

УДК 58.002

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ ДЛЯ ЗАДАЧ СОСТАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ КЛАССИФИКАЦИЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И КАРТ ЭКОЛОГО-РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Борис Сергеевич Петропавловский

Ботанический сад–институт Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
г. Владивосток
690024 г. Владивосток, ул. Маковского 142
petrop5@mail.ru

Рассматривается использование метода многомерного анализа растительности с экологическими факторами для решения ряда задач: составление экологических классификаций растительности; составление карт эколого-растительных комплексов, многофакторной экологической классификации типов леса и других.

Ключевые слова: *метод многомерного анализа растительности; экологические классификации растительности; карты эколого-растительных комплексов.*

Введение

Научное обеспечение организации охраны растительного мира, многоцелевого и устойчивого лесного комплекса предусматривает решение комплекса эколого-географических задач. К ним относятся, в частности, разработка и использование экологических классификаций растительности и составление карт эколого-растительных комплексов. В статье отражен опыт проведения исследований в этом направлении с отражением результатов исследований в научных публикациях. Метод многомерного анализа растительности с экологическими факторами [12] основан во многом на информационной статистике, которая обладает большими возможностями прогнозирования анализируемого объекта («явления») по изменению состояния фактора. Метод нашел применение в географии, в почвоведении, геоботанике, лесоведении, географической экологии.

Цель исследования - показать возможности применение метода многомерного анализа растительности с экологическими факторами на конкретных примерах, связанных с задачами разработки экологических классификаций растительности и составления карт эколого-растительных (эколого-фитоценологических) комплексов на планетарном уровне, хотя метод успешно применялся и на региональном, (ландшафтном) уровне, а также на фитоценологическом и популяционном [9].

Объекты и методы исследований

Объект исследований – планетарный уровень, растительность Земли. Методы исследований лежат в русле географической экологии, и, в частности, в области установления количественных сопряженностей между ведущими факторами среды и растительностью в ее различных проявлениях на основе использования информационной статистики, информационно-логического анализа [10].

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. Оценка разнообразия чаще всего определяется через категории теории вероятностей, в основном через меру разнообразия H - функцию:

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

H - функция первоначально отражала меру неопределенности информации, энтропию, избыточность информации и другие сугубо не биологического содержания понятия.

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 «явления» A . Величины неопределенности, или мера разнообразия, соответственно для фактора среды - $H(B)$ и растительности - $H(A)$ определяются 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 $T(A,B)$ 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:

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

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, по существу, является в биологических системах мерой связи, аналогичной коэффициенту корреляции, но в отличие от последнего является более универсальной мерой, поскольку применяется без ограничения, которые накладываются при корреляционном анализе. Величина связи, оцениваемая через $T(A,B)$, размерная, определяется в битах. Размерность устраняется путем нормирования через $H(B)$:

$$K(B;A) = T(A,B) / H(B)$$

Мера $(B; A)$ изменяется от 0 до 1. По величине меры можно судить о степени влияния фактора на «явление» (в терминах информационно-логического анализа, по Ю.Г. Пузаченко и А.В. Мошкину [10]), в нашем случае - растительности. Мера используется при оценке влияния какого-либо фактора (им могут быть различные характеристики среды) на какое – либо «явление», под которым могут быть различные характеристики зависимых 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 $H(A)$:

$$K(A;B) = T(A,B) / H(A)$$

Эта мера также изменяется от 0 до 1. Она 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 и «явления».

Для задач эколого-географического анализа лесной растительности Приморского края широко использовалась интегрированная информационно-картографическая система для аналитических целей DataGraf4, обладающая весьма большими возможностями сопряженного картографического анализа, применения математической статистики, составления простых ЭВМ-картосхем природных объектов. Она позволяет: формировать собственные массивы данных, использовать наиболее распространенные функции статистической обработки данных (расчет коэффициентов разнообразия Шеннона, корреляционный и регрессивный анализ), проводить районирование по определенной совокупности показателей, составлять ЭВМ-картосхемы распространения лесной растительности.

