и состоянием смежных с ней ячеек
- основной фактор роста деревьев ФАР, остальные факторы задаются ТУМ и бонитетом насаждения для каждого выдела;
- расчет освещенности в соответствии с концепцией "мутного" слоя, при прохождении через который часть света поглощается;
- поглощенная радиация расходуется на прирост в соответствии с видоспецифической световой кривой фотосинтеза;



Математическая постановка задачи динамики многопородного древостоя

1. $H_i(t) = f[H_i(t - dt), C_i(t), P_i(t), VP_j] + e$
2. $D_i(t) = f[D_i(t - dt), C_i(t), P_i(t), VP_j] + e$
3. $S_i(t) = f[S_i(t - dt), S_m(t), VP_j] + e$
4. $K_{jv}(t) = K_{jv}(t - dt) - L_{jv}(t) - E_{jv}(t) + R_{jv}(t) - R_j(v - p)(t)$
5. $C_i(t) = f[H_n(t - dt), S_n(t - dt), VP_j]$
6. $P_i(t) = f[S_m(t - dt), VP_j]$
7. $R_{jv}(t) = \begin{cases} f[K_{jv}(t - dt), VP_j], v \neq p \\ f[K_{jg}(t - dt), VP_j], v = p \end{cases}$
8. $L_{jv}(t) = f[VP_j, C, S, T]$

$K_{jv}(t)$ - количество (доля) деревьев j -ого вида в v -ом возрасте;
 $H_{jv}(t), D_{jv}(t)$ - ожидаемые средние высоты и диаметры деревьев;
 $S_{jv}(t)$ - средняя площадь, занимаемая видом в v -ом возрастном состоянии;
 v - элемент множества возрастных состояний $\{pl, jv, im1, im2, v1, v2, g1, g2, g3, s\}$;
 K_{jg} - количество генеративных особей.
 j - индекс вида ($j=1 \dots N$), N - общее количество видов.
 e - случайная составляющая функций

P_j - интегральный показатель качества местообитания, учитывающий влажность, трофность и механический состав почв, температурный режим и т.п. ;

V_j - видоспецифические параметры (скорость увеличения высоты, диаметра, площади кроны, теневыносливости, сквозистости кроны, максимальный возраст, разнос зачатков и т.д.)

$VP_j = f(V_j, P_j)$ - видоспецифические параметры, перечисленные выше, но с учетом условий конкретного местообитания

$H_i(t), D_i(t), S_i(t)$ - высота, диаметр и площадь кроны i -го дерева на момент времени t ;

$C_i(t)$ - освещенность кроны (результат кроновой конкуренции);

$P_i(t)$ - доступность питательных веществ и влаги (результат корневой конкуренции);

$R_{jv}(t)$ - количество появившегося подроста j -го вида, т. е. перешедшего в состояние "p" ($v=p$), либо количество особей, перешедших в v -е возрастное состояние ($v \neq p$);

$L_{jv}(t)$ - количество погибших особей от эндогенных причин (недостаточности света - C , площади питания - S , достижения предельного возраста T);

$E_j(t)$ - экзогенная составляющая отпада (рубки, пожары, болезни и пр.)

Формирование сценариев моделирования долгосрочного лесопользования на основе лесохозяйственных нормативов

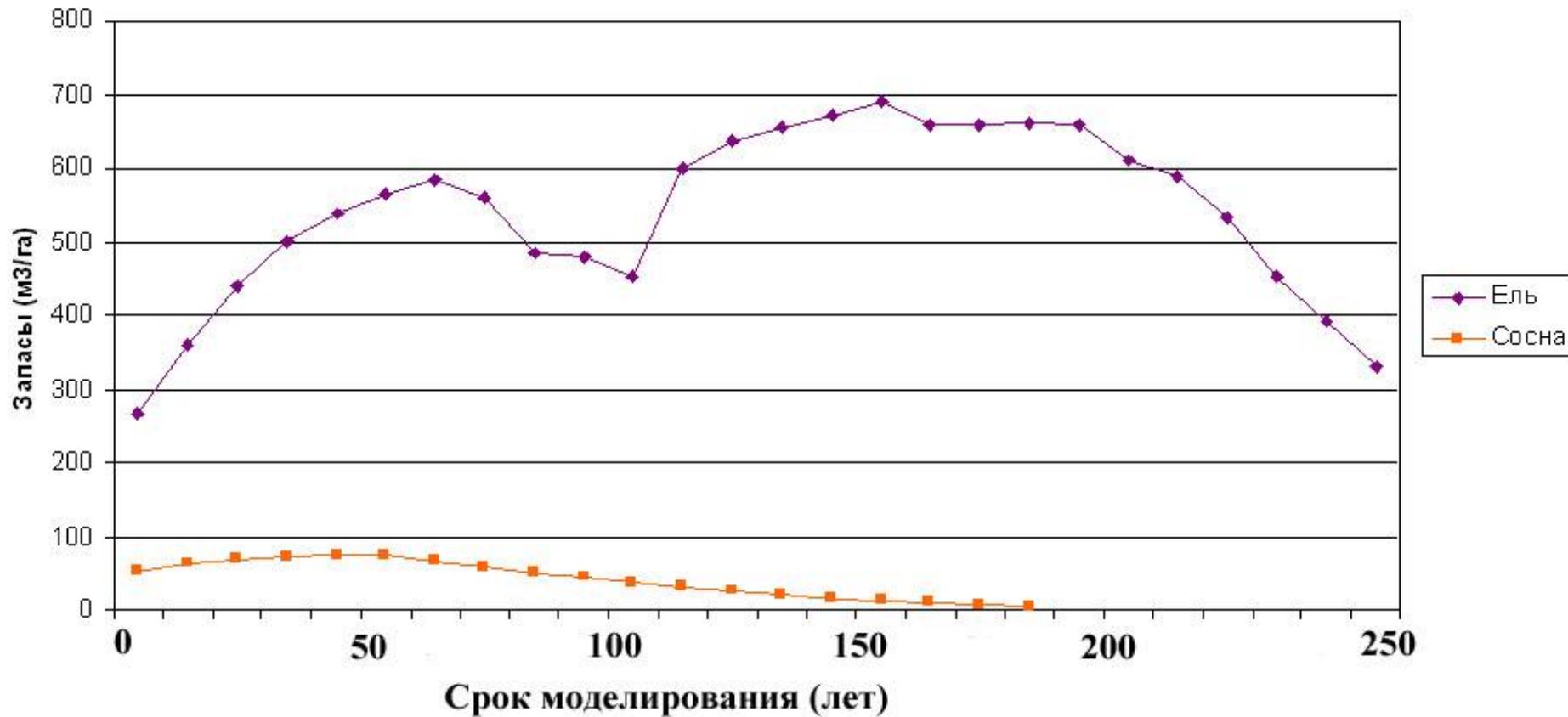


При численном моделировании были использованы сценарии:

- 1) без проведения каких-либо рубок, естественное самоизреживание и естественный распад древостоев – **фоновый сценарий**;
- 2) только с рубками главного пользования имитируются сплошные рубки при достижении древостоем возраста спелости - **жесткий экстенсивный сценарий**;
- 3) с рубками ухода и с рубками главного пользования (имитируются основные виды рубок ухода и сплошные рубки при достижении древостоем возраста спелости) - **жесткий интенсивный сценарий**.

