

УДК 57.034; 519.254

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО ФАКТОРАМ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ОПИСАНИЙ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

©Кислов Д.Е., Петропавловский Б.С., Брижатая А.А.  
*Ботанический сад-институт ДВО РАН, г. Владивосток*  
*kisl\_di@mail.ru, al-lus@mail.ru*

Рассмотрены методические аспекты использования материалов лесотаксационных описаний для задач изучения экологии и географии лесобразующих пород. Исследована проблема реконструкции лесного покрова на ландшафтном уровне на основе количественных связей преобладающих пород с ведущими геоморфологическими факторами среды. Выполнен сравнительный анализ методов для решения задачи тематико-картографического моделирования растительности.

**Ключевые слова:** экологический оптимум, математико-картографическое моделирование лесобразующих видов, Приморский край

### Введение

В связи с возрастающим антропогенным давлением на природную среду все большее значение приобретают методические вопросы изучения возможных изменений структуры и функционирования растительности как ведущего компонента биосферы, от состояния которого зависит устойчивость и динамические процессы экосистем разного иерархического уровня.

Значительный интерес представляет вопрос об использовании массовых лесоустроительных сводок, характеризующихся в сравнении с геоботаническими относительно невысокой точностью описания фитоценозов, но позволяющих успешно решать прогнозные задачи (Петропавловский, 2003).

Преимущество массового описания лесной растительности (что характерно при лесоустроительных работах) состоит в том, что за счет большого количества материала на значительной площади, соизмеримой с крупными регионами, можно установить особенности структуры лесного покрова, распространения лесобразующих пород и лесных сообществ различного типологического уровня.

Методический аппарат, используемый для решения задачи прогнозирования структуры растительного покрова по факторам среды, опирается на математическую теорию принятия решений, предоставляющую достаточно богатый спектр методов с учетом интенсивного современного развития вычислительных средств, и нередко отождествляется в зарубежной литературе с направлением

«обучения машин» (например, зарубежный журнал «Machine learning»).

В предлагаемой работе для построения моделей растительного покрова применяются два подхода – баесовский метод, основанный на локальной оценке плотности вероятностей, – *k*-ближайших соседей (Айвазян, 1989) и подход, основанный на вычислении мер сопряженности (Семкин и др., 1986).

Результатом работы являются построенные модельные карты распределения доминирующих древесных видов Приморского края на территории учебно-опытного лесхоза «Дальневосточный» (Уссурийский район Приморского края) и вероятностные оценки точности решения задачи, характеризующие как степень взаимосвязи структуры растительного покрова и абиотических факторов среды, так и информационную ценность лесотаксационных описаний.

### Материал и методы

Для построения модельной структуры растительного покрова ландшафтного уровня – территории лесхоза «Дальневосточный», использовались лесотаксационные описания (2002 г), оцифрованные с регулярным шагом на местности равным 500 м; при этом в каждой точке (общее число точек 1780), привязанной к географической системе координат WGS-84, определялась доминирующая порода древостоя. В качестве данных для определения параметров абиотических факторов использовался свободно распространяемый архив высот SRTM [<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, разрешение 3" (ок. 90 м) по широте и долготе], на основе которого в каждой точке исследуемой территории оценивались параметры: высота над уровнем моря (метры), крутизна склона (радианы), экспозиция склона (радианы), влагообеспеченность (отождествлялась, как и в: Суханов и др., 1994, с косинусом крутизны склона), освещенность. Условные единицы, выражающие освещенность (*L*) в точке, оценивались исходя из географического положения лесхоза, определяющего интервал изменений высоты

Солнца над горизонтом за год, географической ориентации и крутизны склонов. Более точно, полагалось

$$L = e \frac{(\langle 90^\circ \rangle - \langle a_1 \rangle - \langle i \rangle)^2}{2 \langle \tilde{A}_1 \rangle^2} - \frac{(\langle a_2 \rangle - \langle q \rangle)^2}{2 \langle \tilde{A}_2 \rangle^2}$$

где  $a_1=39^\circ$  – средняя высота солнца над горизонтом за год,  $a_2$  – угол, характеризующий склоны южных экспозиций,  $i$  – крутизна склона в градусах;  $q$  – экспозиция склона в градусах,  $\langle \cdot \rangle$  – оператор перехода к радианной мере угла,  $\sigma_1=45^\circ$ ,  $\sigma_2=17^\circ$ .

