

ВИЗУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Геннадий Андриенко и Наталия Андриенко

<http://www.ais.fraunhofer.de/and>

1. Введение

Результаты моделирования лесных экосистем обычно представляют собой достаточно большой массив пространственно-распределенных данных, относящихся к последовательности моментов времени. Существует несколько причин, стимулирующих всесторонний анализ подобных результатов. Во-первых, практически каждая модель имеет множество параметров, требующих тонкой настройки для получения правильных результатов. Во-вторых, результаты моделирования чувствительны к ошибкам во входных данных. В-третьих, сама модель может содержать неточности и подлежать верификации и отладке. Наконец, в-четвертых, моделирование не является самоцелью. Моделирование применяется для целей научных исследований, для построения прогнозов и/или для принятия управленческих решений. Соответственно, средства анализа результатов моделирования должны обеспечивать учет всех этих факторов, принимая во внимание как пространственную и временную природу данных, так и большую размерность и высокую сложность данных. По этим причинам всесторонний анализ данных невозможен без их визуального представления.

Как правило, для анализа пространственно-распределенных данных применяются географические информационные системы (ГИС). Существует множество реализаций ГИС, как коммерческих программных продуктов, так и общедоступных систем с открытым исходным кодом. Подобные системы обеспечивают хранение пространственной информации и построение разнообразных тематических карт. Одним из недостатков ГИС, сдерживающим их применение в моделировании, является ограниченность средств работы с данными, зависящими от времени. Функции анализа пространственно-временных данных присутствуют только в небольшом числе исследовательских прототипов [1]. Один из подобных прототипов был разработан авторами настоящей работы (см. приложение III к книге [2], “Tools for visual analysis of spatio-temporal data developed at the Fraunhofer Institute AIS”; текст также доступен в сети Интернет, см. <http://www.ais.fraunhofer.de/and/eda/>). В рамках международного исследовательского проекта SILVICS [3] данный прототип был использован для анализа результатов нескольких моделей динамики леса. В статье [3] были описаны проблемно-ориентированные результаты. Целью настоящей работы является описание проделанных исследований в области визуального анализа, обобщение полученного опыта и выработка рекомендаций для дальнейших научных разработок.

В следующем разделе мы рассмотрим характеристики данных (как входных, так и выходных) для нескольких моделей, применявшихся в указанном проекте. Затем

будут описаны основные цели анализа и предложены средства визуализации, применимые для этих целей. Сложность данных не позволяет ограничиться чисто визуальными методами. Поэтому мы предлагаем сочетать визуальный анализ с алгоритмическими и вычислительными методами. Этим вопросам посвящен специальный раздел. Далее мы рассмотрим вопросы визуальной поддержки принятия решений на основе моделирования. В заключении обсуждаются результаты работы и выделяются направления дальнейших исследований и разработок.

2. Примеры данных и задач анализа

Мы рассматриваем класс моделей, применяемых для прогнозирования динамики развития одного или нескольких пространственных объектов (например, кварталов леса). Входными данными модели являются описание текущей ситуации (состав леса, характеристики почвы и т.д.), специфические параметры модели (например, периодичность и правила рубок) и дополнительные внешние данные (например, оценки ожидаемого загрязнения воздуха и климатический прогноз). Выходные данные представляют собой множество атрибутов, описывающих прогноз динамики экосистемы. Атрибуты могут быть как количественными (например, объем биомассы деревьев разных пород и возрастов или концентрации веществ в почве), так и качественными (например, оценки биоразнообразия).

Часто расчет осуществляется для нескольких вариантов входных данных. Например, модель может построить прогноз развития для нескольких сценариев хозяйственной деятельности (заповедное использование леса, разные сценарии рубок) или для нескольких вариантов экологической ситуации (например, разные значения предполагаемого загрязнения воздуха). Соответственно, наборы выходных данных генерируются для каждого сценария по отдельности. Представляет особый интерес сопоставление результатов, полученных при различных условиях, как для целей научного анализа, так и для принятия управленческих решений.

Нетрудно оценить, что даже для небольшого леса результаты моделирования могут быть достаточно обширны. Например, в одном из приложений для заказника “Русский лес” моделирование осуществлялось для 104 кварталов на 200 лет в 4 сценариях развития. При этом биомасса рассчитывалась для 6 основных пород и 13 возрастных групп. Объем данных только по этому атрибуту для каждого сценария составляет порядка $2 \cdot 10^6$ значений. В другом приложении для того же заказника результаты моделирования представляли собой временные ряды по нескольким атрибутам для более чем 2,600 кварталов леса.

Помимо больших объемов многомерных данных, дополнительными источниками сложности являются особенности значений атрибутов:

- большой разброс значений: от величин, близких к нулю, до тысяч и миллионов;
- особенности статистического распределения: смещенность, наличие значений, сильно отличающихся от основной массы – так называемых аутлайеров;

- резкие изменения значений во времени (например, обусловленные рубками);
- негладкое пространственное распределение (например, обусловленное особенностями ландшафта или свойствами почв).

Все эти сложности требуют особого внимания и специальных средств поддержки анализа. По крайней мере, применение стандартных методов визуализации на тематических картах и графиках временной динамики становится практически невозможным (рис.1 и 2).

