

УДК 502.131.1:[502.211+332.012.2]

***В.В. Дмитриев\*\**, *А.Н. Огурцов\****

**УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В ПРИРОДЕ  
И ОБЩЕСТВЕ: МЕТОДОЛОГИЯ, ОЦЕНКА, РЕЗУЛЬТАТЫ**

\* Санкт-Петербургский государственный университет; \*\* Санкт-Петербургский государственный университет / Российский государственный гидрометеорологический университет, vasilij-dmitriev@rambler.ru

***V.V. Dmitriev, A.N. Ogurtsov***

**SUSTAINABILITY OF COMPLEX SYSTEMS IN NATURE  
AND SOCIETY: METHODOLOGY, EVALUATION, RESULTS**

Рассматриваются методология, методы, модели, результаты оценки устойчивости сложных систем в природе (наземные и водные эко- и геосистемы) и обществе (социо-эколого-экономические системы и их подсистемы), а также этапы построения интегральных показателей устойчивости. В качестве методической основы акцентируется использование АСПИД-методологии и моделей устойчивости. Обобщаются результаты интегральной оценки устойчивости водных объектов, наземных ландшафтов, социо-эколого-экономических систем (СЭЭС) и их свойств, реализованные в рамках выполнения научных проектов и грантов последних лет.

**Ключевые слова:** *устойчивость, интегральная оценка, модели-классификации, результаты интегральной оценки устойчивости.*

The methodology, methods, models, and the results of the assessment of the stability of complex systems in nature (terrestrial and aquatic eco- and geosystems) and society (socio-ecological and economic systems and their subsystems) are considered. Stages of construction of integral indicators of stability are considered. As a methodical basis, the use of ASPID methodology and stability models is emphasized. The results of the integral assessment of the stability of water bodies, terrestrial landscapes, socio-ecological and economic systems and their properties, implemented within the framework of scientific projects and grants are generalized.

**Keywords:** *stability, integral estimation, model-classification, results of integral stability estimation.*

**Введение**

В настоящее время при оценивании качества сложных систем и их эмерджентных свойств исследователи прибегают к использованию различных методик. В основе методик интегрального оценивания систем и их свойств лежит представление об объекте окружающей среды как о многопараметрической сложной системе, то есть его качество и свойства характеризуются набором исходных параметров (характеристик). На первый план ставятся вопросы интеграции исходных характеристик, которые могут быть весьма многочисленны и отражать различные аспекты функционирования как природных систем и объектов, так и социально-экономических или социо-эколого-экономических систем и их подсистем. Примером могут служить различные по масштабу геосистемы (природно-территориальные

комплексы), как наземные, так и водные, а также их подсистемы; социосистемы и их подсистемы. В качестве предмета исследования (оцениваемой системы, ее качества или свойства) могут выступать: экологическое состояние, устойчивость, уязвимость, экологическое благополучие, экологическая целостность, экологическая напряженность, качество жизни населения, оценка мультиопасных явлений (мульти-ОЯ, multi-hazards) и рисков (мультириски) при определении интегрального риска от совокупности опасных явлений в целом и т. д.

В исследованиях акцентируются как простые (аддитивные) свойства систем (масса, биомасса, численность, концентрация, объем, площадь и др.), так и сложные (неаддитивные) свойства систем (устойчивость, уязвимость, благополучие, напряженность и др.), которые часто именуют эмерджентными.

Анализ геосистем в науках о Земле на начальном этапе традиционно сопровождается анализом пространственно-временных изменений их аддитивных свойств. Это способствует появлению целого ряда публикаций, в которых авторы, рассматривая сложную систему или сложное системное свойство, предлагают оценивать его на основе информации о компонентном составе системы (как правило, выбираются один-два компонента, характеризующих химический или биологический состав системы) или о факторе, влияющем на сложное системное свойство. Для этого авторами часто используется известная формулировка принципа «бритвы Оккама»<sup>1</sup>. Так, например, часто предлагалось оценивать трофический статус водных экосистем, их устойчивость и др. Методологически такой подход не является оправданным, поскольку принцип простоты относится к сложной системе или к сложному системному свойству. При этом элементом системы должен выступать не компонент состава или фактор, а ее подсистема. Принцип простоты позволяет соподчинить друг другу как естественные, так и искусственные системы так, что свойства систем некоторого уровня выводятся (объясняются) на основе уже изученных свойств и связей систем нижестоящего уровня иерархии. Такой принцип в системологии получил название принципа иерархической организации сложных систем или принципа интегративных уровней.

