

УДК 911.52+91.001.5+502.4

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ ТОПОГЕОСИСТЕМ КОМСОМОЛЬСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

П.С. Петренко

Государственный природный заповедник «Комсомольский»  
пр-т Мира 54, г. Комсомольск-на-Амуре, 681000  
e-mail: petrenkopolina8710@mail.ru

*Проведен анализ межкомпонентных ландшафтных связей лесных топогеосистем Комсомольского заповедника с применением методов теории информации. Построена информационно-статистическая моносистемная модель лесных топогеосистем, с помощью которой выявлена их структура.*

**Ключевые слова:** лесная топогеосистема, информационная модель, межкомпонентные ландшафтные связи, эдификатор, ретранслятор, индикатор.

### Введение

Принято выделять три типа связей между элементами любой системы: вещественные, энергетические и информационные [1]. При изучении процессов, происходящих в геосистемах, традиционно основное внимание уделяется первым двум типам ландшафтных связей, в то время как последние наименее изучены. Между тем использование информационного подхода имеет ряд преимуществ и лучше позволяет раскрыть основные закономерности организации геосистем [2, 9, 14]. Во-первых, в природных комплексах не все связи можно отнести к вещественно-энергетическим, однако все они относятся к информационным, при этом передача информации неотделима от движения вещества и энергии. Во-вторых, помимо силы связи между элементами информационной системы, выявляется и их направление. В-третьих, использование информационного метода удобно как с количественными, так и с качественными признаками природных систем, что позволяет сравнивать между собой элементы, различные по своей физической природе.

Цель данной работы – дать количественную оценку структуры лесных топогеосистем заповедника «Комсомольский» на основе методов теории информации. Ранее была опубликована аналогичная статья по результатам первого полевого сезона 2011 г. [13]. В настоящей работе представлены обобщенные результаты по собранным данным за два полевых сезона (2011–2012 гг.).

### Объект и методы

Государственный природный заповедник (ГПЗ) «Комсомольский» расположен на зональной границе боREALных и суббоREALных ландшафтов юга Дальнего Востока, в Амурско-Приморской физико-географической стране, Нижнеамурской области и одноименной с ней провинции.

Территория заповедника охватывает один из сохранившихся в Нижнем Приамурье крупных массивов темнохвойных и хвойно-широколиственных лесов. Здесь соседствуют представители трех основных флор: охотско-камчатской, восточно-сибирской и маньчжурской.

Под лесными сообществами распространены почвы буроземного типа: в южнотаежных и подтаежных лесах буро-таежные (в том числе иллювиально-гумусовые), а в субнеморальных – бурые почвы (в том числе бурые горно-лесные).

Согласно [12], на территории ГПЗ «Комсомольский» выделяется три типа ландшафтов. Большую часть территории занимают ландшафты низкогорных и среднегорных хребтов и массивов со среднетаежными елово-пихтовыми лесами. Меньшую по площади часть заповедника занимают ландшафты аллювиальных низменностей суженных участков долины Амура с широколиственными лесами и межгорные низменные равнины с болотами и разреженными лиственничными лесами (мари).

Заповедник можно отнести к системе зональных географических экотон, по определению [8]. Предполагается, что геосистемы локального уровня здесь находятся в критических (пессимальных) состояниях, далеких от их функционального оптимума и структурной устойчивости, и отличаются повышенной чувствительностью к внешним воздействиям.

На территории заповедника нами были проведены ландшафтно-экологические исследования в течение двух полевых сезонов (2011–2012 гг.) на топологическом уровне с заложением и описанием почвенного профиля, геоботанической площадки, измерением температуры почвы и освещенности – по известным методикам полевых ландшафтных работ [4, 6, 7]. В 2012 г. удалось увеличить общее количество пробных площадей с 23 до 50, что позволило охватить все наиболее типичные для заповедника ландшафты. Тем не менее, большая левобережная наиболее труднодоступная часть заповедника оказалась мало охвачена пробными площадями (рис. 1). Согласно имеющимся данным физико-географической характеристики территории, лесные топогеосистемы этого района заповедника тождественны уже имеющимся пробным площадям, которые объединены в 7 групп ландшафтных фаций (табл. 1).

