

Л. П. Бакуменко, П. А. Коротков

Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл)

В статье предложена методика интегральной оценки, мониторинга и анализа качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона, основанная на идеологии факторного анализа. Демонстрируется реализация этой методики на данных 1990–2005 гг., характеризующих Республику Марий Эл. Результаты использования методики позволяют исследовать динамику интегрального экологического индикатора (интегральных индикаторов), выявлять проблемные области, определять ключевые направления совершенствования экологической политики региона, строить прогноз экологической ситуации.

1. Введение

Рациональное использование природных ресурсов является необходимым условием для устойчивого развития любого государства или региона. К сожалению, экономический рост России остается «сырьевым» и переход на новый технологический уровень развития производства является приоритетной, но пока еще не выполненной задачей. Сложившиеся тенденции сохраняются в большинстве регионов нашей страны. Реализация задачи удвоения ВВП, мировой рост цен на продовольствие увеличивают антропогенную нагрузку на окружающую природную среду. В силу этого на первый план выходит экологическая безопасность территорий, а значит интегральная оценка состояния окружающей их среды (ОС).

В большинстве исследований проводятся межтерриториальные или межрегиональные сравнения регионов с последующим их ранжированием по экологическому состоянию. Между тем как с практической, так и с научной точки зрения представляет интерес оценка абсолютного уровня качества ОС региона и степени его экологической устойчивости.

Цель исследования: разработка методики интегральной оценки, мониторинга и анализа абсолютного уровня экологического развития региона в аспекте экологической устойчивости, а также ее реализации на данных 1990–2005 гг. в условиях Республики Марий Эл (РМЭ) для того, чтобы выявить ключевые направления улучшения экологической ситуации в регионе.

Интегральная оценка сводится к обоснованному отбору наиболее информативных показателей, определению классов состояния окружающей среды, нахождению градаций (качества, устойчивости) для этих показателей по выбранным классам, выбору типа и правила нормирования и нормированию этих показателей, выбору формы построения интегрально-

го индикатора, введению уровней свертки отобранных показателей, выполнению первого и последующих уровней обобщения информации.

2. Проблемы интегрирования показателей

В наиболее общем виде интегральный индикатор (ИИ), характеризующий качество ОС для отдельных территорий, в статистике формируется как линейная комбинация отдельных показателей, взятых с определенными весовыми коэффициентами, характеризующих качество ОС [Осиневич (2003)]:

$$I = \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i,$$

где I — интегральный индикатор качества ОС территории;

b_i — весовой коэффициент («вес») i -го показателя в результирующем значении интегрального индикатора;

x_i — значение i -го показателя качества ОС;

n — количество исходных показателей (приведенных к единому масштабу), входящих в интегральный индикатор.

При агрегировании информации в интегральные индикаторы основной проблемой является выбор весовых коэффициентов. Простейший эгалитарный подход предполагает использование равных весов для всех исходных показателей. Помимо этого, веса могут быть установлены путем экспертной оценки в зависимости от значимости показателей. Перечисленные подходы в некотором смысле субъективны, так как основываются на мнении экспертов или исследователя.

Между тем существует принципиально другой, так называемый «объективистский» подход, основанный на идеологии факторного анализа [Айвазян и др. (2006)].

К «плюсам» «объективистского» подхода относится исключение из процесса построения системы интегральных индикаторов трудоемких, неоднозначных экспертных процедур, требующих специальных знаний в конкретных предметных областях. Однако эти «плюсы» одновременно могут быть отнесены и к недостаткам, поскольку квалифицированная экспертная оценка значимости каждого из интегрируемых показателей, установление научно обоснованных (там, где это возможно) их нормативных значений повышают практическую ценность получаемых результатов.

Процесс агрегирования информации реализуется следующим образом:

- На первом уровне определяют веса показателей по выделенным проблемам, чтобы получить индекс по каждой проблеме.
- На втором уровне взвешиваются промежуточные интегральные индикаторы и определяется ИИ по выделенным областям.
- На третьем уровне взвешиваются интегральные индикаторы второго уровня и определяется единый ИИ.

Агрегирование можно проводить до уровня основных аспектов развития — экологического, экономического, социального, институционального.

В контексте проводимого исследования особого внимания заслуживают интегральные агрегированные индикаторы, базирующиеся на экологических параметрах.

3. Опыт построения интегральных экологических индикаторов

3.1. Мировой опыт в области построения интегральных экологических индикаторов

В мире довольно активно предпринимаются попытки рассчитать подобные индикаторы.

3.1.1. Индекс «живой планеты»

Агрегированный индекс «живой планеты» (ИЖП) (Living Planet Index) для оценки состояния природных экосистем планеты исчисляется в рамках ежегодных докладов «Живая планета» Всемирного Фонда Дикой Природы (World Wild Fund). Индекс живой планеты измеряет природный капитал лесов, водных и морских экосистем и рассчитывается как среднее из трех показателей: численность животных в лесах, в водных и морских экосистемах. Каждый показатель отражает изменение популяции наиболее представительной выборки организмов в экосистеме [Экономика сохранения биоразнообразия (2002)]. Индекс живой планеты показывает, что потеря биологического разнообразия происходит быстрыми темпами. Так, численность популяций видов позвоночных снизилась примерно на треть с 1970 г., что подтверждает ранее выявленные тенденции [Живая планета (2006)].

3.1.2. Показатель «экологический след»

Показатель «экологический след» (давление на природу) (ЭС) (The Ecological Footprint) также исчисляется в рамках ежегодных докладов Всемирного Фонда Дикой Природы. ЭС измеряет потребление населением продовольствия и материалов в эквивалентах площади биологически продуктивной земли и площади моря, которые необходимы для производства этих ресурсов и поглощения образующихся отходов, а потребление энергии — в эквивалентах площади, необходимой для абсорбции соответствующих выбросов CO₂. ЭС, приходящийся на одного человека, представляет собой сумму 6 слагаемых: площадь пашни для выращивания потребляемых человеком зерновых, площадь пастбищ для производства продукции животноводства, площадь лесов для производства древесины и бумаги, площадь моря для производства рыбы и морепродуктов, территория, занятая под жилье и инфраструктуру, площадь лесов для поглощения выбросов CO₂. Метод ЭС позволяет сравнить фактическое давление общества на природу и возможное с точки зрения потенциальных запасов природных ресурсов и ассимиляционных процессов [Экономика сохранения биоразнообразия (2002)]. Последние данные (2003 г.) свидетельствуют о том, что экологический след человечества вырос более чем в три раза с 1961 г. В настоящее время этот показатель превышает регенеративную способность планеты приблизительно на 25% [Живая планета (2006)].