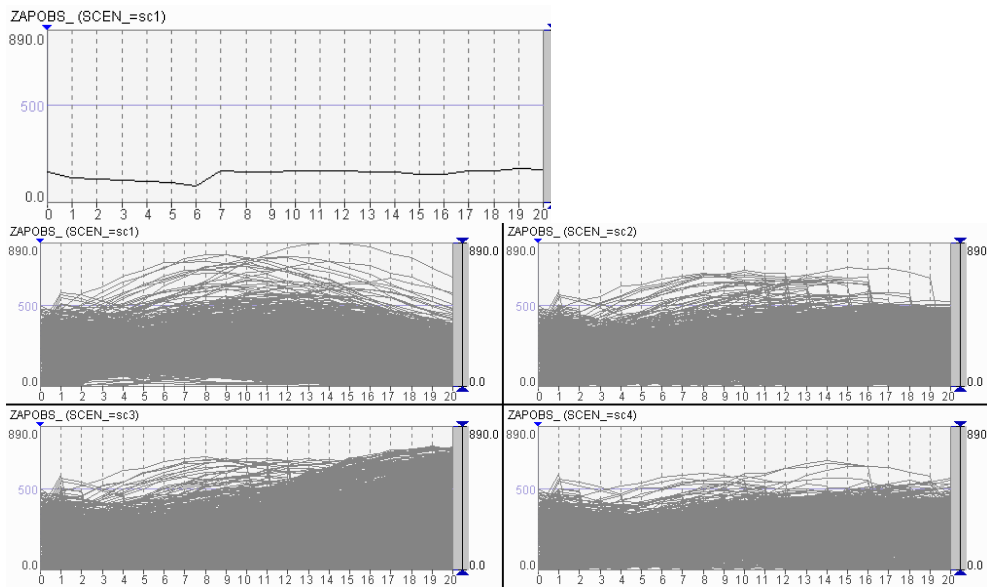


Рисунок 1. В верхней части показана динамика биомассы по отдельному кварталу. В нижней части динамика приводится для четырех сценариев и 2,600 кварталов леса. Наложение множества линий друг на друга затрудняет восприятие.

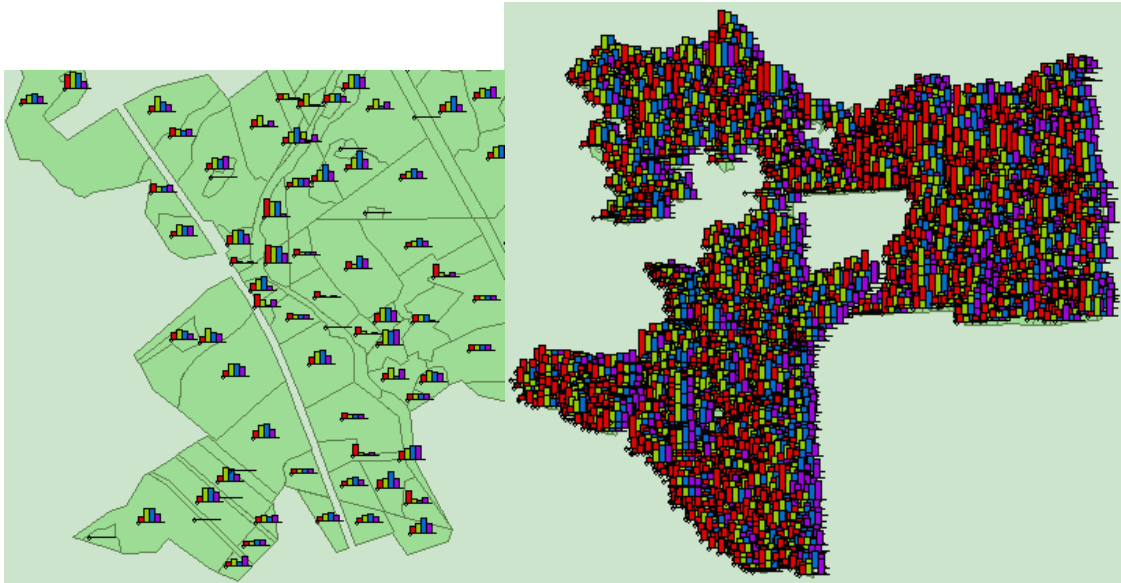


Рисунок 2. Карта слева показывает объем биомассы по 4-м породам для небольшой части территории. Справа показана аналогичная карта для всего заказника. Перекрывание диаграмм делает использование подобных карт невозможным.

Во введении мы перечислили цели анализа с точки зрения потенциального пользователя. Они включают верификацию входных данных моделей и процесса моделирования, а также интерпретацию результатов работы моделей и поддержку принятия решений. Основной задачей анализа является построение компактной и понятной интерпретации массива данных. Поскольку высокая сложность данной задачи часто делает невозможным ее полное решение за один единственный шаг, приходится декомпозировать задачу на частичные подзадачи, решать их по отдельности, и затем синтезировать общее решение из частичных составляющих. Представляют интерес следующие частные подзадачи (см. детальный обзор в нашей книге [2]):

- исследование пространственного распределения (например, поиск кластеров однородного развития или выявление пространственных тенденций в изменении характеристик);
- исследование временной динамики (например, определение периодов интенсивного роста, моментов экстремальных значений или изменения поведения);
- исследование структуры явления (например, особенности возрастного или породного состава леса);
- выявление связей между атрибутами (например, связь объема биомассы с содержанием различных веществ в почве или атмосфере);
- комплексная оценка территории (например, объем и структура лесных запасов), периода времени (общие тенденции развития), или сценария (например, обобщающее описание пространственно-временных характеристик).

При рассмотрении каждой из подзадач представляет интерес, с одной стороны, выявление общих закономерностей, с другой стороны, выявление индивидуальных

элементов или подмножеств (пространственных объектов, моментов времени, атрибутов), которые отличаются определенными особенностями. Эти особенности могут быть индикаторами ошибок в данных или в модели. В то же время подобные особенности могут указывать на интересные научные проблемы, или, по крайней мере, на несоответствие между допущениями модели и реальностью.

