

УДК 504.54

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЛАНДШАФТОВ: МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

<sup>1,2</sup>Дмитриев В.В., <sup>1</sup>Огурцов А.Н., <sup>1</sup>Морозова А.С., <sup>2</sup>Пилюгина А.А., <sup>2</sup>Свердлова О.А.,  
<sup>1</sup>Сиротина П.М., <sup>1</sup>Федорова М.Е., <sup>1</sup>Черепанов С.В., <sup>2</sup>Шакуров В.А.

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург;

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
e-mail: vasily-dmitriev@rambler.ru

Рассматриваются аксиологические основы и аксиометрия интегральной оценки устойчивости ландшафтов к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость). Акцентируются два основных вида устойчивости: адаптационная и регенерационная. Вводятся классы устойчивости, параметры оценивания. Формируются оценочные шкалы параметров для классов устойчивости. Решаются проблемы нормирования исходных данных, учета приоритетов оценивания, выбора вида интегрального показателя. Выполняется построение шкалы интегрального показателя. Предлагается модель-классификация оценки устойчивости на основе метода сводных показателей. Для нескольких ключевых районов на основе модели выполнен расчет интегральных показателей устойчивости. По величинам интегральных показателей для выбранных значений параметров определяется класс устойчивости. Исследуется способность геосистем сохранять класс устойчивости при изменении параметров естественного режима. Обсуждаются перспективы учета устойчивости геосистем на основе интегрального подхода.

**Ключевые слова:** устойчивость, интегральная оценка, модель-классификация, интегральный показатель

## INTEGRATED ASSESSMENT OF LANDSCAPE SUSTAINABILITY: MODELS, RESULTS, PROSPECTS

<sup>1,2</sup>Dmitriev V.V., <sup>1</sup>Ogurtsov A.N., <sup>1</sup>Morozova A.S., <sup>2</sup>Pilyugina A.A., <sup>2</sup>Sverdlova O.A.,  
<sup>1</sup>Sirotina P.M., <sup>1</sup>Fedorova M.E., <sup>1</sup>Cherepanov S.V., <sup>2</sup>Shakurov V.A.

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg;

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, e-mail: vasily-dmitriev@rambler.ru

The axiological foundations and axiometry of integral estimation of the stability of landscapes to changes in the parameters of the natural regime (potential stability) are considered. Two main types of sustainability are emphasized: adaptive and regenerative. Stability classes, estimation parameters are introduced. Formative evaluation scales of parameters for the stability classes are formed. The problems of rationing of the initial data, taking into account the evaluation priorities, and the choice of the form of the integral index are being solved. The scale of the integral indicator is being constructed. A model-classification of the stability assessment based on the composite index method is proposed. For several key regions, the integral stability indicators were calculated on the basis of the model. The stability class is determined by the values of the integral indices for the chosen values of the parameters. The ability of geosystems to preserve the stability class when changing the parameters of the natural regime is investigated. Prospects for accounting for the sustainability of geosystems based on an integrated approach to land use management are discussed.

**Keywords:** stability, integral estimation, model-classification, integral index

Анализ современных подходов к оценке устойчивости геосистем [1–12, 14] позволяет отметить следующие важные особенности исследований. Первая особенность – отсутствие во многих работах авторского понимания устойчивости или абсолютизация только одного из возможных видов устойчивости и неприятие других возможных видов или оценочных средств. В результате иногда выясняется, что оценивается не устойчивость системы, а, например, чувствительность организмов, населяющих эко- или геосистему к определенному типу воздействия на них. При этом учитывается площадь, занятая данным видом. В других случаях оценивается не интегративное (эмерджентное, сложное) свойство системы в целом, а изменчивость компонентного состава системы. В третьем примере строится вектор состояния системы по совокупности

максимально большого перечня характеристик системы, имеющихся в базах данных авторов, и этот вектор отождествляется с устойчивостью системы.

Вторая особенность – преобладание балльных и балльно-индексных подходов и методов оценивания на том основании, что устойчивость является интегративным свойством системы в целом, ее нельзя измерить, а можно только оценить косвенно, например, на основе балльного подхода. Здесь рекомендуется по отдельности определять устойчивость ландшафта к каждому конкретному возмущающему фактору. Этот подход распространяется также на оценку устойчивости почв, элементарных ландшафтов, растительного покрова, как компонентов ландшафта. Зачастую, не учитывается прямая и обратная связь устойчивости с параметрами оценивания. При этом балль-

ная оценка (в ряде случаев баллы по отдельным факторам всё же суммируются) иногда именуется авторами «интегральной оценкой».

