

Использование информационной статистики для изучения экологии растительности и динамических процессов растительного покрова Земли

Б. С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ¹, Л. И. ВАРЧЕНКО²

¹ФГУН Ботанический сад-институт ДВО РАН
690024, Владивосток, ул. Маковского, 142

E-mail: petrop5@mail.ru

²ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН
690014, Владивосток, ул. Радио, 7

E-mail: semkin@tigdvo.ru

Статья поступила 24.09.2020

После доработки 21.10.2020

Принята к печати 03.11.2020

АННОТАЦИЯ

Рассмотренные методики эколого-географического анализа растительности, обозначенные в рамках метода разнообразий, позволяют выявить основные ботанико-географические соотношения, определить динамические процессы растительности. Методы могут быть использованы на разных структурных уровнях растительности – глобальном, региональном, ландшафтном и даже ценотическом.

Ключевые слова: растительный покров, структура растительности, продуктивность растительности, метод анализа разнообразий, факторы среды, динамика растительного покрова.

В связи с изменением климата и возрастанием антропогенной нагрузки на природу все острее встает проблема оценки влияния деятельности человека на окружающую среду и прогнозирования возможных преобразований компонентов биосферы и, в первую очередь, растительного покрова, от состояния которого зависит существование других компонентов. Растительность является интегральным показателем состояния надземной части биосферы, по размеру и характеру изменений в растительном покрове можно судить о происходящих трансформациях в экосистемах разного уровня. При этом особое значение приобретают вопросы обеспечения устойчивости природных

компонентов, прогнозирования динамики растительности в связи с изменением климата и все возрастающим антропогенным прессом на природную среду. С этими задачами связаны проблемы организации мониторинга окружающей среды и особенно растительности как ведущего биологического компонента, определяющего состояние и динамические процессы в остальных. В связи с этим особую роль играют биосферные заповедники, на территории которых выполняются многие исследования в рамках Программы ЮНЕСКО “Человек и биосфера”, которая в 2021 г. будет отмечать свое 50-летие.

Цель данной работы – отразить некоторые методические приемы по выявлению динами-

ческих процессов растительности на примере структуры и продуктивности растительного покрова Земли на основе применения информационной статистики.

ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА

В числе обсуждаемых вопросов следует особо выделить во многом новаторскую работу Д. Л. Арманда [1950], посвященную анализу связей растительности и климата. Автор применил сопряженный картографический анализ, показал технику составления корреляционных таблиц, отражающих связь растительности с климатическими факторами. Он широко использовал математический аппарат, в основном вариационную статистику, с применением коэффициентов корреляции.

В наших исследованиях для изучения динамических процессов растительности широко использована информационная статистика, нашедшая отражение в ряде опубликованных работах [Кульбак, 1967; Пузаченко, Мошкин, 1969; Пузаченко и др., 1975; и др.]. Впоследствии она применялась при разработке метода многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами [Семкин, Усольцева, 1982; Семкин и др., 1986]. Информационная статистика и метод многомерного анализа растительности использовались в различных областях математико-картографического моделирования [Петропавловский и др., 1978; Киселев, 1979, 1985; Скулкин, 1979; Петропавловский, 2001]. Обнадеживающие результаты применения анализа растительности на разных его структурных уровнях позволяют считать, что включающий его метод информационного анализа способен выявить основные тенденции и количественные параметры динамических процессов и на планетарном уровне.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным источником исходной информации послужили карты из Физико-географического атласа мира [1964]. При этом применен сопряженный картографический анализ, эффективность применения которого для выявления количественных связей показана достаточно основательно [Берлянт, 1978]. Карта растительности мира в масштабе 1:60 000 000,

составленная В. Б. Сочавой, была выбрана в качестве основной.

Использовались карты факторов среды из этого же атласа. Материал собирался с помощью регулярной сетки. Размеры сторон квадратных элементарных ячеек на картах-схемах составили 4 мм, что соответствует 240 км. Такой шаг съема информации, или в терминах геоботаники – площади выявления, обосновывается разработанной нами биогеографической сеткой для задач мониторинга растительного покрова всех иерархических уровней растительности с учетом масштабов картирования растительности [Петропавловский, 1982].

Информация снималась в углах левых точек квадратов, что составило “шаг опробования, сканирования” конкретного показателя. В результате квадратной привязки все 2497 точек опробования (съема информации), приходящиеся на сушу, имеют свои координаты и порядковые номера в созданной базе данных.

На этом самом мелком масштабе карты растительности атласа за основную типологическую структуру растительности взяты типы растительности, которые по В. Б. Сочаве [1972] представляют собой сочетание фратрий формаций с характерным набором биоморф. Это самые крупные таксономические подразделения растительности, соответствующие, в большинстве случаев, определенным биомам.

В качестве исходного материала для изучения динамики продуктивности растительного покрова суши Земли использована статья Н. А. Ефимовой [1976]. Данные по продуктивности растительного покрова, отраженные на сериях карт-схем этой статьи, снимались по регулярной сети.

МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В русле обозначенного метода рассматриваются несколько методик, позволяющих выявить особенности экологии растительных сообществ.