3. Визуализация данных

Перечисленные в предыдущем разделе подзадачи требуют разнообразных средств поддержки. Для анализа пространственных аспектов используются карты. Для исследования динамики во времени необходимы средства отображения динамики на картах, а также специфические средства визуализации динамических данных (например, временные графики).

Существует множество способов картографического представления данных. Их можно разбить на две основные группы: закрашка областей карты на основе значений одного или нескольких атрибутов и диаграммные представления значений атрибутов. Подробное рассмотрение всех методов выходит за рамки настоящей работы. Мы можем порекомендовать читателю справочную и научную литературу по картографии, начиная с классических книг [4-6].

В середине 90-х годов появились первые интерактивные реализации тематических карт [7] и постепенно сформировалась новая научная дисциплина – геовизуализация [8-11]. Для целей визуального анализа данных особый интерес представляют интерактивные операции динамической настройки визуальных примитивов карты. Примерами подобных операций являются (см. детальный обзор в нашей книге [2]):

- аналитическая настройка цветовой шкалы картограмм. Например, система может позволять динамически задавать базис для сравнения и отображать разными цветами значения выше и ниже базиса;
- динамическое изменение классов для карт с классификацией. Таким образом система может поддерживать поиск таких границ классов, которые приводят к делению территории на максимально связанные и четко очерченные области;
- изменение структуры диаграмм и порядка сегментов в диаграммах;
- динамическое преобразование данных, отображаемых на карте. Например, в случае большого разброса значений может представлять интерес замена исходных значений атрибута на их логарифмы;
- Интерактивный выбор моментов и интервалов времени. Например, это может позволять автоматическую или управляемую пользователем анимацию карт и статистических графиков.
- динамическое согласование нескольких карт или карты и непространственных графиков путем единообразного показа соответствующих друг другу элементов. Таким образом можно локализовать на карте объекты с экстремальными значениями атрибута (путем выделения их, например, на гистограмме) или с особенностями временной динамики (путем выбора на временном графике). Представляет интерес и переход в обратном направлении: выделение объектов на карте и рассмотрение их особенностей на графиках.

Рассмотрим несколько примеров визуализации результатов моделирования для сценария естественного развития без рубок. Данный сценарий характеризуется увеличением объема биомассы, и это можно увидеть на последовательности карт и гистограмм (рисунок 3). Такая последовательность может быть представлена пользователю как в виде анимации, так и путем показа серии изображений одновременно. Следует отметить, что хотя анимация выглядит весьма привлекательно, ее применимость сильно ограничена. Анимация полезна для иллюстрации стабильных тенденций, таких как рост территории городов или накопление биомассы при естественном развитии леса. В случае процессов с более сложным поведением, анимация становится трудной для восприятия и недостаточной для постижения характера изменений. Основная проблема заключается в том, что кадры анимации, соответствующие различным моментам времени, не складываются в восприятии человека в единое целое. Поэтому образ, воспринятый ранее, замещается в сознании пользователя новым образом, что приводит к потере информации и невозможности сравнения ситуаций в разные моменты времени. Применение серий изображений, показываемых одновременно, ограничивается размерами дисплеев и возможностями человека по анализу множества графических представлений. В качестве компромисса можно рекомендовать сочетание анимации и рассмотрения нескольких выбранных состояний с целью сравнения.

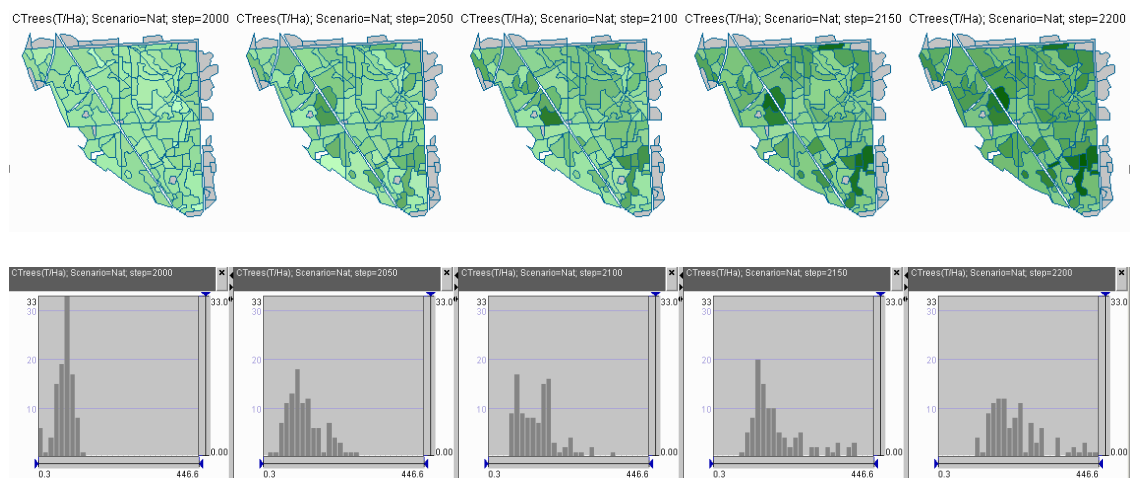


Рисунок 3. Последовательность карт показывает накопление биомассы на участках леса (в тоннах на гектар) с интервалом 50 лет. Интенсивность окраски на картах прямо пропорциональна удельному объему биомассы. Последовательность гистограмм с единым масштабом показывает динамику разброса значений того же атрибута.