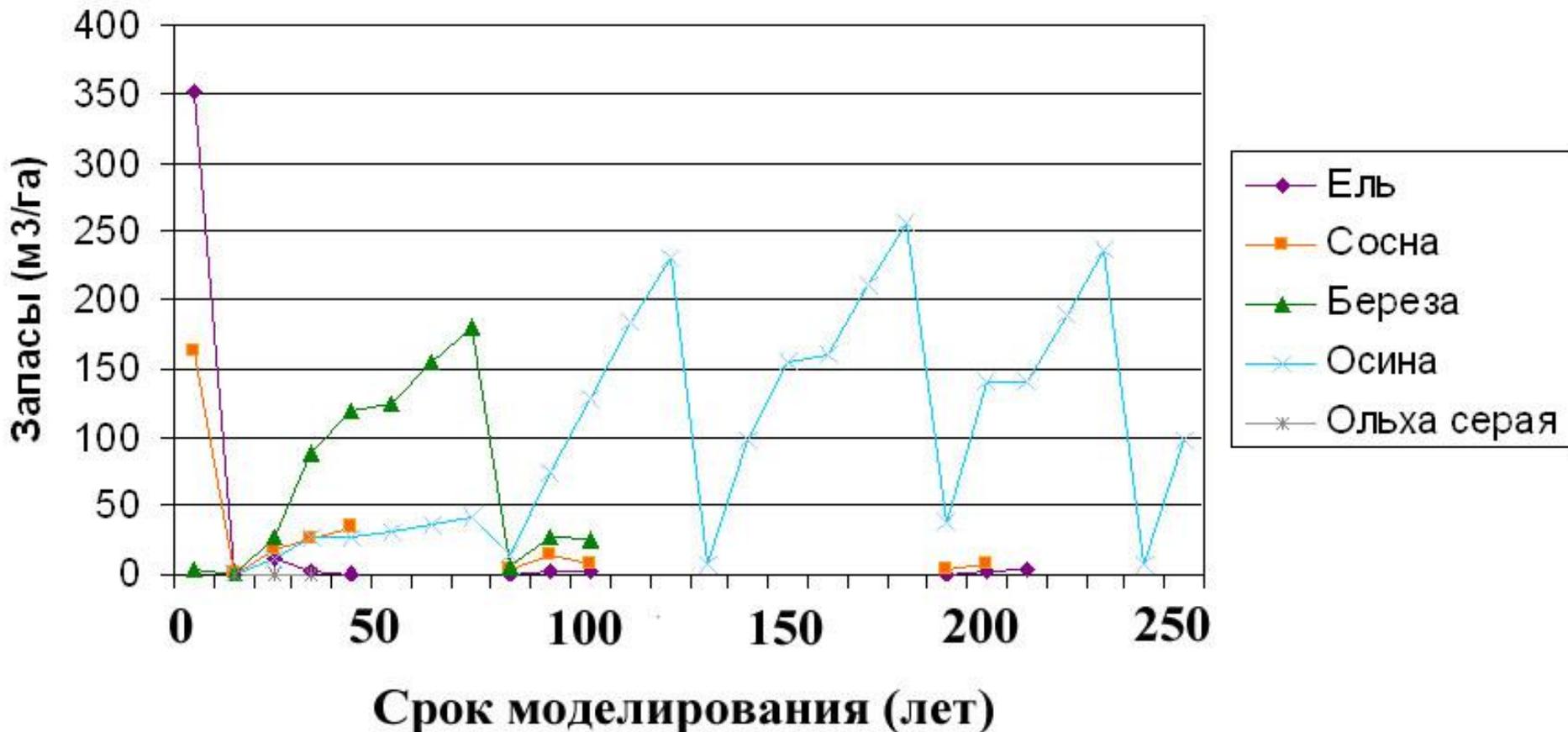
Вершинные поверхности моренных холмов

Изменение запасов в 1 ярусе древостоя при естественном самоизреживании

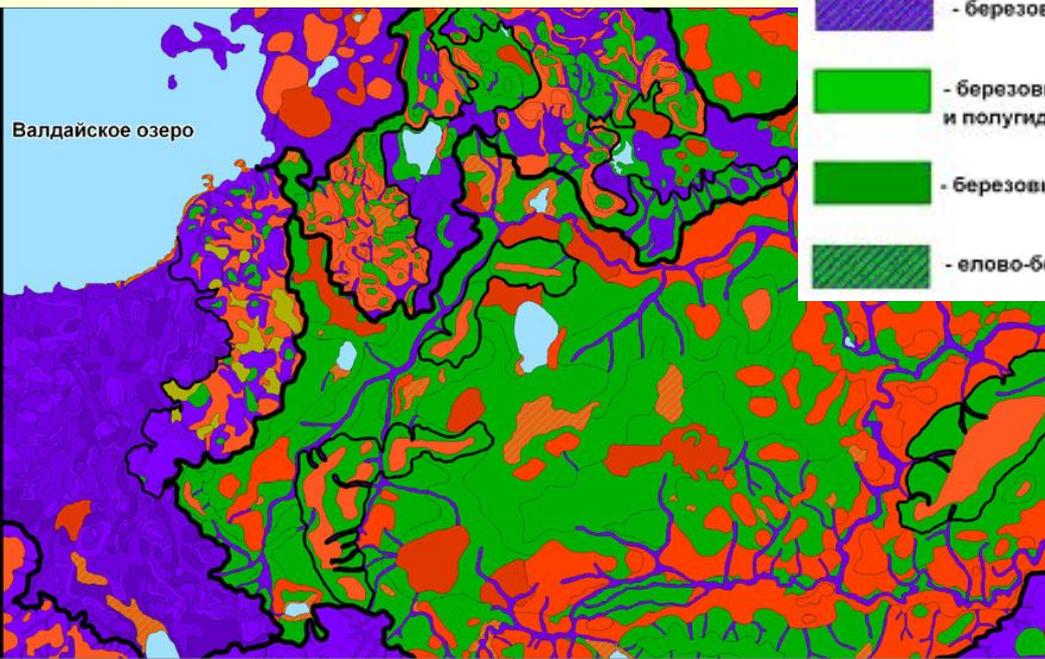
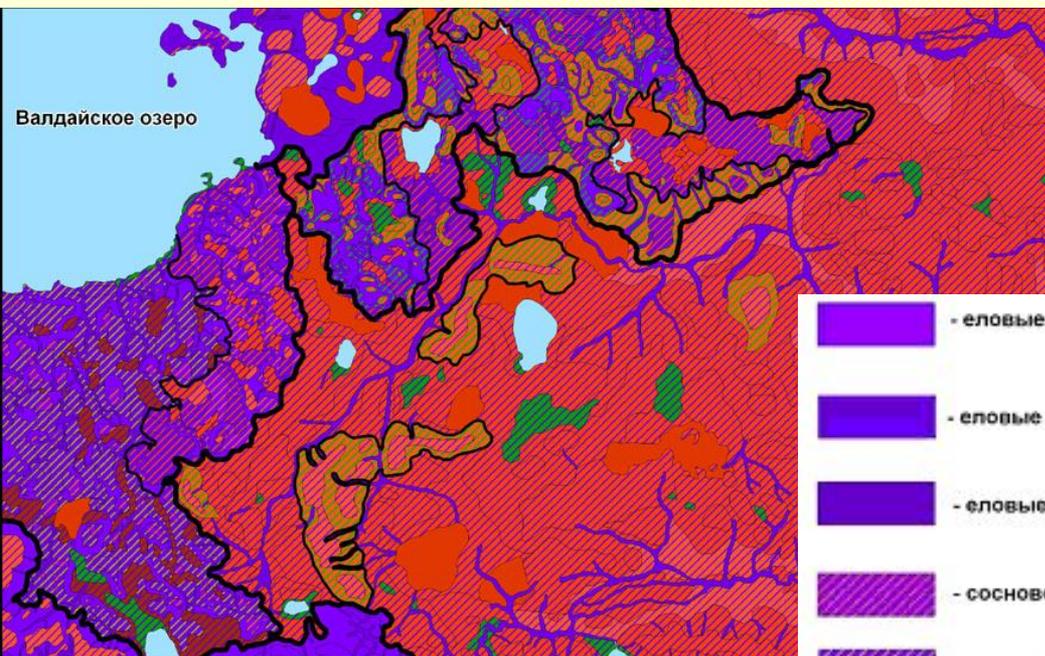


