

УДК 504.54

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНЫХ
ЛАНДШАФТОВ: ОТ БАЛЛЬНЫХ ОЦЕНОК К КОМПОЗИТНЫМ
ИНДЕКСАМ НА ОСНОВЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ДЕТЕРМИНАНТ****Дмитриев В.В., Огурцов А.Н., Седова С.А., Алексеева А.А.,
Байжанова К.К., Грига С.А., Кислина А.Е.***ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, e-mail: v.dmitriev@spbu.ru, vasilij-dmitriev@rambler.ru*

Рассматриваются оценочные классификации устойчивости (модели-классификации интегральной оценки устойчивости) для оценки потенциальной устойчивости наземного ландшафта к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость) на основе разработанного индекса потенциальной устойчивости ландшафта. На первом этапе вводятся параметры оценивания и классы устойчивости (I – минимальная, II – ниже средней, III – средняя, IV – выше средней, V – максимальная). Для каждого класса задаются левая и правая границы изменения параметров. На втором этапе выполняется нормирование показателей по всем шкалам с учетом вида связи параметра с устойчивостью (прямая, обратная) и степени линейности (нелинейности) связи. На третьем этапе решается проблема выбора весов (приоритетов) оценивания. На четвертом этапе вводится вид интегрального показателя (сумма нормированных значений характеристик, взятых со своим весом). Рассчитывается оценочная шкала интегрального показателя по совокупности всех характеристик. На завершающем этапе рассматривается апробация подхода на примере расчета интегральных показателей потенциальной устойчивости для нескольких разных ландшафтов. Выявляется роль количества исходных параметров и их весомости в расчетах интегральных показателей устойчивости. Выполняется оценка устойчивости для пяти ландшафтов территории России, на примере Новгородской области (Приильменская низменность), Республики Башкортостан, Уфимского плато, Лемболовской возвышенности Ленинградской области, арктических ландшафтов Земли Франца-Иосифа. Арктические ландшафты по величине интегрального показателя устойчивости являются самыми неустойчивыми (II класс, устойчивость ниже средней), остальные ландшафты отнесены к III–IV классам (среднеустойчивые – устойчивость выше средней) с учетом близости к левой, правой границе класса или его середине. Намечены перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: устойчивость ландшафта, интегральная оценка, интегральный показатель**INTEGRAL ASSESSMENT OF THE STABILITY OF GROUND LANDSCAPES:
FROM SCORE ASSESSMENTS TO COMPOSITE INDICES
BASED ON TERRITORIAL DETERMINANTS****Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N., Sedova S.A., Alekseeva A.A.,
Bayzhanova K.K., Griga S.A., Kislina A.E.***St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg,
e-mail: v.dmitriev@spbu.ru, vasilij-dmitriev@rambler.ru*

We consider the estimated stability classifications (model-classifications of the integrated stability assessment) to assess the potential stability of the terrestrial landscape to changes in the parameters of the natural regime (potential stability) based on the developed landscape potential stability index. At the first stage, assessment parameters and stability classes are introduced (I-minimum, II-below average, III-average, IV-above average, V-maximum). For each class, the left and right boundaries of the parameter change are specified. At the second stage, the indicators are normalized on all scales, taking into account the type of connection of the parameter with stability (direct, inverse) and the degree of linearity (nonlinearity) of the connection. At the third stage, the problem of choosing weights (priorities) for estimation is solved. At the fourth stage, the form of the integral indicator is introduced (the sum of the normalized values of the characteristics taken with their weight). The estimated scale of the integral indicator is calculated based on the totality of all characteristics. At the final stage, the approbation of the approach is considered using the example of calculating the integral indicators of potential stability for several different landscapes. The role of the number of initial parameters and their weight in the calculations of integral stability indicators is revealed. A stability assessment is carried out for 5 landscapes of the territory of Russia, using the example of the Novgorod region (Priilmenskaya lowland), the Republic of Bashkortostan, the Ufa Plateau, the Lembolovskaya Upland of the Leningrad Region, and the Arctic landscapes of Franz Josef Land. The Arctic landscapes are the most unstable in terms of the integral stability index (class II, stability is below average), the remaining landscapes are assigned to classes III-IV (medium-stable – stability is above average), taking into account proximity to the left, right border of the class or its middle. The prospects for further research are outlined.

