7. *Мирчинк Т. Г. М.* Почвенная микология, 1976. 206 с.
8. *Озерская С.М.* Структура комплексов почвенных грибов-микромикетов двух лесных биогеоценозов зоны смешанных лесов: Днс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ. 1980. 156 с.
9. *Саттон Д., Фотергилл А., Ринальди М.* Определитель патогенных и условно патогенных грибов. М.: Мир, 2001. 486 с.
10. *Rodolfi M., Lorenzi E., Picco A.M.* Study of the occurrence of greenhouse microfungi in a Botanical Garden. *Journal of Phytopathology*. 2003. 151(11-12). P. 591–599.

Литинский П.Ю.

*Институт леса Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск
litinsky@krc.karelia.ru*

БИОГЕОМАТИКА БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ – НЕОБХОДИМОСТЬ, ВОЗМОЖНОСТЬ, МЕТОДОЛОГИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Необходимость. На современном этапе развития естествознания нарастает необходимость смены научной парадигмы от анализа к синтезу. Причем, если в конце 20-го века формировались междисциплинарные научные направления, то в начале 21-го уже требуется объединение целых групп наук и технологий.

Исследования наземной части биосферы привели к осознанию того, что понять её структурно-функциональную организацию можно лишь на основе синтеза географического и экологического подходов (Сочава, 1979; Fogman and Godron, 1986). Группой наук этого направления – геоботаникой, биогеоценологией, ландшафтной экологией (условно назовем ее **биогеографией**) получен огромный массив данных о структуре и функциях биогеоценозов. Но абсолютное их большинство относится к отдельным модельным объектам – пробным площадям, трансектам и т. д., исследований межбиоценозных связей значительно меньше. И почти упускается из виду (по крайней мере, считается вторичным) одно обстоятельство – сколь бы детальными и точными такие исследования ни были, все они **имеют смысл** лишь в том случае, если их результаты в дальнейшем будут интегрированы и **адекватно экстраполированы** на всю изучаемую территорию. Для этого необходима геометрически корректная пространственная основа, структурная модель экосистем, отражающая динамику естественных и антропогенных изменений. Эта основа должна обеспечивать возможность **количественного** анализа и математического моделирования выявленных закономерностей.

Такая модель может быть создана лишь с использованием данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий, в настоящее время эта группа наук и технологий получила название **геоматика**. Работы в этой области активно ведутся в течение нескольких десятилетий, но в основном они носят локальный, методический характер и о широком использовании их в фундаментальной науке говорить пока рано.

Глобальная модель наземных экосистем (Барталев и др., 2007) создается на основе сканерных снимков с разрешением в несколько сотен метров, на которых можно выявить лишь наиболее крупные, генерализованные контуры растительного покрова планеты. Ввиду явного несоответствия масштабных уровней служить основой для интеграции детальных наземных исследований она может лишь формально.

В 1984 году появился мультиспектральный сканер Landsat TM, разрешение которого (30 м) сопоставимо с минимальными размерами растительного сообщества (Pignatti *et al*, 2002). С тех пор накоплен трудно представимый объем данных о структуре и динамике растительного покрова, который, как это ни парадоксально, до настоящего времени остается в значительной степени невостребованным, особенно в России. Научное сообщество до сих пор крайне недостаточно (а иногда и недостоверно) информировано о возможностях и перспективах использования геоматики в науках о Земле.

Сканерные снимки могут быть адекватно интерпретированы только на основе наземных данных, поэтому в определенном смысле невостребованными оказываются и результаты натурных исследований. Во всяком случае, осмысленное, неформальное объединение тех и других могло бы дать колоссальный «синергический» эффект для фундаментальной и прикладной науки.

Таким образом, налицо необходимость слияния двух групп наук и технологий – геоматики и биогеографии. Новую синтетическую науку можно назвать **биогеоматикой**. Малоизвестно, что в настоящее время возникло уникальное стечение обстоятельств, при котором развитие этого направления не требует **никаких финансовых затрат**.