3.1.3. Индекс экологической устойчивости

Индекс экологической устойчивости (ИЭУ) (Environmental Sustainability Index), рассчитывается Йельским и Колумбийским университетами США [Environmental Sustainability Index Report (2005)], опираясь на 76 показателей, сгруппированных в 21 индикатор, которые в свою очередь сведены в 5 компонентов: «Экологическая система», «Снижение экологиче-

ского стресса», «Снижение уязвимости человечества», «Социальные и институциональные возможности» и «Глобальный надзор».

«Экологическая система» включает в себя индикаторы: «качество атмосферы», «качество воды», «количество воды», «биологическая вариативность», «земля»;

«Снижение экологического стресса» включает индикаторы: «уменьшение атмосферных выбросов», «уменьшение стресса на экосистему», «уменьшение стресса на население», «уменьшение выбросов и отходов», «уменьшение стресса на водные ресурсы», «управление природными ресурсами».

Формально все показатели получают равный вес при расчете индекса, поскольку отсутствуют общепризнанные приоритеты в ранжировании экологических проблем. Фактически значимость отдельных проблем усиливается за счет введения большего количества показателей их характеризующих. Считается, что индекс позволяет проводить сравнение между странами по уровню экологической устойчивости, оценивать результаты природоохранной политики, выявлять наилучшие результаты, определять страны, которым грозит экологический кризис, сопоставлять экономический рост и охрану природы. Изучение взаимосвязи между индексом экологической устойчивости и наиболее распространенными синтетическими показателями в области экономики позволило сделать заключение, что в странах с близкими экономическими условиями экологическое состояние определяется управлением и хозяйствованием [Экономика сохранения биоразнообразия (2002)].

3.2. Опыт России в области построения интегральных экологических индикаторов

В России имеется опыт построения интегральных индикаторов на региональном уровне и использования их в аналитической работе. По этой тематике имеется значительное число публикаций (см., например, [Айвазян и др. (2006)], [Греков, Садков (2007)], [Зубаревич (2003)], [Музалевский (2003)], [Петров (2007)], [Полоусова (2003)], [Рубанов, Тикунов (2007)], [Шихова (2007)] и др.). Рассмотрим исследования в этой области, выполненные в последние годы (2005–2007 гг.), которые либо непосредственно касаются различных аспектов оценки экологического состояния регионов России, либо содержат методические подходы для решения поставленной задачи.

3.2.1. Исследования под руководством С. А. Айвазяна (ЦЭМИ РАН), посвященные проблеме интегральной оценки качества жизни населения

Исследуемая автором категория «качество жизни населения» понимается в синтетическом, комплексном смысле, далеко выходящем за пределы таких более привычных и более частных (но тоже интегральных) категорий, как «качество населения», «благополучие населения», «качество социальной сферы», «качество окружающей среды» [Айвазян и др. (2006)]. Была предложена методология оценки интегральных характеристик качества жизни населения (КЖН) регионов России и рейтингования субъектов РФ по каждой из анализируемых синтетических категорий. Она основана на свертке статистически регистрируемых объективных показателей (частных критериев) различных категорий КЖН, а также на некоторых методах многокритериального ранжирования объектов, т. е. ее методы разработаны в рамках так называемой «объективистской» теории. В частности, веса исходных показателей в интегральных индикаторах подбираются таким образом, чтобы по значению (значениям)

интегрального индикатора (интегральных индикаторов) можно было бы наиболее точно (в определенном смысле) восстановить значения всех исходных показателей априорного набора, характеризующего анализируемую синтетическую категорию КЖН. Данные берутся из официальных источников государственной статистики. Методология исследования предполагает реализацию следующих шагов:

1. Создание информационной базы исследования предусматривает два этапа. На первом этапе с целью структуризации и классификации статистических показателей и интегральных индикаторов КЖН строится их общая иерархическая система. На втором этапе эта иерархическая система наполняется конкретным содержанием. Для осуществления второго этапа последовательно решаются две задачи:

- определение (на содержательном, экспертном уровне) исходного априорного перечня статистических показателей для каждой из анализируемых синтетических категорий (в том числе «качество экологической ниши»);
- отбор (по определенной методике, использующей математико-статистические методы) из каждого априорного набора относительно небольшого числа частных критериев, играющих решающую роль в формировании соответствующего интегрального индикатора (или интегральных индикаторов); этот сокращенный набор авторы называют апостериорным.

2. Унификация шкал измерений анализируемых частных критериев предусматривает специальные преобразования всех показателей, в результате чего они оказываются измеренными в безразмерной N -балльной шкале, в которой нулевое значение свидетельствует о наихудшем качестве, а значение в N баллов — о наилучшем. Для определения унифицирующих параметров используется эмпирический подход.

3. Анализ структуры статистических связей между компонентами (частными критериями) исследуемой синтетической категории КЖН включает в себя: определение числа блоков, на которые разбивается набор частных критериев; определение состава показателей в каждом блоке.

4. Построение интегрального индикатора (ИИ) анализируемой синтетической категории:

- случай линейной свертки (число блоков = 1);
- случай нелинейного ИИ КЖН (число блоков ? 2).

Формальным аппаратом этой методологии являются современные методы математической статистики.

3.2.2. Исследования И. Н. Рубанова, В. С. Тикунова (МГУ), посвященные проблеме интегральной оценки экологического состояния окружающей среды регионов России

Методика построения интегрального индикатора разработана в рамках «субъективистской» теории и представляет собой многоэтапную процедуру [Рубанов, Тикунов (2007)].

На первом этапе определяется круг доступных данных.

На втором этапе оценка интегрального индекса разделяется на ряд дополнительных задач — тем. Таковыми являются оценки экологического состояния для основных компонентов окружающей среды — литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Затем определяются основные проблемы (подтемы), характеризующие неблагоприятное экологическое состояние каждого из компонентов окружающей среды. Для оценки остроты этих проблем используются один или несколько показателей. При их отборе исходят из содержательных соображений.

На третьем этапе производится обработка исходных данных. Сначала проводят нормировку исходных данных, т. е. производят их пересчет в абсолютную шкалу от 0 (наихудшее возможное значение) до 100 (наилучшее возможное значение) с использованием нижних и верхних «пороговых значений», определяющихся экспертным путем. Затем путем экспертной оценки, в зависимости от значимости показателей, им присваивается определенный вес.