Крутые склоны камовых холмов

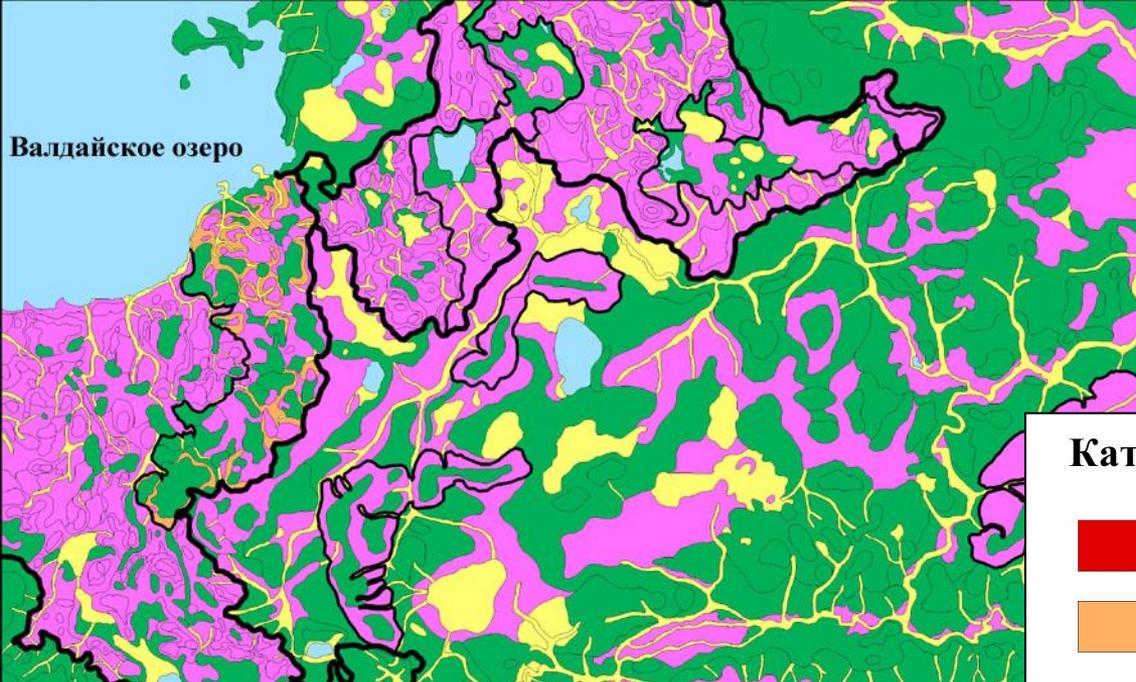
Изменение запасов в 1 ярусе древостоя при рубках главного пользования



Исходный породный состав лесов



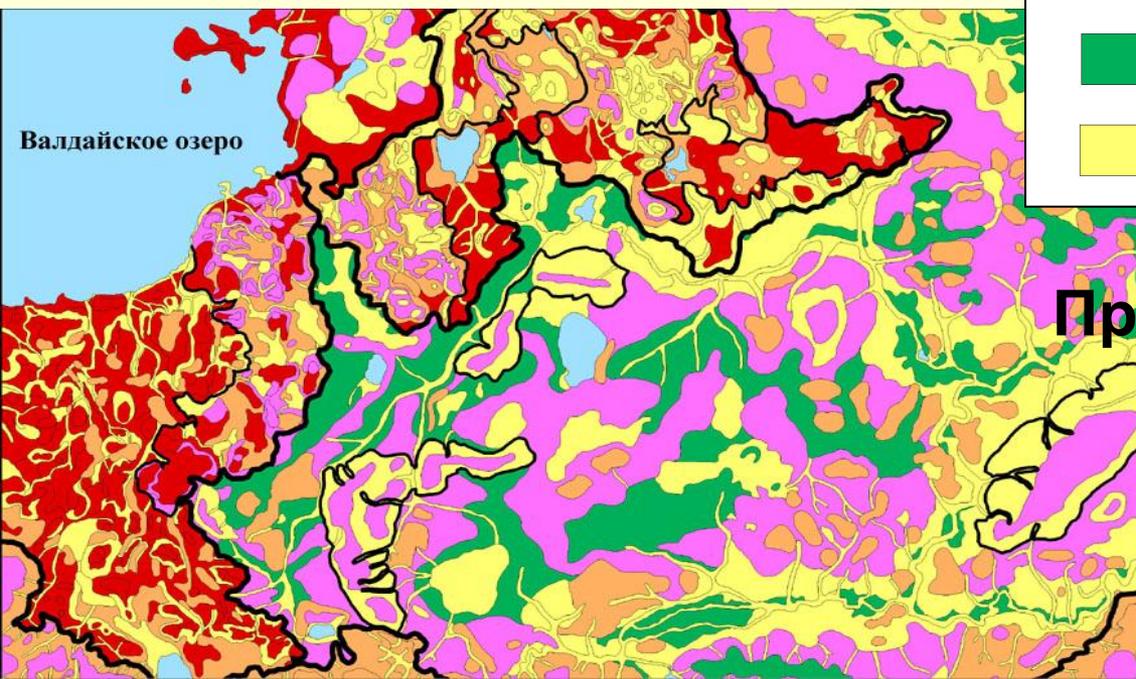
Прогноз состава лесов
при рубках главного пользования
через 200 лет.



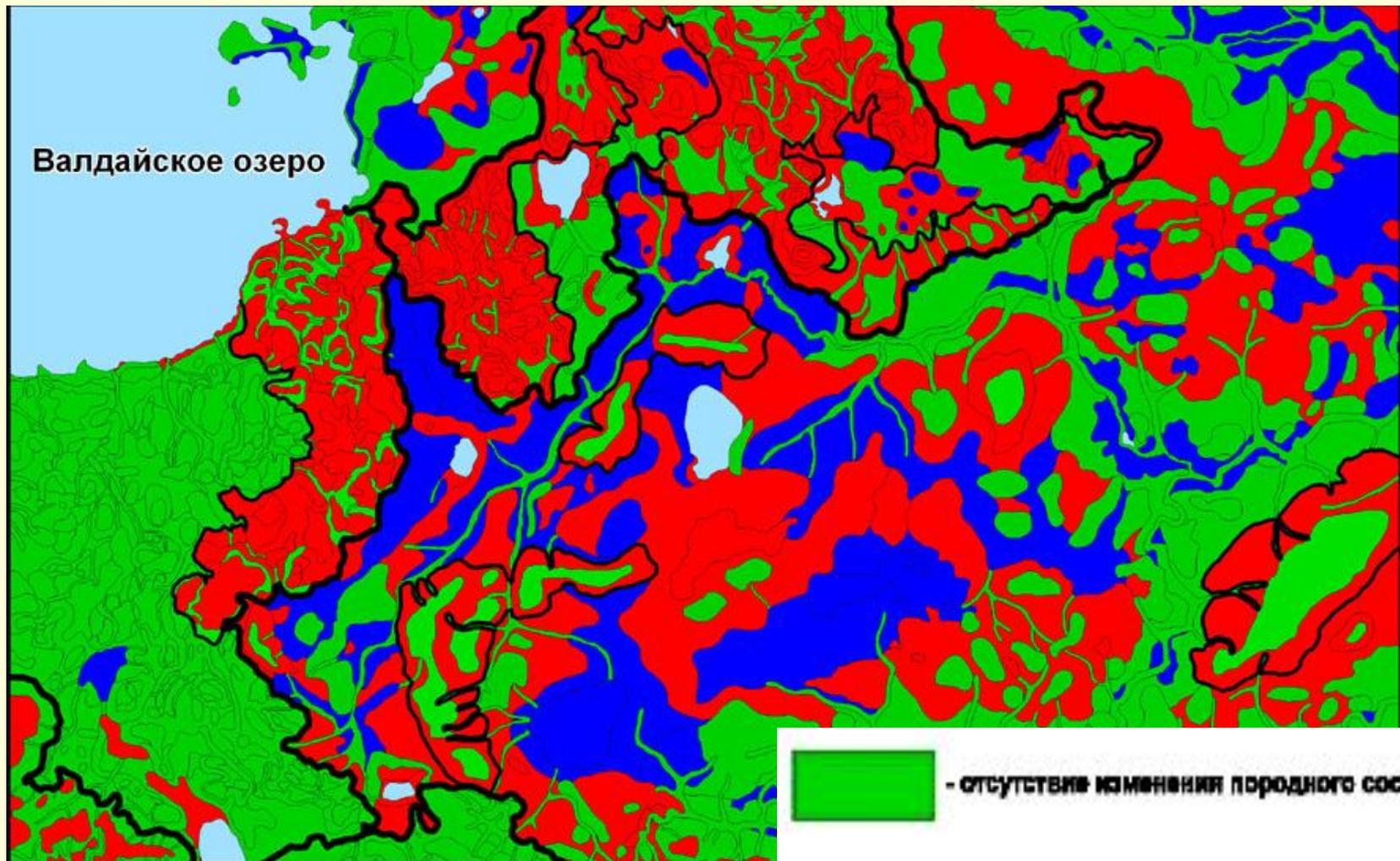
Исходные запасы стволовой древесины (м³/га)