Возможность. До конца 20 века данные сканирования были малодоступны ввиду их высокой стоимости и необходимости для их обработки компьютеров значительной по тем временам мощности, и специального программного обеспечения. Положение начало меняться с запуском в 1999 г. сканера Landsat 7 ETM+, снимки которого были многократно дешевле (и при этом даже несколько информативнее), чем у Landsat TM, а затем появились и в открытом доступе на правительственных и университетских сайтах (NASA, GLCF). Затем были открыты также архивы Landsat TM, и сейчас любому жителю планеты, вне зависимости от его местожительства и образования, доступны в онлайн-режиме высококачественные, геометрически корректные снимки (не только изображения, но и исходная цифровая информация) любого ее участка как минимум с 2-3 кратной повторностью за тридцать последних лет. Доступны также некоторые необходимые для геоматического моделирования цифровые модели высот, снимки других сканерных и радарных систем. На картографических разделах сайтов Google, Yandex, Bing большая часть территории Земли покрыта снимками сверхвысокого разрешения (менее 1 м), которые значительно облегчают интерпретацию снимков Landsat.

Прогресс компьютерной техники привел к тому, что для обработки снимков сейчас можно эффективно использовать персональные компьютеры среднего и даже низшего ценового уровня, то есть также практически бесплатные. Все вышесказанное позволяет говорить о наступившем конце «эры суперкомпьютерной ментальности» [Laestadius, 2003] в геоматике. Следует отметить, что высказанные тогда этим автором прогнозы относительно перспектив доступности геоинформации сбылись значительно больше, чем на 100%. Он справедливо полагал, что высокотехнологичные области финансируются за счет налогоплательщиков, и они не должны платить за получение информации дважды.

И наконец, существует такой, еще недооцененный цивилизационный феномен, как открытое (официально бесплатное) программное обеспечение (ПО). Если около десяти лет назад оно разрабатывались в основном в операционной системе Linux, что в определенной степени ограничивало его доступность для «непрограммистов», то сейчас существуют Windows-версии большинства пакетов. От профессиональных они отличаются лишь несколько менее удобным и эстетичным интерфейсом, и (иногда) меньшим быстродействием. С другой стороны, многие «научно-исследовательские» алгоритмы реализованы только в открытом ПО. Наиболее распространенные ГИС-пакеты - QGIS, GRASS, SAGA включают все необходимые средства для обработки ДДЗ, существует большое количество руководств по их освоению, ведутся тематические форумы.

Таким образом, исходные данные для моделирования пространственной структуры экосистем, а также аппаратно/программное обеспечение общедоступны и бесплатны, требуются лишь интеллектуальные усилия по освоению технологий обработки снимков. Здесь существует препятствие, которое, возможно, и ограничивает развитие этого направления.

Методология. Традиционные, описанные в учебниках, методы извлечения информации из сканерных снимков – чисто математические. Они основаны на **формальной экстраполяции** данных ключевых участков на всю охваченную снимком территорию («управляемая классификация»), для чего используются универсальные статистические методы – обычно дискриминантный анализ. Но реальная информация о земной поверхности, отраженная в многомерном спектральном пространстве снимка, из-за технических и атмосферных факторов лишь **частично** согласуется с представлениями биологов о классификации растительного покрова – не говоря уже о том, что существуют различные варианты классификаций – экологические, геоботанические, ландшафтные, хозяйственные. Поэтому, например, разработчики пакета Idrisi в руководстве пользователя прямо указывают, что дискриминантный анализ при недостаточном качестве наземных данных может работать «terribly». Возможно, получение на начальных этапах удручающих результатов и отталкивает начинающих исследователей.

Принципиальный недостаток традиционного подхода в том, что при любом математическом методе обработки, и при наличии большого количества наземных эталонов, спектральное пространство снимка остается «черным ящиком». Исследователь не может оценить реальные размеры и расположение категорий, их пространственную сопряженность, то есть в прямом смысле слова действует **вслепую**.

