

УДК 581.52+910.2

М. Е. КОНОВАЛОВА, Г. Б. КОФМАН, А. Е. КОНОВАЛОВА

Институт леса СО РАН, г. Красноярск

СОПРЯЖЕННОСТЬ ПРИЗНАКОВ РЕЛЬЕФА И ТИПОВ ЛЕСА В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

На примере заповедника «Столбы» с использованием теоретико-информационных методов анализа взаимосвязи двух подсистем проведена количественная оценка информативности отдельных орографических факторов для идентификации типов леса. Показано, что сопряженность распределения растительного покрова и элементов рельефа возрастает при дифференциации горных территорий. Наибольшая информативность орографических факторов для определения типологической структуры лесов обнаруживается при одновременном рассмотрении крутизны и экспозиции склонов, в совокупности определяющих большую часть комплекса лесорастительных условий каждого экотопа. Впервые для подобного рода задач проведена оценка вкладов частной информации, определяемой отдельными орографическими факторами, во взаимосвязь растительного покрова и рельефа в целом. Например, частная информация о типах леса при фиксированных значениях уклонов максимальна для склонов крутизной более 30°. На этих элементах рельефа создаются самые неблагоприятные гидрологические условия, что приводит к резкому снижению разнообразия растительных сообществ, формирующихся в данных условия произрастания (10 из 119 типов леса). Наименьшую информативность имеют склоны крутизной от 11 до 20°, характеризующиеся лесорастительными условиями, благоприятными для большинства лесообразующих древесных пород и видов травянистой растительности. И только при дополнительной дифференциации по экспозиции информативность отдельных элементов рельефа значительно возрастает, так как различия в степени инсоляции, тепло- и влагообеспеченности этих склонов вносят дополнительные ограничения в разнообразие типов леса. Предлагаемый подход не только позволяет конкретизировать описательно-интуитивный характер взаимосвязей растительного покрова и элементов рельефа, но и будет полезным при решении ряда прикладных задач — тематическом картографировании, мониторинге состояния лесных экосистем и оценке природно-ресурсного потенциала горных территорий.

Ключевые слова: коэффициент нормированной взаимосвязи, тип леса, высотно-поясные комплексы типов леса, крутизна и экспозиция склонов.

A quantitative assessment of the information content of separate orographic factors for identifying the forest types has been made in a case study of the Stolby Nature Reserve by using the theoretical-informational methods of analyzing the interrelationship of two subsystems. It is shown that the correlation of the distribution of vegetation cover and relief elements increases with the differentiation of mountainous territories. The highest information content of the orographic factors for determining the typological structure of forests is revealed in a combined treatment of slope steepness and aspect which, in the aggregate, are responsible for most of the set of forest vegetation conditions of each ecotope. For the first time for problems of this kind, we made an assessment of the contributions from particular information determined by separate orographic factors, to the interrelationship of vegetation cover and relief in general. For instance, particular information on forest types at fixed values of inclination is maximal for slopes more than 30° in steepness. These relief elements produce the most unfavorable hydrological conditions thus leading to a dramatic decrease in diversity of plant communities that are evolving under such growth conditions (10 out of 119 forest types). The lowest information content is provided by slopes varying from 11 to 20° in steepness, which are characterized by favorable forest vegetation conditions for most forest-forming tree and grass species. And only with an additional differentiation with respect to slope aspect does the information content of separate relief elements increase considerably, because the differences in the degree of insolation and heat and moisture supply of these slopes impose additional limitations on the diversity of forest types. The suggested approach makes it possible not only to concretize the descriptive-intuitive character of the interrelationships between vegetation cover and relief elements but also to serve as a useful tool for a number of practical tasks, such as thematic mapping, monitoring of the state of forest ecosystems, and assessment of the natural-resource potential of mountainous territories.

Keywords: normalized correlation coefficient, forest type, altitudinal-belt complexes of forest types, slope steepness and aspect.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Горный рельеф, перераспределяя прямодействующие экологические факторы, выступает интегральным показателем относительно однородных лесорастительных условий, соответствующих типам леса. Однако значение одних и тех же признаков рельефа для формирования однородных растительных сообществ меняется в различных географо-климатических условиях. Такая неоднозначность

влияния орографических факторов является сложной проблемой, которая не может быть решена традиционными методами, имеющими качественный, описательный характер. Объективные трудности анализа связаны со сложностью и многообразием взаимосвязей растительности и рельефа, необходимостью учета многих факторов. Стандартная статистическая обработка также не всегда возможна из-за использования номинальных переменных (тип леса, серии типов леса и т. д.), характеризующих растительный покров.