Категории лесов по уровню запасов (м³/га)

-  - очень высокопродуктивные (>700 м³/га)
-  - высокопродуктивные (500-700 м³/га)
-  - продуктивные (300-500 м³/га)
-  - среднепродуктивные (100-300 м³/га)
-  - малопродуктивные (<=100 м³/га)



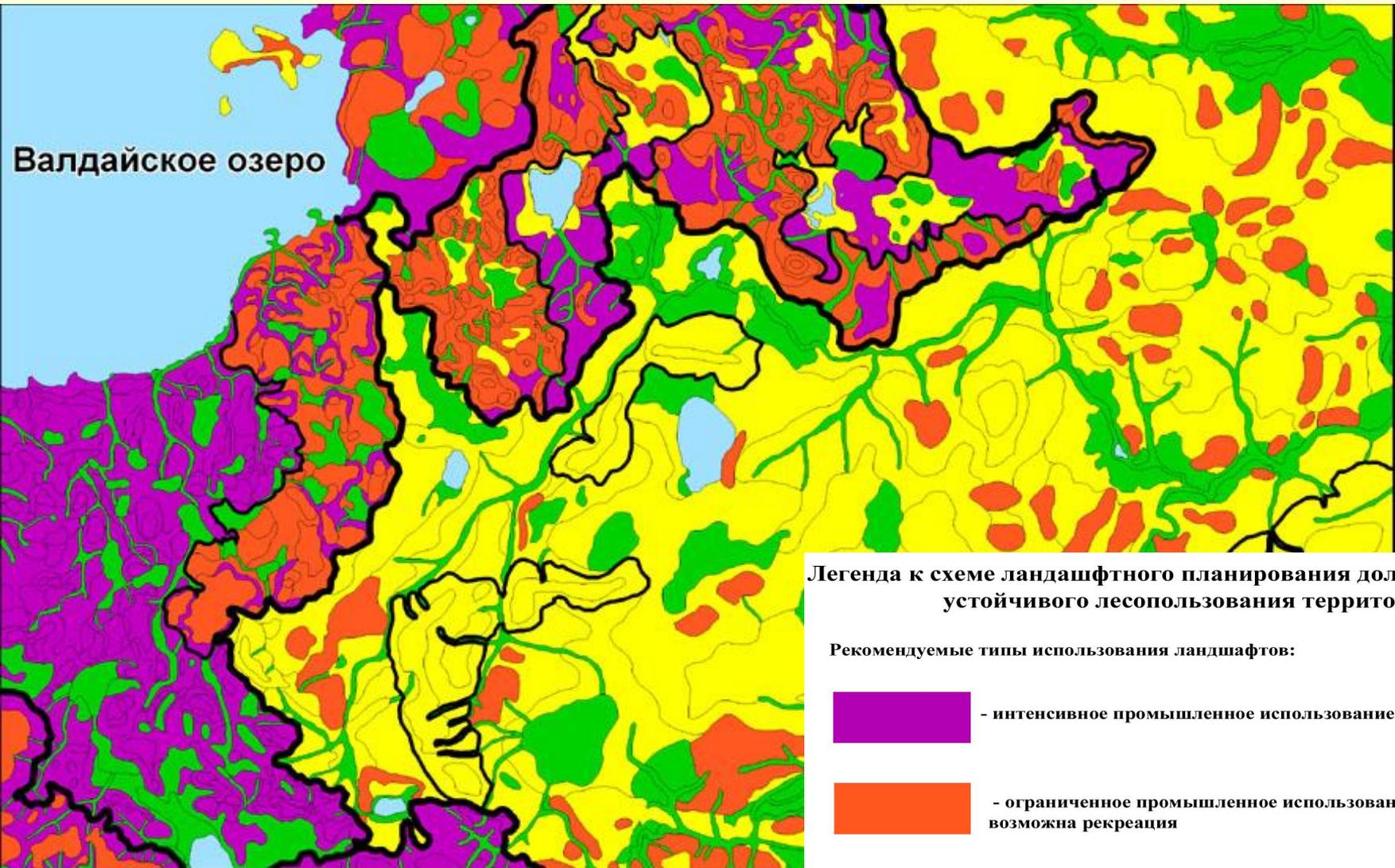
Прогноз запаса древостоя
при проведении рубок главного
пользования.



-  - отсутствие изменения породного состава леса
-  - значительное изменение породного состава леса (омена или выпад второстепенной породы)
-  - существенное изменение породного состава леса (смена главной породы)

Прогноз устойчивости структуры леса при рубках главного пользования на срок 200 лет.

IV.



Легенда к схеме ландшафтного планирования долгосрочного устойчивого лесопользования территории

Рекомендуемые типы использования ландшафтов:

-  - интенсивное промышленное использование
-  - ограниченное промышленное использование, возможна рекреация
-  - рекреационное использование, охотничьи угодья, создание ООПТ
-  - жесткое ограничение нагрузок, запрет любого вида природопользования, создание ООПТ