Наиболее распространенные, получившие широкую известность методики оценки состояния природных систем базируются на балльном или балльно-индексном подходе. Например, для комплексной оценки геохимической устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами используется не менее 10 характеристик, отражающих процессы деструкции (биохимического окисления), аккумуляции, выноса и рассеивания нефтяных углеводородов. На идеях и принципах балльной системы оценки построены исследования сотрудников Института проблем освоения Севера СО РАН [12, 17], ВНИИприроды [4] и др. За рубежом в рамках концепции «Nordicity» широкую известность получила

---

<sup>1</sup> Принцип «бритвы Оккама», известный в науке как «принцип бережливости», «принцип простоты» или «принцип лаконичности мышления», был сформулирован в XIV в. английским философом Уильямом Оккамом в следующем виде: *frustra fit plura, quod fieri potest pauciora* – «не следует делать посредством большего то, чего можно достичь посредством меньшего» (Бирюков, Широков, 1968; Лем, 1968; Флейшман, 1982; цит. по Розенберг, 1984 [16]). Иногда переводят: «Не преумножайте сущности бытия». Этот же принцип проглядывается и в известном лозунге И. Ньютона: «Гипотез я не придумываю!».

балльная система оценки, предложенная канадским географом Л.-Э. Амелиным (Louis-Edmond Hamelin).

В современном ландшафтоведении акцентируются «условия возникновения особых эмерджентных пространственных эффектов» в ландшафтах. Вводится термин «эмерджентный эффект пространственной структуры». Названы примеры таких эффектов: микроклимат, режим стока, жизнеспособность популяций животных, биопродуктивность, сочетание антропогенных воздействий, сочетание естественных и антропогенных воздействий, например, в виде моделей интегральных оценок или мультирисков и др. На наш взгляд, эти примеры относятся в первую очередь к подсистемам ландшафта. Каждая из подсистем сохраняет свои свойства и параметры режимов или не способна к сохранению своих свойств и параметров режимов во времени и пространстве после оказанных воздействий (естественных или антропогенных или и тех, и других). Если система сохраняет свои свойства и режимы функционирования, тогда она устойчива. Если не сохраняет (переходит в другой класс), то теряет устойчивость (потеря устойчивости может обнаружиться как во времени, так и в пространстве). Сложность анализа состоит в том, что сохранение свойств и режимов может быть вызвано как естественными причинами, так и антропогенным воздействием. Это требует учета и тех, и других в оценочных исследованиях. Кроме этого успешность получения результата зависит от умения авторов выделять граничные состояния между классами исследуемых свойств по совокупности параметров.

В связи с этим можно обратить внимание на сам термин «эмерджентный эффект пространственной структуры» и отметить, что само эмерджентное свойство ландшафта (устойчивость, целостность, благополучие и др.), отражающее системные свойства, в нем не названо. Следуя логике нашей работы, мы бы сказали «эмерджентный эффект устойчивости системы» или другого свойства, вызван временными или пространственными изменениями элементов режимов в ландшафте, поскольку эмерджентный эффект присущ системе в целом, но не ее компоненту или структуре по отдельности.

Авторами статьи в качестве методологической основы интегрального оценивания при решении широкого круга задач в рамках исследований и работ по проблеме интегральной оценки объектов окружающей среды используются идеи и принципы АСПИД-методологии (анализ и синтез показателей при информационном дефиците) [19], на которых построены модельные алгоритмы программы Geo-expert [3].

Анализируя возможности оценки устойчивости социо-эколого-экономических систем, авторы пишут о том, что к настоящему моменту накоплен значительный методологический и практический опыт в данной области, но на сегодня еще не сформирован общепринятый теоретико-методологический подход к анализу и оценке устойчивого развития [10]. Выделяется работа комиссии Стиглица–Сена–Фитусси (2009) и ее «Доклад об измерении экономического развития и социального прогресса», в котором предложены рекомендации по формированию статистического инструментария оценки качества жизни и социальной устойчивости [10]. Действительно, идеи и выводы данного доклада вызвали широкий общественный резонанс [10]. Вскоре после этого в докладе Еврокомиссии «ВВП