Из 17 лесообразующих пород, характерных для территории лесхоза, в данной работе рассматриваются всего 5 наиболее распространенных: сосна корейская, или «кедр» корейский (К) *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc., ель иезская (аянская) (Е) *Picea jezoensis* (Siebold et Zucc.) Carr., лиственница Каяндера (Л) *Larix cajanderi* Mayr., дуб монгольский (Д) *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. subsp. *mongolica* и ясень маньчжурский (Я) *Fraxinus mandshurica* Rupr., образующие, соответственно, кедрово-широколиственные, елово-пихтовые, лиственничные, дубовые и ясеневые леса.

Для индикации доминанта древостоя использован подход, согласно которому степень совместности каждой категории (таксона) растительности с той или иной градацией фактора среды характеризуется обобщенной мерой Дайса-Брея (Семкин и др., 1986):

$$K_j = \frac{2P_{ij}}{P_i + P_j}$$

где  $P_{ij}$  – частота совместных встреч  $i$ -той категории растительности и  $j$ -той градации среды,

$$P_i = \sum_j P_{ij} \quad P_j = \sum_i P_{ij}$$

Принятие решения относительно вероятной структуры растительного покрова в точке осуществлялось на основе максимального значения суммы мер Дайса-Брея по различным факторам среды, согласно алгоритму, описанному в работе Б.И. Семкина с соавторами (Семкин и др., 1986).

Наряду с методом использовался непараметрический метод  $k$ -ближайших соседей (Айвазян, 1989), имеющий достаточно простую физическую интерпретацию и характеризующийся низкими ошибками индикации в случае сложных перекрытий плотностей внутриклассовых распределений (Kuncheva, 2004). Для определения ошибки решения задачи применялся алгоритм «скользящего» экзамена (one-leave-out cross validation technique) по всем данным оцифрованных таксационных описаний.

В связи с невысокой исходной размерностью факторного пространства при решении задачи отбора значимых признаков использовался алгоритм полного перебора по всем возможным комбинациям (всего 31 комбинация) факторов. При этом оценивались ошибки решения задачи идентификации доминанта для каждой из встретившихся пород при значениях числа ближайших соседей  $k=\{3, 5, 10, 20, 30, 35, 40\}$ , используемых в алгоритме принятия решения. Вычисление ближайших в факторном пространстве описаний к заданной точке определялось на основе евклидовой метрики путем предварительной нормировки градаций факторов на оценку их среднеквадратического отклонения, вычисляемого по обучающей выборке. Таким образом, общее число рассмотренных комбинаций составило  $31 \times 7 = 217$ . По результатам анализа всех 217 вариантов была отобрана комбинация факторов, приводящая к наименьшим ошибкам в идентификации наиболее часто встретившихся на территории видов.

### Результаты и их обсуждение

В отношении лесообразующих видов ландшафтного уровня было установлено, что наиболее точно идентифицируются по геоморфологическим факторам — кедр корейский (рис. 1) и дуб монгольский (рис. 2). То, что наименьшая ошибка (43%) в определении факта доминирования кедра корейского или дуба монгольского достигается (при  $k = 35$ ) лишь при учете факторов: высота над уровнем моря, освещенность, влагообеспеченность, указывает на исключительную важность теплового и водного режимов при формировании благоприятных условий для произрастания данных видов и их выхода в доминирующие породы.

Результаты индикации остальных 15 видов (в описаниях лесхоза «Дальневосточный» всего представлено 17 доминантных видов) характеризуются ошибками большими 60 %, в связи с чем их представление нецелесообразно.