На четвертом этапе для каждой территориальной единицы рассчитывается интегральный индекс экологического состояния окружающей среды как среднее значение частных индексов экологического состояния отдельных компонентов окружающей среды. Значимость всех компонентов считается равноценной.

В результате проведенных расчетов получают сводный индекс экологического состояния окружающей среды и индексы экологического состояния отдельных ее компонентов для каждого из избранных регионов по шкале 0 до 100.

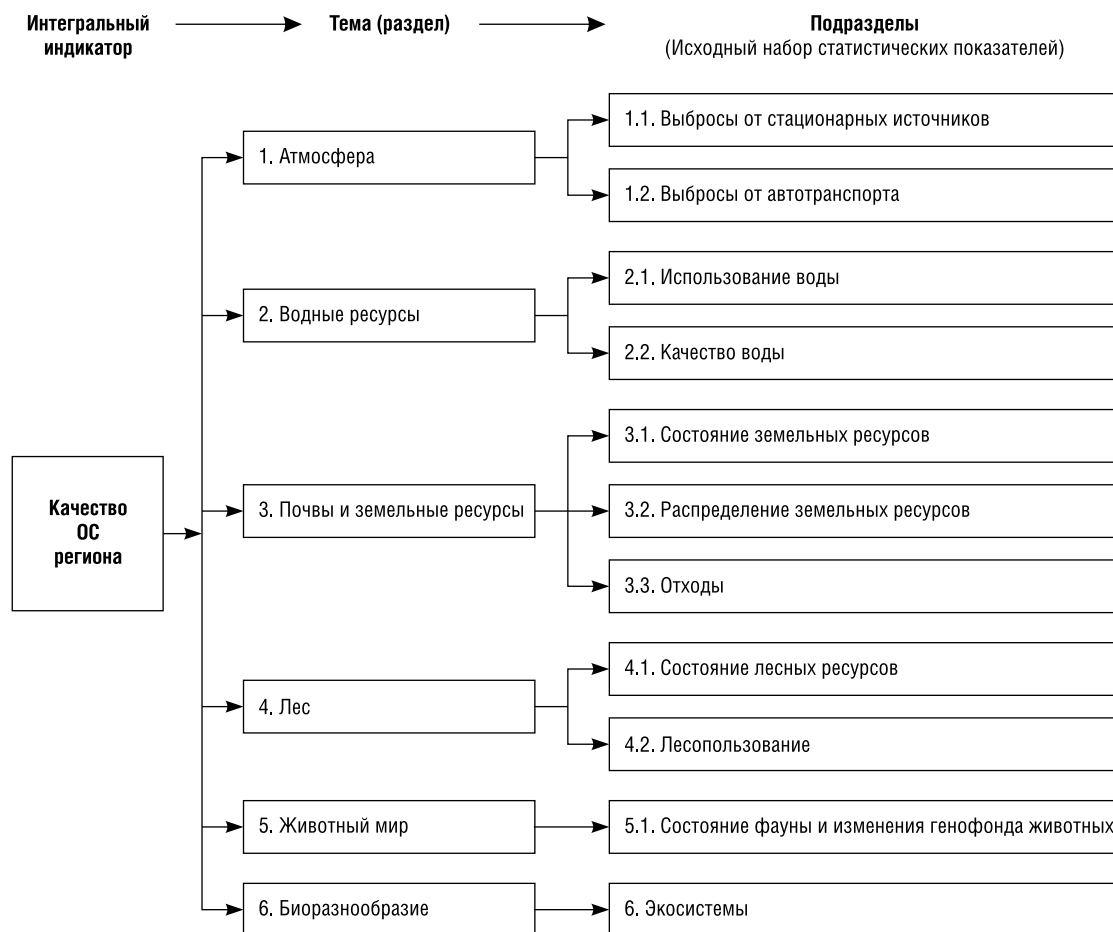
4. Формирование информационной базы статистического анализа экологического состояния региона

Формирование информационной базы статистического анализа экологического состояния региона представляет собой двухэтапную процедуру.

На первом этапе строится иерархическая система статистических показателей и частных критериев в виде общей схемы (рис. 1). Иерархическая система строится в соответствии с ресурсно-компонентным подходом, т. е. нами были выделены следующие разделы (темы), которые описывают экологическое состояние или ущерб, нанесенный отдельным компонентам или ресурсам окружающей среды: атмосферный воздух, водные ресурсы, почвы и земельные ресурсы, лес, животный мир, биологическое разнообразие.

Затем определялись подразделы (подтемы), описывающие специфику и проблемы экологического состояния региона.

На втором этапе в соответствии с принятой структуризацией формируется (из содержательных соображений) исходный набор статистически регистрируемых показателей. Затем производится отбор (по определенной методике, использующей, в частности, метод главных компонент) наиболее информативных частных критериев среди показателей исходного набора каждого раздела ОС. Этот набор частных критериев мы назвали сокращенным. Под критерием мы подразумеваем описание совокупности показателей, позволяющих охарактеризовать ухудшение состояния окружающей среды по степени экологического неблагополучия. Предложенный набор частных критериев, или ключевых индикаторов, может быть использован для анализа сложившейся экологической ситуации, выявления факторов и условий экологического развития региона. Кроме того, он рассматривается в качестве необ-



Л. П. Бакуменко, П. А. Коротков

Рис. 1. Иерархическая система статистических показателей, частных критериев качества окружающей среды региона

ходимого условия для последующей интегральной оценки экологической ситуации и качества ОС региона.

5. Методика построения интегрального индикатора (индикаторов) качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона

Расчет интегрального экологического индикатора производился на основе методики измерения синтетических категорий КЖН и многокритериального рейтингования регионов РФ и их муниципальных образований по КЖН, предложенной в [Айвазян и др. (2006)], которая была модифицирована и адаптирована под цели нашего исследования.

В работе интегральный индикатор (ИИ) качества окружающей среды и степени экологической устойчивости региона представляет собой линейную свертку (взвешенную сумму) нормированных (в N-балльной шкале) значений частных критериев сокращенного набора и вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{св}}(t) = \sum_{j=1}^s w_j \cdot \tilde{X}_j, \quad (1)$$

где $\tilde{X}_j(t)$ — значение j -го нормированного частного критерия в год t , а w_j — «веса» критериев. В качестве весов w_j ($w_j \geq 0, \sum_{j=1}^s w_j = 1$) используются значения c_j^2 ($w_j = c_j^2$), где $\bar{C} = (c_1, c_2, \dots, c_s)$ — собственный вектор ковариационной матрицы показателей $\tilde{X}_1(t), \dots, \tilde{X}_s(t)$, соответствующий наибольшему собственному значению λ_1 этой матрицы.