и за его пределами» (2009) были сформулированы предложения по совершенствованию показателей социального прогресса. ОЭСР предложила свою разработку «Компендиум индикаторов благосостояния» (2011) на основе рекомендации доклада Стиглица–Сена–Фитусси. Интерес к проблеме формирования полной и объективной системы индикаторов общественного благосостояния и устойчивого развития был проявлен правительствами Франции, Японии, КНР и США, Германии, Норвегии и других стран. Таким образом, в настоящее время можно говорить о том, что международный интерес к проблеме оценки устойчивого развития очень высок, а методология его измерения находится в стадии становления [10]. В работе [10] предложено авторское определение понятия устойчивости социо-эколого-экономической системы, характеризующее ее как подсистему в системах более высокого порядка: макрорегиональной и национальной. Следуя автору, «социо-эколого-экономическая устойчивость представляет собой свойство системы достигать поставленные социальные и экономические цели в условиях трансформации внешней среды, сохраняя свой внутренний потенциал и основные параметры природного окружения» [10]. Заметим, что достигать поставленные цели и сохранять свои свойства и параметры режимов при внешнем воздействии – разные понятия. В понимании авторов речь, скорее, идет о близости системы к некоему «идеальному» состоянию, заданному параметрически в виде свертки показателей, с которым сравнивается состояние исследуемой системы и определяется их близость.

В нашем понимании и русле статьи речь должна идти не о социо-эколого-экономической устойчивости, а об устойчивости социо-эколого-экономической системы как интегративном (сложном, эмерджентном) свойстве социосистемы, под которой нами понимается динамическая саморазвивающаяся и саморегулирующаяся система «человеческое общество – природа» или «человеческое общество – окружающая среда», динамическое равновесие в которой должно обеспечиваться общественным разумом. Условная формула такой системы была представлена нами следующим образом: социосистема = биоценоз(ы) + физико-географическая среда (биотопы) + население + экономика + культура + политика. Или: социосистема (социоэкосистема) = геосистема (геоэкосистема) + экономика + культура + политика.

В другой работе автор предлагает измерять устойчивость на основе двух основных подходов: «индикаторном» и через «расчет интегрального индекса, позволяющего получить комплексную оценку устойчивости социально-экономического развития» [18, с. 143]. Под устойчивым развитием автором понимается «совокупность процессов позитивных изменений и воплощающих их технологий, направленных на гармонизацию взаимодействия с экономической, экологической и социальной сферами для удовлетворения потребности социо-эколого-экономической системы в долгосрочном будущем периоде» [2, 30]. Далее автор предлагает использовать метод динамических нормативов для оценки устойчивости развития. Данный метод основан на определенном упорядочении показателей динамики. «Порядок показателей динамики наблюдаемых параметров характеризует происходящие в системе структурные изменения. Следовательно, выбирая и упорядочивая определенным образом наблюдаемые параметры системы, можно построить эталонную модель изменения ее структурных характеристик. Измерить

результативность деятельности можно посредством сравнения эталонного и фактического режимов функционирования хозяйственной системы», – пишет автор [18, с. 144]. Далее строится матрица фактического упорядочения показателей экономической составляющей развития для Российской Федерации за 2005–2011 гг. и делается вывод о том, что по экономической составляющей в среднегодовом исчислении за 2005–2011 гг. мера сходства соотношений динамики показателей устойчивого развития РФ составила 79,2 %. Это означает, по мнению автора, что «за исследуемый период средние темпы роста базовых экономических показателей более-менее сбалансированы между собой» [18, с. 148].

Можно согласиться с автором в том, что в работе предложена комплексная оценка динамики отдельных показателей развития страны на определенном временном интервале. Но как эти показатели характеризуют способность системы в целом сохранять свои свойства и параметры режимов функционирования при внешних воздействиях на систему или переход системы в другой класс, с лучшими или худшими условиями состояния социо-эколого-экономической системы или качества жизни населения? И здесь встречается интерпретация показателей устойчивого развития, которая состоит в покомпонентном анализе динамики или изменчивости показателей, отражающих состав и свойства систем. При этом авторы уже не акцентируют тот момент, что они исследуют устойчивость системы в целом (или ее подсистем). Реализуется сравнение некоторого эталона (нормы) по отдельным индексам с индексами, рассчитанными по реальным статистическим данным за ряд лет. В этом случае обнаруживается, что по одному индексу (или критерию) система попадает в один класс, а по другому (другим) – в другой (другие) классы. Как вариант задается траектория изменения индекса, характеризующая, например, экономическое благополучие страны, и в итоге получается более-менее сбалансированный темп роста базовых показателей. Такой вывод, на наш взгляд, не дает возможности отнести систему к определенному классу состояния (благополучия, устойчивости) и выявить реакцию системы в целом на внешнее воздействие или внутреннюю трансформацию, обусловленную, например, социальными или политическими факторами.