Пробные площади были заложены в различных ти-



Перечень геокомпонентных признаков для моделирования

№ п/п	Название признака	Единица измерения
Геоморфологический блок		
1.	Абсолютная высота местности	м
2.	Солярная экспозиция склона	качественный признак
3.	Угол наклона поверхности	градусы
4.	Тип локального местоположения	качественный признак
5.	Механический состав пород	качественный признак
Почвенный блок		
6.	Мощность горизонта $A_0$	см
7.	Мощность горизонта $A$	см
8.	Мощность горизонта $A_2$	см
9.	Мощность горизонта $B$	см
10.	Мощность гумусового профиля	см
11.	Механический состав горизонта $A_1$	качественный признак
12.	Механический состав горизонта $B$	качественный признак
13.	Мера сложности почвенного профиля	бит
14.	Литомасса горизонта $A_1$	%
15.	Литомасса горизонта $B$	%
Структурный фитоценотический блок		
16.	Глубина проникновения корней травянистых растений	см
17.	Сомкнутость крон	баллы
18.	Проективное покрытие травостоя	%
19.	Средняя высота травостоя	см
20.	Мера флористического разнообразия травяно-кустарничкового яруса	бит
21.	Мера флористического разнообразия кустарников	бит
22.	Мера флористического разнообразия древесного яруса	бит
23.	Количество ярусов	шт.
24.	Средняя высота древостоя	м
25.	Средняя высота подроста	м
26.	Средняя высота кустарничкового яруса	м
27.	Средний диаметр ствола по основным лесообразующим породам	см
28.	Бонитет	Римские цифры
Комплексный блок растительных сообществ		
29.	Типы леса	качественный признак
30.	Группы ландшафтных фаций	качественный признак
31.	Экологические группы травостоя	качественный признак
32.	Ценоотические группы травостоя	качественный признак
33.	Географические группы травостоя	качественный признак
Фитоценотический функциональный блок		
34.	Сырая надземная фитомасса травостоя	г/м <sup>2</sup>
35.	Воздушно-сухая надземная фитомасса травостоя	г/м <sup>2</sup>
36.	Запас древесины	т/га
Геофизический блок		
37–39.	Освещенность на высотах 1, 1,5 и 2 м	люкс
40–44.	Температура почвы на глубинах 30, 40, 50, 60 и 70 см	°С
45.	Вертикальный температурный градиент	°С/см
46–49.	Влажность почвенных горизонтов $A_0, A_1, A_2, B$	качественный признак

лен комплексный блок растительных сообществ, что позволило оценить влияние не только различных признаков друг на друга, но и последних на конкретные фитоценоотические и биогеоценоотические единицы.

Первым подготовительным этапом анализа стало ранжирование каждого признака на градации (классы). Для количественных признаков классовые промежутки нами определялись эмпирически – путем анализа поля дисперсии каждого признака в отдельности. Качественные признаки также были разбиты на градации путем придания каждому признаку определенного порядкового номера (балла), начиная с 1.