В рамках указанных ЭВМ-программ для задач эколого-географического анализа лесной растительности выполнялись математические процедуры направленные на: 1) определение уровня экологического соответствия лесной растительности; 2) составление таблиц экологической сопряженности лесной растительности; 3) восстановление (моделирование) исходной растительности.

Определение уровня экологического соответствия растительности

Методика основана на выявлении уровня экологического соответствия состояния таксона (например, типа леса, доминирующей породы) и конкретной градации фактора среды (экологического градиента). Такой подход адекватен оценке экологической устойчивости растения или сообщества в связи с нахождением их вдоль градиента среды. Наиболее устойчиво сообщество в области экологического оптимума, что проявляется, как правило, повышенной встречаемостью растения или сообщества в данных условиях. Для оценки уровня экологического соответствия (УЭС) таксонов растительности использована нормированная мера Дайса-Брея.

Выборочная мера совместимости событий (коэффициент Дайса; обобщенная мера Дайса-Брея) широко используется для сравнения относительной встречаемости явления при разных градациях фактора среды:

$$K = \frac{2\rho_{ij}}{\rho_i + \rho_j}, \text{ где}$$

ρ_{ij} - совместная встречаемость по фактору и явлению;

ρ_i - условная вероятность по градации фактора;

ρ_j - условная вероятность по сочетанию явления.

Мера совместимости событий изменяется от 0 до 1. Это позволяет сравнивать между собой относительную частоту встречаемости по всем градациям фактора. Следовательно, что чем ближе значение меры к единице, тем более характерно, или типично, сочетание фактора и явления. Мера «К» позволяет сравнивать относительную встречаемость явления при разных градациях фактора среды.

Для расчета УЭС составляется таблица, по столбцам которой приводятся градации факторов среды, а по строке – градации любой характеристики («явления») растительности, в принципе любые структурные или функциональные показатели, в качественной или количественной шкале градаций, градиентов, показателей растительности. В ячейках таблицы проставляются частоты совместных встреч или наблюдений. Не все при этом ячейки имеют совместные частоты в связи с экологическими особенностями растений. По каждой заполненной ячейке вычисляются меры Дайса-Брея.

При оценке УЭС таксона по двум и более факторам среды для каждого из них составляется соответствующая матрица. Интегральная оценка УЭС производится на основании суммирования всех нормированных мер Дайса–Брея. Нормированные УЭС обозначались через K_1 .

Аналогичная процедура может быть выполнена при оценке типичности, характерности произрастания растения или сообщества в сравнении с другими в диапазоне значений конкретной градации фактора среды. Техника расчета та же, только таксон оценивается уже не по градациям конкретных факторов среды (как при расчете K_1 – по «вертикали», столбцам матрицы), а в отношении каждой градации фактора в сравнении с другими таксонами – по «горизонтали», строкам матрицы.

В первом случае анализируется всего один таксон по всем градациям фактора среды, во втором случае, наоборот, в анализе участвуют все таксоны, но они сравниваются между собой по значениям мер Дайса–Брея конкретной градации фактора среды. Во втором случае УЭС обозначается как K_2 .

Результаты исследований

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 (табл.).

На ординационной схеме растительность Приморского края «размещена» в 6 сочетаниях тепло-влагообеспеченности из 19. В таблице эти сочетания выделены заливкой. Они имеют номера: VI и X.

Ординация растительности мира в принципе во многом сходна с таблицей географической зональности, на которой на качественном уровне прослеживается тесная связь географических зон, биомов с радиационным балансом земной поверхности и радиационным индексом сухости. Это позволило А.А. Григорьеву и М.И. Будыко [2] вывести периодический закон географической изменчивости.

На этой схеме выделяются гомогенные участки факторов среды и растительности, показаны оптимумы и пессимальные условия типов растительности, что отражается коэффициентами Дайса. В таком виде ординация представляет собой картографическую модель системы «факторы среды – растительность», что позволяет использовать ее для оценки возможных изменений структуры растительности при изменении этих ведущих факторов среды.