### Методика исследования

Методическая процедура интегральной оценки состоит из определенной последовательности этапов (шагов). На первом этапе работ проводятся структуризация всей имеющейся информации и формирование матрицы исходных характеристик вида

$$\begin{vmatrix} x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_m^{(1)} \\ x_1^{(j)}, \dots, x_i^{(j)}, \dots, x_m^{(j)} \\ x_1^{(k)}, \dots, x_i^{(k)}, \dots, x_m^{(k)} \end{vmatrix}.$$

Здесь  $x_i^{(j)}$  – значение  $i$ -й характеристики ( $i = 1, 2, 3, 4 \dots m$ ) качества или свойства для  $j$ -го объекта.

Определяются шкалы измерений по каждой из характеристик с указанием предельных значений ( $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ) и указываются способы измерения исследуемого качества по каждой характеристике (критерию). На этом же этапе при необходимости все множество исходных характеристик разбивается на подмножества (группы характеристик, которые в публикациях названы блоками), и тогда организуется иерархическая схема последовательного синтеза интегральных показателей различного уровня.

На следующем шаге строится вектор отдельных показателей (индексов)  $q_1, \dots, q_m$  и формируется матрица вида

$$\begin{pmatrix} q_1^{(1)}, \dots, q_i^{(1)}, \dots, q_m^{(1)} \\ q_1^{(j)}, \dots, q_i^{(j)}, \dots, q_m^{(j)} \\ q_1^{(k)}, \dots, q_i^{(k)}, \dots, q_m^{(k)} \end{pmatrix}.$$

Здесь  $q_i^{(j)}$  – значение  $i$ -го отдельного показателя ( $i = 1, 2, 3, 4 \dots m$ ) качества или свойства для  $j$ -го объекта ( $j = 1 \dots k$ ).

Каждый отдельный показатель характеризует лишь отдельную сторону качества объекта и представляет собой функцию исходных характеристик в форме

$$q_i = q_i(x_i) = q_i[\varphi(x_i)], \quad 0 \leq q_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, m,$$

где  $q_i(x_i)$  – нормирующие функции.

Существуют различные варианты модификации нормирования исходных характеристик. В нашем случае в зависимости от характера поведения в качестве нормирующей функции используются возрастающая или убывающая функции:

$$q_i = q_i(x_i) \begin{cases} = 0, & x_i \leq x_{\min} \\ = \left( (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \right)^p, & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ = 1, & x_i \geq x_{\max} \end{cases}$$

$$q_i = q_i(x_i) \begin{cases} = 1, & x_i \leq x_{\min} \\ = \left( (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \right)^p, & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ = 0, & x_i \geq x_{\max} \end{cases}$$

Параметр  $p$  указывает на характер выпуклости нормирующей функции. Опыт показывает, что при нормировке часто достаточно ограничиться линейной зависимостью ( $p = 1$ ). Множество значений отдельных показателей  $q_i$  представляет собой многокритериальную оценку качества (свойства) исследуемой системы (объекта). Необходимо отметить, что проблема несравнимости многокритериальных оценок качества, для решения которой на следующем этапе работ осуществляется выбор-построение *синтезирующей функции*, сопоставляющей вектору отдельных (нормированных) показателей значение *интегрального показателя*, характеризует исследуемое качество (свойство) в целом.

В качестве такой модельной функции в нашем случае, чаще всего, используется функция вида  $Q = Q(q; w) = \sum_{i=1}^n q_i w_i$ , с помощью которой свертываются отдельные показатели качества в единый *интегральный показатель* (индекс). При этом синтезирующая функция зависит от вектора весовых коэффициентов  $w = (w_1, \dots, w_n)$ , определяющих значимость отдельных показателей для интегральной оценки. Диапазон изменений индекса находится в интервале от 0 до 1. Индекс конструируется так, чтобы максимальные значения (близкие к единице) свидетельствовали о высокой степени качества, а близкие к нулю – о низкой (можно наоборот).

Поскольку существует неопределенность выбора единственного вектора весовых коэффициентов, в расчетах используется байесовская модель рандомизации, позволяющая перейти от неопределенности выбора весовых коэффициентов к их случайному выбору [19]. Для этого исследователю необходимо задать только приоритеты показателей качества. Далее необходимо отметить, что при генерации весовых коэффициентов используется алгоритм формализации нечисловой, неточной и неполной информации, основанный на методе последовательного перебора в лексикографическом порядке монотонных путей, заданных на целочисленной решетке и взаимно однозначно определяющих соответствующий вектор весовых коэффициентов [19]. В результате в качестве числовой оценки конкретного вектора весовых коэффициентов принимается математическое ожидание рандомизированного весового коэффициента. Точность такой оценки характеризуется стандартным отклонением рандомизированного весового коэффициента. Использование вектора рандомизированных весовых коэффициентов в функции свертки отдельных показателей приводит к получению рандомизированных интегральных показателей с аналогичными статистическими характеристиками.