Построенная таким образом линейная комбинация частных критериев (названная в [Айвазян (2003)] модифицированной первой главной компонентой) обладает полезным свойством наилучшего автопрогноза частных критериев $\tilde{X}_1(t), \dots, \tilde{X}_s(t)$. Значения $Y(t)$ могут варьироваться в рамках той же шкалы $[0; 10]$, что и нормированные значения $\tilde{X}_1(t), \dots, \tilde{X}_s(t)$, а веса говорят о сравнительной значимости частных критериев в смысле их влияния на интегральный индикатор.

Этап 1. Нормирование частных критериев

Перед тем, как переходить непосредственно к процедуре свертки частных разнородных критериев x_1, \dots, x_s i -го раздела, необходимо их нормировать, т. е. применить к каждому из них такое преобразование, в результате которого все они будут измеряться в N -балльной (безразмерной) шкале. Для этого используется метод линейного масштабирования, позволяющий отслеживать динамику реального роста/снижения каждого критерия относительно стабильных референтных точек (стабильных максимальных и минимальных значений критерия — параметров), а также более точно учитывать различия по отдельным критериям при суммировании. Расчет нормированного частного критерия \tilde{x} производится по формуле (2), если частный критерий x связан с анализируемым качеством компонента ОС монотонно-возрастающей зависимостью (т. е. чем больше значение x , тем выше качество):

$$\tilde{x} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot N, \quad (2)$$

и по формуле (3), если связь отрицательна.

$$\tilde{x} = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot N. \quad (3)$$

Определение референтных точек, или абсолютных значений нормирующих параметров напрямую связано с важнейшей проблемой прикладной экологии — выявлением пределов устойчивости экологических систем разного пространственного масштаба к различным антропогенным нагрузкам. Существующий подход к квантованию и выделению граничных значений числовых признаков, используемых для группировки экологических ситуаций по классам качества, чаще всего достаточно произволен и основывается на опыте исследователя [Шитиков, Розенберг и др. (2003)]. Между тем Федеральный закон «Об охране природы» [2002] в главе VIII для оценки зон экологического бедствия и зон чрезвычайных ситуаций предписывает использовать соответствующий документ Минприроды РФ [Критерии оценки (1992)], в котором экологическая обстановка классифицируется по возрастанию степени неблагоприятия следующим образом:

- относительно удовлетворительная;
- напряженная;
- критическая;
- кризисная (или зона чрезвычайной экологической ситуации);
- катастрофическая (или зона экологического бедствия).

В нашем исследовании параметры — это границы интервалов, соответствующих степеням экологического неблагополучия территорий. В частности, за минимальное (максимальное) нормативное значение x_{\min} (x_{\max}) принимается значение нижней границы интервала, соответствующего либо относительно удовлетворительной (нормальной), либо кризисной экологической обстановке территории. Поскольку зона экологического кризиса характеризуется *потерей устойчивости*, угрозой здоровью населения, устойчивыми отрицательными изменениями состояния естественных экосистем [Критерии оценки (1992)], то предлагаемая методика нормирования частных критериев и выбора их параметров позволяет оценивать не только реальное состояние и качество ОС, но и, что особенно важно, *степень экологической устойчивости* ОС региона. Параметры определяются на основании нормативов либо на основании научных, экспериментальных данных.

Таким образом, нулевое значение нормированного критерия будет соответствовать *кризису*, или *потере экологической устойчивости*, а максимальное (N баллов) — *норме*. Мы используем десятибалльную шкалу, т. е. $N = 10$.

Известно, что устойчивость природной среды определяется самым слабым ее элементом, или звеном [Теоретические и практические аспекты (2004)]. Поэтому «выход» какого-либо критерия за пределы параметров означает потерю устойчивости природной среды в целом.

Этап 2. Определение числа интегральных индикаторов, характеризующих качество и степень экологической устойчивости ОС региона

Считается, что интегральный индикатор, построенный в виде первой главной компоненты по частным критериям сокращенного набора, должен объяснять не менее 55% общей дисперсии этих критериев [Айвазян и др. (2006)]. В противном случае, не существует сколько-нибудь удовлетворительного решения задачи построения единственного интегрального индикатора в виде первой главной компоненты, аппроксимирующего (с приемлемой точностью) значения всех частных критериев сокращенного набора. Подобные ситуации возникают, в частности, когда в составе рассматриваемого набора частных критериев имеется определенное количество взаимно слабо коррелированных переменных, хотя каждая из них вносит существенный вклад в описание и интерпретацию качества ОС региона.

Для определения числа интегральных индикаторов по имеющимся значениям нормированных частных критериев $\tilde{x}_{i1}(t), \dots, \tilde{x}_{is}(t)$ строится оценка $\hat{\Sigma}_{\tilde{X}}$ ковариационной матрицы $\Sigma_{\tilde{X}}$ вектора нормированных частных критериев $\tilde{X} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_s)^T$, определяются собственные числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_s \geq 0$ этой матрицы (т. е. решается характеристическое уравнение $|\hat{\Sigma}_{\tilde{X}} - \lambda I_s| = 0$, где I_s обозначает единичную матрицу размерности $s \times s$), а затем определяется m_0 из условия

$$m_0 = \min_{1 \leq m \leq s-1} \left\{ m: \frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_m}{\lambda_1 + \dots + \lambda_s} \geq 0,55 \right\}.$$

Если оказалось, что $m_0 = 1$, то переходят к этапу 3, если же $m_0 > 1$, то реализуют вначале процедуры этапа 2а, после чего переходят к этапу 3а. Общая методологическая схема расчета ИИ качества и степени экологической устойчивости ОС региона на разных иерархических уровнях общности представлена на рис. 2.