Методика изучения влияния факторов среды на растительность. Для оценки влияния факторов среды применена информационная статистика, основные принципы и методы которой отражены в ряде работ [Пузаченко, Мошкин, 1969; Пузаченко и др., 1975; 1978;

Киселев, 1979, 1985; Скулкин, 1979; и др.]. Информационный анализ в сравнении с корреляционным и дисперсионным обладает рядом достоинств, которые заключаются в том, что этот метод обладает общностью, возможностью применения его к сложной системе, как, например, лесная растительность. Применение этого анализа не требует ни линейности, ни метричности, ни непрерывности, ни даже упорядоченности [Пузаченко, Мошкин, 1969]. Метод оказался эффективным при изучении различных биологических объектов, для которых структурно-функциональное состояние объекта и влияющие на него факторы среды характеризуются как количественными, так и качественными показателями (со слабой шкалой параметров).

Метод анализа разнообразий вкупе с информационным анализом нашел применение в физической географии, почвоведении, геоботанике, лесоведении. Ниже приводятся основные методические приемы, меры, коэффициенты, имеющие отношение к информационному анализу (информационной статистике, информационно-логическому анализу).

Информационная статистика основана на оценке количества передаваемой информации, выраженной в категориях неопределенности, энтропии фактора и явления. Центральным понятием для расчета меры взаимозависимости является оценка разнообразия состояния системы, которая чаще всего определяется через категории теории вероятности, в основном через меру разнообразия функции H :

$$H = -\sum_i p_i \log p_i,$$

где p_i – вероятность i -го события.

Логика определения меры связи основана на том, что по информации, которая определяется как мера неопределенности и характеризует фактор среды (обозначим его через B), можно определить состояние растительности A (“явления” – в терминах информационного анализа). Величина неопределенности, или мера разнообразия, $H(A)$ и $H(B)$ определяется по формуле Шеннона, отражающей априорное распределение вероятностей:

$$H(B) = -\sum_i p(b_i) \log_2 p(b_i);$$

$$H(A) = -\sum_i p(a_i) \log_2 p(a_i),$$

где $p(b_i)$ и $p(a_i)$ – соответственно вероятности событий b_i и a_i .

В случае, когда известны меры неопределенности (или разнообразия) фактора среды и состояния структуры растительности и их совместное состояние, можно определить меру зависимости между ними по формуле

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

где $H(A)$ – неопределенность структуры растительности (“явления”); $H(B)$ – неопределенность фактора среды; $H(A, B)$ – совместная неопределенность фактора и явления, которая определяется как

$$H(A, B) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(a_i b_j) \log_2 p(a_i b_j).$$

При фактически независимых состояниях A и B совместная неопределенность $H(A, B)$ равна сумме $H(A)$ и $H(B)$ и тогда $T(A, B) = 0$.

Таким образом, мера зависимости $T(A, B)$ выражает определенное “количество” информации и по существу является в биологических системах мерой связи, аналогичной коэффициенту корреляции, но, в отличие от последнего, более универсальной, поскольку применяется без ограничений, которые накладываются при корреляционном анализе. Величина связи, оцениваемая через $T(A, B)$, размерная и определяется в битах. Размерность устраняется путем нормирования через $H(A)$:

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

Мера $K(A, B)$ изменяется от 0 до 1. По величине меры можно судить о степени влияния фактора на “явление”. Мера используется при оценке влияния какого-либо фактора (им могут быть различные характеристики среды) на какое-либо “явление” (в терминах информационно-логического анализа, по Ю. Г. Пузаченко, А. В. Мошкину, [1969]), под которым могут быть различные зависящие от факторов структурно-функциональные характеристики растительности, почвы, животного мира и многие другие проявления биоты. Для биологических систем большое значение имеет “обратная” мера, представляющая собой отношение $T(A, B)$ и $H(B)$:

$$K_0(A, B) = \frac{T(A, B)}{H(B)}.$$

Эта мера также изменяется от 0 до 1. Биологическая интерпретация меры может характеризовать индикаторную роль “явления”, например, при установлении возможности определения кислотности почвы по встречаемости отдельных видов растений. Основой расчета меры зависимости (коэффициента сопряженности) является матрица совместных частот фактора среды и “явления”.

Методика восстановления (моделирования) исходной растительности. Методика основана на использовании коэффициентов наиболее специфичных отношений или классификационных критериев. Несмотря на некоторые непринципиальные различия в аппроксимации растительности (восстановлении, прогнозировании, моделировании), у разных авторов методика по существу однотипна [Пузаченко, Мошкин, 1969; Семкин и др., 1986; и др.].

Методика включает несколько этапов:

1. По каждому экологически значимому (ведущему) фактору среды и анализируемому таксону составляется матрица совместных частот.

2. Производится расчет коэффициентов наиболее специфичных соотношений.

3. Определяются суммы коэффициентов по каждой градации факторов среды и данного показателя растительности таксона индексов.

4. Для данных экологических условий по максимальной сумме по всем грациям всех

факторов определяется наиболее вероятный показатель растительности.