Поскольку оцениваемые объекты носят географический (пространственный) характер, то важным этапом исследований является необходимость разноаспектной визуализации результатов на основе использования ГИС-технологий. При этом ГИС выступает в качестве инструмента пространственного моделирования и анализа интегральных оценок.

### Результаты исследований

Проработка и тестирование функциональных возможностей АСПИД-методики для решения эколого-географических задач во второй половине 1990-х гг. позволили получить первые результаты по оценке качества природных вод, трофического статуса водных экосистем, благоприятности природных условий макрорегионов северо-запада РФ для жизни людей [15], токсического загрязнения воды и грунтов [8], экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий [1].

К настоящему времени авторами накоплен значительный опыт по интегральной оценке качества объектов окружающей среды, неаддитивных свойств сложных систем в природе и обществе. В практическом плане при решении прикладных задач в рамках проведения инженерно-экологических изысканий получены

оценки экологического состояния, выполнено зонирование городской территории, оценена устойчивость почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами [11, 13], выявлено экологическое благополучие аквальных экосистем, оценена устойчивость растительного покрова в зоне активного техногенного воздействия с использованием ГИС-технологий и устойчивость почвенного покрова к загрязнению тяжелыми металлами [14].

Накопленные данные позволили развить теоретические знания, которые легли в основу публикаций последних лет и разработки моделей интегральной оценки устойчивости наземных и водных ландшафтов и социо-эколого-экономических систем [5–7, 9].

В качестве примера рассмотрим некоторые результаты оценочных исследований последних лет, изложенные в отчетах по НИР и грантам.

**Оценка устойчивости экосистем внутренних водоемов суши.** Для оценки устойчивости озер использовался балльно-индексный подход и методы интегральной оценки. В период летних полевых исследований был продолжен мониторинг параметров, формирующих устойчивость экосистем малых озер карельского Приладожья. В экспериментах удалось показать, что на основе балльно-индексного подхода можно идентифицировать влияние изменения параметров естественного и антропогенного режимов на устойчивость системы. На примере анализа наблюдений 2015 и 2016 гг. показано, что увеличение уровня воды в озере в 2016 г. инициировало снижение продуктивности водоема и повышение уязвимости системы к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию (устойчивость 1-го типа). Использование метода интегральной оценки позволило утверждать, что увеличение уровня воды в озере снизило устойчивость озерной системы к изменению параметров естественного режима и качества воды. Интегральная оценка другого эмерджентного свойства системы, в котором устойчивость является влияющим на экологическое благополучие (ЭБ) фактором, показала, что для 2010–2016 гг. ЭБ озера Суури оценено II-м классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ незначительно изменялись внутри II-го класса (правая граница) или попадали в левую границу III класса. Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс ЭБ достаточно длительное время.

**Оценка устойчивости водотоков и оценка ЭБ речных систем.** Под речной системой понималась система «водоток + водосбор». Под экологически благополучной речной системой понималась система, способная продуцировать органическое вещество, выполнять социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства), являющаяся разнообразной по составу биоты, чистой (по химическому составу воды и гидро-биологическим критериям качества воды), устойчивой к изменению естественного и антропогенного режимов, способной к самоочищению. Таким образом, устойчивость является одним из факторов ЭБ речной системы. На первом этапе рассматривалась только устойчивость водотока (реки), не учитывалась устойчивость наземного ландшафта водосборной территории. Для построения интегральных показателей ЭБ использовался метод сводных показателей (МСП), который дает возможность на основе существующих представлений об ЭБ разработать

модель-классификацию ЭБ, которая включает в себя оценочные шкалы и классы ЭБ. Учитывались 5 групп характеристик и 2 уровня свертки показателей. В результате были разработаны 3 модели, отличающиеся количеством параметров оценивания. Интегральный показатель рассчитывался как сумма нормированных значений характеристик с учетом их весомости. На этапе 2016 г. для всех моделей задавались равные приоритеты при свертке показателей на 1-м (внутри блоков) и 2-м (между блоками) уровнях. Нормирующие функции учитывали вид связи (прямая или обратная). В «модели 1» использовалось 72 параметра оценивания, которые были разделены на 5 основных блоков. В «модели 2» количество параметров было уменьшено до 50, в «модели 3» – до 28. Это уменьшение было обусловлено как несовершенством современного мониторинга рек (отсутствием данных по большому перечню параметров), так и необходимостью проверки того, как уменьшение параметров скажется на результатах оценивания. В итоге было выявлено, что сокращение параметров не привело к искажению результатов или переходу системы в другой класс ЭБ. Было реализовано несколько этапов исследования моделей [19].