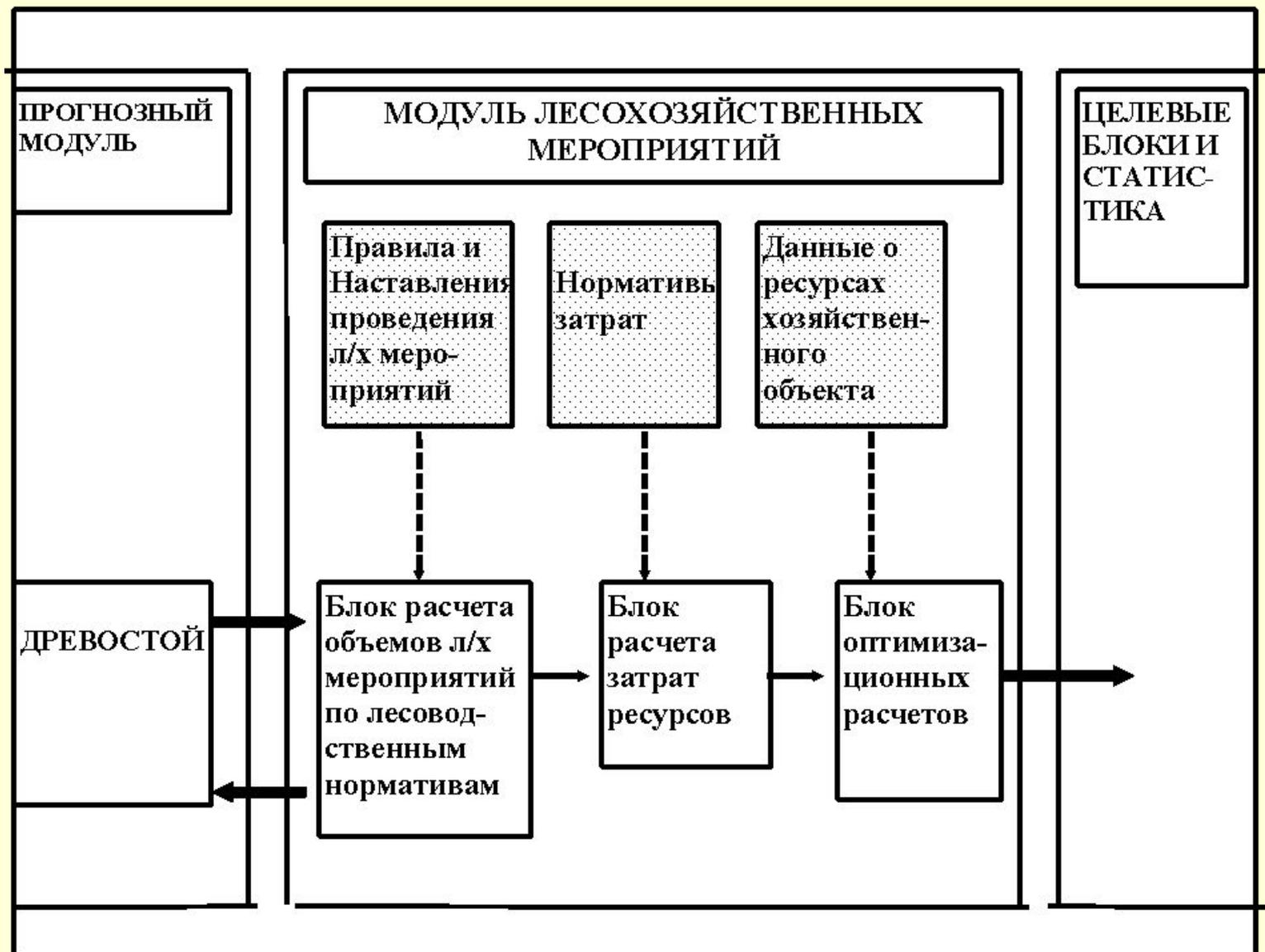
Схема ландшафтного планирования долгосрочного устойчивого лесопользования.

Моделирование показало

Устойчивость продукционных процессов в древостоях к лесохозяйственному воздействию тесно ***связана со структурой ландшафта*** :

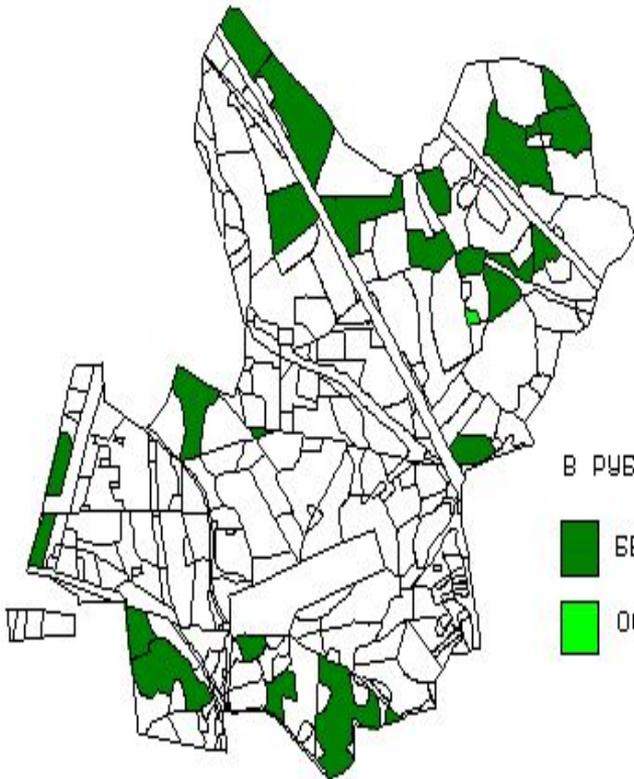
- в пределах конечно-моренного ландшафта формируются наиболее продуктивные и устойчивые к антропогенному воздействию леса, в которых рационально ведение интенсивных рубок главного пользования;
- в пределах камовой местности и камово-озового ландшафта формируются продуктивные, но менее устойчивые к антропогенному воздействию леса, в которых рекомендуются менее интенсивные рубки – выборочные и постепенные;
- неустойчивые к антропогенному воздействию леса формируются в местообитаниях озерно-водно-ледникового ландшафта, они имеют невысокий средний прирост и запас древесины, и рекомендованы для щадящего природопользования или создания на их базе ООПТ;
- наименее устойчивые леса с минимальным средним приростом и запасами древесины приурочены к местообитаниям долин рек и болот, где должно быть запрещено лесопользование.

Схема модуля управляющих лесохозяйственных мероприятий



Отбор выделов в рубки ухода и переформирования на основе пространственного запроса в ГИС к базе лесотаксационных данных

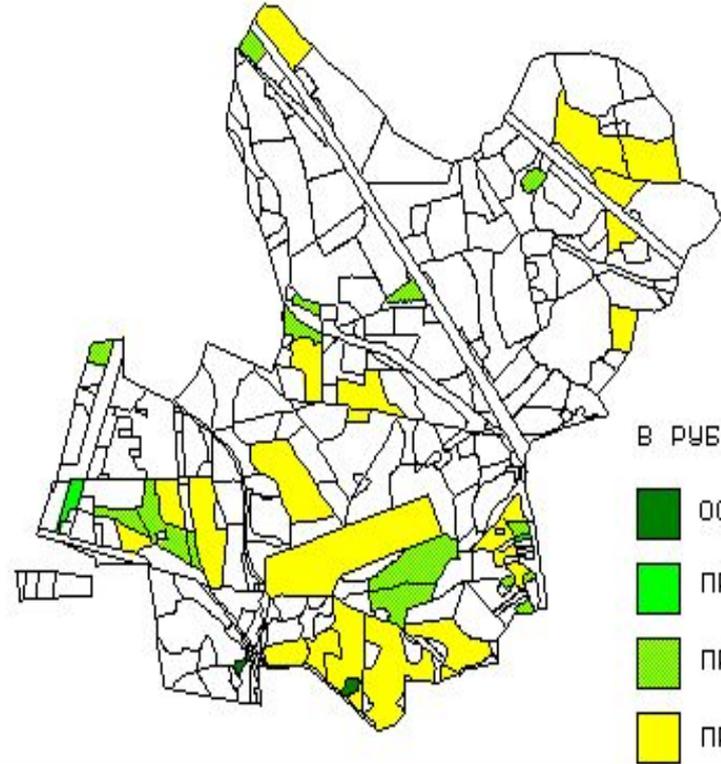
Заповедник – лесопарков
"ГОРКИ ЛЕНИНСКИЕ"



В РУБКУ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ.

- BEREZNYAKI.
- OSINNIKI.

Заповедник – лесопарков
"ГОРКИ ЛЕНИНСКИЕ"



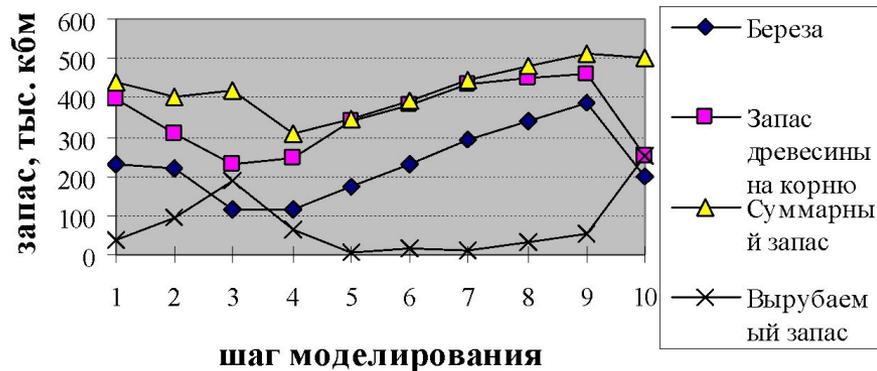
В РУБКУ УХОДА.