Из 36 теоретически возможных сочетаний климатических экотопов в природе существует 19 – относительно однородных по климатическим показателям участков суши с набором характерной (типичной) растительности в гомеостатическом состоянии. С известной условностью такие однородные участки по экологическим параметрам, составу, структуре, продуктивности растительности, вслед за И.И. Букс [1], можно считать ЭТИ эколого-фитоценологические комплексы самого высшего, планетарного уровня. Эти гомогенные участки характеризуются вполне конкретной величиной «притертости», уровнем экологического соответствия растительности, который, на наш взгляд, можно использовать как показатель экологической устойчивости растительности. В экстремальных условиях, как правило, отмечаются сообщества одного типа растительности (например, тундры). Центральная часть ординационной схемы наиболее «насыщена» различными типами растительности.

Таблица

Ординация растительности мира (по: Семкин и др., [12])

Влагообеспеченность (радиационный индекс сухости)	Крайне недостаточное увлажнение, РИС свыше 3				XIII 7-38 15-18	XVIII 13-58 7-32 12-20	
	Недостаточное увлажнение, РИС от 2 до 3			VIII 6-16 7-6	XII 14-12 15-9 7-6	XVII 11-20 12-13 14-13	XXI 11-8
	Умеренное недостаточное увлажнение, РИС от 1 до 2			VII 6-45 3-3	XI 4-27 16-19 6-17	XVI 12-42 11-35 5-11	XX 10-24 9-12 11-12
	Умеренное увлажнение, РИС от 0,7 до 1,0			VI 6-23 3-23 4-21	X 4-52 5-7	XV 5-58 9-23 10-12	XIX 9-27 10-4 11-4
	Влажные, РИС от 0,3 до 0,7		III 8-24 3-16 2-16	V 3-75 2-10	IX 8-8 4-4	XIV 10-5 9-4	
	Избыточное увлажнение, РИС до 0,3	I 2-24	II 2-63 8-30 3-8	IV 8-11 3-9 2-5			
		Очень холодные, до 10	Холодные, 10-20	Умеренно теплые, 20-40	Теплые, 40-60	Очень теплые, 60-80	Жаркие, свыше 80

Теплообеспеченность (радиационный баланс, ккал на 1 см² в год)

Примечание. РИС – радиационный индекс сухости. Римскими цифрами обозначены номера эколого-фитоценологических комплексов, арабскими – коды растительности (первая цифра), меры Дайса, умноженные для удобства на 1000 (вторая, после тире).

Приведены наиболее характерные типы растительности: 2 – тундры; 3 – бореальная; 4 – неморальная; 5 – кустарниково-древесная субтропическая; 6 – степная; 7 – внетропических пустынь северного полушария; 8 – высокогорная тундрового и бореальных типов; 9 – влажный вечнозеленый тропический лес; 10 – листопадный и вечнозеленый переменновлажный тропический лес; 11 – тропические сухие леса, склерофильные леса; 12 – тропических саванн; 13 – тропических пустынь; 14 – ксерофильная древесно-кустарниковая подтропическая; 15 – внетропических пустынь южного полушария; 16 – широколиственные и хвойно-широколиственные субантарктические леса.

Толерантность их во многом пересекается, что в реальной ситуации проявляется в распространении на одной и той же территории нескольких типов растительности, но экологические оптимумы у них разные. Этому способствует горный рельеф, который позволяет в пространстве, через высотную поясность, 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.

На основе ординации растительности составлена эколого-фитоценологическая карта мира [6] схематично отраженная на рисунке. Типы эколого-фитоценологических комплексов, показанные на ординационной схеме приведены на этой картосхеме.