Вторым этапом обработки данных стал их информационный анализ. Пусть даны два объекта с известными состояниями: явление  $A (a_1, a_2, \dots, a_j)$  и фактор  $B (b_1, b_2, \dots, b_j)$ . Состояния объектов имеют различные априорные вероятности совместной встречаемости в пространстве  $P_i$  и  $P_j$ :  $[A] = \{a_1, a_2, \dots, a_i, P_1, P_2, \dots, P_j\}$  и  $[B] = \{b_1, b_2, \dots, b_j, P_1, P_2, \dots, P_j\}$ . В исходной рабочей матрице (1) вектор состояний фактора  $B$  образует строки, а вектор состояний явления  $A$  – столбцы. Матрица характеризует прямое отображение множества состояний явления на множество состояний данного фактора. В клетках матрицы помещены вероятности, или частоты,  $P_{ij}$  совме-

стной встречаемости рассматриваемых состояний  $A$  и  $B$ , а суммы по столбцам и строкам дают соответственно  $P(a_i)$  и  $P(b_j)$ ; по ним вычисляются значения условных вероятностей. Сущность информационного анализа сложных систем состоит в количественной оценке соотношения частот (или вероятностей) совместной встречаемости различных градаций явления  $A$  и фактора  $B$ .

	$a_1$	$a_2$	...	$a_i$	...	$a_n$	
$b_1$	$P_{11}$	$P_{12}$	...	$P_{1i}$	...	$P_{1n}$	$P_{1\cdot}$
$b_2$	$P_{21}$	$P_{22}$	...	$P_{2i}$	...	$P_{2n}$	$P_{2\cdot}$
...							...
$b_j$	$P_{j1}$	$P_{j2}$	...	$P_{ji}$	...	$P_{jn}$	$P_{j\cdot}$
...							...
$b_m$	$P_{m1}$	$P_{m2}$	...	$P_{mi}$	...	$P_{mn}$	$P_{m\cdot}$
	$P_{\cdot 1}$	$P_{\cdot 2}$	...	$P_{\cdot i}$	...	$P_{\cdot n}$	$N$

$$P_{ij} = K_{ij} / N,$$

где  $K_{ij}$  – частота (встречаемость)  $A$  и  $B$  совместно по  $i$ -му и  $j$ -му состояниям,  $N$  – суммарная частота.

Мера абсолютной информационной сопряженности между явлением  $A$  и фактором  $B$  (количество информации) рассчитывается по следующей формуле:

$$T(AB) = H(A) + H(B) - H(AB),$$

где  $H$  – энтропийная мера разнообразия. При этом:

$$H(A) = \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i,$$

$$H(B) = \sum_{j=1}^m P_j \log_2 P_j,$$

$$H(AB) = \sum_{ij=1}^N P_{ij} \log_2 P_{ij}.$$

Количество информации оценивается в двоичных единицах (битах), однако удобнее пользоваться относительными мерами связи, выраженными в долях 1, так как только в относительных значениях данные могут сравниваться корректно. В настоящем исследовании использован нормированный коэффициент сопряженности [9]:

$$K(A; B) = \frac{2^{T(AB)} - 1}{2^{H(\min\{a, b\})} - 1}.$$

Каждое из рассматриваемых свойств может находиться в одном из состояний:  $a_i \in A$ , где  $i = \overline{1, k}$  и  $b_j \in B$ , где  $j = \overline{1, c}$ . Величина  $2^{T(AB)}$  есть число общих состояний  $A$  и  $B$  или число состояний, лежащих в области пересечения множества наблюдений  $A$  и  $B$ . Число состояний, соответствующих области пересечения, которая и определяет степень взаимоограничения  $A$  и  $B$ , зависит от числа состояний свойств  $A$  и  $B$ , представленных в конкретных наблюдениях. В случае абсолютного взаимоограничения, когда каждому состоянию свойства  $A$  с  $k \geq c$  соответствует только одно состояние свойства  $B$ , число состояний в области пересечения, однозначно

соответствующих друг другу, равно  $c$ , а при  $k \leq c$ . Если свойства полностью независимы и  $T(AB)$  равно нулю, то  $2^0 = 1$ , т.е. на каждое состояние из  $A$  приходится только одно тождественное состояние из  $B$ , и наоборот.