Для выявления пространственной структуры экосистем целесообразнее применять иной способ извлечения информации из сканерных снимков. Суть его в том, что абстрактное многомерное спектральное пространство снимка определенным способом трансформируется в трехмерное, явным образом визуализируемое – т.е. создается его **модель**. Впервые идея была высказана почти 40 лет назад (Kauth and Thomas, 1976), когда еще не существовало не только трехмерной, но и вообще компьютерной графики – рисунки к статье выполнены тушью. Идея практически не используется современными исследователями, хотя развитая 3D-графика есть, например, в упомянутом пакете GRASS. Очевидно, причина в том, что такой метод не описан в руководствах, а его самостоятельная реализация требует наличия некоторых навыков программирования (и креативного мышления).

В видимом 3D-пространстве становится возможной интерпретация, имеющая ясный **биологический смысл** – например, сопоставление положения сегментов лесных экосистем с локальным вариантом эдафифитоценотической схемы типов леса. Таким образом, можно назвать данный метод *моделированием спектрального пространства*. Для таежных экосистем нами была разработана 3D-трансформация, в общих чертах сходная с Tasseled Cup, предложенной вышеуказанными авторами для сельскохозяйственных культур, но обеспечивающая лучшее разделение категорий (Литинский, 2011).

Результаты. Применение методики началось в северотаежной подзоне восточной Фенноскандии. Сопоставление спектральной модели с наземными данными показало, что для лесных экосистем в значительной части случаев локализация сегментов прямо соответствует их положению в осях эдафифитоценотических координат, причем идентифицируются не только типы (иногда группы типов) леса, но и биогеоценотические комплексы (*четвертичные отложения - почва - растительность*). Естественно, в спектральном пространстве оси не перпендикулярны, а расположены под некоторым углом, в зависимости от параметров трансформации.

Так, для **(суб)климаксовых лесов** по *оси недостаточного увлажнения* за зеленомошными сосняками и ельниками моренных гряд (почвы – супесчаные подзолы) выстраиваются сосняки брусничные и лишайниковые флювиогляциальных равнин (песчаные подзолы), за которыми следуют сосняки каменистые/скальные на выходах кристаллических пород с моренным чехлом различной мощности (неполноразвитые и скелетные почвы).

По *оси избыточного застойного увлажнения* за зеленомошными идут сосняки долгомошные (ввиду сходных параметров древесного полога границы между ними не очень четко выражены), затем четкий сегмент сосняков багульниковых озерных равнин, затем сосняки сфагновые (здесь уже возможно выделение нескольких классов по полноте и типу болотных почв). Менее дифференцированы сегменты некоторых низкополнотных сосняков и ельников с различной долей участия обеих пород, их разделение возможно с учетом ландшафтного контекста и по геоморфометрической модели, с учетом экологической приуроченности к формам рельефа.

Четко вырисовываются две траектории восстановительной динамики **после рубки** – через смену пород и без таковой, также связанные с типом четвертичных отложений. На морене выражены все стадии от молодняков до приспевающих, на песках – лишь 1-2 стадии, здесь для более точной датировки необходимы разновременные данные (для значительной части территории они имеются).

Для **болотных экосистем** положение спектральных сегментов строго определяется типом водно-минерального питания (олиготрофное или мезотрофное) и степенью увлажнения поверхности. Четко обособленное положение от лесных и болотных экосистем занимают сегменты травянистой растительности, гари различной давности, карьеры и другие лишенные растительности категории.

Таким образом, при использовании данной методики выделяются все основные классы первичных экосистем подзоны, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, в настоящее время в общей сложности несколько десятков категорий, с детализацией масштаба примерно 1:25 000 (Литинский, 2012; 2013). Отметим, что созданные традиционными методами на основе аналогичных снимков модели таежных территорий существенно менее информативны, обычно включают до десяти категорий.