Keywords: landscape stability, integrated assessment, integrated indicator

В опубликованных нами ранее работах рассмотрены особенности оценочных исследований эмерджентных свойств геосистем, к числу которых, прежде всего,

относится «устойчивость» [1]. В целом в современных публикациях оценка устойчивости геосистем характеризуется отсутствием: 1 – авторских определений

устойчивости и ее типов (потенциальная устойчивость или устойчивость к изменению параметров естественного режима; устойчивость к воздействию одного типа; устойчивость к воздействию нескольких типов; совместный учет потенциальной устойчивости и устойчивости к воздействию и др.); 2 – обоснования для использования тех или иных методов ее оценки (балльная, балльно-индексная оценка; многокритериальная, интегральная оценка устойчивости и др.); 3 – обоснования возможности и целесообразности одновременного учета в разработанных подходах нескольких основных типов устойчивости (потенциальная, адаптационная, регенерационная) и их комбинаций или последовательных сочетаний; 4 – возможности аддитивного учета типов устойчивости, состояния геосистем и правомерности таких подходов. В последних публикациях обсуждаются сопутствующие акценты, например в одном из обширных зарубежных обобщений, посвященных обзору имеющейся литературы (более 1500 исследований) по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды, авторами выявлены 23 пространственно-распределенных композитных индекса, в основу которых заложена информация о 329 переменных [2]. Это разнообразие характеризует, с точки зрения авторов, отсутствие «общей основы» и «может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов» [2].

Цель исследования: разработка оценочной классификации потенциальной устойчивости геосистем и ее апробация на примере нескольких ключевых ландшафтов Российской Федерации. При разработке подхода к интегральной оценке потенциальной устойчивости исследуются: количество параметров оценивания (территориальных детерминант) и задание их весомости при расчете интегрального показателя устойчивости.

Материалы и методы исследования

С нашей точки зрения, в «общую основу» и перечень этапов исследования, в числе прочих, необходимо всегда включать цель исследования (начальный этап) и проверку адекватности модельных представлений, отражающих исследуемое эмерджентное свойство (завершающий этап) или состояние (статус) самой системы.

Рассмотрим специфику объектов современных ландшафтно-экологических исследований. Для количественной оценки и моделирования ландшафтной структуры и ее влияния на виды и сообщества в зарубежных публикациях обсуждаются два фундаментальных подхода: так называемые «патч-ориентированные модели» (от англ. «*patch*», буквально – «заплата») и «градиентные модели» [4]. Модели на основе патчей рассматривают ландшафт как набор участков среды обитания, представляющих собой экологически однородные субъединицы ландшафта. В итоге структура ландшафта складывается из состава, конфигурации и взаимосвязей участков с различными размерами и качествами [4, 5]. В отличие от этого, «градиентные модели» представляют собой ландшафтную структуру, основанную на непрерывных растровых или сеточных данных, без априорного выделения участков или субъединиц. Здесь ячейки сетки или пиксели являются наименьшими однородными и дискретными пространственными единицами, позволяющими осуществлять квазипрерывное изменение характеристик по всему ландшафту [4, 6, 7]. Используя первый подход, мы акцентируем необходимость доказательства адекватности результатов (верификации) оценочных исследований устойчивости, полученных на основе балльного, балльно-индексного подхода или моделей-классификаций, разработанных для интегральной оценки устойчивости, и невозможность прямого измерения интегративного свойства геосистем (устойчивость), характеризующего их способность сохранять свои свойства и параметры режимов при внешних воздействиях или внутренних трансформациях.

Сказанное выше приводит к отказу многих авторов от использования терминов «модель» и «моделирование» в оценке эмерджентных свойств геосистем: устойчивость, уязвимость, благополучие, напряженность, экологический статус (или потенциал), «здоровье эко- или геосистемы» и др., поскольку в природе эти свойства в принципе нельзя измерить. В этом случае авторы употребляют термины «оценочная классификация», «обучающая классификация» и развивают методы косвенного подтверждения результатов оценки состояния системы или ее сложного свойства на основе балльных оценок. Здесь, на наш взгляд, следует отметить, что непременным условием проверки адекватности модели «оригиналу» является выдвижение ряда гипотез, которые могут быть проверены по имеющимся натурным данным и ре-

зультатам расчетов, или исходя из логики событий. Чем больше гипотез оправдывается или подтверждается, тем большего доверия заслуживает модель. Поэтому отсутствие разработки и доказательства таких гипотез является «слабым звеном» многих публикаций по данной проблеме. Авторы просто обходят стороной данный этап работы. При этом, как правило, не обсуждается системообразующий тип геосистемы, например, для водной геосистемы: 1 – циклический тип, 2 – транзитный, 3 – каскадный. Проверка нами ряда гипотез показала, что логично оценивать адаптационную устойчивость для водных эко- и геосистем 1 типа, регенерационную – для 2 или для 2 и 3 типов систем. В некоторых случаях можно обосновать последовательное изменение типов внутри года (ряда лет), если система меняет свой тип в результате естественных или антропогенных трансформаций.