Третья особенность – присутствие в оценочных подходах одновременно нескольких видов устойчивости. С одной стороны, оценка устойчивости к изменению параметров естественного и антропогенного режимов – необходимое условие оценки устойчивости природных систем. Такая оценка позволяет делать выводы о соотношении природных и антропогенных составляющих в интегральной оценке или, изменяя одну из них, выявлять, способна ли система (и до какого предела) сохранять тот класс (продуктивности, качества, устойчивости, благополучия), который имела до воздействия.

С другой стороны, встречаются подходы, в которых одновременно сочетаются два основных вида устойчивости, характеризующих разные механизмы ее формирования. Это проявляется в процессе формирования оценочных шкал. При оценке устойчивости в первом случае (адаптивная устойчивость) важнейшим свойством природной системы является ее способность не менять свое состояние или плавно переходить в другой класс, сохраняя при этом свои свойства и связи (инертность, пластичность). В другом случае (регенерационная устойчивость) система способна многократно восстанавливать свои свойства, возвращаясь в то состояние, которое она имела до внешнего воздействия и которое она утратила (восстанавливаемость). В итоге, в соответствии с методической платформой авторов, один и тот же параметр имеет противоположные шкалы в первом и втором случаях. Это объясняется тем, что природа регенерационной устойчивости и параметров, ее характеризующих, например, самоочищения, близки, а адаптивной устойчивости и того же параметра – противоположны. Рассмотренные нами в [7] примеры позволили выявить основные условия использования одних и тех же параметров в первом и втором типах устойчивости и целесообразность их совместного использования в одной модели-классификации.

В этом случае, по нашему мнению, важную роль играет системообразующий тип анализируемой геосистемы, например: 1 – циклический тип, 2 – транзитный, 3 – каскадный [9]. Тогда логично оценивать адаптивную устойчивость для эко- и геосистем 1 типа, регенерационную – для 2 или для 2 и 3 типов систем. Этого на практике не происходит. В оценке устойчивости, как правило, присутствуют одновременно первый и второй типы, см., например, [14].

Четвертая особенность, отмеченная нами в [7], состоит в медленном развитии индексологии устойчивости. Редко авторами предлагаются индексы устойчивости, для которых, разработаны оценочные шкалы. Но даже, если такие шкалы существуют, то они, при использовании в балльном оценивании заменяются балльными шкалами, что снижает их ценность как основы «экологической квалиметрии» или «экологической аксиометрии».

#### Материалы и методы исследования

Рассмотрим основные этапы построения модели-классификаций устойчивости. В классификации математических моделей сложных систем Г.С. Розенберга (1984) [13] в группу эмпирико-статистических моделей автор включил «модели-классификации». Эти модели описывали правила, по которым исследуемый объект можно отнести к одному из классов состояния на основе разбиения информации об отдельных параметрах на классы. В соответствии с этим, классификации, включающие в себя набор параметров и классов для интегральной оценки устойчивости и правило построения шкалы интегрального показателя устойчивости, будем называть моделями-классификациями устойчивости.

На первом этапе выявляется тип устойчивости, механизмы ее формирования и отбираются необходимые и достаточные критерии оценивания. Не претендующая на полноту сводка критериев оценивания потенциальной устойчивости приведена в табл. 1. Вводятся классы устойчивости и формируются оценочные шкалы для всех критериев.

Внешний вид модели-классификации интегральной оценки устойчивости, построенной нами на основе критериев из табл. 1 при равенстве приоритетов оценивания приведен в табл. 2.

Для нормирования исходных параметров использовались функции «мини-макса», традиционно применяемые нами в построении интегральных показателей [15].

В расчетах использованы нормирующие функции, отражающие линейный характер изменения характеристик. В качестве  $\min_i$  и  $\max_i$  использовались минимальное и максимальное значения оценочных шкал.

В последней строке табл. 2 приведены рассчитанные значения интегрального показателя устойчивости (ИПУИ) по классам. Правила построения оценочных шкал интегральных показателей состояния и устойчивости геосистем опубликованы нами в работах по интегральной оценке состояния и устойчивости природных и антропогенно- трансформированных систем [5–8]. Использовались: метод сводных показателей (МСП); метод рандомизированных сводных показателей (МРСП); АСПИД-методология [15]. Реализация этапов проводилась либо для нескольких уровней свертки информации, либо все параметры оценки сводились в единую исходную модель-классификацию.