**Оценка устойчивости наземных ландшафтов.** Рассмотрены существующие представления различных научных школ на проблему оценки устойчивости ландшафтов [5, 7]. Был обобщен предшествующий опыт построения моделей-классификаций для интегральной оценки устойчивости наземных ландшафтов. Рассмотрены: балльная оценка устойчивости; использование индикаторного подхода и индексологии в оценке устойчивости; многокритериальное оценивание по совокупности небольшого числа индексов; новые модели-классификации для интегральной оценки на основе построения сводных показателей. Выявлены недостатки балльного метода, который, по мнению авторов статьи, относится к комплексным оценкам, а не к интегральным, как это часто делают авторы в современных публикациях. Выполнен анализ развития индикаторного подхода и индексологии для оценки устойчивости. Предложены модели, агрегирующие следующие признаки: 1 – годовой радиационный баланс; 2 – радиационный индекс сухости; 3 – индекс биологической эффективности климата; 4 – ветровой режим (количество дней со штилями за год); 5 – ветровой режим (количество дней с сильными ветрами за год); 6 – интенсивность геоматических процессов (аддитивный учет показателей или их независимое включение в модель: неотектоническая активность, сейсмичность, тип рельефа, свойства пород); 7 – устойчивость составных частей ландшафта (доминантных и детерминантных урочищ); 8 – контрастность урочищ в ландшафте; 9 – защищенность грунтовых вод; 10 – устойчивость ландшафтов к упрощению структуры почвенно-растительного покрова; 11 – индекс устойчивости ландшафтов к загрязнению тяжелыми металлами; 12 – индекс устойчивости ландшафтов к закислению; 13 – устойчивость ландшафтов к эрозионному смыву почв. Получены шкалы сводных показателей устойчивости при равновесном учете названных факторов. Использование модели возможно на основе метода сводных показателей или метода рандомизированных сводных показателей в среде ГИС. Это позволило получать результаты районирования или зонирования территорий по величинам интегральных показателей, проследить их временную динамику и пространственные различия.

**Оценка устойчивости наземных ландшафтов на основе их подсистем (растительный покров, почвенный покров).** В рамках данного направления рассмотрены существующие подходы к оценке устойчивости (устойчивость почв, устойчивость растительного покрова к пожарам, опасность экзогенных природных процессов и риск от природных и техноприродных процессов, геоморфологический риск и др.) [7, 11, 13, 14]. Рассмотрены вопросы построения интегрального показателя для оценки потенциальной устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами с использованием 10 различных индикаторов устойчивости. Интегральные оценки устойчивости почв получены с использованием АСПИД-метода. Вариант оценочного расчета учитывал как критерии аккумуляции тяжелых металлов, так и способность почвы к самоочищению. Предлагаемый подход к оценке устойчивости почв был апробирован на участке ландшафта в пригородной зоне Санкт-Петербурга, в районе нефтедобычи, на острове Сахалин. Пространственный анализ потенциальной устойчивости проводился с использованием географической информационной системы (ГИС). Результаты исследования представлены в материалах международной конференции «Интеркарто/Интергис» разных лет, в том числе и в 2017 г.

Второй пример данного направления – результаты интегральной оценки устойчивости растительного покрова к аэротехногенному загрязнению ландшафта. Для этого была разработана модель-классификация интегральной оценки устойчивости растительности как подсистемы ландшафта к загрязнению атмосферы. В основу модельной классификации были положены первичные результаты работы НИИ охраны атмосферного воздуха по разработке экологических нормативов и опыт, полученный на первом этапе построения интегральных классификационных индексов. Было выделено шесть категорий устойчивости ландшафтной растительности. Наиболее низкая категория устойчивости – крайне неустойчивая – соответствует группе самых чувствительных растительных организмов – лишайников. К неустойчивым с величиной индекса 0,14–0,206 отнесены хвойные леса, поскольку они очень чувствительны к воздействию большинства атмосферных загрязнителей. Для лиственных лесов с малоустойчивой категорией характерны более высокие значения оценочных индексов (0,206–0,425). Относительно устойчивой к загрязнению атмосферного воздуха является растительность сельскохозяйственных ландшафтов. Ландшафты, где преобладает травяная растительность, характеризуются как устойчивые к загрязнению воздуха (0,522–0,775). Растительность техногенных экотопов отнесена к высокоустойчивым сообществам (0,775–1,0). В качестве тестируемой территории была выбрана южно-таежная подзона Республики Коми. В качестве базовой оценочной основы использовалась карта растительности Республики Коми (<http://abratsev.ru/gissu/>). Контуры растительности были привязаны к границам южно-таежной подзоны. Всего было выделено 135 площадных объектов оценки. Соотнесение классификационных индексов с типом растительности и использование методики синтетического картографирования позволили построить пилотный проект карты интегральной оценки устойчивости растительности ландшафтов. Эти же данные использовались для оценки устойчивости растительности к загрязнению атмосферного воздуха.