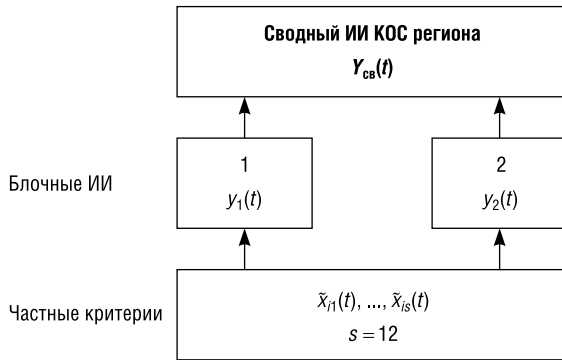


Рис. 2. Иерархическая схема построения интегральных индикаторов КОС региона

Этап 2а. Разбиение анализируемого набора частных критериев $\tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_s(t)$ на m_0 относительно однородных непересекающихся групп M_1, M_2, \dots, M_{m_0} . Для структуризации и определения числа групп (блоков) M_j , на которые целесообразно разбить сокращенный набор нормированных частных критериев, применяется факторный анализ. Значимыми считаются факторные нагрузки больше 0,7. Полученная факторная структура должна иметь четкую экологическую интерпретацию.

Этап 3. Построение единственного ИИ, характеризующего качество и степень экологической устойчивости ОС региона (случай $m_0 = 1$)

В этом случае значение сводного интегрального индикатора $Y(t)$ качества ОС региона определяется по указанной выше формуле (1).

Этап 3а. Построение блочных ИИ в виде модифицированных первых главных компонент отдельно по частным критериям, входящим в каждый из блоков M_1, M_2, \dots, M_{m_0} . Значения модифицированной первой главной компоненты $y_j(t)$ частных критериев $\tilde{x}_{i1}(M_j), \tilde{x}_{i2}(M_j), \dots, \tilde{x}_{is_j}(M_j)$, вошедших в блок M_j ($s_1 + s_2 + \dots + s_{m_0} = s$), определяются по формуле:

$$y_j(t) = \sum_{q=1}^{s_j} w_j(M_j) \cdot \tilde{x}_{iq}(t). \tag{4}$$

Отметим, что возможны ситуации, когда блок M_j состоит из единственного частного критерия $\tilde{x}_{i1}(M_j)$. Тогда значения интегрального индикатора $y_j(t)$ определяются значениями этого частного критерия.

Этап 4. Построение единственного ИИ, характеризующего качество и степень экологической устойчивости ОС региона (случай $m_0 > 1$)

Значение сводного интегрального индикатора $Y_{cb}(t)$ качества окружающей среды региона и ее экологической устойчивости для года t определяется по значениям блочных ИИ ($y_1(t), y_2(t), \dots, y_{m_0}(t)$) следующим образом [Айвазян и др. (2006)]:

Вычисляется взвешенное евклидово расстояние $p(t)$ между вектором качества ОС региона в год t — ($y_1(t), y_2(t), \dots, y_{m_0}(t)$) и эталоном (10; 10; ...; 10) в пространстве блочных ИИ по формуле:

$$p(t) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_0} (v_j (y_j(t) - 10)^2)} \quad (5)$$

где v_1, v_2, \dots, v_{m_0} $\left(\sum_{j=1}^{m_0} v_j = 1, v_j \geq 0 \right)$ — нормированные неотрицательные веса блочных ИИ. Вес v_j определяется долей дисперсии блочного ИИ $y_j(t)$ в суммарной дисперсии $y_1(t), y_2(t), y_{m_0}(t)$. Сводный интегральный индикатор качества окружающей среды региона и степени ее экологической устойчивости (ИИ КО) для года t определяется по формуле:

$$Y_{cb}(t) = 10 - p(t). \quad (6)$$

6. Результаты построения интегральных индикаторов качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл)

Использование двухэтапной процедуры, описанной в разделе 3, привело к сокращенному набору частных критериев:

1. Атмосферный воздух

$x_{1.1}$ — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в среднем на 1 кв. км территории региона, т/год;

$x_{1.2}$ — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта в среднем на 1 кв. км территории региона, т/год.

2. Водные ресурсы

$x_{2.3}$ — доля загрязненных сточных вод в общем объеме сточных вод, сброшенных в поверхностные водоемы, %;

$x_{2.4}$ — количество сброшенных в поверхностные водоемы загрязненных сточных вод на 1 кв. км территории региона, т/год.

3. Почвы и земельные ресурсы

$x_{3.5}$ — содержание гумуса, %;

$x_{3.6}$ — распаханность территории, %;

$x_{3.7}$ — площадь нарушенных земель, га.

4. Лес

$x_{4,8}$ — лесная площадь, пройденная пожарами, га/год;

$x_{4,9}$ — лесистость, %;

$x_{4,10}$ — использование расчетной лесосеки, %.

5. Животный мир

$x_{5,11}$ — плотность тетерева на 1000 га лесных угодий, голов.

6. Биологическое разнообразие

$x_{6,12}$ — доля особо охраняемой природной территории (ООПТ) федерального значения (национальные парки и государственные природные заповедники) в общей площади региона, %.

В качестве исходных данных использовались:

- официальные статистические данные Федеральной службы государственной статистики [Основные показатели охраны окружающей среды (2007)];
- информационные и аналитические материалы Министерства природных ресурсов РФ и других министерств и ведомств, деятельность которых связана с природопользованием, экологическим контролем и охраной окружающей среды [Государственные доклады (1993–2006), Государственный доклад (2006)].

Для нормирования частных критериев использовался этап 1 методики, описанной в разделе 4. Как уже было сказано, основной проблемой является выбор абсолютных нормирующих параметров. Для некоторых частных критериев определить параметры на основании законодательно установленных нормативов оказалось невозможно. Вместо них использовались экспериментальные и научные данные. Так, для частного критерия $x_{4,8}$ — лесная площадь, пройденная пожарами, — за максимальное нормативное значение мы приняли площадь опустошительных лесных пожаров 1972 года, создавших чрезвычайную экологическую ситуацию на территории РМЭ. Для частных критериев: $x_{1,1}$ — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников на площадь территории региона; $x_{1,2}$ — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта на площадь территории региона; $x_{2,4}$ — сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы на площадь территории региона — абсолютные нормирующие параметры определялись экспериментальным путем. В частности, по значениям каждого из этих частных критериев, находящихся в открытом доступе, проводилась классификация укрупненных субъектов РФ по степени неблагополучия экологической обстановки методом « k -средних» (табл. 1, 2, 3). Учитывая, что на территории РФ зоны экологического бедствия (по этим критериям) отсутствуют [Егоренков, Кочуров (2005)], субъекты РФ разбивались на четыре, а не на пять кластеров. По причине отсутствия информации из расчетов была исключена Чеченская Республика. В целях лучшей сопоставимости регионов г. Москва и Московская

область, а также г. Санкт-Петербург и Ленинградская область рассматривались как единые регионы.