Соответствующие карты для сосны корейской и дуба монгольского представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно. В результате вычислительных экспериментов было установлено, что использование для решения задачи на ландшафтном уровне организации метода, основанного на вычислении мер Дайса-Брея, в целом приводит к значительно большим погрешностям.

Найденные в результате анализа решений задачи восстановления растительного покрова ошибки отражают как «точность» (непротиворечивость) лесотаксационных описаний, так и тенденции его динамики на исследуемой территории в целом.

Тот факт, что сосна корейская и дуб монгольский восстанавливаются с ошибкой, не превосходящей 43 %, свидетельствует, с одной стороны, о достаточной точности лесотаксационных описаний и геоморфологической группы факторов для грубой реконструкции структуры растительного покрова, а с другой, по-видимому, – об определенной неустойчивости настоящего распределения древесных

видов. Последняя особенно заметна, если учесть высокие (более 60%) ошибки идентификации других значимо распространенных на территории лесхоза видов – пихты цельнолистной и ели аянской.

#### Заключение

Подводя итоги проделанной работы, отметим основные ее результаты.

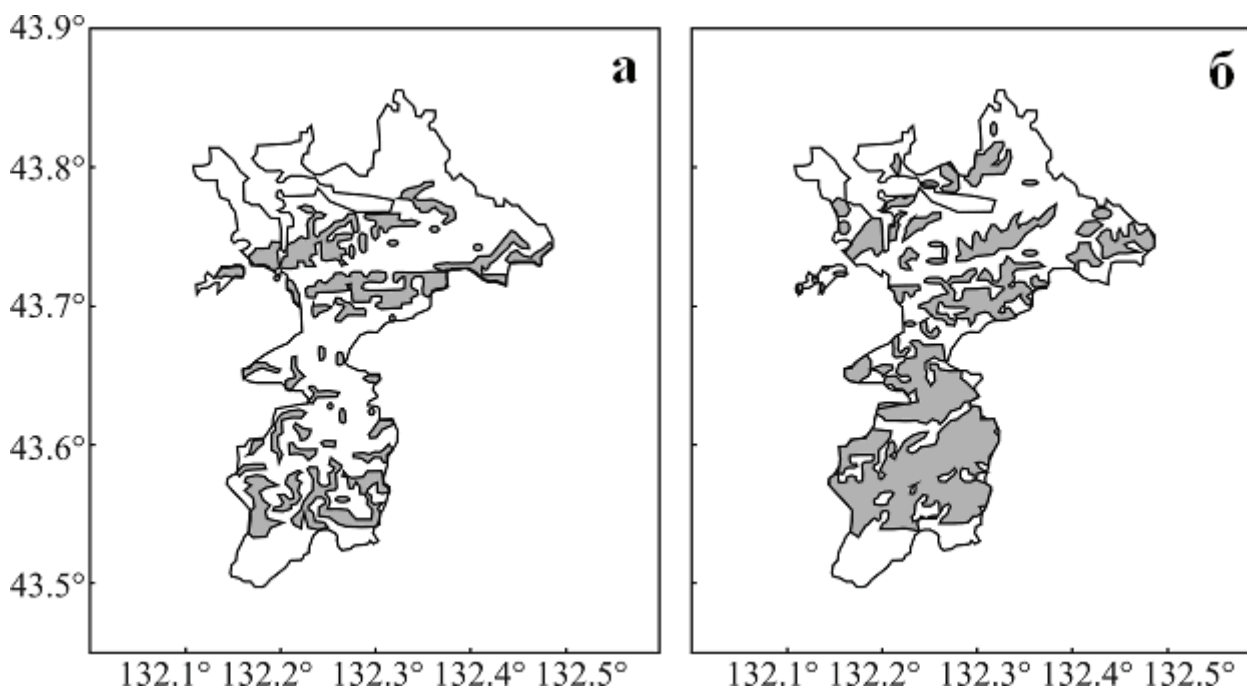


Рис. 1. Распространение сосны корейской на территории лесхоза «Дальневосточный»: а – современное; б - расчетное