В настоящее время наиболее проработанный фрагмент включает территорию от южной границы подзоны до полярного круга (около 12 млн га). Верификация модели проводилась путем сопоставления с независимо создаваемой базой данных экотопов с координатной привязкой, и соответствие оказалось почти стопроцентным (Крышень, Литинский, 2013). Это свидетельствует о принципиально более высокой достоверности результатов по сравнению с традиционным подходом (заметим, что 3D-модель спектрального пространства наглядно **показывает** причину иногда странных результатов «управляемой классификации»). Развитие модели идет в направлении

расширения территориального охвата, увеличения степени детализации и подключения к модели функциональных блоков.

Тип комплекса *четвертичные отложения/растительность* определяет ход почвообразовательного процесса, биологическую продуктивность биоценоза и другие его характеристики. Поэтому в традиционном понимании, биогеоматическая модель – это «комплект карт»: а) четвертичных отложений; б) типов леса; в) типов болот; г) почв; д) биоресурсов; е) ненарушенных территорий; ж) хода возобновления на вырубках и др.

В практическом плане она является пространственной базой данных по природным ресурсам и биоразнообразию, и т.о. представляет собой наиболее адекватную картографическую основу для планирования экологически сбалансированного природопользования. Но еще важнее фундаментальное значение модели – интеграция результатов дискретных наблюдений в единый пространственно-временной континуум – комплексную структурно-функциональную модель растительного покрова, его взаимодействия с атмо-, гидро- и литосферой, а также служить отправной точкой мониторинга с 1980-х годов на десятилетия вперед.

Перспективы. Предварительный анализ спектральных моделей показывает, что их структура сходна у всех снимков Landsat TM/ETM+ таежных территорий Фенноскандии, Сибири, Канады, поэтому данный подход целесообразно использовать во всей бореальной зоне. Единая, экологически ориентированная методика обеспечит независимость от локальных классификаций экосистем и, соответственно, сопоставимость результатов в глобальном масштабе.

На первом этапе создания спектральной модели, формирования ее «каркаса», не нужны новые наземные данные, наоборот, требуется подробное изучение по литературным источникам и картографическим материалам структуры четвертичных отложений и растительного покрова территории. В качестве эталонных объектов идеально подходят охраняемые природные территории, поскольку в них подробно изучена биогеоценозическая структура, имеются картографические материалы, а для экосистем, находящихся в естественном состоянии, проще проводить локализацию спектральных классов. По мере детализации модели выявляются **недостаточно изученные** участки территории и характеристики биоценозов. Таким образом, модель будет способствовать и развитию традиционных биогеографических направлений. Она также внесет коррективы – возможно, весьма существенные – в модели, созданные упомянутыми выше формальными математическими методами. Даже если в некоторых случаях в процентном отношении разница будет невелика, модель безусловно будет способствовать качественно лучшему пониманию структурной организации растительного покрова.

Биогеоматическая модель дает возможность **количественного анализа** структуры экосистем методами ландшафтной экологии, реализованным, например, в пакетах GRASS и SAGA. Качественный скачок в развитии биогеоматики произойдет, когда станут доступны весьма дорогостоящие в настоящее время данные лазерной (лидарной) съемки, по которым рассчитываются детальные модели рельефа и архитектоники древесного полога. Декомпозиция спектральных классов по этим параметрам в несколько раз увеличит общее количество распознаваемых классов растительного покрова. Обработка этих данных потребует значительно большей вычислительной мощности, но решение проблемы обеспечит как прогресс собственно компьютеров (увеличение производительности процессоров и объемов памяти), так и развитие облачных технологий.

Всеобщая доступность данных и технологий биогеоматики создает все условия для ее изучения студентами и школьниками. Развитие биогеоматики смогут обеспечить лишь креативные личности, в равной степени компетентные в биологии, физике, математике и информатике. Разрешение чиновников от науки и образования для этого не требуется, начинать можно уже сейчас. Более подробно принципы и методы биогеоматического моделирования описаны в перечисленных ниже статьях, размещенных на сайте Карельского НЦ РАН.