Направление связей определялось изначально, исходя из известных представлений о характерных временах различных природных компонентов [3]. При возникновении затруднений для уточнения направлений связей рассчитывались коэффициенты приема  $K(B/A)$  и передачи информации  $K(A/B)$ , по [4]:

$$K(B; A) = \frac{T(A, B)}{H(A)} \text{ и } K(A; B) = \frac{T(A, B)}{H(B)}.$$

При  $K(B/A) > K(A/B)$  принималось, что преобладает входное воздействие от  $B$  к  $A$ , при  $K(B/A) < K(A/B)$  – воздействие выходное от  $A$  к  $B$ ; при  $K(B/A) \approx K(A/B)$  считалось, что  $A$  и  $B$  в равной мере воздействуют друг на друга. В первом случае признак  $A$  считается индикатором, во втором – эдификатором (средообразователем); в третьем случае оба признака ( $A$  и  $B$ ) являются ретрансляторами [9].

В формировании ландшафтов абсолютными эдификаторами являются геоморфологические признаки, которые в системе ландшафтных связей выступают в качестве исходных факторов ( $K(A; B) = 0,18 - 0,23$ ). Остальные признаки могут играть роль как явлений, так и факторов. Они образуют группу вторичных эдификаторов (второстепенных средообразователей, по терминологии [2]).

### Результаты и их обсуждение

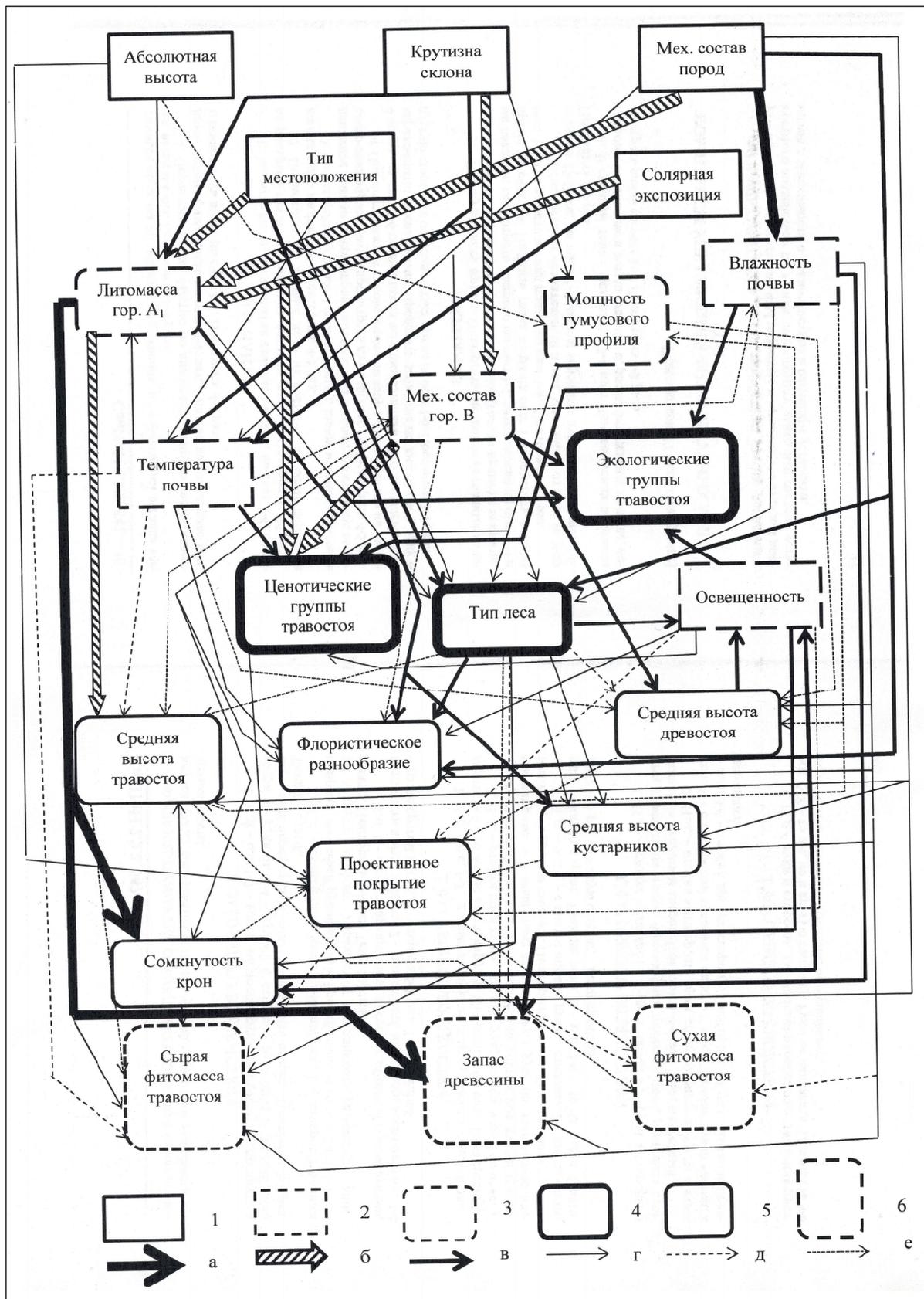
Информационная модель межкомпонентных ландшафтных связей лесных топогеосистем заповедника «Комсомольский» показала следующее – (рис. 2) (на рисунке представлена генерализированная модель).