При характеристике таких структур в качестве адекватного метода анализа хорошо зарекомендовали себя энтропийные меры взаимосвязи двух подсистем [1–3]. Применение общей теории информации к экологическим задачам детально рассмотрено в ряде работ зарубежных авторов [4–6]. В отечественной литературе теоретико-информационный анализ применялся, в частности, при изучении межкомпонентных ландшафтных связей [7–9].

Преимущество данного метода связано с отсутствием каких-либо дополнительных предположений о характере выборки и типах распределений. Он не требует определения минимального порогового значения для обязательного заполнения ячеек исходной матрицы. Энтропийные меры статистической взаимосвязи подсистем могут использоваться как для количественных, так и для качественных признаков [10–12]. Кроме того, теоретико-информационный анализ позволяет не только установить факт наличия статистически значимой связи и ее интенсивность, но и детализировать структуру взаимодействия подсистем.

В данной работе проведен количественный анализ информативности различных признаков рельефа для идентификации относительно однородных растительных сообществ (типов леса) при помощи теоретико-информационных мер связи.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор в качестве объекта исследования особо охраняемой природной территории (ООПТ) заповедника «Столбы» обусловлен отсутствием хозяйственной деятельности, повышенной точностью лесоустроительных данных, длительным периодом наблюдений и, соответственно, наличием большого числа публикаций. В частности, геоботанические исследования здесь были начаты Т. Н. Буториной [13], почвенно-грунтовые условия изучались С. А. Коляго [14], ландшафтная структура описана Д. И. Назимовой и др. [15].

Заповедник расположен на Куйсумском хребте Манского Белогорья Восточного Саяна. Согласно лесорастительному районированию [16], его территория является частью Манско-Канского лесорастительного округа Восточно-Саянской лесорастительной провинции с характерным спектром поясности и особенностями типологического состава лесов. По условиям увлажнения климат низкогорного светлохвойного и верхнего темнохвойного поясов оценивается как гумидный и пергумидный соответственно. Сложное геологическое строение поверхности, контрастные сочетания кислых интрузивных и осадочных (часто карбонатных) пород существенно усложняют структуру растительного покрова. На территории заповедника по ландшафтно-биоклиматическим признакам выделяются два высотно-поясных комплекса (ВПК): подтаежный светлохвойный низкогорный (200–550, местами до 600 м) и горно-таежный темнохвойный среднегорный (500–750 м), включающий сосновые интразональные леса (до 800 м). Переходная зона (экотон) между двумя поясами образует извилистую полосу в интервале абс. высот 450–650 м, варьируя в разных частях территории в связи с экспозицией макросклонов основного водораздела и мезорельефа [17].

В качестве исходного материала использовалась база данных, которая содержит информацию о породном составе древостоев, сериях типов леса, ВПК и орографических условиях (высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склона) по 4582 таксационным выделам. В основе базы данных лежат материалы лесоинвентаризации 1977–2008 гг., проведенной по первому разряду лесоустройства, а также схема типов леса, разработанная для данной территории В. И. Власенко [18].

Структурной единицей растительного покрова (подсистема Y) нами выбран тип леса, характеризующийся определенным составом и структурой биоценоза в пределах конкретного экотопа. Дифференциация и оценка информативности признаков рельефа (подсистема X) осуществлялись последовательно. На первом этапе данные разделяли по высоте над уровнем моря на три высотные зоны, отличающиеся по тепло- и влагообеспеченности, геологической структуре и составу растительного покрова. На втором этапе для каждого ВПК полученные выборки дифференцировались по крутизне склона на четыре группы, значительно различающиеся по интенсивности эрозионных процессов, накоплению влаги и т. д. (пологие — 1–10°, покатые — 11–20°, крутые — 21–30°, очень крутые — бо-

лее 30°). На третьем этапе в пределах каждого ВПК сортировка производилась только по экспозиции склонов (без учета их крутизны). Полученные восемь групп различались по степени инсоляции, тепло- и влагообеспеченности и скорости снеготаяния: восточные, западные, северные, северо-восточные, северо-западные, южные, юго-восточные и юго-западные. На четвертом этапе в каждом ВПК с учетом одновременно крутизны и экспозиции склонов было выделено 32 группы.