- OSVETLENIYA.
- PROCHISTKI.
- PROREZIVANIYA.
- PROKHODNYE.

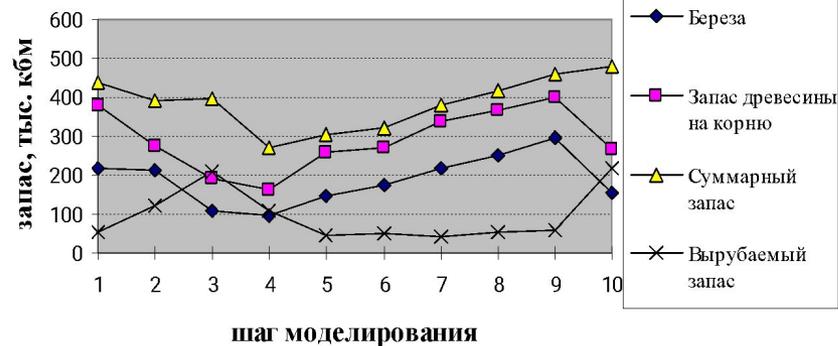
Изменение запасов древостоев в лесничестве

Слева имитация сплошных рубок главного пользования, справа имитация рубок главного пользования и рубок ухода. Шаг моделирования 10 лет.

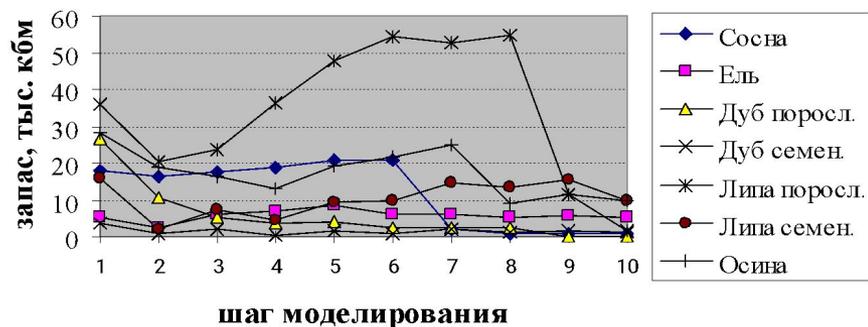
Рубки главного пользования



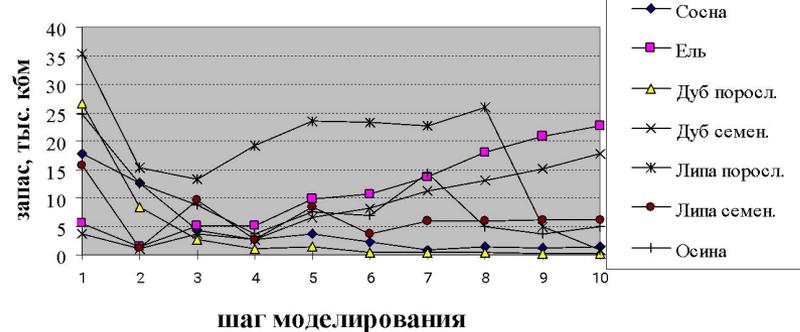
Вариант с рубками ухода



Рубки главного пользования



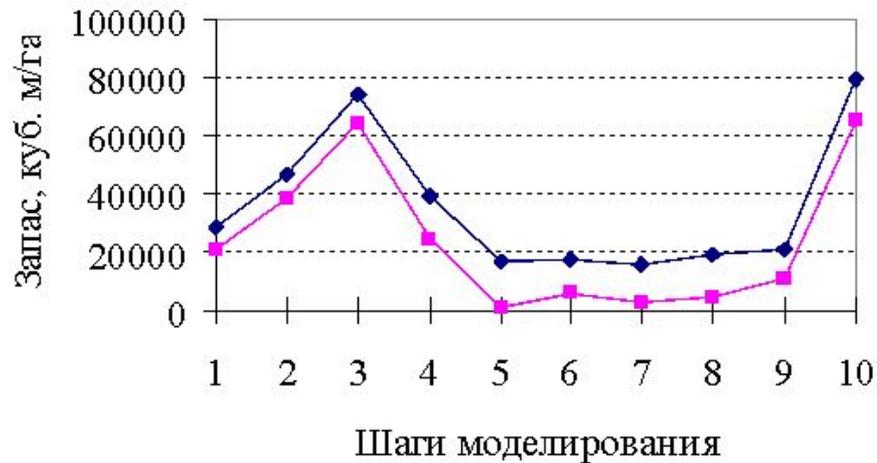
Вариант с рубками ухода



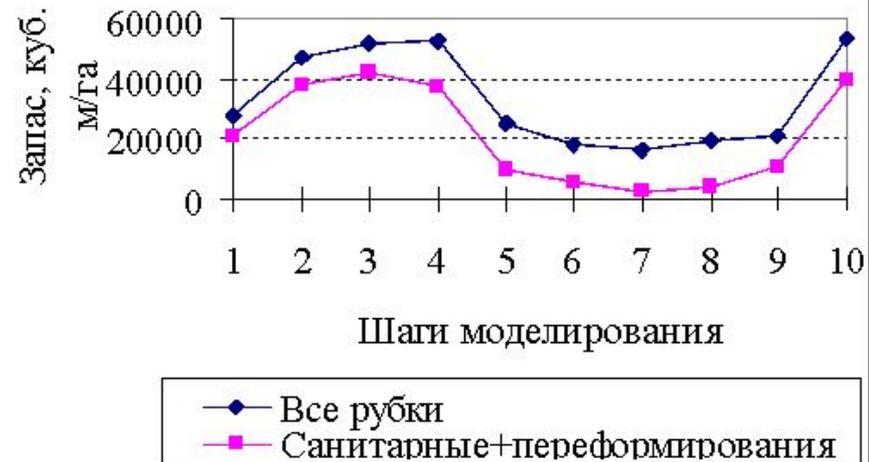
Объемы удаляемых запасов для моделируемого лесного массива, рассчитанные на десятилетние периоды.

Слева расчет по лесоводственным нормативам, справа - скорректированные объемы удаляемых запасов с учетом трудовых и материально-технических ресурсов.