Таблица 1

Классификация субъектов РФ по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в среднем на 1 кв. км территории региона, т/год

Экологическая обстановка	Выбросы	Количество субъектов РФ
Относительно удовлетворительная	0,04–2,23	60
Напряженная	2,66–4,19	9
Критическая	5,76–7,12	5
Кризисная	11,33–15,74	3

Таблица 2

Классификация субъектов РФ по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта в среднем на 1 кв. км территории региона, т/год

Экологическая обстановка	Выбросы	Количество субъектов РФ
Относительно удовлетворительная	0,01–2,05	36
Напряженная	2,19–4,59	27
Критическая	5,10–10,14	13
Кризисная	10,14–41,23	1

Таблица 3

Классификация субъектов РФ по количеству сброшенных загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы на 1 кв. км территории региона, тыс. м³/год

Экологическая обстановка	Выбросы	Количество субъектов РФ
Относительно удовлетворительная	0–2,03	45
Напряженная	2,27–5,46	19
Критическая	6,42–17,68	12
Кризисная	17,68–51,54	1

Результаты классификации субъектов РФ по рассматриваемым критериям согласуются с официальной информацией МПР РФ ([Государственный доклад (2005)], [Национальный план (1999)]), а также с результатами исследований в этой области ведущих ученых России [Егоренков, Кочуров (2005)].

Параметры, необходимые для нормирования всех частных критериев сокращенного набора, представлены в табл. 4.

Абсолютные нормирующие параметры частных критериев

№ п/п	Кри-терий	Название частного критерия	Параметры		Тип норми-рования	Источ-ник
			x_{\min}	x_{\max}		
1	$x_{1.1}$	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников / S , тыс. т/год	0	11,33	2	Табл. 1
2	$x_{1.2}$	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта / S , тыс. т/год	0	10,14	2	Табл. 2
3	$x_{2.3}$	Доля загрязненных сточных вод в общем объеме сточных вод, %	0	100	2	
4	$x_{2.4}$	Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы / S , тыс. т/год	0	17,68	2	Табл. 3
5	$x_{3.5}$	Содержание гумуса, %	1,49	1,98	1	
6	$x_{3.6}$	Распаханность территории, %	10	40	2	
7	$x_{3.7}$	Площадь нарушенных земель, га	10	5000	2	
8	$x_{4.8}$	Лесная площадь, пройденная пожарами, га/год	0	186 000	2	
9	$x_{4.9}$	Лесистость, %	9	60	1	
10	$x_{4.10}$	Использование расчетной лесосеки, %	0	100	1	
11	$x_{5.11}$	Плотность тетерева на 1000 га лесных угодий, голов	5	30	1	
12	$x_{6.12}$	Доля ООПТ федерального значения / S , %	0	6	1	

Примечание: для экономии места в таблице даны краткие названия частных критериев; S — общая площадь территории региона, кв. км.

Определение числа интегральных индикаторов, характеризующих качество ОС РМЭ, осуществлялось в соответствии с этапом 2 методики. Построенная первая главная компонента по 12 нормированным частным критериям $\tilde{x}_{1.1}(t), \dots, \tilde{x}_{6.12}(t)$ (для периода времени 1990–2005 гг.) объясняет лишь 50,42% общей дисперсии этих критериев. Следовательно, построение единственного интегрального индикатора качества окружающей среды региона и ее экологической устойчивости в виде первой главной компоненты не имеет удовлетворительного решения.

С целью структуризации и определения числа блоков M , на которые целесообразно разбить набор частных критериев (этап 2а), был проведен факторный анализ по значениям 12 нормированных частных критериев $\tilde{x}_{1.1}(t), \dots, \tilde{x}_{6.12}(t)$ для периода времени 1990–2005 гг.; метод вращения «*varimax normalized*». Значимыми считаем факторные нагрузки, превышающие 0,7. Рассчитанные факторные нагрузки, отражающие вклад каждого частного критерия и дисперсии факторов, представлены в табл. 5.

Решено было ограничиться двумя блоками (табл. 6), так как доля объясненной дисперсии двумя первыми факторами (78,75%) превышает заданный пороговый уровень (55%), а структура корреляционных связей между критериями $\tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_{12}(t)$ позволяет дать блокам содержательную интерпретацию.

Оценки нагрузок и дисперсий специфических факторов

Частный критерий	Оценки нагрузок на факторы	
	F_1	F_2
x_1	0,7145	-0,3214
x_2	0,8926	0,2955
x_3	0,8191	-0,2666
x_4	0,8951	0,3239
x_5	-0,6806	-0,7020
x_6	-0,2234	0,8940
x_7	0,0315	0,9806
x_8	-0,0800	-0,2019
x_9	0,2771	0,8943
x_{10}	-0,9005	-0,1902
x_{11}	0,0323	0,9108
x_{12}	0,7831	0,5667
Оценка доли вклада F_j в общую дисперсию, %	50,42	28,33

Примечание: для краткости индекс i при частных критериях опускается.

Таблица 6

Блоки частных критериев, характеризующих качество и степень экологической устойчивости окружающей среды региона

Блок 1: «Качество техносферы»	Блок 2: «Качество экосистем»
x_1 — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в среднем на 1 кв. км территории региона	x_5 — содержание гумуса
x_2 — выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта в среднем на 1 кв. км территории региона	x_6 — распаханность территории
x_3 — доля загрязненных сточных вод в общем объеме сточных вод, сброшенных в поверхностные водоемы	x_7 — площадь нарушенных земель
x_4 — сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы в среднем на 1 кв. км территории региона	x_8 — лесная площадь, пройденная пожарами
x_{10} — использование расчетной лесосеки	x_9 — лесистость
x_{12} — доля ООПТ федерального значения в общей площади региона	x_{11} — плотность тетерева на 1000 га лесных угодий, голов

Примечание: два блочных интегральных индикатора объясняют около 79% общей вариации всех частных критериев сокращенного набора.

Первый блок (M_1) включает в себя показатели изменения состояния окружающей среды от поступления отходов (газообразных, жидких, твердых) в различные ее компоненты и показатели противодействия этому негативному воздействию (использование расчетной лесосеки, площадь ООПТ). Поэтому этот блок получил название «Качество техносферы».

Второй блок (M_2) включает с себя показатели, характеризующие изменение состояния элементов экосистем. Следовательно, этот блок назвали «Качество экосистем».