Данные объединяли в исходные таблицы абсолютной встречаемости сочетаний различных признаков рельефа и растительного покрова, а затем рассчитывали матрицу оценок вероятности сочетаний разных состояний.

Для совокупности матриц встречаемости сочетаний различных состояний (x_i, y_j) вычисляли значения общепринятых характеристик, таких как $H(X, Y)$ — энтропия объединенной системы (1), $H(Y|X)$ — условная энтропия (2), $I(X, Y)$ — взаимная информация (3), $I_{x_i \rightarrow Y}$ — частная информация фиксированного состояния подсистемы (4) и $R_{Y|X}$ — коэффициент нормированной взаимосвязи (5) [1–3, 11]:

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \log_2 P_{ij}, \quad (1)$$

$$H(Y|X) = \sum_{i=1}^n p_i H(Y | x_i), \quad (2)$$

$$I(X, Y) = H(Y) - H(Y|X), \quad (3)$$

$$I_{x_i \rightarrow Y} = \sum_{j=1}^m P(y_j | x_i) \log_2 \frac{P(y_j | x_i)}{p_j}, \quad (4)$$

$$R_{Y|X} = \frac{I(X, Y)}{H(Y)} = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(Y)}, \quad (5)$$

где P_{ij} — вероятность состояния (x_i, y_j) системы (X, Y) , $H(Y)$ — энтропия подсистемы Y ; $H(Y|x_i)$ — условная энтропия подсистемы Y при известном состоянии x_i подсистемы X ; $H(Y|X)$ — полная условная энтропия подсистемы Y относительно подсистемы X ; p_i — вероятность состояния x_i подсистемы X ; p_j — вероятность состояния y_j подсистемы Y ; $P(x_i|y_j)$ — удельная вероятность x_i при заданном состоянии y_j .

Коэффициент $R_{Y|X}$, отражающий влияние подсистемы X на подсистему Y , имеет такой же смысл, как и коэффициент детерминации в регрессионном анализе: он характеризует процент объясненного разнообразия подсистемы Y , если известно состояние подсистемы X . Значения $R_{Y|X} = 0$ и $R_{Y|X} = 1$ относятся к независимым и эквивалентным системам. Примечательно, что коэффициенты нормированной информации $R_{Y|X}$ и $R_{X|Y}$ вычисляются в логарифмической шкале, и их величины, равные 0,1, эквивалентны умеренной корреляции в обычном смысле [10, 12].

Оценка достоверности количества информации (3) осуществляется стандартным образом. Вычисленное значение $I(X, Y)$ сравнивается с критическим — I_0 , где $I_0 = \chi_{\text{крит}}^2 / (2n)$. Здесь n — число наблюдений, $\chi_{\text{крит}}^2$ — табличная величина χ^2 , определяемая принятым уровнем значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех вариантах вычислений энтропия объединенной системы $H(X, Y)$ меньше простой суммы энтропий анализируемых подсистем Y (тип леса) и X (рельеф) или $H(Y) > H(Y|X)$. Соответственно полная взаимная информация $I(X, Y) > 0$ статистически значима при доверительной вероятности 0,95. Это позволяет утверждать, что зависимость между типами леса и признаками рельефа разного уровня детализации существенна.

Различия в значении коэффициентов относительной редукции неопределенности ($R_{Y|X}$) идентификации растительного покрова (типов леса) при различных грациях характеристики рельефа (крутизна склонов, экспозиция склонов, крутизна и экспозиция склонов одновременно) в пределах каждого ВПК демонстрирует рис. 1. Для проверки целесообразности первоначальной дифференциации данных проводилось контрольное разбиение объединенного массива без выделения ВПК.