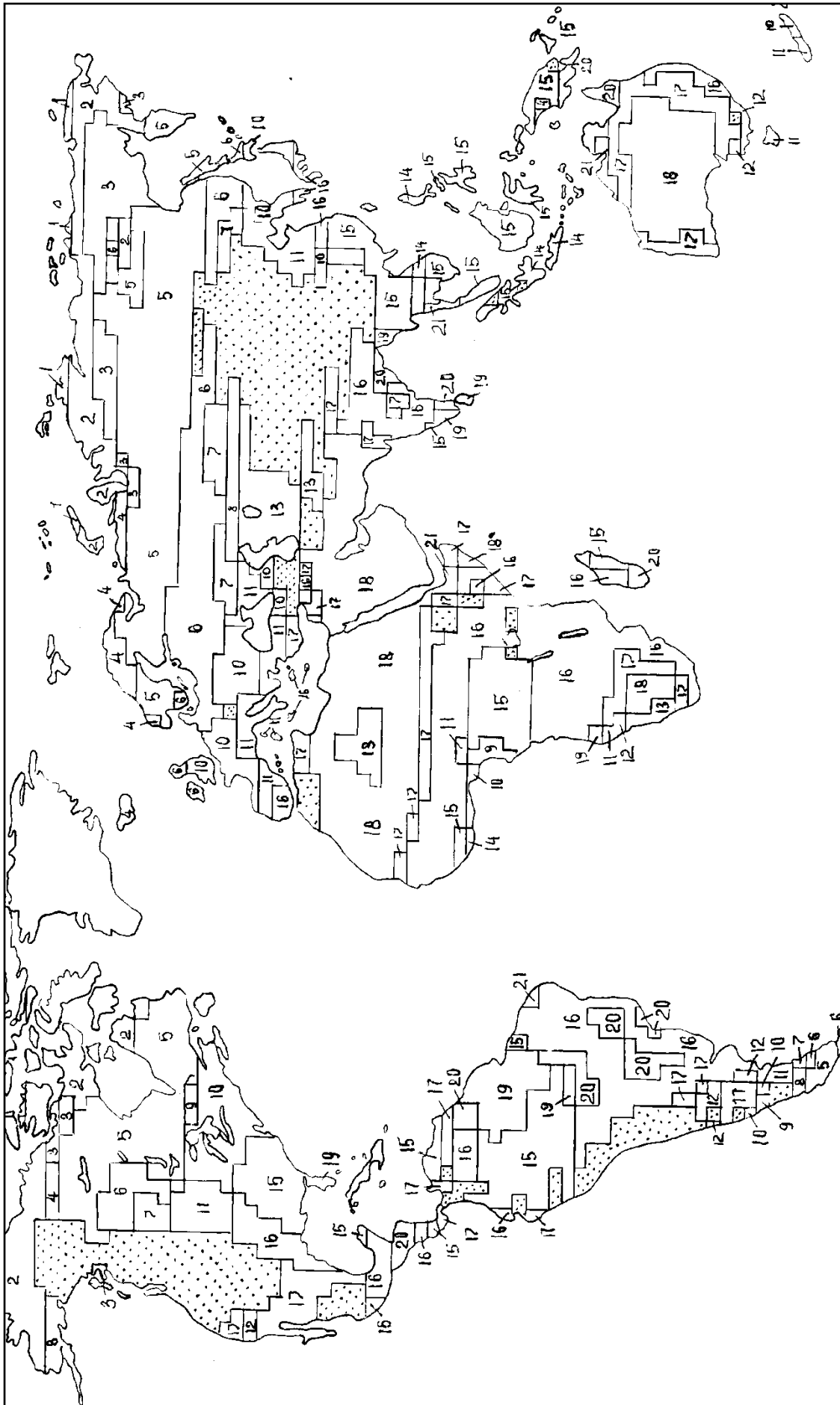


Рис. Эколого-фитоценологические комплексы мира

На северную часть Приморского края приходится VI эколого-фитоценологический комплекс, на южную часть Приморья – X комплекс. К нему примыкает XI, уходящий в сопредельные страны (Китай, Корея). Контур самих комплексов вытянуты в основном в широтном направлении, что свидетельствует о преобладающей роли теплообеспеченности в распределении растительности, отражая в основном зональные ботанико-географические соотношения.

На основе анализа эколого-фитоценологической карты (эколого-растительных комплексов) мира выявлены основные ботанико-географические соотношения планетарного уровня [6, 8], которые во многом определяют структурно-функциональную организацию лесной растительности Дальнего Востока, в том числе и Приморского края. В ячейках ординации – VI и X, соответствующие в большей мере экологическим условиям растительности Приморья, приводятся 3 типа растительности бореальная, неморальная и степная. Ни один из этих типов растительности в указанных ячейках не обладает максимальным значением меры Дайса, что свидетельствует об экотонной роли растительности Приморского края, основу которой составляют леса.