На соответствующей карте-схеме такой наиболее вероятный таксон (вид или сообщество) в конкретной регулярной точке сбора информации, т. е. в соответствующей ячейке карты-схемы, маркируется путем “заливки”, что обычно применяется при математико-картографическом моделировании.

Сопоставление исходной и современной растительности позволяет выявить основные динамические процессы, связанные с антропогенным воздействием или изменением климата. Данный метод может быть полезен для задач палеоботаники и палеогеографии, восстановления исходной растительности по заданным параметрам факторов среды, для прогноза возможных изменений растительности при различных сценариях изменения экологических условий. Наиболее простой способ изучения возможных климатических изменений – использование климатической ординации растительных сообществ определенного структурного уровня растительности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние факторов среды на растительность. Влияние ведущих факторов среды с помощью меры $K(A, B)$ и индикаторное значение растительности через $K(A, B)$ характеризуют данные табл. 1. Значения “прямых” мер по всем факторам меньше, чем “обратных” с повышенными фитоиндикаторными возможностями. Это объясняется тем, что граций

Т а б л и ц а 1

Влияние ведущих факторов среды на структуру и продуктивность растительности Земли

Фактор среды	Структура растительности		Продуктивность растительности	
	$K(A, B)$	$K(B, A)$	$K(A, B)$	$K(B, A)$
Геоморфологическая структура	0,144	0,097	0,069	0,050
	0,112	0,076	0,089	0,050
Почва	0,383	0,324	0,151	0,139
	0,008	0,006	0,097	0,085
Суммарная солнечная радиация	0,406	0,343	0,417	0,331
	0,129	0,094	–	–
Радиационный баланс годовой	0,564	0,203	0,576	0,319
	0,017	0,006	0,287	0,083
Радиационный баланс в январе	0,561	0,347	0,503	0,310
	0,011	0,005	–	–

П р и м е ч а н и е. По каждому фактору среды над чертой – значения мер связи, под чертой – их дисперсии. Отсутствие данных отмечено прочерком (дефисом).

(типов) растительности заметно больше, чем соответствующих градаций среды, а следовательно, энтропия, неопределенность, разнообразие, характеризующее Н-функцией, также выше по растительности (“явлению”), которая является знаменателем в мерах.

Самые низкие значения связаны с геоморфологической структурой, что является следствием того, что этот фактор действует на растительность не прямо, а опосредованно, через рельеф и почву.

Самая высокая сопряженность растительности отмечается в отношении суммарной солнечной радиации, радиационного баланса годового и этого же показателя в январе. Как оказалось, более существенно влияние радиационного баланса и температуры на растительность в январе, чем в июле. Это, по-видимому, является характерной чертой для крупных территорий и тем более для всей планеты в целом, где выражены большие градиенты (перепады) по температуре воздуха и радиационному балансу.

Высокая сопряженность растительности с притоком тепла и радиации хорошо согласуется с тем, что радиационные пояса, границы которых совпадают практически с параллелями, являются зональными категориями наивысшего уровня дифференциации географической оболочки. Закон зональности имеет первостепенное значение при физико-географическом районировании крупных территорий. Заметно высокое значение мер в отношении почвы. По-видимому, это связано с тем, что контуры почв корректировались по соответствующим выделам типов растительности, что искусственно повысило экологическую сопряженность, отраженную в значениях мер. Высокими значениями характеризуются меры и в отношении такого интегрального фактора, как “безморозный период”, во многом адекватный вегетационному периоду. Он целиком определяется основными прямыми действующими факторами, определяющими теплообеспеченность территории – суммарной солнечной радиацией, радиационным балансом годовым, в январе и июле. Влияние осадков на растительность неожиданно оказалось сравнительно невысоким – 0,180, хотя общеизвестно лимитирующее влияние осадков при образовании растительных группировок саванн, степей, пустынь. Количество осадков

само по себе ничего еще не отражает: один и тот же показатель может быть оптимальным для растительных сообществ тундры при низкой испаряемости и крайне недостаточным для “нормального” развития растительности, например, при очень высокой испаряемости в центральной части африканского континента, где типичны сообщества пустынь.

Влияние факторов среды как на продуктивность, так и на структуру растительности в целом аналогично, хотя есть и отличия. На продуктивность растительности меньшее влияние оказывает температура воздуха в январе и июле. Но повысилась роль годовых осадков.

Ординация растительности. Эффективность применения метода многомерного анализа растительности с экологическими факторами демонстрируется на примере составления экологической классификации и подготовки карты эколого-растительных (эколого-фитоценологических) комплексов растительности мира. Установлено, что распределение зональных типов растительности обусловлено определенными сочетаниями тепла и влаги.

Наиболее удобной формой отражения зависимости распределения растительности от ведущих факторов среды является прямая ординация. На планетарном уровне использовались радиационный баланс годовой и радиационный индекс сухости (РИС) (табл. 2).

В таблице приведены наиболее характерные типы растительности: 1 – тундры; 2 – бореальная; 3 – неморальная; 4 – кустарниково-древесная субтропическая; 5 – степная; 6 – внетропических пустынь Северного полушария; 7 – высокогорная тундрового и бореальных типов; 8 – влажный вечнозеленый тропический лес; 9 – листопадный и вечнозеленый переменного-влажный тропический лес; 10 – тропические сухие леса, склерофильные леса; 11 – тропических саванн; 12 – тропических пустынь; 13 – ксерофильная древесно-кустарниковая подтропическая; 14 – внетропических пустынь.