Применение метода главных компонент к нормированным частным критериям каждого блока M_1 , M_2 дало следующие результаты (табл. 7):

Таблица 7

Собственные значения корреляционной матрицы частных критериев блоков M_1 , M_2 и процент объясненной дисперсии, $t = 1990-2005$

Номер главной компоненты	Блок 1 (M_1) «Качество техносферы»		Блок 2 (M_2) «Качество экосистем»	
	Собственные значения	% объясненной дисперсии	Собственные значения	% объясненной дисперсии
1	4,364	72,728	4,045	67,411
2	0,708	11,800	0,976	16,268
3	0,546	9,092	0,598	9,974
4	0,151	2,511	0,198	3,305
5	0,132	2,204	0,147	2,449
6	0,100	1,665	0,036	0,592

Первая компонента, построенная по критериям блока M_1 , объясняет около 73% (больше порогового значения 55%) общей дисперсии этих критериев. Первая компонента, построенная по критериям блока M_2 , объясняет около 67% общей дисперсии этих критериев.

После подсчета значений блочных интегральных индикаторов $y_1(t)$, $y_2(t)$ для каждого года t (этап 3а) и их дисперсий вычислялись веса блочных ИИ v_1 , v_2 (табл. 8).

Значение сводного интегрального индикатора $Y_{cb}(t)$ качества и экологической устойчивости окружающей среды РМЭ для каждого года t ($t = 1990, \dots, 2005$) определялось по значениям блочных ИИ $y_1(t)$, $y_2(t)$ в соответствии с процедурой этапа 4 (табл. 8).

Детальный анализ динамики интегральных индикаторов с учетом влияния факторов воздействия выходит за рамки данной работы, поэтому мы ограничимся лишь общими комментариями.

Траектория ИИ «Качество техносферы». Траектория блочного ИИ $y_1(t)$ имеет «точку перегиба» в 1999 г. Если до 1999 г. в целом прослеживается позитивная динамика, то после 1999 г. — отрицательная. Такое развитие вполне логично, поскольку с 1999 г. в РФ, и в Марий Эл в том числе, наблюдается устойчивый экономический рост, который способствует ухудшению качества и снижению степени экологической устойчивости техносферы. Между тем в последние годы (2004–2005) на фоне экономического роста наблюдается стабилизация качества техносферы. Это свидетельствует о сбалансированности проводимой экологи-

Динамика двух блочных интегральных индикаторов $y_1(t)$, $y_2(t)$ и сводного ИИ качества и степени экологической устойчивости ОС РМЭ $Y_{cb}(t)$ за 1990–2005 гг.

Веса (v_1, v_2)	0,658	0,342		
Год	$y_1(t)$ «Качество техносферы»	$y_2(t)$ «Качество экосистем»	ρ	$Y_{cb}(t)$ Качество и степень экологической устойчивости ОС РМЭ
1990	5,69	5,04	4,54	5,46
1991	5,63	5,24	4,50	5,50
1992	5,81	4,92	4,52	5,48
1993	5,83	5,23	4,38	5,62
1994	6,05	5,17	4,27	5,73
1995	5,88	5,12	4,39	5,61
1996	5,88	5,31	4,32	5,68
1997	6,10	5,36	4,17	5,83
1998	6,12	5,38	4,15	5,85
1999	6,22	6,07	3,83	6,17
2000	6,14	6,20	3,84	6,16
2001	6,09	6,85	3,67	6,33
2002	6,02	6,58	3,79	6,21
2003	5,88	6,55	3,90	6,10
2004	5,91	7,04	3,74	6,26
2005	5,90	7,60	3,61	6,39

Л. П. Бакуменко, П. А. Коротков

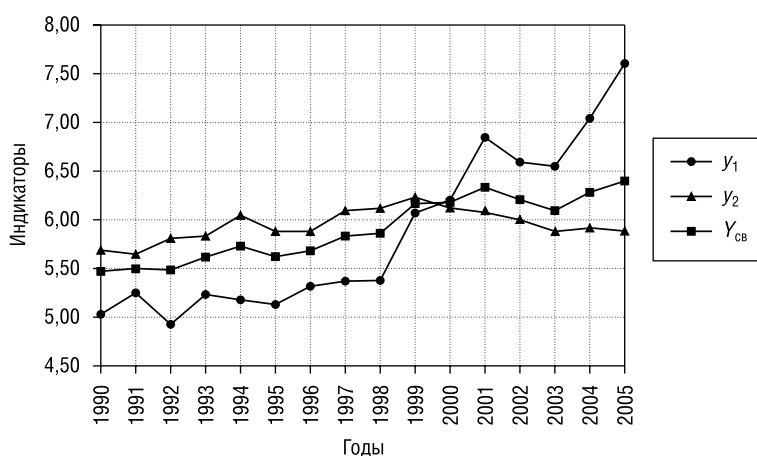


Рис. 3. График динамики двух блочных интегральных индикаторов $y_1(t)$, $y_2(t)$ и сводного ИИ качества и степени экологической устойчивости ОС РМЭ $Y_{cb}(t)$ за 1990–2005 гг.

ческой политики, а также об эффективности проводимых природоохранных мероприятий по этому блоку.

Траектория динамики ИИ «Качество экосистем». Траектория блочного ИИ $y_2(t)$ имеет тенденцию к росту с 1990 г. Вероятно, это связано с упадком сельского хозяйства, снижением рекреации, относительно благоприятными погодными условиями. Тревожным сигналом является низкое финансирование природоохранных мероприятий по этому блоку.

Траектория динамики сводного ИИ «Качество и степень экологической устойчивости ОС региона». Траектория этого сводного ИИ имеет тенденцию к росту — ухудшение качества техносферы нивелируется более быстрым ростом качества экосистем. Именно эта особенность экологического развития РМЭ и создает «резерв» качества и экологической устойчивости ОС в целом. Однако можно предположить, что в условиях роста антропогенной нагрузки (например, наметившееся развитие агропромышленного комплекса) на экосистемы качество экосистем будет ухудшаться, что в конечном итоге приведет к ухудшению качества и снижению степени экологической устойчивости ОС региона в целом. Учитывая эффект запаздывания, для сохранения этого экологического «резерва», необходимо заранее делать капиталовложения в природоохранные мероприятия по сохранению и росту качества экосистем. Следует отметить, что руководство региона осознает эту опасность, и в 2005 г. капиталовложения в охрану ОС и природных ресурсов по блоку «Качество экосистем» увеличились более чем в три раза.