К эдификаторам относятся пять признаков. По силе суммарного воздействия на остальные признаки на первом месте стоит механический состав горных почвообразующих пород ( $K(A; B) = 6,17$ ), на втором – крутизна склона (5,38), далее следуют абсолютная высота (4,81), тип местоположения (4,22) и соляная экспозиция склона (3,64).

Рассмотрим группу вторичных эдификаторов, или ретрансляторов, с наличием как входных, так и выходных стрелок достаточно сильных связей. Сюда относятся все признаки геофизического и почвенного блоков, наиболее влиятельные из которых – влажность почвы (суммарное воздействие 3,77), литомасса почвенного горизонта  $A_1$  (3,25), освещенность (2,89 бит) и механический состав горизонта  $B$  (2,87).

В группу индикаторов состояния лесных топогеосистем входят признаки геохимического и двух фитоценологических блоков. Наиболее эффективные индикационные свойства проявляют следующие признаки: запас древесины (3,66), воздушно-сухая (3,53), экологические, ценологические и географические группы травостоя (3,2–3,5), типы леса (3,44).

Проследим основные каналы передачи информационных сигналов. К группе наиболее значимых ландшафтообразующих факторов, по В.Б. Сочаве [16], относят-



**Рис. 2. Общая информационная модель межкомпонентных ландшафтных связей лесных топогеосистем Комсомольского заповедника**

Геокомпонентные блоки: 1 – геоморфологический; 2 – геофизический; 3 – почвенный; 4 – комплексный блок растительных сообществ; 5 – структурный фитоценотический; 6 – функциональный фитоценотический. Нормированные коэффициенты сопряженности признаков  $K(A;B)$ : а  $\geq 0,201$ ; б  $-0,171-0,2$ ; в  $-0,141-0,17$ ; г  $-0,111-0,14$ ; д  $-0,091-0,11$ ; е  $-0,071-0,09$

ся литология подстилающих пород, генетический тип рельефа, гидротермика. Исходя из этого, для моделирования ландшафтных связей мы взяли независимые переменные, характеризующие рельеф и литологию геосистем. Эти факторы относятся к группе инертных компонентов и представляют собой фиксированную основу геосистемы [9]. По В.Н. Солнцеву [15], они создают стабилизирующий механизм межкомпонентных связей и обеспечивают устойчивость геосистем. Такие переменные вместе с признаками почвенного блока, характеризующие минеральные горизонты почвы, образуют первую серию связей. Рассмотрим ее более подробно.