Толерантность их во многом пересекается, что в реальной ситуации проявляется в распространении на одной и той же территории нескольких типов растительности, но с разными экологическими оптимумами. Этому способствует горный рельеф, который позволяет в пространстве, через высотную поясность,

Т а б л и ц а 2
Ординация типов растительности Земли

Уровень увлажнения растительного покрова	Уровень теплообеспеченности растительного покрова (ккал на 1 см ² в год)					
Крайне недостаточное, РИС свыше 3	Очень холодные, до 10 °С	Холодные, 10–20 °С	Умеренно теплые, 20–40 °С	Теплые, 40–60 °С	Очень теплые, 60–80 °С	Жаркие, свыше 80 °С
Недостаточное, РИС от 2 до 3				XIII 6–38 14–18	XVIII 12–58 6–32 11–20	
Умеренное недостаточное, РИС от 1 до 2			VIII 5–16 6–6	XII 13–12 14–9 6–6	XVII 10–20 11–13 13–13	XXI 10–8
Умеренное, РИС от 0,7 до 1,0		IV 2–1 5–47	VII 5–45 2–3	XI 3–27 15–19 5–17	XVI 11–42 10–35 4–11	XX 9–24 8–12 10–12
Влажные, РИС от 0,3 до 0,7		III 7–24 2–16 1–16	VI 5–23 2–23 3–21	X 3–52 4–7	XV 4–58 8–23 9–12	XIX 8–27 9–4 10–4
Избыточное, РИС до 0,3	I 1–24	II 1–63 7–30 2–8	V 2–75 1–10	IX 7–8 3–4	XIV 9–5 8–4	

П р и м е ч а н и е. Римскими цифрами обозначены номера эколого-фитоценологических комплексов, арабскими – коды растительности (первая цифра), меры Дайса, умноженные для удобства на 1000 (вторая, после тире).

развести сообщества разных типов растительности по своим экологическим нишам, где они находят свои экологические оптимумы. Каждый таксон характеризуется своей, сугубо индивидуальной мерой экологической сопряженности с определяющими факторами среды. На ординационной схеме четко выделяются по значениям мер Дайса экологические оптимумы по каждому типу растительности в пределах своего экологического ареала.

Существует 19 относительно однородных по климатическим показателям участков суши с набором характерной (типичной) растительности в гомеостатистическом состоянии. С известной условностью такие однородные участки по экологическим параметрам, составу, структуре, продуктивности растительности, вслед за И. И. Букс [1976], можно считать эколого-фитоценологическими комплексами самого высшего, планетарного уровня. Эти гомогенные участки характеризуются вполне конкретной величиной “притертости”, уровнем экологического соответствия растительности, который, на наш взгляд, можно использовать как показатель экологи-

ческой устойчивости растительности. В экстремальных условиях, как правило, отмечаются сообщества одного типа растительности (например, тундры). Центральная часть ординационной схемы наиболее “насыщена” различными типами растительности. На основе ординации растительности составлена эколого-фитоценологическая карта-схема Земли (рис. 1).

Типы эколого-фитоценологических комплексов, приведенные в табл. 2, показаны на этом рисунке. Контуры самих комплексов вытянуты в основном в широтном направлении, что свидетельствует о превалирующей роли теплообеспеченности в распределении растительности, отражая главным образом зональные ботанико-географические соотношения.

Динамика структуры растительного покрова суши Земли. Для изучения динамики растительного покрова составлялись карты-схемы современной и восстановленной структуры растительного покрова. Результаты сопоставления современной и восстановленной растительности сведены в табл. 3. Данные таблицы отражают существенное измене-

**Изменение площади преобладающих типов растительности в связи с антропогенным влиянием
и изменением экологических условий**

Статус растительности	Площадь, млн км ²	Преобладающий тип растительности								Всего
		Тундровая	Бореальная	Неморальная	Кустарниково-древесная субтропическая	Степная	Влажный вечнозеленый тропический лес	Тропические саванны	Внетропические пустыни Северного и Южного полушарий	
Восстановленная	Площадь, млн км ²	8,9	45,5	14,5	2,9	25,0	12,2	23,2	19,5	151,7
	%	6,9	35,4	11,3	2,2	1,4	9,5	18,0	15,3	100
Современная	Площадь, млн км ²	9,4	25,8	8,2	3,8	22,7	5,8	12,8	22,2	110,7
	%	9,6	26,4	8,4	3,9	10,1	5,9	13,0	22,7	100
Увеличилось (+), млн км ² от восстановленной (%)		0,5 (5,6)			1,0 (34,5)				3,2 (16,4)	
Уменьшилось (-), млн км ² от восстановленной (%)			19,7 (49,3)	6,3 (43,4)		2,3 (9,2)	6,4 (52,5)	10,4 (44,8)		41,0 (27,0)

ние площади основных типов растительности, в основном в результате существенной потери площади преобладающих типов растительности, за исключением тундровой, кустарниково-древесной субтропической и внетропических пустынь Северного и Южного полушарий, которые увеличили площадь соответственно от расчетной (восстановленной, аналог – первоначальной) на 5,6, 34,5 и 16,4 %.