В качестве  $d$ -функции для построения интегрального показателя устойчивости использовалась линейная свертка нормированных значений вида

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i, \quad (1)$$

представляющая собой сумму взвешенных значений показателей  $q_i$  (результат нормирования  $i$ -й характеристики), определяемую весовыми коэффициентами  $w = (w_1, \dots, w_m)$  отдельных критериев для интегральной оценки устойчивости. Введение условия  $w_1 + \dots + w_m = 1$  позволяет оценивать  $w_i$  как относительную значимость показателя  $q_i$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены исходные шкалы и нормированные значения параметров этих шкал по классам устойчивости и шкала интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость). Данная модель-классификация построена в предположении равенства весов (приоритетов) между признаками ( $w_i = 1/9$ ). В этом случае вес рассчитывается по формуле  $w_i = 1/n$ .

Максимальной устойчивости поставлено в соответствие значение  $q_i = 1$ , а минимальной  $q_i = 0$ . При формировании шкал и нормировании показателей учтен вид связи выбранного параметра с исследуемым свойством ландшафта.

На первом этапе рекомендуется рассмотреть ряд гипотетических ситуаций (сценариев). Сценарии могут отражать минимально возможные для данной территории и максимально возможные значения параметров модели или интервалы их изменения. По ним исследователь определяет, как может изменяться интегральный показатель устойчивости для различных (характерных) типов ландшафтов или временных интервалов. Для этого можно использовать комбинации различных, выбранных априори значений параметров, а также средние, фоновые, экстремальные и т.п. значения параметров.

Таблица 1

Критерии оценки потенциальной устойчивости ландшафта

Признак, рекомендуемый для оценки устойчивости, его характеристика	Автор(ы)
1. Радиационный баланс, ккал/см <sup>2</sup> год, определяет энергетику ландшафтообразующих процессов, большим его значениям соответствует и максимальная устойчивость ландшафта	Мельченко, 1992; Черниговский, Маршунова, (цит. по Алисов, Полтараус, 1974) [цит. по 14]
2. Радиационный индекс сухости (К) – отношение между радиационным балансом территории и годовой суммой осадков, выраженное в калориях скрытой теплоты испарения. Отражает возможность накопления влаги при различных радиационных условиях. При К=1,00 возможность испарения примерно соответствует количеству выпавшей влаги. Это значение К соответствует условиям максимальной устойчивости ПТК	Мельченко, 1992; Будыко (цит. по: Хромов, 1968; Реймерс, 1990) [цит. по 14]
3. Ветровой режим: а) количество дней со штормами в году (баллы). Оценен на качественном уровне (чем больше дней со штормами, тем устойчивость выше)	Мельченко, 1992 [цит. по 14]
4. Ветровой режим: б) количество дней с сильными ветрами (баллы). Оценен на качественном уровне: чем больше дней с сильными ветрами, тем устойчивость ниже	Мельченко, 1992 [цит. по 14]
5. ИГП – интенсивность геоматических процессов (сумма баллов от показателей: неотектоническая активность, сейсмичность, тип рельефа, свойства пород). Оценена по [14]. По суммарной величине четырех составляющих максимальной устойчивостью будут обладать ландшафты с суммой баллов от 16 до 20 баллов, а минимальной – суммой баллов равной 4	Мельченко, 1992; Чуринов, 1983 [цит. по 14]
6. Устойчивость составных частей ландшафта – балльная качественная оценка. По роли в ландшафте урочища разделены на активные, пассивные и детерминанты. Максимальной устойчивостью по роли в ландшафте, будут отличаться пассивные урочища (останцы, в денудационных ландшафтах), минимальной – ПТК Н-Н детерминанты	Мельченко, 1992 [цит. по 14]
7. Контрастность урочищ в ландшафте, балльная оценка по принципу: чем выше контрастность, тем устойчивость выше	Мельченко, 1992 [цит. по 14]
8. Защищенность ГВ (грунтовых вод) – балльная качественная оценка. Определяется по глубине ГВ, поглощательной способности пород, трещиноватости, фильтрационным свойствам пород. ГВ в ландшафте считаются защищенными при наличии слабопроницаемого, мощного слоя пород и глубоком залегании ГВ. ГВ в ландшафте при наличии трещиноватых пород и карстовых ПТК не защищены, особенно, при достаточно близком залегании ГВ	Мельченко, 1992; Гольдберг, 1984 [цит. по 14]
9. Индекс биологической эффективности климата (ТК) [1] представляет собой интегральный критерий тепло- и влагообеспеченности, от которого зависит устойчивость ландшафта. В публикациях отмечено, что на региональном уровне высокие значения индекса характерны для наиболее устойчивых ландшафтов, а низкие – для неустойчивых	Иванов, 1962; Мельченко, 1992; Исаченко, 2001; Абалаков, Лопаткин 2014 [1, 9, 10, 14]