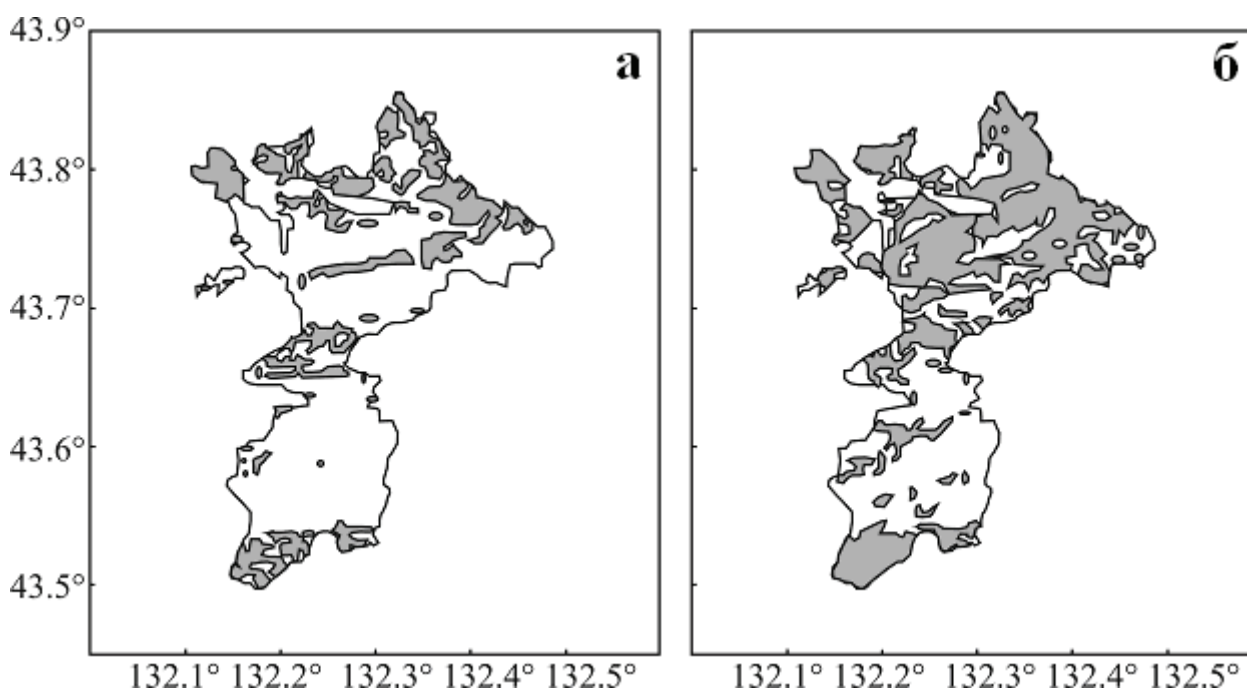


Рис. 2. Распространение дуба монгольского на территории лесхоза «Дальневосточный»: а – современное; б - расчетное

Рассмотренные подходы могут использоваться не только при ландшафтном (Петропавловский, 1987; Онищенко, 2001) и региональном (Петропавловский, 1993, 2008) уровнях структурной организации растительности, но и, как показали исследования, их можно успешно применять на других уровнях: фитоценоотическом (Апалькова, Петропавловский, 1976), субрегиональном (Брижатая, Петропавловский, 2007), планетарном (Петропавловский и др., 1978; Петропавловский, 1983).

Массовые лесотаксационные описания могут быть успешно использованы для решения задач восстановления структуры растительного покрова по факторам среды; для территории лесхоза «Дальневосточный» (юг Приморского края) наилучшим образом идентифицируются виды: сосна корейская и дуб монгольский. Другие виды идентифицируются с гораздо меньшей точностью, что, по-видимому, обусловлено тремя причинами: 1) точностью лесотаксационных описаний; 2) значительной меньшей их распространенностью на исследуемой территории; 3) неустойчивостью текущей структуры лесорастительного покрова.