Наибольшая потеря площади, 52,5 % от расчетной, отмечается для влажных тропических лесов. Большие потери площади указаны для лесной растительности Северного полушария – неморальной (43,4 %) и бореальной (49,3 %). Существенно уменьшилась площадь и тропических саванн.

Динамика продуктивности растительного покрова Земли. Наиболее известные работы по продуктивности и биологическому круговороту главных типов растительности суши Земли связаны с исследованиями Н. И. Базилиевич с соавт. [Базилиевич, Родин, 1967; и др.].

Н. А. Ефимова [1976] рассчитывала продуктивность на основании установленной зависимости между продуктивностью растительности и ведущими факторами среды – радиационным индексом сухости и годовым радиационным балансом, отразив эту зависимость в виде серии кривых, отражающих экологическую сопряженность конкретных градиций продуктивности.

Коренное изменение структуры растительного покрова, безусловно, повлияло и на продуктивность растительности мира. В связи с этим проведена работа по разработке математической модели продуктивности растительности мира на основании данных Н. А. Ефимовой [1976] и результатах исследований многих авторов и источников. Для этого использовались данные для построения карты-схемы продуктивности 1850 метеорологических станций Земли. Радиационный индекс сухости представляет собой отношение годовой суммы радиационного баланса годового (ккал/(см²·год⁻¹)) к количеству тепла, необходимого для испарения годовой суммы осадков. Н. А. Ефимова выразила зависимость продуктивности растений (годового прироста биомассы их надземной и подземной частей в сухом виде, в ц/га). Эти зависимости послужили основой Н. А. Ефимовой для составления карт-схем продуктивности растительного покрова в целом по суши и по отдельным континентам, используя данные всех возможных метеостанций Земли. Мы выразили эту зависимость продуктивности растительности (ПР) от ведущих факторов среды – радиационного индекса сухости X_1 и радиационного баланса X_2 , в виде уравнения:

$$ПР = 0,177209X_1^{1,661389} \cdot X_2^{-1,16553}.$$

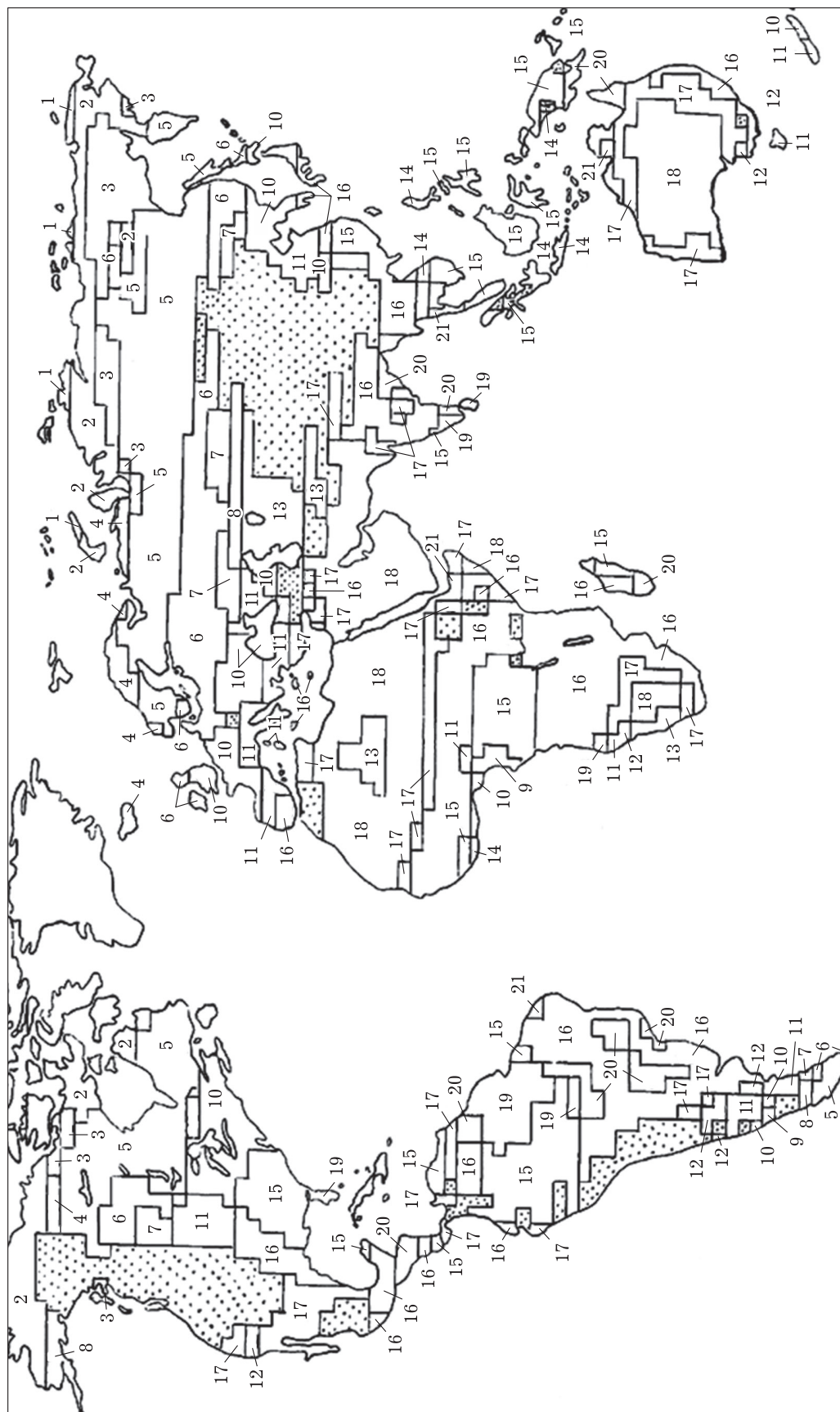


Рис. 1. Эколого-фитогеографические комплексы Земли.

1. Очень холодные с избыточным увлажнением: РБ – до 0,3 Р.; тундра, ЭС – до 24.2. Холодные с избыточным увлажнением: РБ – 10–20, РИС – до 0,3 Р.; тундры, ЭС – 63; высокогорная тундрового и бореального типов, ЭС – 30, бореальная, ЭС – 8.3. Холодные и влажные: РБ – 10–20, РИС – 0,3–0,7. Р.; высокогорная тундрового и бореального типов, ЭС – 63; бореальная, ЭС – 16; тундра, ЭС – 16.4. Умеренно теплые с избыточным увлажнением: РБ – 20–40, РИС – до 0,3 Р.; высокогорная тундрового и бореального типов, ЭС – 11; бореальная, ЭС – 9; тундра, ЭС – 5.5. Умеренно теплые и влажные: РБ – 20–40, РИС –

0,3–0,7. Р.: бореальная, ЭС – 75 и тундры, ЭС – 10. 6. Умеренно теплые с умеренным увлажнением: РБ – 20–40, РИС – 0,7–1,0. Р.: степная, ЭС – 23; бореальная, ЭС – 23; неморальная, ЭС – 21. 7. Умеренно теплые с умеренно недостаточным увлажнением: РБ – 20–40, РИС – 1–2. Р.: степная, ЭС – 45; бореальная – 3. 8. Умеренно теплые с недостаточным увлажнением: РБ – 20–40, РИС – 2–3. Р.: степная, ЭС – 16; внетропических пустынь северного полушария, ЭС – 6. 9. Теплые и влажные: РБ – 40–60, РИС – 0,3–0,7. Р.: высокогорная тундрового и бореального типов, ЭС – 8; неморальная, ЭС – 4. 10. Теплые с умеренным увлажнением: РБ – 40–60, РИС – 0,7–1,0. Р.: неморальная, ЭС – 62; кустарниково-древесная, ЭС – 7. 11. Теплые с умеренно недостаточным увлажнением: РБ – 40–60, РИС – 1–2. Р.: неморальная, ЭС – 27; широколиственные и хвойно-широколиственные субарктические леса, ЭС – 19; степи, ЭС – 17. 12. Теплые с недостаточным увлажнением: РБ – 40–60, РИС – 2–3. Р.: ксерофильная древесно-кустарниковая подтропическая, ЭС – 12; внетропических пустынь южного полушария, ЭС – 9; внетропические пустыни северного полушария, ЭС – 6. 13. Теплые с крайне недостаточным увлажнением: РБ – 40–60, РИС – 0,3–0,7. Р.: листопадные и вечнозеленые временнo-влажные тропические леса, ЭС – 5, влажные вечнозеленые тропические леса, ЭС – 4. 15. Очень теплые с умеренным увлажнением: РБ – 60–80, РИС – 0,7–1,0. Р.: кустарниково-древесная, ЭС – 58; влажные вечнозеленые тропические леса, ЭС – 23; листопадные и вечнозеленые переменно-влажные тропические леса, ЭС – 35; ЭС – 12. 16. Очень теплые с умеренно недостаточным увлажнением: РБ – 60–80, РИС – 1–2. Р.: тропические саванны, ЭС – 42; тропические сухие леса, ЭС – 20; кустарниково-древесная субтропическая, ЭС – 11. 17. Очень теплые с недостаточным увлажнением: РБ – 60–80, РИС – 2–3. Р.: тропические сухие леса, ЭС – 20; тропические саванны, ЭС – 13; ксерофильная древесно-кустарниковая подтропическая, ЭС – 13. 18. Очень теплые с крайне недостаточным увлажнением: РБ – 60–80, РИС – 2–3. Р.: тропические саванны, ЭС – 32; тропические саванны, ЭС – 20. 19. Жаркие с умеренным увлажнением: РБ – выше 80, РИС – 0,7–1,0. Р.: влажный вечнозеленый тропический лес, ЭС – 27; листопадный и вечнозеленый переменно-влажный тропический лес, ЭС – 4; тропические сухие леса, ЭС – 24; жаркие с умеренно недостаточным увлажнением: РБ – выше 80, РИС – 0,7–1,0. Р.: влажный вечнозеленый тропический лес, ЭС – 12; тропические сухие леса, ЭС – 12. 21. Жаркие с недостаточным увлажнением: РБ – выше 80, РИС – 2–3. Р.: тропические сухие леса, ЭС – 8. Участки с вкраплениями – горные страны, по которым нет информации по факторам среды. РБ – радиационный баланс; РИС – радиационная испаряемость; ЭС – экологическое соответствие; Р – растительность