В качестве вспомогательного средства для сравнения ситуаций в разные моменты времени и выявления изменений применяются преобразования исходных данных. Так, в нашем примере в целях более детального изучения динамики роста были подсчитаны величины изменения (разности) по сравнению с начальным моментом времени. На рисунке 4 показаны результаты преобразования тех же данных, что

были показаны на рисунке 3. Для усиления наглядности цветовая шкала была изменена таким образом, чтобы визуально отделить участки с увеличением биомассы от участков, где произошло уменьшение объема. Современные программные средства позволяют пользователю осуществлять подобные преобразования интерактивно в рамках одной и той же визуализации, то есть не теряя контекста.

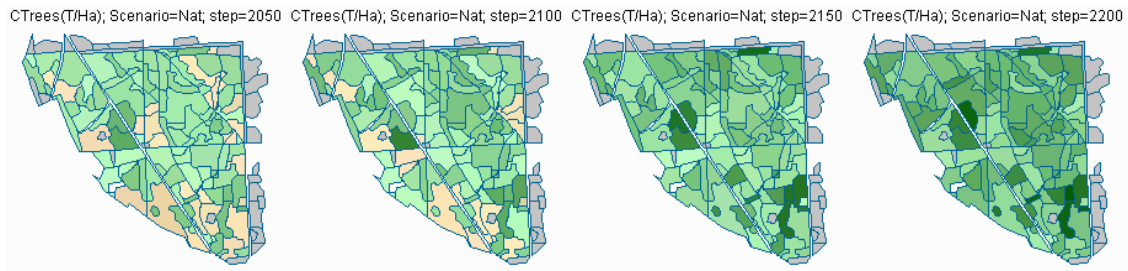


Рисунок 4. Последовательность карт показывает абсолютное изменение (разницу) удельного объема биомассы по сравнению с начальным моментом времени. Положительные значения (прирост) показаны оттенками зеленого цвета, отрицательные – оттенками коричневого цвета. Интенсивность окраски прямо пропорциональна величине изменения.

Для исследования временной динамики накопления биомассы полезно использование временных графиков. На рисунке 5 приведены графики динамики биомассы в 100 участках леса для четырех сценариев развития. Каждая темно-серая линия представляет динамику по одному объекту. Совокупность линий представляет динамику для определенного сценария в целом. Современные программные реализации позволяют множество полезных интерактивных операций над такими графиками. Например, выбор объекта на карте может отображаться выделением соответствующей линии, и наоборот. Графики могут синхронно масштабироваться как по вертикали (согласно значениям атрибута), так и по горизонтали (по временному интервалу). Временные ряды могут быть сглажены для выявления общих тенденций путем игнорирования локальных изменений. В свою очередь, локальные изменения могут быть выявлены путем вычитания скользящего сглаженного значения. Наконец, аналогично картам, графики могут отображать показатели изменения (разницы, отношения и т.д.)

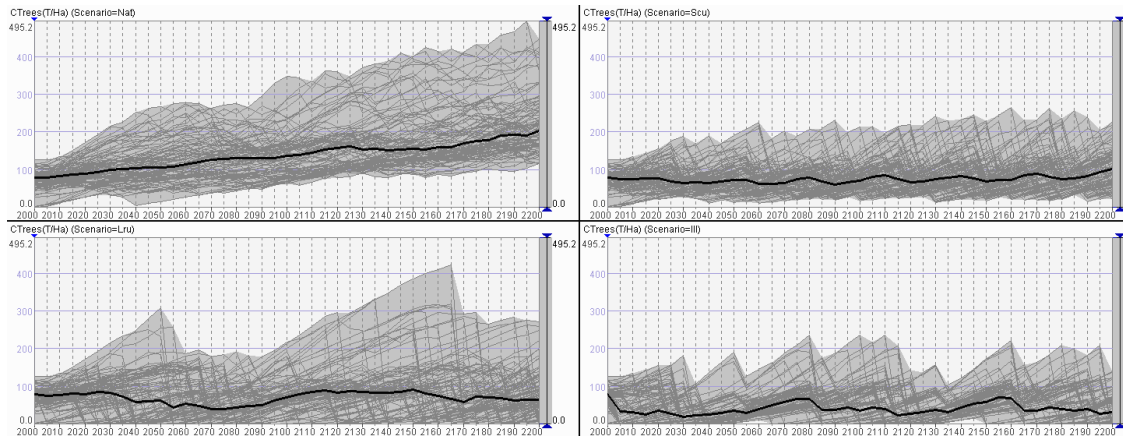


Рисунок 5. Динамика биомассы в четырех сценариях развития показана на временных графиках. Черная линия представляет динамику медианных значений (из 100 кварталов леса) для каждого сценария. Вертикальная ось имеет общий масштаб.

Очевидно, что приведенные примеры интерактивной визуализации полезны для решения указанных задач. Тем не менее, следует отметить ограниченность их применимости для сложных и больших массивов данных. В таких случаях необходимо сочетать визуализацию с вычислительными методами.

4. Визуально-аналитические методы

Часто большой объем данных делает невозможным чисто визуальный анализ. На рисунках 1 и 2 показаны примеры карт и графиков для случая 2,600 участков леса. Перекрывание линий и диаграмм затрудняет визуальный анализ. В таких случаях полезно использование вычислительных методов. В результате вычислений могут быть получены некоторые обобщающие характеристики, и тем самым снижена сложность и размерность данных. Кроме того, вычисления могут помочь выявить объекты с теми или иными особенностями поведения.

Серия графиков на рисунке 6 показывает, как путем достаточно простых вычислений, дополненных динамической графикой на согласованных дисплеях, можно провести нетривиальное исследование достаточно большого массива данных. Временной график показывает динамику развития по тем же 2,600 участкам леса. В качестве обобщающих показателей были вычислены перцентили с шагом 10% для каждого из моментов времени. Эти перцентили показаны на среднем графике и соединены линиями. Из данного графика следует, что хотя экстремальные значения существенно менялись, в целом по всей территории поведение было относительно стабильно. По крайней мере, линии, соединяющие последовательные значения перцентилей, являются почти прямыми и расположены в основном горизонтально.