Топогеосистемы изначально определены тем, какому типу местоположения они принадлежат. В соответствии с этим меняется механический состав почвы и количество в ней литомассы, мощность минеральных почвенных горизонтов.

Геоморфологические признаки воздействуют на количество литомассы в почве и механический состав горизонта *B*. Механический состав минеральных горизонтов почвы и их мощность определяют экологическую и ценотическую приверженность групп травостоя к тому или иному местообитанию. Количество литомассы в почве и мощность горизонта *B*, в свою очередь, влияют на ее трофность и, тем самым, отражаются на запасе древесины ( $K(A;B)=0,2$ ) и надземной фитомассе травостоя ( $K(A;B)=0,14-0,16$ ).

На информационной модели прослеживается вторая серия внутрисистемных связей лесных топогеосистем. Пучок связей от гидротермических показателей почвы расходится к признакам фитоценологических и геохимического блоков, при этом наибольшее влияние на температуру почвы оказывает крутизна склона ( $K(A;B)=0,17$ ).

На схеме геофизические признаки показаны обобщенно. На самом деле, измерение температуры и влажности почвы производилось на разных глубинах (30–70 см), а измерение освещенности – на разных высотах (1–1,5–2 м). Интересно отметить, что влияние экспозиции склона на температуру почвы ограничивается глубиной 50 см, ниже которой разница в приходе солнечной радиации к поверхности почвы уже не ощущается. На глубине 70 см на температуру почвы наиболее сильно воздействует механический состав почвообразующих пород ( $K(A;B)=0,14$ ), что связано с близким расположением материнской породы. Так, грубообломочная или монолитная горная порода оказывает больший охлаждающий эффект, нежели песчаные отложения.

Подобная ситуация, но уже во всем почвенном профиле, наблюдается с влажностью почвы. В зависимости от механического состава почва будет переувлажненной или свежей. Влажность почвы воздействует на многие структурные параметры взрослого древостоя: сомкнутость крон, диаметр ствола, высоту деревьев, тогда как температура – на высоту подростка и распределение ценологических групп травостоя.

Информационные связи от температуры и влажности почвы направлены к признакам функционального фитоценологического блока и типу леса ( $K(A;B)=0,11$ ).

Действительно, в заболоченных западинах представлены низкорослые угнетенные разреженные лиственничники, а для сухих склонов характерны густые толстоствольные дубняки.

Гидротермические показатели почвы – основные факторы, распределяющие кислотность почв (рН водного и гидролитической кислотности). В то время как рН солевой почвы определяется ее механическим составом и количеством литомассы.

Интересно также отметить, что рН водный почвенного горизонта  $A_1$  и влажность горизонта *B*, сильно зависящие от высоты местности, определяют разнообразие травяно-кустарничкового яруса ( $K(A;B)=0,21$ ). Например, наибольшее флористическое разнообразие ( $H_{фц} = 3,38$  бит) наблюдается в умеренно увлажненной слабокислой почве (рН=6,16) пойменных широколиственных лесов.

В центре третьей группы связей освещенность. Ее измерение, как уже отмечалось, проводилось на небольших высотах, в связи с чем удалось проследить ее влияние лишь на нижние ярусы подростка, кустарников и травостоя. Сильные информационные потоки от геоморфологического и почвенного блоков, а также от гидротермических признаков почвы направлены на сомкнутость крон древостоя, высоту деревьев и тип леса. В самом деле, хвойный или пойменный лес обычно достаточно густой, поэтому снижает освещенность, а вторичный разреженный березняк и лиственничник ее повышают. Освещенность, в свою очередь, оказывает наиболее сильное воздействие ( $K(A;B)=0,14-0,16$ ) на экологические группы травостоя и запас древесины.