Таблица 2

Модель-классификация оценки устойчивости ландшафта

Признак / класс устойчивости	I Минимальная устойчивость	II Устойчивость ниже средней	III Средняя устойчивость	IV Устойчивость выше средней	V Максимальная устойчивость.
1. Радиационный баланс, ккал/см <sup>2</sup> /год	-5 – +10 0 – 0,18	11–20 0,18–0,29	20–30 0,29–0,41	30–50 0,41–0,65	50–80 0,65–1,00
2. Радиационный индекс сухости	5–4 0 – 0,20	4–3 0,20–0,44	3–2 0,44–0,68	2–1 0,68–0,88	1–0,45 0,88–1,00
3. Ветровой режим: а) количество дней со штилями в году (баллы)	0–1 0 – 0,20	1–2 0,20–0,40	2–3 0,40–0,60	3–4 0,60–0,80	4–5 0,80–1,00
4. Ветровой режим: б) количество дней с сильными ветрами (баллы)	5–4 0–0,20	4–3 0,20–0,40	3–2 0,40–0,60	2–1 0,60–0,80	1–0 0,80–1,00
5. Интенсивность геоматических процессов, баллы	0–4 0 – 0,20	4–8 0,20–0,40	8–12 0,40–0,60	12–16 0,60–0,80	16–20 0,80–1,00
6. Устойчивость составных частей ландшафта, баллы	0–1 0 – 0,20	1–2 0,20–0,40	2–3 0,40–0,60	3–4 0,60–0,80	4–5 0,80–1,00
7. Контрастность урочищ в ландшафте, баллы	0–1 0 – 0,20	1–2 0,20–0,40	2–3 0,40–0,60	3–4 0,60–0,80	4–5 0,80–1,00
8. Защищенность грунтовых вод, баллы	0–1 0 – 0,20	1–2 0,20–0,40	2–3 0,40–0,60	3–4 0,60–0,80	4–5 0,80–1,00
9. Индекс биологической эффективности климата (индекс ТК)	0–4 0 – 0,20	4–8 0,20–0,40	8–12 0,40–0,60	12–16 0,60–0,80	16–20 0,80–1,00
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ)	0–0,198	0,198–0,392	0,392–0,588	0,588–0,793	0,793–1,00

Примечание. В числителе – значения параметра для левой и правой границ класса; в знаменателе – то же для нормированных значений показателей.

Таблица 3

Исходные данные для расчета интегрального показателя устойчивости ключевого ландшафта (результат нормирования)

Признак устойчивости	Рекогносцировочное изменение параметра	Характерное значение параметра
1. Радиационный баланс, ккал/см <sup>2</sup> год	0,41–0,65	0,60
2. Радиационный индекс сухости	0,88–1,00	0,92
3. Ветровой режим: а) количество дней со штилями в году (баллы).	0,20–0,40	0,28
4. Ветровой режим: б) количество дней с сильными ветрами (баллы)	0,40–0,60	0,45
5. Интенсивность геоматических процессов, баллы	0,40–0,60	0,48
6. Устойчивость составных частей ландшафта, баллы	0,40–0,60	0,42
7. Контрастность урочищ в ландшафте, баллы	0,20–0,40	0,24
8. Защищенность грунтовых вод, баллы	0,80–1,00	0,86
9. Индекс биологической эффективности климата (индекс ТК)	0,60–0,80	0,71
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ): интервал изменения, класс устойчивости, характерное значение ИПУЛ	0,476 – 0,672 (III-IV)	0,551 (IIIп)

Примечание. Нижний индекс «п» справа от класса устойчивости характеризует близость к правой границе класса.

Рассмотрим несколько примеров использования модели (табл. 2). В качестве первого ключевого района выбрана территория Вишерского заповедника в Пермском крае с рекогносцировочным изменением и характерным значением параметров оценивания устойчивости, представленным в табл. 3. Рекогносцировочное изменение параметров в данном примере было задано границами классов.