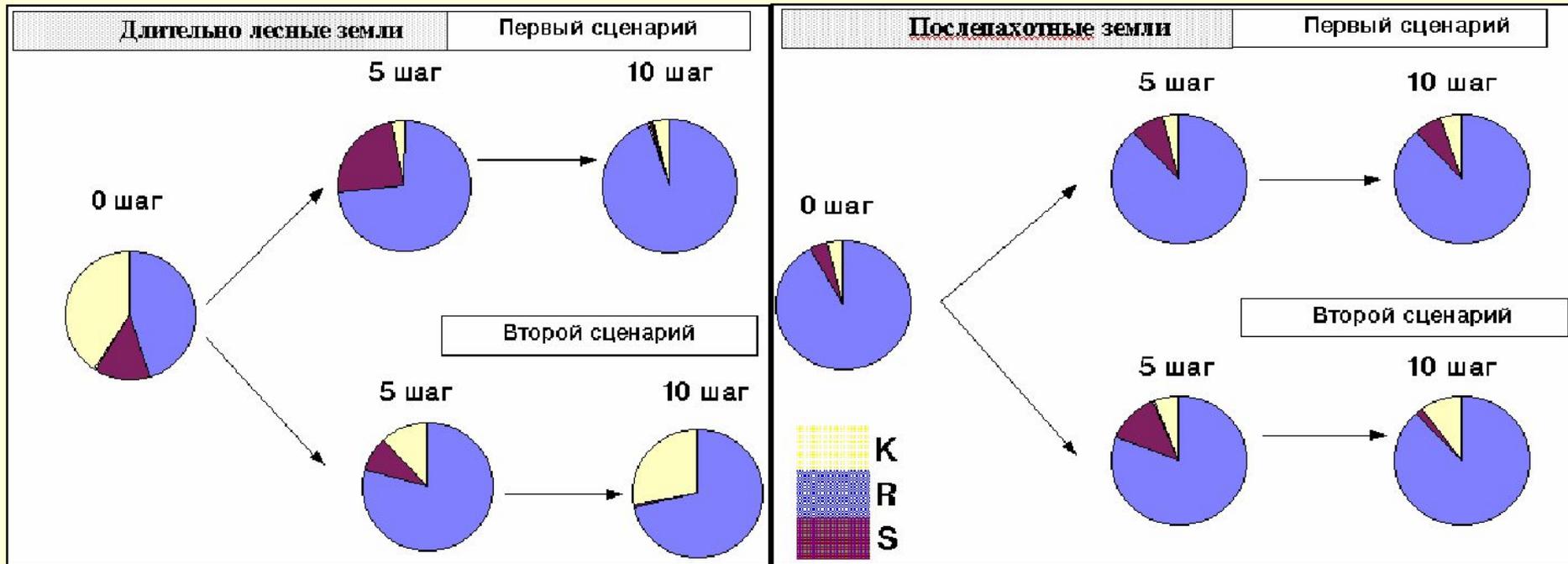
Объем удаляемого запаса по лесоводственным требованиям



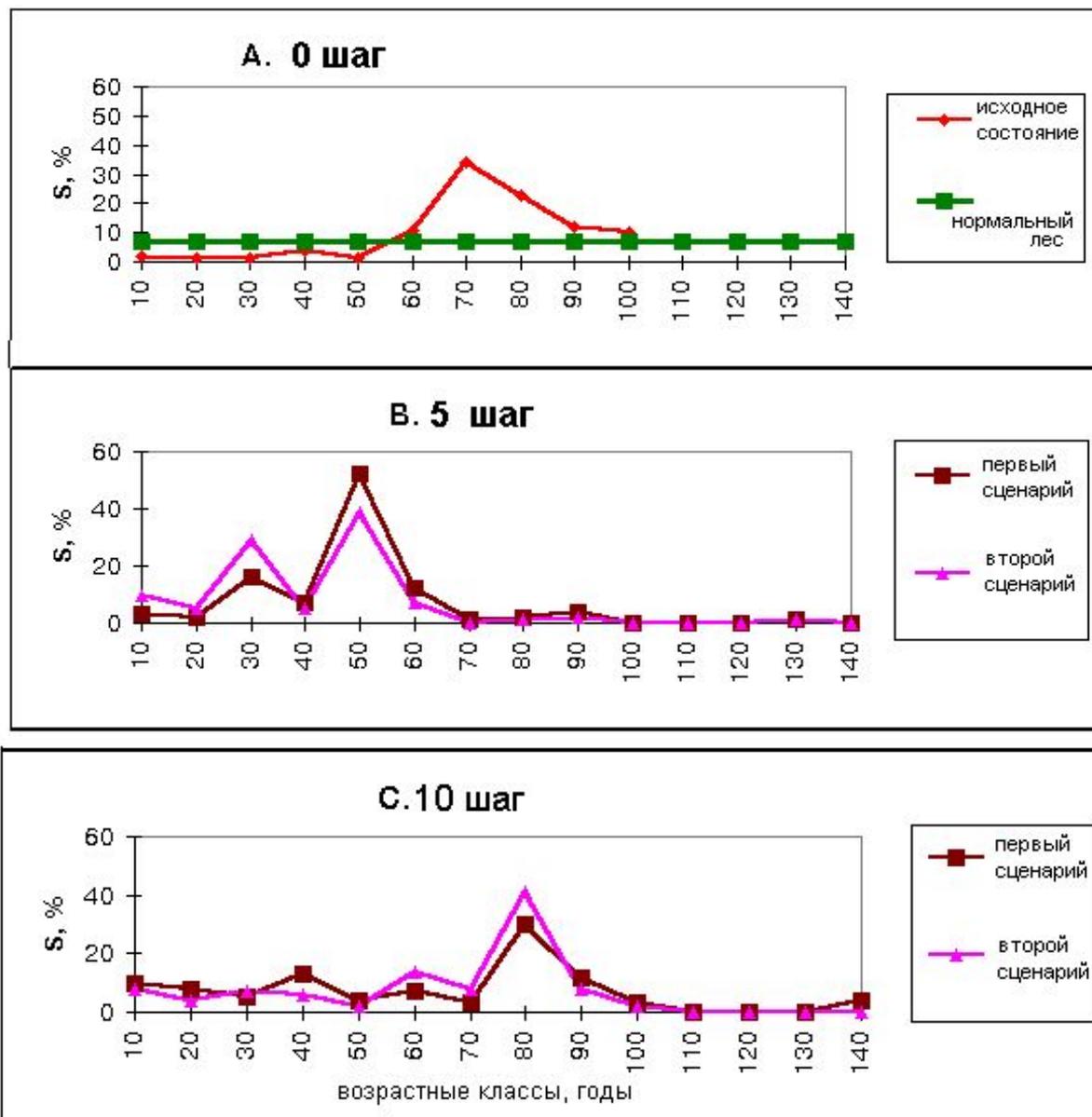
Объем удаляемого запаса с учетом экономических возможностей



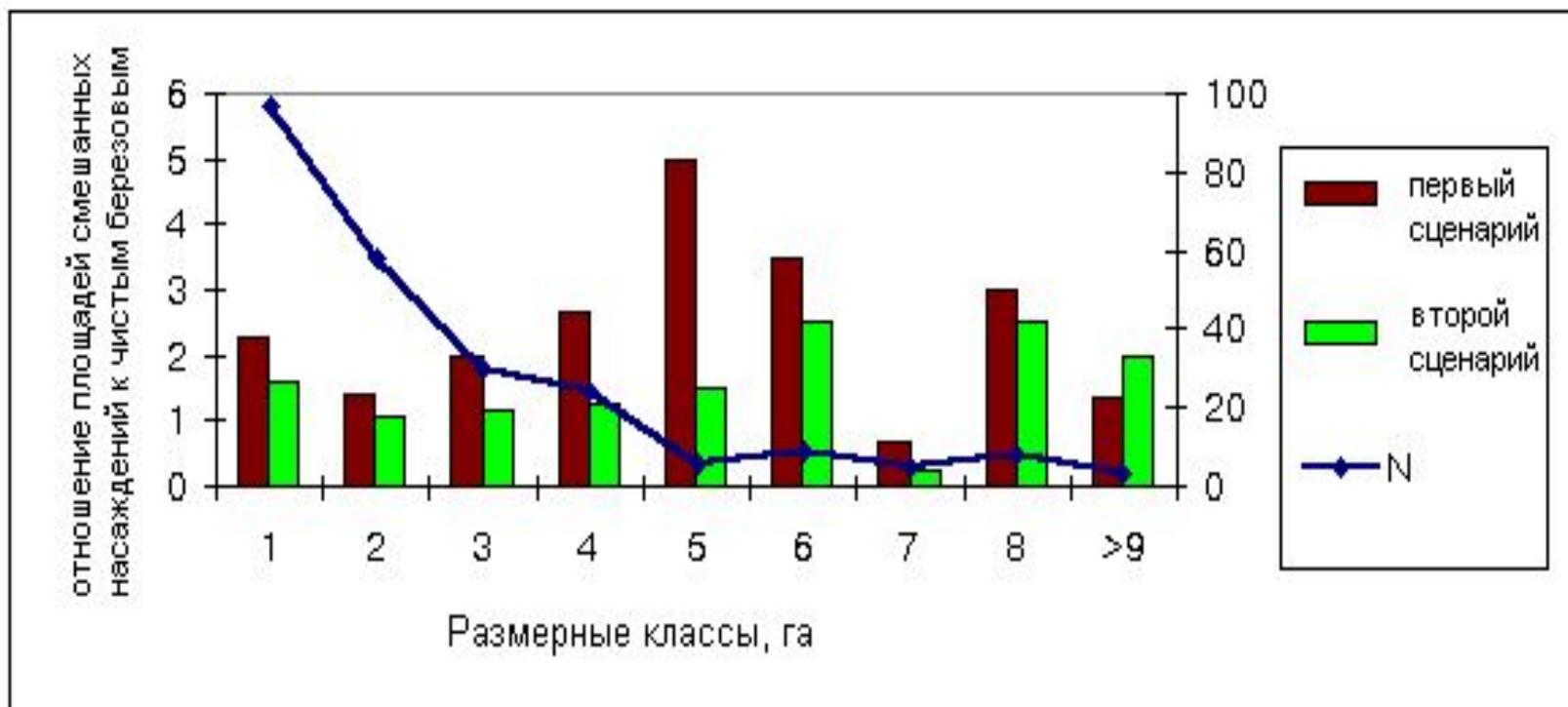
Изменение площадей древостоев разных типов стратегий при разных сценариях лесохозяйственных мероприятий на разных типах земель. (К- конкуренты, S - толеранты, R - рудералы)