Наименьшие значения коэффициентов нормированной информации наблюдаются при анализе связей растительности и признаков рельефа для объединенного массива данных без их предварительной дифференциации по ВПК. Это объясняется тем, что разные ВПК характеризуются определенными природно-климатическими параметрами, обусловленными высотой над уровнем моря и гео-

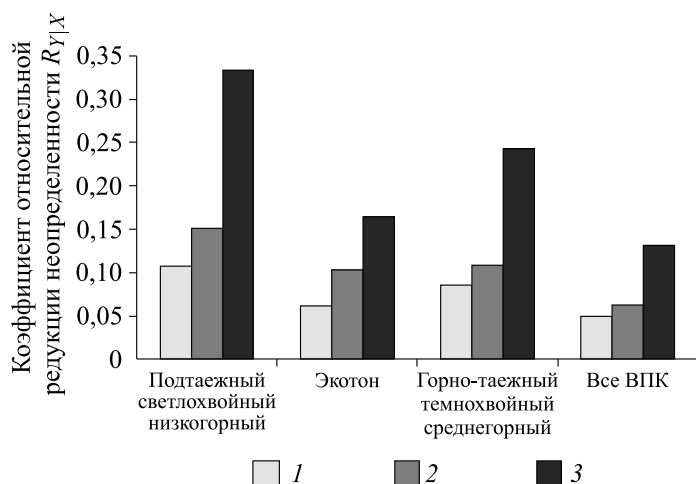


Рис. 1. Информативность различных признаков рельефа при идентификации типов леса ($R_{Y|X}$) в пределах трех высотных комплексов и без разделения на ВПК.

Дифференциация рельефа: 1 — по уклонам; 2 — по экспозиции; 3 — по уклонам и экспозиции склонов.

графическим положением. Общие различия по тепло- и влагообеспеченности являются причиной возникновения отличий в экологических условиях на сходных элементах рельефа в пределах каждого ВПК. Следовательно, при объединении данных по нескольким ВПК информационная взаимо-

связь растительности и рельефа «размывается» в силу большего разнообразия растительности на сходных формах мезорельефа.

Информативность рельефа по отношению к типам леса ($R_{Y|X}$) в переходной зоне незначительно превышает результат анализа сопряженности этих подсистем без разделения по ВПК, поскольку в экотоне наблюдаются элементы соседствующих ВПК. В итоге повышается ценотическое разнообразие и уменьшается устойчивость связи растительности с рельефом.

Наиболее высокая информативность рельефа ($R_{Y|X}$), при всех уровнях его дифференциации, по отношению к типам леса наблюдается в подтаежном светлохвойном низкогорном ВПК (см. рис. 1). Климат низкогорного пояса, граничащего с Красноярской лесостепью, отличается от климата среднегорья большей континентальностью, меньшей высотой снежного покрова, более холодной зимой и сухим летом. Здесь в большей степени проявляются такие лимитирующие факторы, как сдувание снежного покрова, промерзание почвы, недостаток почвенной и воздушной влаги [13]. Все это создает более жесткий каркас лесорастительных условий, формирующийся в результате перераспределения рельефом жизненно необходимых ресурсов.

Таким образом, при анализе связи между особенностями растительного покрова и признаками рельефа, безусловно, необходима предварительная классификация данных по крупным высотно-поясным комплексам, обладающим определенными геоморфологическими, эдафическими и климатическими характеристиками, складывающимися в определенную мозаику условий местопроизрастания.

Отдельные орографические факторы не имеют одинакового значения для идентификации растительного покрова (см. рис. 1). Значение коэффициента $R_{Y|X}$ последовательно возрастает по мере детализации рельефа в пределах каждого ВПК. Крутизна склонов влияет преимущественно на снегонакопление, условия почвенного увлажнения, дренажа, интенсивность склоновых процессов, накопление минеральных и органических веществ, их перенос и в целом на характер почвенно-грунтовых условий. Как указывает С. А. Коляго [14], для территории ООПТ характерны благоприятные почвенно-грунтовые условия: обеспеченность минеральным питанием и хороший дренаж почв. В связи с этим в условиях достаточно влажного климата и господства маломощных хрящеватых и щебнистых почв интенсивность перераспределения осадков и минеральных веществ, детерминированная крутизной склонов, не становится критическим фактором для развития растительного покрова. Экспозиция склонов, определяющая радиационные и термические условия произрастания леса, оказывает несколько большее влияние на формирование растительных ассоциаций. Однако наиболее значительная информативность орографических факторов для определения типологической структуры лесов обнаруживается при одновременном рассмотрении крутизны и экспозиции склонов, в совокупности определяющих большую часть комплекса лесорастительных условий каждого экотопа.