После получения общей картины временной динамики были вычислены агрегированные характеристики каждого из индивидуальных временных рядов, отражающие усреднение и разброс. Путем выбора соответствующих точек на графике были выделены объекты, характеризующиеся стабильно высокими значениями. Подоб-

ным образом могут быть найдены и объекты с другими особенностями. Например, можно определить, какие объекты были наиболее нестабильны на протяжении всего периода моделирования или отдельных интервалов, какие объекты характеризовались устойчивым ростом или падением значений и т.д.

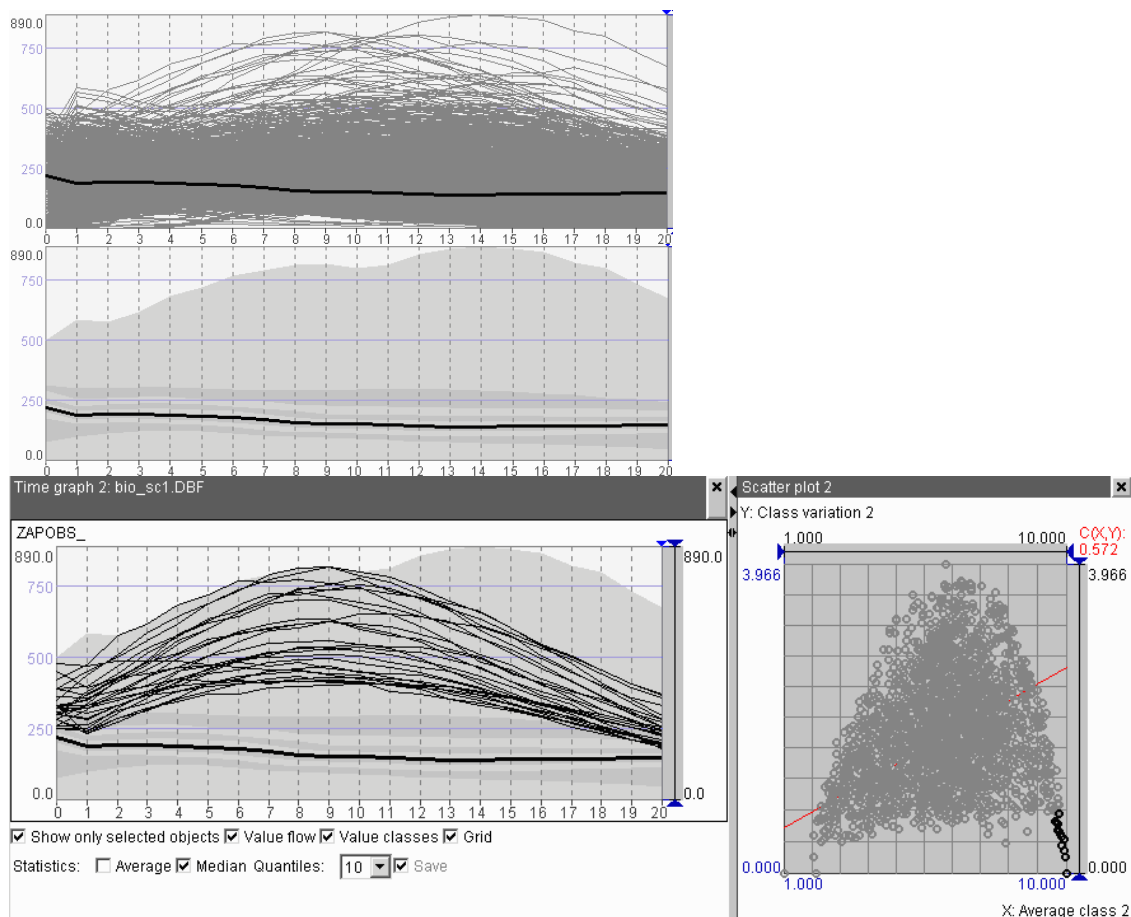


Рисунок 6. Чтобы избежать перекрытия линий (верхний график), вместо индивидуальных линий показана динамика медианных значений и перцентилей с шагом 10% (средний график). В правом нижнем углу приведен график разброса, где по горизонтали отображены усредненные значения временных рядов, а по вертикали – характеристики разброса для каждого временного ряда. Выделение нескольких точек в правом нижнем углу графика привело к выявлению нескольких временных рядов, характеризующихся стабильно высокими значениями.

Рассмотрим еще один пример, когда простые вычисления могут содействовать визуальному анализу. Во втором разделе мы упоминали, что при моделировании по 104 кварталам оценка биомассы была вычислена по отдельности для 6 основных пород и 13 возрастных групп. Соответственно, для каждого квартала и каждого момента времени было получено 78 значений атрибута. Совокупность этих значений описывает структуру леса.