Литература

1. *Барталев С.А., Исаев А.С., Еришов Д.В.* Актуальные задачи, возможности и перспективные направления методов спутникового мониторинга бореальных лесов // Международная конференция «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве», М: МГУЛ, 2007. С. 20-22.
2. *Крышень А.М., Литинский П.Ю.* Сопоставление и взаимная верификация геоинформационной и эколого-динамической моделей разнообразия лесных экосистем // Труды КарНЦ РАН. No 2. Сер. Биогеография. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 86-91.

3. *Литинский П.Ю.* Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Труды КарНЦ РАН РАН, Сер. «Математическое моделирование и информационные технологии», Вып. 2. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 45-54.
4. *Литинский П.Ю.* Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. No 1. Сер. Биogeография. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 3-15.
5. *Литинский П.Ю.* Геоинформационная модель наземных экосистем хребта Маанселькя (район оз. Паанаярви) // Труды КарНЦ РАН. No 2. Сер. Биogeография. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 97-100.
6. *Сочава В. Б.* Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, 1979. 190 с.
7. *Kauth, R.J. and Thomas. G.S.* The Tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 4b: 41-51, 6 June - 2 July 1976 (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University).
8. *Laestadius L.* Конец эры суперкомпьютерной ментальности // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. Материалы международной конференции, 26-28 ноября 2003, М. С. 15-19.
9. *Pignatti S., Vox E. O., Fujiwara K.* A new paradigm for the XXIth century // Ann. Bot. 2002. Vol. 2. P. 30–57.

Лиханова И.А., Арчегова И.Б.

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
likhanova@ib.komisc.ru*

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА СЕВЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

Промышленное освоение природных ресурсов Республика Коми активизировалось во второй половине XX века. Разработка крупных месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, Печорского угольного бассейна, рудных месторождений Тимана и Урала происходит в наиболее уязвимых к антропогенному влиянию подзонах южной кустарниковой тундры, северной и южной лесотундры, крайнесеверной и северной тайги. Высокая степень уязвимости к техногенным нарушениям и длительный период самовосстановления природных экосистем Севера определяют необходимость ускорения восстановительного процесса на посттехногенных территориях. Высокие темпы нарушения земель Республики Коми в 80-е годы прошлого столетия (до 3.5-4 тыс. га ежегодно) послужили толчком к началу изучения приемов их восстановления. О слабой, к тому времени проработанности теоретической базы и практических приемов рекультивации земель на Севере говорит то, что нередко рекультивационные работы ограничивались проведением только первого, т.е. технического этапа (Охрана..., 1991; Охрана..., 1996; Государственные доклады...). Биологический этап зачастую не проводился, так как считалось приемлемым оставлять нарушенные земли на самозарастание.

Первые исследования рекультивации нарушенных земель в подзонах крайнесеверной и северной тайги Республики Коми были проведены сотрудниками Сыктывкарского государственного университета Н.П. Акульшиной и Н.Н. Лобовиковым (1981). В целях восстановления земель, лишенных почвенно-растительного покрова в ходе строительства трассы нефтепровода Возей-Уса-Ухта, предложено использовать метод гидропосева. Состав гидросмеси в расчете на 1 га площади включал 3000-5000 кг воды, 400-600 кг скопа (отход лесопромышленного комплекса), 150 кг нитроаммофоски и семена трав районированных сортов и/или местных популяций овсяниц луговой и красной, мятлика лугового, лисохвоста лугового, арктофилы рыжеватой, канареечника тростниковидного, полевицы гигантской, клевера ползучего и лугового. Норма высева травосмесей составляла до 40 кг/га, на склонах – до 120 кг/га. На песчаные техногенные пустоши рекомендовано возвращать биологически активный поверхностный слой почвы или наносить торф, ил слоем толщиной 10-15 см. На основе обобщения проведенных исследований были разработаны методические указания по технологии биологической рекультивации нарушенных земель