Выводы

Применение метода многомерного анализа растительности с экологическими факторами позволяет успешно решать актуальные задачи в области оптимизации рационального и устойчивого лесопользования, охраны растительного мира как на региональном уровне структурно-функциональной организации растительности, так и на планетарном, что отражено в статье при выявлении количественных сопряженностей между ведущими факторами среды и растительности, построении ординации растительности Земли - основой экологической классификации растительности и легенды карты эколого-растительных (эколого-фитоценологических) комплексов. На основе этого метода выполнены и другие задачи: 1) на примере лесной растительности Кавказа (в границах Тебердинского государственного заповедника) разработана многофакторная экологическая классификация лесной растительности [3]; 2) составлена карта эколого-растительных комплексов Дальнего Востока [7]; 3) проведено картографическое моделирование исходной растительности Приморского края [9]; 4) созданы экологические паспорта лесообразующих видов [4]; типов леса и лесных формаций Приморского края [5], использованы биоинформационные технологии при построении экологических карт [11].

Список литературы

1. Букс И.И. Методика составления и краткий анализ корреляционной эколого-фитоценологической карты Азиатской России (м-б 1:7 500 000) // Геоботаническое картографирование, 1976. Л., 1976. С. 44–51.
2. Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности / Докл. АН СССР, 1956, т. 110, № 1. С. 129–132.
3. Онищенко В.В., Петропавловский Б.С. Методика составления многофакторной экологической классификации типов леса на основе лесотаксационных описаний // Методика разработки многофакторной экологической классификации типов леса на примере лесной растительности Тебердинского заповедника: Препринт. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 35-60.
4. Петропавловский Б.С. Математико-картографическое моделирование оптимальных мест произрастания лесообразующих пород (на примере Приморского края) // Сибирский экологический журнал. № 6. 2011. С. 767-772.
5. Петропавловский Б.С. Экологическая обусловленность распространения типов леса Приморского края // Лесоведение. № 3. 2012. С. 33-42.

6. *Петропавловский Б.С.* Эколого-растительные комплексы мира // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 20-24 сентября 2011 г.). Том 2. Структура и динамика растительных сообществ. Экология растительных сообществ. «Бостон-спектр», Санкт-Петербург, 2011 С. 397-400.

7. *Петропавловский Б.С.* Эколого-фитоценотические комплексы Дальнего Востока России // Актуальные проблемы геоботаники: // Актуальные проблемы геоботаники: материалы Международной научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого, основоположника казахстанской геоботанической школы, академика НАН РК, д.б.н. Б.А. Быкова в связи с 100-летием со дня рождения. Алматы: 2011. С. 86-90.

8. *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. Пущино, 1978. С. 60–63.

9. *Петропавловский Б.С.* Леса Приморского края (Эколого-географический анализ). Владивосток: Дальнаука, 2004. - 317 с.

10. *Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В.* Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Сер. «Медицинская география», 1969., вып. 3. М., С. 5–74.

11. *Семкин Б.И., Петропавловский Б.С., Кислов Д.Е., Зуев Ю.Ф.* Об использовании биоинформационных технологий при построении экологических карт / Международный семинар по обработке изображений и распознаванию образов. Нижний Новгород, 2011. С. 26-35.

12. *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, Том 71, № 9. С. 1167-1181.

Petropavlovsky B.S. The use of multidimensional analysis method for vegetation with environmental factors for making the ecological classifications of vegetation and maps of ecological - vegetation complexes // Works of Nikit. Botan. Gard. – 2016. – Vol. 143. – P. 140-147.

The use of multidimensional analysis method for vegetation with environmental factors for making ecological classifications of vegetation, mapping of ecological-vegetable complexes, multi-factor environmental classification of forest types and others.

Key words: *method of multidimensional analysis of vegetation; environmental classification of vegetation; maps of ecological plant complexes*