Для более детального анализа взаимосвязи растительности и рельефа рассмотрим структуру их полной информации, разложив ее на частные информации фиксированных состояний одной из подсистем по отношению к другой ($I_{X_i \rightarrow Y}$), рассчитанных по формуле (4). На примере подтаежного светлохвойного низкогорного ВПК анализируется связь между типами леса и рельефом, классифицируемым по крутизне склона. Частная информация о типах леса, содержащаяся в отдельных категориях крутизны склонов, имеет наибольшее значение для категории очень крутых склонов (более

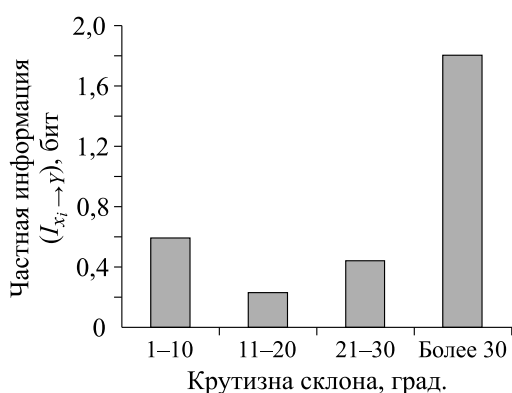


Рис. 2. Информативность категорий рельефа, дифференцированных по крутизне склонов, при идентификации типов леса ($I_{x_i \rightarrow Y}$) в подтаежном светлехвойном низкогорном ВПК.

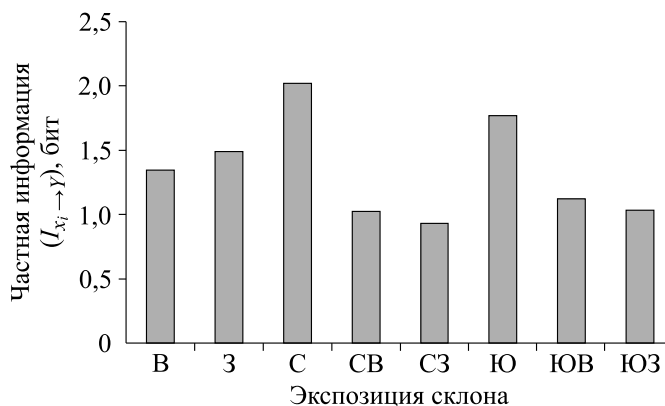


Рис. 3. Информативность категорий рельефа $I_{x_i \rightarrow Y}$, дифференцированных по экспозиции при фиксированной крутизне склонов (11–20°), при идентификации типов леса в подтаежном светлехвойном низкогорном ВПК.

30°) (рис. 2). На этих элементах рельефа создаются самые неблагоприятные гидрологические условия, что приводит к резкому снижению разнообразия растительных сообществ, формирующихся в данных условия произрастания (10 из 119 типов леса). На очень крутых склонах развиваются растительные сообщества (остепененные сосняки и березняки), в составе которых значительное участие имеют виды степной и лесостепной эколого-ценотических групп. Данные типы леса широко распространены только на очень крутых склонах.

Достаточно высокая информативность пологих склонов (1–10°) также объясняется небольшим количеством произрастающих на них типов леса. Однако ограничение разнообразия растительных сообществ связано с сильной межвидовой конкуренцией, в результате которой на пологих склонах формируются преимущественно пихтарники, ельники, осинники и, в меньшей степени, сосняки зеленомошной и крупнотравной серий типов леса, редко развивающихся на склонах большей крутизны. Наименьшую информативность имеют покатые склоны (11–20°), характеризующиеся лесорастительными условиями, благоприятными для большинства лесообразующих древесных пород и видов травянистой растительности. При дифференциации покатых склонов по экспозиции информативность отдельных элементов рельефа значительно возрастает (рис. 3), так как различия в степени их инсоляции, тепло- и влагообеспеченности вносят дополнительные ограничения в разнообразие типов леса. Это позволяет детализировать сделанный ранее вывод о том, что для идентификации типов леса большей информативностью обладают элементы рельефа, определяемые одновременно по экспозиции и крутизне склонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ информативности различных орографических факторов при идентификации типов леса ($R_{Y|X}$) показал рост значений количественных мер взаимосвязи при дифференциации горной территории на относительно однородные высотно-поясные комплексы. Интенсивность взаимосвязи растительного покрова и орографических факторов изменяется в различных ВПК. Наибольшие значения $R_{Y|X}$ характерны для подтаежного светлехвойного низкогорного ВПК, где рельеф имеет особое значение для влагообеспеченности экотопов.