Сходимость фактических данных по конкретным результатам исследований многих авторов, использованных Н. А. Ефимовой, и наших расчетных по приведенному выше уравнению оказалась очень высокой. Коэффициент корреляции между ними составил 0,96744. Критерий Фишера также показал высокую достоверность результатов.

Для расчета восстановленной, изначально, максимально соответствующей продуктивности растительного покрова для ведущих факторов среды использовались и дополнительные материалы. Кроме осадков и испаряемости, использовались данные по радиационному балансу годовому, в январе и июле, продолжительности безморозного периода, температуре воздуха в январе и июле, сумме солнечной радиации и испарению. Для каждой точки регулярной сети рассчитывалась продуктивность по этим факторам среды по методике, описанной выше.

Расчетная (максимально соответствующая всем отмеченным ведущим факторам среды) продуктивность растительности суши Земли составила 175,9 млрд т, что значительно выше данных Н. А. Ефимовой [1976] – 141,1 млрд т, которая рассчитывала продуктивность по двум факторам среды. По данным Н. И. Базилевич, Л. Е. Родина [1967], продуктивность растительного покрова мира составила 172,5 млрд т, что довольно близко к нашим расчетным данным с учетом всех ведущих факторов среды.

Распределение наших расчетных данных по продуктивности растительности суши хорошо согласуется с материалами Н. А. Ефимовой [1976], хотя на наших картах-схемах в целом по суше Земли принята другая шкала продуктивности, в виде кодов грааций продуктивности (от 1 до 12): 1 (10 ц/га), 2 (30), 3 (50), 4 (70), 5 (90), 6 (110), 7 (135), 8 (175), 9 (225), 10 (275), 11 (300), 12 (более 300 ц/га). Изолинии у Н. А. Ефимовой относятся к следующим граациям продуктивности: 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300 и более. Таким образом, наши начальные и конечные граации продуктивности растительности по абсолютным значениям изолиний совпадают с таковыми Н. А. Ефимовой – 10 ц/га и 300.

По мнению Н. А. Ефимовой, величина продуктивности растительности, равная

141,1 млрд т, характеризует потенциальную продуктивность как бы восстановленного (реконструированного) растительного покрова суши. Она считает, что существующий в настоящее время растительный покров, вероятно, имеет меньшие величины продуктивности, так как на значительных территориях наиболее продуктивные первичные типы растительного покрова в результате вырубок и пожаров замещены вторичными, менее продуктивными. По оценке А. М. Рябчикова [1972], величина общей продуктивности растительного покрова суши составляет 120 млрд т. Это, по его мнению, результат антропогенного влияния, по данным этого автора, в результате деятельности человека около 5 % площади суши лишены растительного покрова.

Существенное уменьшение продуктивности растительности поверхности суши идет в основном за счет тропических дождевых лесов, что, как было отмечено выше, связано с существенным уменьшением площади этого типа растительности – на 52,5 %. В целом, основные типы растительности (бореальная, неморальная, кустарниково-древесная субтропическая, влажные тропические дождевые леса) с древесной и кустарниково-древесной растительностью занимают в настоящее время 58,2 % от общей площади восстановленной растительности. В связи с этим есть основание считать, что фактическая продуктивность в связи с существенной деградацией и потерей площадей с древесной растительностью, с максимальными фитомассами, а следовательно, и повышенной продуктивностью, может быть еще ниже – на уровне 100 млрд т.

Однотипность распределения градаций продуктивности совпадает в общих чертах по нашим данным и Н. А. Ефимовой [1976]. На наших картах-схемах максимальная расчетная продуктивность растительности также совпадает с ареалом влажных тропических лесов, с градациями продуктивности с максимальными значениями – 300 ц/га. Минимальные значения продуктивности растительности приурочены к областям с тропическими пустынями Африки, Азии, Австралии, внетропических пустынь Северной и Южной Америки, Средней и Центральной Азии. Градация продуктивности 2 (10 ц/га) и изолиния по Н. А. Ефимовой [1976], маркируемая продуктивностью 20 ц/га, практически совпадают

с границами тундры и лесотундры обширных территорий России и Северной Америки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методики с применением информационного анализа, эколого-географического анализа растительности, обозначенных в рамках метода многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами, позволяют выявлять основные ботанико-географические соотношения, проводить экологический анализ растительности и определять динамические процессы растительности.

Как показали результаты наших исследований, этот метод с конкретными обозначенными методиками может успешно использоваться и на других структурных уровнях растительности, не только на глобальном, но и на региональном [Апалькова, Петропавловский, 1976; Киселёв, 1979, 1985, 2002] и даже ценоотическом [Петропавловский и др., 1987; Петропавловский, 1993, 2004; Максимова, Петропавловский, 1999].