**Оценка устойчивости социо-эколого-экономических систем (СЭЭС), оценка качества жизни населения и выявление его трансформаций при внешнем воздействии на отдельные подсистемы (экологическая, экономическая, социальная).** В соответствии с имеющимися в литературе данными и обобщением опыта исполнителей, представленным на международных конференциях в Албене (Болгария) в 2016 и 2017 гг. и в других публикациях, были предложены параметры и модели оценки состояния социо-эколого-экономических систем (СЭЭС) и качества жизни населения (КЖН). Для исследования устойчивости были спланированы следующие сценарии воздействия на СЭЭС региона: 1 – гипотетическое ухудшение экологической ситуации в регионе на 30 %; 2 – гипотетическое ухудшение экономической ситуации в регионе на 30 %; 3 – гипотетическое ухудшение социальных условий в регионе на 30 %; 4 – гипотетическое ухудшение ситуации во всех блоках одновременно на 30 %. Далее в сценариях 5–8 реализовано двукратное ухудшение ситуации во всех перечисленных блоках поочередно и во всех блоках одновременно. Рассчитаны интегральные показатели качества жизни населения для всех восьми сценариев для первого (внутри блоков) и второго (между блоками) уровней свертки показателей. Основной задачей исследований было выполнение свертки показателей на первом и втором уровнях и выявление ситуаций, при которых СЭЭС не сможет сохранить свои свойства и параметры режимов в отдельных блоках и СЭЭС в целом в пределах классов, в которых она находилась в 2013 г., поскольку все изменения в сценариях реализованы на фоне 2013 г. Для оценки качества жизни населения было отобрано 18 критериев, которые, в свою очередь, образуют три блока: экономический, социальный, экологический. Введены пять классов оценки качества жизни: I класс («высокое»), II класс («выше среднего»), III класс («среднее»), IV класс («ниже среднего»), V класс («низкое»). Близость интегрального (сводного) показателя к 0,0 характеризует улучшение качества жизни населения, близость к 1,0 – снижение качества жизни населения. Разработаны оценочные шкалы для критериев по классам качества.

В 2016 г. предложена модель-классификация оценки качества жизни населения на первом и втором уровнях обобщения данных с учетом равенства весов (приоритетов оценивания). В качестве ключевого района были выбраны регионы АЗР и Тверская область. Состояние СЭЭС сравнивалось для периода с 2003 по 2015 г. В исследовании получено, что самым чувствительным блоком оказался блок социальных условий. Для него отмечено максимальное увеличение эффекта от воздействия как на отдельные подсистемы (блоки), так и в целом на социо-эколого-экономическую систему (сводная оценка). При невысоких негативных изменениях экологические и экономические параметры дают примерно одинаковое изменение как на первом уровне свертки, так и на втором. Заметно, что после 30 %-го ухудшения ситуации на сводную оценку сильнее влияют экономические факторы.

Отмечено, что во всех исследуемых регионах присутствует тенденция к улучшению качества жизни населения. Мурманская область, Республика Коми, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Республика Саха (Якутия) – улучшение качества жизни населения на 7–10 %. Архангельская область, Ненецкий

автономный округ, Чукотский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ – улучшение качества жизни населения на 10–12 %. Неизменным осталось качество жизни в Таймырском (Долгано-Ненецком) автономном округе в период с 2003 по 2005 г.

Для сравнения качества жизни арктических регионов РФ с регионами центральной части страны и рассмотрено качество жизни населения Тверской области. По величине интегрального показателя последнего уровня свертки качество жизни населения в Тверской области с 2003 по 2013 г. улучшилось на 11 %. В итоге установлено отсутствие разных темпов развития регионов АЗР и центральной части Российской Федерации за исследованный временной период.