Перспективным представляется использование методов многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами при составлении корреляционных эколого-фитоценоотических карт. Подобные карты, созданные впервые под руководством академика В.Б. Сочавы (Букс, 1976), но без применения мер количественных сопряженностей, нами были составлены с использованием мер зависимости растительных сообществ планетарного (Петропавловский, 1983), регионального и ландшафтного уровней (Петропавловский, 1987).

Следует отметить, что в свете проблем мониторинга климатических изменений различного масштаба рассмотренные задачи и методы их решения имеют особую актуальность, в первую очередь, связанную с разработкой и оптимизацией планов реализации таких исследований.

## Л и т е р а т у р а

*Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков Е.С.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 608 с.

*Апалькова Л.А., Петропавловский Б.С.* К вопросу о закономерностях формирования древесного яруса в поясе широколиственных лесов Среднего Сихотэ-Алиня // Статистические методы исследования геосистем. – Владивосток, 1976. – С. 100–111.

*Брижатая А.А.* Опыт восстановления (аппроксимации) лесной растительности в бассейне р. Комаровка (Уссурийский район, Приморский край) // Матер. междунар. конф. «Биоразнообразие: проблемы и перспективы сохранения». – Пенза, 2008. – С. 167–169.

*Брижатая А.А., Петропавловский Б.С.* Особенности распределения жизненных форм дендрофлоры на российском Дальнем Востоке // Биоморфологические исследования в современной ботанике. Матер. междунар. конф. «Биоморфологические исследования в современной ботанике. (Владивосток, 18–21 сентября 2007 г.). – Владивосток: БСИ ДВО РАН, 2007. – С. 82–85.

*Онищенко В.В.* Геоэкологические особенности и функционирования лесной растительности Северо-Западного Кавказа (на примере Тебердинского заповедника): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ростов-на-Дону, 2001. – 31 с.

*Петропавловский Б.С.* Принципы составления корреляционной эколого-фитоценоотической карты мира и ее использование с целью оптимального размещения биосферных станций мониторинга окружающей среды // Разработка и внедрение на комплексных станциях методов экологического мониторинга. – Рига: Зинатне, 1983. – С. 99–104.

*Петропавловский Б.С.* Экологические особенности лесобразующих пород Приморского края // Комаровские чтения. Вып. 41. – Владивосток: Дальнаука, 1993. – С. 16–28.

*Петропавловский Б.С.* Картографическое моделирование исходной растительности на примере Приморского края // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: Матер. XII Делегатского съезда РБО. Ч. 5. Секция «Геоботаника». – Петрозаводск: КНЦ РАН, 2008. – С. 256–260.

*Петропавловский Б.С., Семкин Б.И., Усольцева Л.А.* Опыт изучения устойчивости растительности в планетарном масштабе для целей фонового мониторинга окружающей среды // Опыт и методы экологического мониторинга. – Пушкино, 1978. – С. 60–63.

*Семкин Б.И., Петропавловский Б.С., Кошкарёв А.В., Варченко Л.И., Усольцева Л.А.* О методе многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами // Ботан. журн. – 1986. – Т. 71. № 9. – С. 1167–1981.

*Доклад был заслушан на конференции молодых ученых «Зри в корень», прошедшей 29-30 марта 2012 г. в Ботаническом саду-институте ДВО РАН, г. Владивосток.*

**MODELING OF VEGETATION COVER  
STRUCTURE BY ENVIRONMENTAL FACTORS  
AND FOREST TAXATION LISTS**

**Dmitry E. Kislov, Boris S. Petropavlovsky, Albina  
A. Brizhataya**

*Botanical Garden-Institute FEB RAS, Vladivostok*

**Key words:** ecological optimum, tree dominant species, vegetation cover modeling, Primorsky krai region

The article presents methodical aspects of using forest taxation lists for studying spatial distribution of tree dominant species. Problem of the vegetation structure prediction by quantitative measures is considered.

Comparison analysis of methods used to solve the problem of prediction tree dominant species by environmental factors is presented.

Il. 2. Bibl. 10.