Одной из целей анализа является получение представления о структуре леса по породам и возрастам в отдельных кварталах и на территории в целом. Одновременная визуализация значений 78 атрибутов на одной карте вряд ли может быть очень полезной. Поэтому возникла необходимость вычисления и визуального представления некой обобщающей характеристики. В качестве такой характеристики мы предложили показатель доминирования, отражающий, какая из породно-возрастных групп преобладает на каждом участке. Если обозначить v_{ij} объем запаса i -й породы и j -й возрастной группы в определенном квартале леса, то показатель доминирования для этого квартала вычисляется по формуле:

$$d = \begin{cases} 0, & \text{если } \max(v_{ij}) < \alpha \\ -1, & \text{если } \frac{\max(v_{ij})}{\sum v_{ij}} < \beta \\ (k, l), & \text{где } v_{kl} = \max(v_{ij}) \end{cases}$$

Таким образом, данный показатель отражает породу и возраст с максимальным запасом. Особо рассматриваются случаи очень малых запасов, когда максимальное значение меньше порогового значения α (значение доминирования равно 0), и случай смешанного леса, когда максимальное значение составляет относительно небольшую часть (меньше порогового значения β) от общего запаса в данном квартале (значение доминирования равно -1). Программная реализация позволяет подобрать в диалоге подходящие значения обоих порогов.

Набор карт на рисунке 7 показывает структуру леса в три различных момента времени. Кварталы леса на карте окрашены в цвета, соответствующие доминирующим породам и возрастам. При этом оттенок цвета соответствует породе, а светлота – возрастной группе. Кварталы с малым запасом леса ($d = 0$) окрашены в черный цвет, смешанный лес ($d = -1$) показан белым цветом. Дополнительно к окраске полигонов применены круговые диаграммы, отражающие общий запас и структуру в каждом квартале.

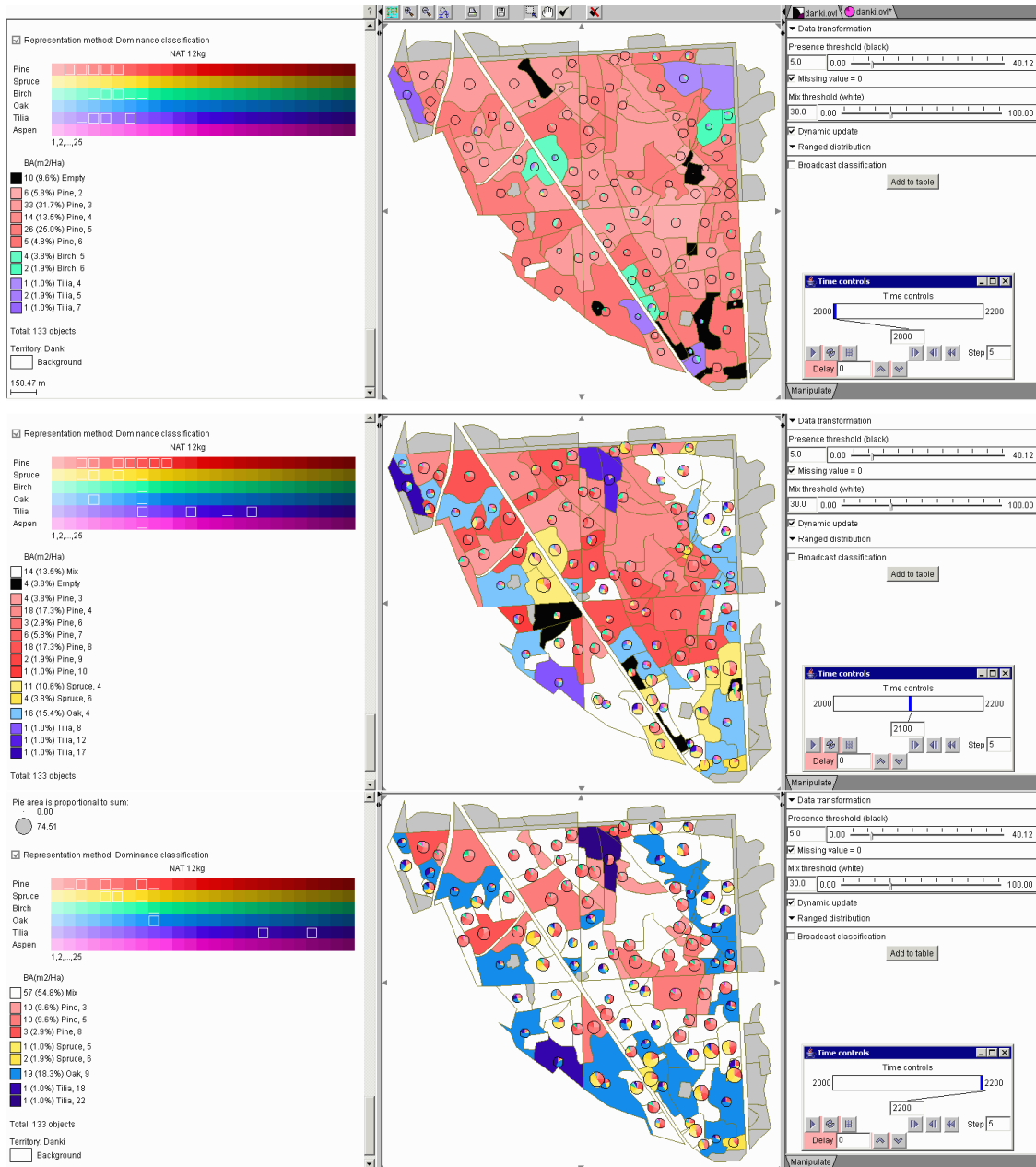


Рисунок 7. Динамика возрастного и породного состава леса показана при помощи карт доминирования. Аналитическая легенда карты поясняет цветное решение и представляет общую статистику (количество кварталов с доминированием определенного типа).

При помощи подобных карт можно получить представление о структуре леса и ее динамике. Окраска полигонов позволяет визуальную группировать кварталы с похожей структурой. Дополнительно к этому, диаграммы отражают детальную информацию по каждому из кварталов. Сопоставление нескольких карт, соответствующих разным моментам времени, полезно для изучения динамики процесса. В дан-

ном случае применима и анимация карт, демонстрирующая тенденцию развития от преимущественно однородного к смешанному составу леса.