### Заключение

Многолетний опыт проведения эколого-географических исследований дал обширный материал по интегральной оценке объектов окружающей среды с использованием методики анализа и синтеза показателей при информационном дефиците (АСПИД). АСПИД-методика используется в качестве основы, которая может применяться к очень широкому спектру проблем и проектов эколого-географического (геоэкологического) анализа, в частности, при решении прикладных задач в рамках инженерно-экологических изысканий и фундаментальных исследований. На основе полученных интегральных оценок, на базе ГИС проведен анализ и районирование акваторий и территорий.

Исследования выполнялись при поддержке грантом РФФИ 16-05-00715-а.

### Литература

1. *Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей*. V. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий / Л.В. Александрова, В.Ю. Васильев, В.В. Дмитриев // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2000. Вып. 4, № 31. – С. 34–47.
2. *Алферова Т.В., Третьякова Е.А.* Концептуальное моделирование определения категории «устойчивое развитие» // Журнал экономич. теории. 2012, № 4. – С. 46–52.
3. *Васильев В.Ю., Огурицов А.Н., Хованов Н.В.* Организация специализированных приложений для ГИС на принципах АСПИД-методологии // Устойчивое развитие территорий: геоинформационное обеспечение и практический опыт // Материалы междунар. конф. «Интеркарто 10». – Владивосток (Россия) – Чаньчунь (КНР), 2004. – С. 134–143.
4. *Оценка состояния и устойчивости экосистем* / В.В. Снакин, В.Е. Мельченко, Р.О. Бутовский и др. – М.: ВНИИприрода, 1992. – 127 с.
5. *Дмитриев В.В., Огурицов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2012, № 3. – С. 65–78.
6. *Дмитриев В.В., Огурицов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2013, № 3. – С. 88–103.
7. *Дмитриев В.В., Огурицов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014, № 4. – С. 114–130.

8. *Многокритериальная* оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. IV. Токсическое загрязнение воды и грунтов / В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов, В.Ю. Васильев, В.Ю. Третьяков // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 1999. Вып. 1. – С. 40–53.
9. *Дмитриев В.В., Федорова И.В., Бирюкова А.С.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Ч. IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016, № 2. – С. 37–53.
10. *Корчагина Е.В.* Анализ и оценка устойчивого развития социо-эколого-экономических систем. Специальность 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством (региональная экономика): автореф. дисс. ... д-ра экон. наук. – Гатчина, 2012. – 377 с.
11. *Интегральная* оценка и пространственный анализ потенциальной устойчивости почвенного покрова Большеземельской тундры к загрязнению нефтяными углеводородами / Ю.Л. Машкин, С.В. Орлов, В.Ю. Разживин, А.Н. Огурцов // Инженерные изыскания. 2013, № 13. – С. 60–67.
12. *Московченко Д.В.* Картографирование устойчивости ландшафтов севера Западной Сибири к химическому загрязнению // География и природные ресурсы. 1994, № 3. – С. 129–138.
13. *Геоинформационный* анализ и синтез показателей устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами при информационном дефиците / А.Н. Огурцов, В.Ю. Разживин, Г.Б. Пигольцина, Н.В. Хованов // ИнтерКарто – ИнтерГИС 13: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт // Материалы Международной конференции Ханты-Мансийск–Йеллоунайф, 12–24 августа 2007 г. – Ханты-Мансийск: Изд-во «Полиграфист», 2007. Т. 1. – С. 189–196.
14. *Огурцов А.Н., Бахматова К.А.* Интегральная оценка и пространственный анализ потенциальной устойчивости почвенного покрова урбанизированной территории к загрязнению тяжелыми металлами // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2016;2(22):232-243. DOI:10.24057/2414-9179-2016-2-22-232-243.
15. *Огурцов А.Н., Хованов Н.В.* Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. III. Оценка степени благоприятности природных условий макрорегионов северо-запада РФ для жизни людей // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 1997. Вып. 2. – С. 55–62.
16. *Розенберг Г.С.* Модели в фитоценологии. – М.: Наука, 1984. – 265 с.
17. *Тигеев А.А.* Оценка устойчивости ландшафтных комплексов при крупномасштабном картографировании // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2006, № 6. – С. 164–169.
18. *Третьякова В.Е.* Оценка устойчивости развития эколого-экономических систем: динамический метод // Проблемы прогнозирования. 2014, № 4. – С. 143–154.
19. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. – 204 с.