В результате расчетов получен диапазон изменения интегрального показателя устойчивости на основе использования рекогносцировочных данных по каждому параметру и характерное значение ИПУЛ, по которому ландшафты района были отнесены к III классу устойчивости (правая граница). Исследование показало, что добавление в модель или изъятие из нее одного параметра при их равновесомом учете практически не сказывается на итоговом результате. Так, например, изъятие из модели индекса ТК дало характерное значение ИПУЛ, равное 0,531, что дает разницу с рассмотренным выше результатом в пределах 4% при ширине интервала оценочной шкалы ИПУЛ, построенной для 8 параметров, для III класса 0,391–0,586. В то же время, придание в 2 раза большего веса этому параметру по сравнению с другими, дает характерное значение ИПУЛ, равное 0,630, что свидетельствует о приближении ИПУЛ вплотную к граничному значению между III и IV классами (0,654 – правая граница III класса для оценочной шкалы с учетом неравновесности задания приоритетов).

Рассмотрим второй пример. Расчет ИПУЛ выполнен для ландшафтов Прибайкалья на территории Иркутской области. Получен диапазон изменения интегрального показателя устойчивости 0,486–0,677, что позволило отнести ландшафты к III–IV классам устойчивости. Третий район был выбран на территории республики Бурятия. Диапазон изменения интегрального показателя устойчивости ландшафтов составил 0,494–0,703, что позволило отнести их к III–V классам устойчивости. Четвертый ключевой район – территория национального парка «Шушенский бор» в Шушенском районе Красноярского края. Диапазон изменения интегрального показателя устойчивости ландшафтов составил 0,459–0,575, характерное значение ИПУЛ составило 0,567 (правая граница III класса).

Следующими шагами в работе с моделями-классификациями устойчивости будет сбор данных и уточнение исходных показателей, а также выявление параметров, наиболее подверженных естественным и антропогенным изменениям. Необходимо также введение в модель параметров,

отражающих влияние антропогенного воздействия на систему и исследование устойчивости ландшафтов к изменению естественного и антропогенного режимов их функционирования. В этом случае оцениваемая «потенциальная устойчивость» или устойчивость к изменению параметров естественного режима может быть первым шагом оценочных исследований. Далее выделяется группа параметров для оценки устойчивости ландшафта к изменению антропогенного режима, указывается его специфика. Авторам предстоит обосновать набор необходимых и достаточных параметров, приоритетов оценивания устойчивости к изменению антропогенного режима и ввести еще один уровень свертки показателей для отражения совместного эффекта «потенциальной устойчивости» и антропогенных воздействий на ландшафт.

*Исследования выполнялись при поддержке грантом РФФИ № 16–05–00715 а.*

#### Список литературы

1. Абалаков А.Д., Лопаткин Д.А. Устойчивость ландшафтов и ее картографирование // Известия Иркутского государственного университета. – 2014. – Т. 8. Серия «Науки о Земле». – С. 2–14.
2. Глазовская М.А. Методические основы эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. – М.: Изд-во Моск. ун-та. 1997 – 102 с.
3. Глазовская М.А. Проблемы и методы оценки эколого-геохимической устойчивости почв и почвенного покрова к техногенным воздействиям // Почвоведение. – 1990. – №1. – С. 114–124.
4. Гродзинский М.Д. Устойчивость геосистем: Теоретический подход к анализу и методы количественной оценки // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1987. №6. – С. 5–15.
5. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник СПбГУ. – 2012. – Сер. 7, вып. 3. – С. 65–78.
6. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник СПбГУ, сер. 7 (геология, география). – 2013. – Вып.3. – С. 88–103.
7. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестник СПбГУ. – 2014. – Сер. 7, вып. 4. – С.114–130.
8. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. – СПб., 2004. – 294 с.
9. Иванов Н.Н. Показатель биологической эффективности климата // Изв. ВГО. – 1962. – Т. 94, Вып. 1. – С. 65–70.
10. Исаченко А.Г. Экологическая география России. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2001. – 328 с.
11. Осипов А.Г. Теория и практика интегральной оценки пригодности земель природных ландшафтов для аграрного и рекреационного освоения: автореф. дисс. ... д-ра наук по специальности 25.00.26 – Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – СПб.: СПбГУ, 2017. – 40 с.
12. Осипов А.Г. Эколого-географическая оценка ландшафтов при формировании природно-экологического каркаса территории // Информация и космос. – 2015. – № 1 – С. 62–71.
13. Розенберг Г.С. Модели в фитоценологии. – М.: «Наука», 1984. – 265 с.
14. Снакин В.В., Мельченко В.Е., Бутовский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости геосистем. – М.: ВНИИ природы, 199. – 127 с.
15. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. – 196 с.