### Заключение

Информационная модель показала, что в формировании лесных топогеосистем Комсомольского заповедника прослеживается достаточно строгая геокомпонентная иерархия. В основе их межкомпонентной структуры лежат признаки геоморфологического блока. Им подчинены геофизический и почвенный блоки. Ниже на ступень – геохимический и структурный фитоценологический блоки. На самой низшей ступени – функциональный фитоценологический блок, отвечающий за продуктивность леса. По мере движения сверху вниз по ступеням иерархии сила информационных связей снижается, что говорит о значительной автономии растительного покрова от среды. Подобное явление уже отмечалось в работе А.А. Крауклиса [10].

Среди признаков-эдификаторов главную роль играют механический состав почвообразующих пород и угол наклона поверхности. Основные ретрансляторы системы – влажность и температура почвы, освещенность, механический состав минеральных горизонтов и количество литомассы в гумусовых горизонтах почвы. Еще один важный ретранслятор системы, но находящийся на ступень ниже перечисленных ранее, – древостой. Индикаторами системы являются запас древесины, сырая и воздушно-сухая надземная фитомасса, тип леса, экологические, ценологические и географические группы травостоя.

Благодаря увеличению количества пробных площа-

дей и анализируемых признаков, за счет проведения второго полевого сезона в 2012 г. удалось выявить дополнительные признаки из числа эдификаторов, ретрансляторов и индикаторов. Кроме того, более полно были определены основные каналы передачи информационных связей.

Собранных полевых данных вполне достаточно для оценки структуры лесных топогеосистем заповедника «Комсомольский» и дальнейшее увеличение количества пробных площадей будет способствовать лишь небольшой коррекции количественных показателей в коэффициентах информационной сопряженности. Однако пополнение количества анализируемых геокомпонентных признаков и охват пробными площадями наиболее труднодоступных районов заповедника откроет новые горизонты для исследования лесных топогеосистем заповедника. В связи с этим в 2014 г. в рамках гранта РФФИ № 14-05-00032 планируется провести очередные полевые работы на территории заповедника по имеющимся и новым пробным площадям с целью сбора дополнительного материала для построения покомпонентных и прогнозных карт лесных биогеоценозов заповедника.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1998. 264 с.
2. Арманд А.Д. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 126 с.
3. Арманд Д.Л., Тагульян В.О. Некоторые принципиальные ограничения эксперимента и моделирования в географии // Изв. АН СССР. Серия географическая. 1974. № 4. С. 129–138.
4. Беручашвили Н.Л., Жучкова И.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 319 с.
5. Глазовская М.А. Геохимия природных и антропогенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
6. Дылис Н.В. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. 403 с.
7. Дьяконов К.Н., Касимов Н.С., Тикунов В.С. Современные методы географических исследований. М.: Просвещение, 1996. 207 с.
8. Залетаев А.С. Экотонные экосистемы как географическое явление и проблемы экотонизации биосферы // Современные проблемы географии экосистем: тезисы докл. Всесоюз. совещ.). М.: Ин-т географии АН СССР, 1984. С. 53–55.
9. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
10. Крауклис А. А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
11. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
12. Никонов В.И. Природные ландшафты Нижнего Приамурья // Сибирский географический сборник. 1975. Вып. 10. С. 128–175.
13. Петренко П.С. Информационная модель межкомпонентных связей в топогеосистемах заповедника «Комсомольский»/ Региональные проблемы. 2013. Т. 16, № 2. С. 73–77.
14. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука. 1981. 275 с.
15. Солнцев Н.А. В защиту закона Докучаева // Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 5–28.
16. Сочава В.Б. Геотопология как раздел учения о гео-системах // Топологические аспекты учения о гео-системах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3–86.

*This article is devoted to the analysis of landscape components interdependence in forest geosystems of the Komsomolsky nature reserve. To make the analysis, it was applied the information theory methods. The informational statistic monosystem model of forest geosystems, built by the author, shows their structure.*

**Keywords:** forest local geosystem, informational model, component landscape links, re-transmitter, indicator.