Возрастная структура насаждений при разных сценариях моделирования



Частотное распределение площадей выделов (N) и индекса породного разнообразия (отношение площадей смешанных насаждений к чисто березовым насаждениям) на 10 шаге моделирования.

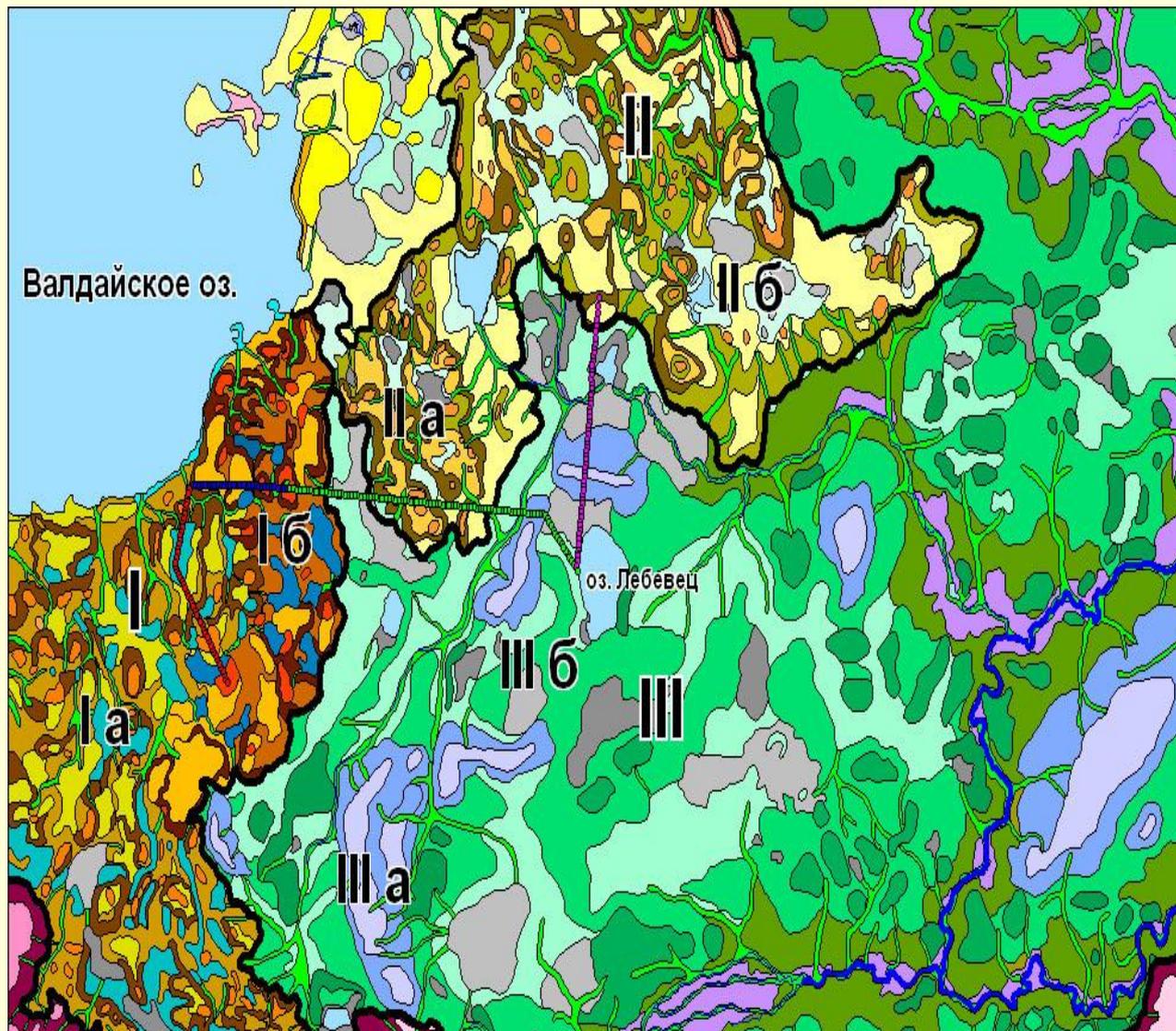


Выводы

1. На основе теории геосистем и теории оптимизации предложена методология ландшафтного планирования долгосрочного устойчивого лесопользования
2. При оптимизации лесопользования структура геосистем является необходимым граничным условием, а лесохозяйственные мероприятия - управляющим воздействием
3. Разработана методика прогнозирования продуктивности и состава древостоев на основе моделирования типов условий местообитаний (ТУМ) и динамики древостоя.
4. Разработан новый информационный слой – ландшафтно обусловленные ТУМ, характеризующий геосистемные условия, определяющие развитие насаждений
5. На основе долгосрочного прогнозирования развития древостоя по контрастным сценариям лесопользования разработаны схема и рекомендации ландшафтного планирования лесопользования



Фрагмент ландшафтной карты исследованной территории Шуйского лесничества (точками нанесены ландшафтные транссекты)



Легенда ландшафтной карты

I. Моренная суглинистая равнина с камовыми холмами с еловыми и сосново-еловыми кислично-зеленомошными лесами на дерново-палевоподзолистых почвах

I а. Холмисто-рядовая моренная равнина с ельниками чернично-зеленомошными на смытых дерново-палевоподзолистых почвах

I б. Мелкохолмистые камовые супесчаные комплексы на суглинистой морене с березово-сосново-еловыми кислично-зеленомошными лесами на дерново-палевоподзолистых почвах

II. Камово-озовая песчано-супесчаная равнина на озовых конусах выноса с сосново-еловыми папоротниково-майниково-кисличными лесами на иллювиально-железистых дерново-подзолах

II а. Мелкорядово-холмистые супесчаные камы на озовых конусах выноса с сосново-еловыми чернично-майниковыми лесами на слабосмытых иллювиально-железистых дерново-подзолах

II б. Плоские заболоченные песчано-супесчаные поверхности на озовых конусах выноса с березово-еловыми чернично-осоковыми лесами на контактно-осветленных дерново-подзолах.

III. Озерно-водно-ледниковая равнина с крупнохолмистыми песчаными камовыми комплексами с сосново-еловыми долгомошными лесами на контактно-осветленных дерново-подзолах;

III а. Крупнохолмистые песчаные камы с сосновыми лесами на ожелезненных подзолах

III б. Заболоченные плоские местности и террасы озер