По нашему мнению, для детального анализа динамики экологического развития РМЭ необходимо исследовать и количественно оценить взаимосвязи между рассчитанными интегральными индикаторами качества окружающей среды региона и группой показателей (промышленность, транспорт, сельскохозяйственное производство, городские агломерации), характеризующих давление на ОС. Результаты такого исследования позволят выявить (на количественном уровне) ключевые направления совершенствования экологической политики региона, построить точечный прогноз качества и степени экологической устойчивости ОС РМЭ. Такое исследование мы планируем представить в следующей работе.

7. Заключение

1. Необходимость построения и численной оценки интегрального индикатора качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона диктуется, с одной стороны, наличием большого числа показателей, принимаемых во внимание при оценке экологического состояния региона, а с другой стороны, ограниченными возможностями человека за конечное время осмысливать и обобщать большие массивы разнородной информации.

2. Значения построенных интегральных индикаторов и их динамика могут интерпретироваться как оценки степени эффективности управления административных служб, деятельность которых связана с природопользованием, экологическим контролем и охраной окружающей среды.

3. Предложенная иерархическая система статистических показателей, частных критериев и интегральных индикаторов качества окружающей среды региона (рис. 1) допускает как

последовательную иерархическую декомпозицию каждого из разделов, так и анализ частных критериев сокращенного набора, причем эти критерии также могут рассматриваться как ключевые индикаторы в рамках известной системы индикаторов устойчивого развития «ключевые/базовые индикаторы».

4. Предложенная методика нормирования частных критериев и выбора их параметров позволяет оценивать не только реальное состояние и качество окружающей среды региона, но и степень ее экологической устойчивости.

5. Возможность измерения и мониторинга интегральных индикаторов качества и степени экологической устойчивости окружающей среды регионов (субъектов) РФ позволяет:

- выявлять их позитивную или негативную динамику для региона;
- анализируя «веса» в свертках, представляющих собой соответствующие интегральные индикаторы, определять, какие именно факторы (статистические показатели) оказывают наиболее сильное влияние на формирование выявленной позитивной (негативной) тенденции;
- определять ключевые направления совершенствования экологической политики региона;
- строить прогноз экологической ситуации, результатов принимаемых управленческих решений.

6. В соответствии с предложенной в данной работе методикой построены следующие интегральные индикаторы:

- качество техносферы;
- качество экосистем;
- качество и степень экологической устойчивости ОС (сводный ИИ).

Проведенный эмпирический анализ динамики этих интегральных индикаторов за 1990–2005 гг. позволил выявить проблемные области, наметить ключевые направления экологической политики, оценить степень эффективности управления административных служб, деятельность которых связана с природопользованием, экологическим контролем и охраной окружающей среды.

Список литературы

Айвазян С. А. К методологии измерения синтетических категорий качества жизни населения // *Экономика и математические методы*. 2003. № 2. С. 33–53.

Айвазян С. А., Степанов В. С., Козлова М. И. Измерение синтетических категорий качества жизни населения региона и выявление ключевых направлений совершенствования социально-экономической политики (на примере Самарской области и ее муниципальных образований) // *Прикладная эконометрика*. 2006. № 2. С. 18–84.

Государственные доклады «О состоянии окружающей природной среды Республики Марий Эл» в 1992–2005 гг. Йошкар-Ола, 1993–2006.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2005 году». М.: АНО «Центр международных проектов», 2006. С. 500.

Долгосрочная Государственная программа охраны природы Марийской ССР на 1991–1995 годы и на перспективу до 2005 года. Йошкар-Ола, 1991.

Егоренков Б. И. Геоэкология. М.: Финансы и статистика, 2005.

«Живая планета–2006» Доклад WWF // Internet resource: http://www.panda.org/news_facts/publications/living_planet_report/index.cfm

Зубаревич Н. В. Социальное развитие регионов России: проблемы и тенденции переходного периода. М.: Едиториал УРСС, 2003.

Рыбальский Н. Г., Кузьмин В. Н., Морозов Н. П., Назаревский Н. В., Шакин В. В. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 1992.

Музалевский А. А. Новые подходы к решению проблемы обеспечения экологической безопасности окружающей среды на основе экологической парадигмы // Internet resource: [http://www.eatu.ru/eatu.ru.page\(DOC\).doc\(1032\).html](http://www.eatu.ru/eatu.ru.page(DOC).doc(1032).html)

Национальный план действий по охране окружающей среды Российской Федерации на 1999–2001 годы. М.: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 1999 // Internet resource: <http://infopravo.by.ru/fed1998/ch02/akt12629.shtm>

Осиневич Л. М. Методы экономико-статистического анализа окружающей природной среды [Электронный ресурс]: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12. М.: РГБ, 2003. (Из фондов Российской государственной библиотеки.)

Основные показатели охраны окружающей среды / Статистический бюллетень / Федеральная служба государственной статистики (Росстат). М., 2007.

Петров С. Э. Анализ агроэффективности территории на базе системы показателей мониторинга состояния земель [Электронный ресурс]: на примере Республики Татарстан: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.26. Астрахань: РГБ, 2007. (Из фондов Российской государственной библиотеки.)

Полоусова Г. Ю. Статистический анализ влияния экологических факторов на здоровье населения Тульской области [Электронный ресурс]: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12. М.: РГБ, 2003. (Из фондов Российской государственной библиотеки.)

Рубанов И. Н., Тикунов В. С. Методика оценки экологического состояния окружающей среды регионов России // *Проблемы региональной экологии*. 2007. № 3. С. 20–28.

Садков В. Г., Греков И. Е. Высшие ценности цивилизации и измерение результатов общественного развития стран мирового сообщества // Материалы Интернет-конференции «Интеллектуальные силы человечества и гармония мирового развития» (2007) // Internet resource: <http://www.plproject.ru/planetary02.php>

Теоретические и практические аспекты устойчивого природопользования: управление, принципы организации природно-хозяйственных систем, ландшафтное планирование / Под общей ред. д-ра биол. наук Ю. П. Демакова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003.

Шихова О. А. Статистическая оценка социально-экономического и экологического состояния территории: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12. М., 2007.

Экономика сохранения биоразнообразия / Под ред. А. А. Тишкова. М.: Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия Российской Федерации», Институт экономики природопользования, 2002.

2005 Environmental Sustainability Index Report // Internet resource: <http://www.yale.edu/esi>