В этом же ВПК выявлен достаточный для прогнозирования уровень детализации категорий рельефа путем последовательного анализа энтропийных мер взаимосвязи различных признаков рельефа и растительного покрова. Одновременная оценка крутизны и экспозиции склонов позволяет выделить экотопы, сходные по влагообеспеченности, радиационному и температурному режимам, а также по общему характеру почвенно-грунтовых условий, формирующих относительно однородные растительные сообщества, классифицируемые как типы леса.

Частная информативность состояний одной из подсистем по отношению ко второй ($I_{x_i \rightarrow Y}$) позволяет раскрыть структуру их взаимосвязи и перейти к более детальному анализу сопряженности растительного покрова и рельефа.

Полученные результаты свидетельствуют о плодотворности применения информационного анализа для оценки взаимосвязей различных природных комплексов (подсистем). Предлагаемый подход не только позволяет конкретизировать описательно-интуитивный характер взаимосвязей растительного покрова и элементов рельефа и отфильтровывать «случайные» связи, но и будет полезным при решении ряда прикладных задач — тематическом картографировании, мониторинге состояния лесных экосистем и оценке природно-ресурсного потенциала горных территорий.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития» (№ 30.11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Файнштейн А.** Основы теории информации. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 240 с.
2. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
3. **Cover T. M., Thomas J. A.** Elements of Information Theory. — New York: John Wiley & Sons, 1991. — 542 p.
4. **Thomas R. W.** Information statistics in geography // Concepts and techniques in modern geography. — UK: Headley Brothers Ltd The Invicta Press Ashford Kent, 1981. — N 31. — 43 p.
5. **Orlóci L., Orlóci M.** Data analysis in ecology and related fields. — London; Canada, 1995. — 279 p.
6. **Legendre P., Legendre L.** Numerical ecology. 3rd English edition. Developments in Environmental Modelling. — Amsterdam: Elsevier Science BV, 2012. — 990 p.
7. **Арманд А. Д.** Информационные модели природных комплексов. — М.: Наука, 1975. — 126 с.
8. **Пузаченко Ю. Г., Скулкин В. С.** Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. — М.: Наука, 1981. — 275 с.
9. **Коломыц Э. Г.** Локальные механизмы глобальных изменений экосистем. — М.: Наука, 2008. — 427 с.
10. **Елисеева И. И.** Статистические методы измерения связей.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. — 136 с.
11. **Krippendorff K.** Information theory: structural models for qualitative data. — Newbury Park, Calif.: Sage Publications, 1986. — 96 p.
12. **Ran G.** Related information measures for the associations of earth-science variables // Mathematical Geology. — 1995. — Vol. 17. — P. 609–632.
13. **Буторина Т. Н.** К характеристике лесорастительных условий Государственного заповедника «Столбы» // Труды Гос. заповедника «Столбы». — Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1961. — Вып. 3. — С. 248–282.
14. **Коляго С. А.** Почвы Красноярского государственного заповедника «Столбы» // Труды Гос. заповедника «Столбы». — Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1961. — Вып. 3. — С. 197–247.
15. **Назимова Д. И., Первунин В. А., Тропина Е. Ф., Ерунова М. Г.** Схема природного районирования. Лесорастительные зоны и пояса. Ландшафтная структура заповедника // Труды Гос. заповедника «Столбы». — Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 2010. — Вып. 19.— С. 16–39.
16. **Типы лесов гор Южной Сибири** / Отв. ред. В. Н. Смагин. — Новосибирск: Наука, 1980. — 336 с.
17. **Ландшафтно-типологическая структура заповедника «Столбы»: Карта м-ба 1:1 500 000** / Д. И. Назимова, В. А. Первунин, М. Г. Ерунова, Е. Ф. Тропина. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса СО РАН, 2008. — 1 л.
18. **Власенко В. И.** Структура и динамика лесной растительности заповедных территорий Алтае-Саянской горной страны. — М.: МСОП, 2003. — 484 с.

Поступила в редакцию 13 июня 2014 г.