5. Аналитическая поддержка принятия решений

Карты доминирования, аналогичные представленным на рисунке 7, могут использоваться не только для изучения динамики развития, но и для сравнения нескольких сценариев развития леса. Задача сравнения сценариев возникает, например, при оценке риска в зависимости от уровня загрязнения воздуха или при выборе подходящих управленческих решений о внешнем воздействии на лес, таких как порядок рубок. В результате сопоставления карт доминирования для нескольких сценариев можно оценить и сравнить структуру леса и уровень биоразнообразия. Таким образом могут быть сформированы критерии выбора, отражающие данные аспекты.

Другой потенциально полезный критерий оценки и выбора отражает динамику запасов. Аналогично рисунку 5, на рисунке 8 (верхняя часть) показаны наборы линий, соответствующие динамике относительного объема биомассы в четырех сценариях развития. Подобные временные графики позволяют оценить общую тенденцию и амплитуду значений для каждого сценария. В то же время, для более точной оценки необходимо вычислить дополнительные характеристики. Один из возможных вариантов агрегирования продемонстрирован на рисунке 8. В диалоговом режиме пользователь определяет несколько пороговых значений объема запасов. Это соответствует проведению нескольких горизонтальных линий на временном графике. После этого вычисляется количество кварталов леса, попадающих в каждый из интервалов в каждый момент времени. Вычисленные значения показываются в виде набора сегментированных столбцов, представленных в нижней части рисунка.

В данном примере оттенки коричневого цвета соответствуют кварталам с низкими запасами, оттенки зеленого – кварталам с высокими запасами, и желтый цвет представляет промежуточные значения. Программная реализация позволяет в диалоге подобрать пороговые значения и цветовое решение, наиболее подходящие для конкретного случая и/или удобные для пользователя

При помощи подобных диаграмм, представляющих результаты агрегирования, можно оценить стабильности динамики развития леса. Очевидно, что сценарий естественного развития (показан в левом верхнем углу) характеризуется постепенным повышением запасов. Это явно видно по последовательному увеличению зеленой составляющей диаграмм. В других сценариях количество кварталов, соответствующих различным интервалам между пороговыми значениями, меняется по-разному. В одном из сценариев общая картина относительно стабильна: размеры сегментов диаграмм каждого из цветов меняются незначительно. В остальных двух сценариях степень стабильности существенно меньше.

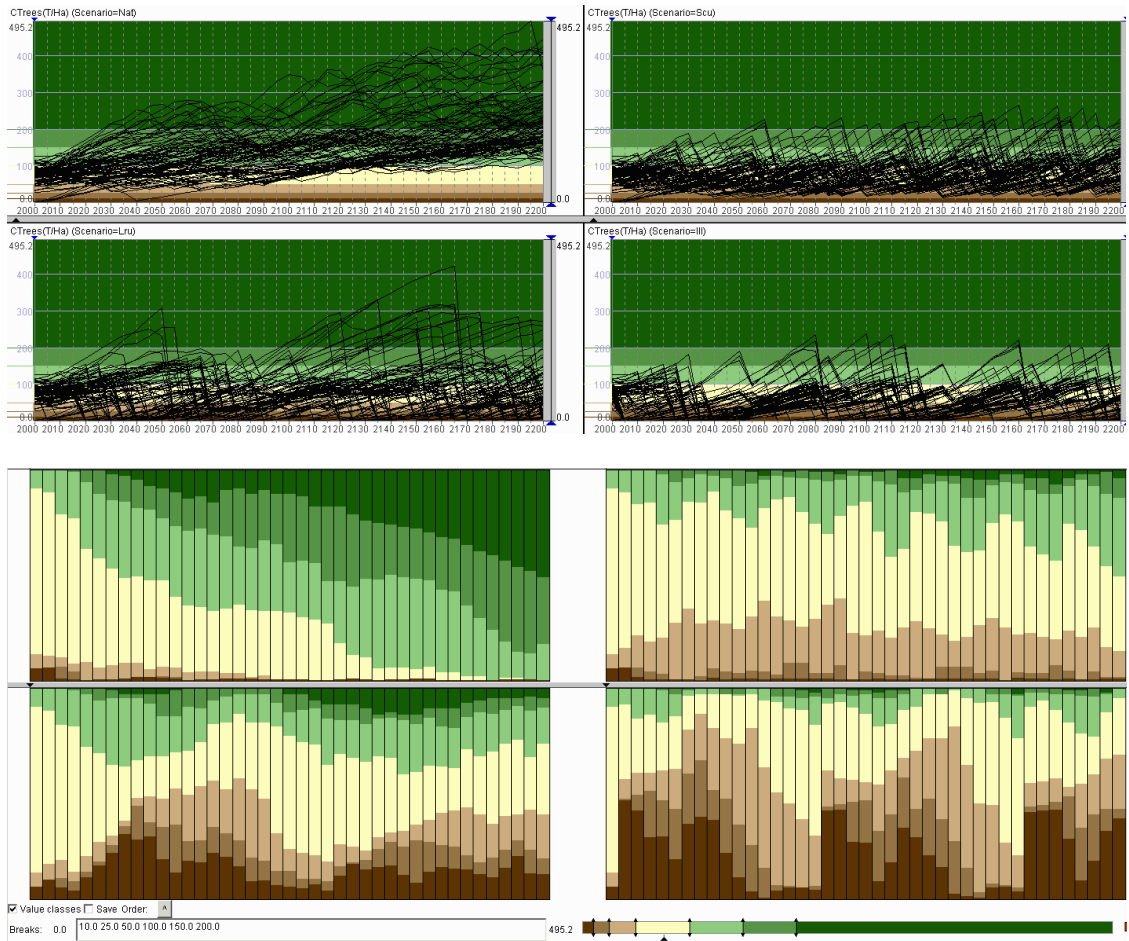


Рисунок 8. Динамика запасов в четырех сценариях развития показана на временных графиках (верхняя часть рисунка) и сегментированных диаграммах (нижняя часть).