ЛИТЕРАТУРА

- 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. 100–112.
- Арманд Д. Л. Опыт математического анализа связи между типами растительности с климатом // Изв. ВГО. 1950. Т. 82, вып. 1. С. 19–50.
- Базилевич Н. И., Родин Л. Е. Картограммы продуктивности и биологического круговорота важнейших типов растительности суши Земли // Изв. ВГО. 1967. Т. 99, № 3. С. 123–129.
- Берлянт А. М. Картографический метод исследования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 255 с.
- Букс И. И. Методика составления и краткий анализ корреляционной эколого-фитоценоотической карты Азиатской России // Геоботаническое картографирование. Л., 1976. С. 44–51.
- Ефимова Н. А. Карты продуктивности природных растительных покровов континентов // Ботан. журн. 1976. Т. 61, № 12. С. 1641–1657.
- Киселёв А. Н. Методика крупномасштабного прогнозного картографирования растительности горных территорий (на примере лесной растительности Среднего Сихотэ-Алиня) // Геоботаническое картографирование. Л., 1979. С. 8–21.
- Киселёв А. Н. Прогнозное биогеографическое картографирование: региональный аспект. М.: Наука, 1985. 104 с.
- Киселёв А. Н. Пространственно-временная структура экосистем Дальневосточного региона. Владивосток, 2002. 204 с.

- Кульбак С. Теория информации и статистики. М.: Наука, 1967. 408 с.
- Максимова В. Ф., Петропавловский Б. С. К характеристике некоторых типов леса восточного макросклона Среднего Сихотэ-Алиня // Биологические исследования на Горнотаежной станции: сб. науч. тр. Вып. К. Владивосток: ДВО РАН, 1999. С. 33–92.
- Петропавловский Б. С. Некоторые подходы к разработке биогеографической сетки для задач мониторинга растительного покрова // Локальный мониторинг растительного покрова. Владивосток, 1982. С. 5–10.
- Петропавловский Б. С. Экологические особенности лесообразующих пород Приморского края // Комаровские чтения. Вып. 41. Владивосток: Дальнаука, 1993. С. 16–28.
- Петропавловский Б. С. Опыт математико-картографического моделирования структуры и продуктивности растительности для задач мониторинга окружающей среды // Картография XXI века: теория, методы, практика: Вторая Всерос. науч. конф. по картографии. М., 2001. С. 105–110.
- Петропавловский Б. С. Леса Приморского края (эколого-географический анализ). Владивосток: Дальнаука, 2004. 317 с.
- Петропавловский Б. С., Майорова Л. А., Усольцева Л. А. Об экологии кедрово-широколиственных лесов // Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока (биогеоценотический аспект). Владивосток: ДВО РАН, 1987. С. 9–24.
- Петропавловский Б. С., Семкин Б. И., Усольцева Л. А. Опыт изучения устойчивости типов растительности в планетарном масштабе для целей фонового мониторинга окружающей среды // Опыт и методы экологического мониторинга. Пущино, 1978. С. 60–63.
- Пузаченко Ю. Г., Мошкин А. В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Сер. Мед. география. 1969. Вып. 3. С. 5–74.
- Пузаченко Ю. Г., Петропавловский Б. С., Скулкин В. С. Статистические модели геосистем и их компонентов // Моделирование элементарных геосистем. Иркутск, 1975. С. 104–116.
- Рябчиков А. М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М.: Мысль, 1972. 312 с.
- Семкин Б. И., Усольцева Л. А. Об использовании метода разнообразий при исследовании взаимосвязи растительности и среды // Локальный мониторинг растительного покрова. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 54–60.
- Семкин Б. И., Петропавловский Б. С., Кошкарев А. В., Варченко Л. П., Усольцева Л. А. О методе многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами // Ботан. журн. 1986. Т. 71, № 9. С. 1167–1181.
- Скулкин В. С. Математико-картографическое моделирование лесной растительности СССР и ЭВМ-карты ее состояний // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1979. № 5. С. 97–111.
- Сочава В. Б. Классификация растительности как иерархия динамических систем // Геоботаническое картографирование. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. С. 3–18.
- Физико-географический атлас мира. М., 1964. 298 с.

Using information statistics to study the ecology of vegetation and dynamic processes of the Earth's vegetation cover

B. S. PETROPAVLOVSKY¹, L. I. VARCHENKO²

¹*Botanical Garden-Institute FEB RAS
690024, Vladivostok, Makovskiy str., 142
E-mail: prtrop5@mail.ru*

²*Pacific Geographical Institute FEB RAS
690014, Vladivostok, Radio str., 7
E-mail: semkin@tigdro.ru*

The considered methods of ecological-geographical analysis of vegetation, indicated within the framework of the method of diversity, make it possible to identify the main botanical-geographical relationships, to determine the dynamic processes of vegetation. These methods can be used at different structural levels of vegetation – global, regional, landscape and even cenotic.

Key words: vegetation cover, vegetation structure, vegetation productivity, diversity analysis method, environmental factors, dynamics of vegetation cover.