В дополнение к простым и интуитивно понятным методам вычислений могут применяться и более сложные, требующие большего объема вычислений методы. Например, часто полезно сочетать визуальный анализ с методами статистической проверки гипотез, методами извлечения знаний из баз данных и методами многокритериальной оценки и оптимизации. Рассмотрение подобных методов выходит за рамки данной работы.

6. Заключение

В настоящей работе мы привели ряд примеров анализа больших объемов данных, возникающих в результате работы моделей. Мы показали, что исследование данных полезно на таких стадиях анализа, как проверка входных данных, верификация моделей, интерпретация результатов моделирования и принятие управленческих решений.

Следует отметить, что высокая сложность задач исследования многомерных пространственно-временных данных требует сочетать визуальный анализ с вычислительными процедурами. Мы показали, что множественность аспектов исследования данных определяет необходимость использования разнообразных визуальных и вычислительных методов. Необходимо органично сочетать визуальные и вычислительные методы, эффективно используя человеческую способность зрительного восприятия с вычислительными возможностями компьютеров. Этим целям посвящена новая активно развивающаяся область прикладной науки – визуальная аналитика [12].

Несмотря на разработку ряда исследовательских прототипов, на сегодняшний день не существует программной системы, систематически поддерживающей все аспекты и стадии исследования данных и принятия решений. Очень большие объемы данных выдвигают требование новых подходов к визуализации и анализу. Известные методы анализа недостаточно поддерживают работу с качественными данными. Практически отсутствуют средства для документирования процесса исследования, структурирования выявленных знаний и поддержки коммуникации результатов.

С другой стороны, декомпозиция задач на подзадачи анализа и последующий синтез решения требуют высоких затрат времени и значительных усилий пользователей. Поэтому в большинстве случаев для успешного анализа сложных данных требуется совместная работа предметных специалистов с экспертами по визуально-аналитическим методам. Данное утверждение основывается на опыте данной работы и подтверждается опытом многих научных групп в различных проблемных областях.

Поскольку достаточно трудно обеспечить выполнение всех трех предпосылок для успешного анализа (наличие проблемных специалистов, экспертов-аналитиков, и подходящего программного обеспечения), одним из основных направлений развития визуальной аналитики является разработка интеллектуальных систем, которые будут воплощать знания экспертов и практически применять их для решения прикладных задач в диалоге с проблемными специалистами.

Мы надеемся, что опыт данной работы будет полезен для двух категорий потенциальных читателей. С одной стороны, ученые, занимающиеся проблемами моделирования лесных экосистем, найдут в данной работе сценарии применения визуально-аналитических методов для решения специфических задач. С другой стороны, для разработчиков теоретических и практических аспектов визуально-аналитических методов и систем данная работа представляет пример разностороннего анализа проблем, возникающих в избранной проблемной области.

Данная работа была частично поддержана Европейской Комиссией в рамках INTAC проекта SILVICS и рядом исследовательских проектов нашего института. Мы благодарны всем партнерам за предоставленные данные и плодотворное обсуждение задач и подходов. Мы хотим выразить особую признательность нашим колле-

гам О.Чертову, А.Комарову, М.Паленовой, С.Чумаченко, Л.Ханиной, А.Михайлову и П. Гатальскому, без чьей помощи и дружеской поддержки данная работа была бы невозможна.

Литература

1. Andrienko, N., Andrienko, G., Gatalsky, P.: Exploratory spatio-temporal visualization: an analytical review. *Journal of Visual Languages and Computing*. 14(6), 503-541 (2003)
2. Andrienko, N. and Andrienko, G.: *Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data. A Systematic Approach*, Berlin, Springer, 2006
3. Chertov, O., Komarov, A., Mikhailov, A., Andrienko, G., Andrienko, N., Gatalsky, P.: Geovisualization of forest simulation modelling results: a case study of carbon sequestration and biodiversity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 49(1), 175-191 (2005)
4. К.А.Салищев. Картография. М.: Высшая школа, 1982
5. Slocum, T.A.: *Thematic Cartography and Visualization* (Prentice Hall, Upper Saddle River 1999)
6. Bertin, J.: *Semiology of Graphics. Diagrams, Networks, Maps*. (University of Wisconsin Press, Madison 1983). Translated from Bertin, J.: *Sémiologie graphique* (Gauthier-Villars, Paris 1967)
7. MacEachren, A.M., Fraser Taylor, D.R. (Eds.): *Visualization in Modern Cartography*, ed. by (Elsevier, New York 1994)
8. MacEachren, A. M., 1994, Visualization in modern cartography: setting the agenda. In *Visualisation in Modern Cartography* (New York: Elsevier Science Inc.), pp. 1-12
9. MacEachren, A. M., and Kraak, M.-J., 1997, Exploratory cartographic visualization: advancing the agenda. *Computers and Geosciences*, 23, 335-344
10. *Cartography and Geographic Information Science*. Special Issue "Research Challenges in Geovisualization", 28(1) 2001
11. J. Dykes, A. MacEachren and M.-J. Kraak (Eds.): *Exploring Geovisualization*. Oxford: Elsevier, 2005
12. James J. Thomas and Kristin A. Cook (Eds.): *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. IEEE Press, 2005