В ландшафтных исследованиях, как правило, одновременно присутствуют все типы геосистем. Это позволяет сформировать патчи всех типов для оценки устойчивости ландшафта и использовать их одновременно. Присутствие того или другого типа патчей в ландшафте можно учитывать по занимаемой ими площади или через весовые множители, приписываемые тем или иным характеристикам. Развитие этой идеи на практике пока не происходит, хотя в оценочных классификациях устойчивости у авторов, как правило, присутствуют одновременно параметры и шкалы первого и второго типов, часто одни и те же для разных типов геосистем [3, 8, 11].

Следующая особенность оценочных исследований, отмеченная нами, состоит в медленном развитии индексологии устойчивости и других сложных свойств. В иностранных и последних российских публикациях речь идет, чаще всего, о так называемых «композитных индексах» [2]. Выявлено: отсутствие общей методологической структуры построения индексов, необходимость развития методов отбора переменных для конкретных целей, так называемая «рамочная основа» для индексов; необходимость повышения методологической прозрачности (открытости, доступности) для улучшения межтерриториального сопоставления результатов [2]. Редко авторами предлагаются «композитные индексы», для которых в процессе исследования были разработаны оценочные шкалы. Но даже если такие шкалы существуют, то они часто заменяются авторами балльными шкалами, что снижает их

ценность как основы «экологической квалиметрии» или «экологической аксиометрии». Возможно поэтому, хотя разработка составных индексов привлекает все большее внимание ученых и государственных органов, эта концепция по-прежнему не обладает способностью к транспонированию и устойчивостью, в том числе из-за различных концепций и/или методологий [2]. В итоге, авторы приходят к выводу о том, что «не существует признанного стандарта или международного признанного правила для определения количества и типа переменных, которые должны быть включены в количественную оценку состояния окружающей среды» и что «до настоящего времени ни в одном исследовании не рассматривался вопрос о возможном включении данных в качестве носителя информации для использования в составных индексах состояния окружающей среды» [9].

Рассмотрим основные этапы построения классификаций или моделей-классификаций устойчивости [1, 3]. Такие модели характеризуют способность сложной системы сохранять свои свойства (морфометрию и рельеф, климатические особенности, водный режим, его специфику и сезонные эффекты) и параметры режимов в результате естественных изменений и/или антропогенных воздействий и трансформаций. Вид представления знаний о свойствах и параметрах естественного и антропогенного режимов – классификация состояния и/или классификация устойчивости. Такая классификация формируется с учетом цели исследования, сформулированной на первом этапе работы.

После выявления типа устойчивости и его представления в модели-классификации, механизмов формирования, отбора необходимых и достаточных критериев оценивания необходимо ввести классы и сформировать оценочные шкалы для всех критериев. Например, в [1] нами для оценки потенциальной устойчивости ландшафта в эколого-географическом зонировании территории были рекомендованы: 1 – радиационный баланс, $\text{ккал}/\text{см}^2 \text{ год}$. Большим его значениям соответствует максимальная устойчивость ландшафта; 2 – радиационный индекс сухости (К) – отношение между радиационным балансом территории и годовой суммой осадков, выраженное в калориях скрытой теплоты испарения. $K = 1,00$ соответствует условиям максимальной устойчивости ландшафта; 3 – ветровой режим: а) количество дней со штормами в году (баллы). Чем больше дней со штормами, тем выше адаптационная

устойчивость; 4 – ветровой режим: б) количество дней с сильными ветрами (баллы). Чем больше дней с сильными ветрами, тем ниже адаптационная устойчивость (и выше регенерационная устойчивость); 5 – интенсивность геоматических процессов (ИГП) характеризуется аддитивным учетом неотектонической активности, сейсмичности, типа рельефа, свойств пород. Максимальной величине ИГП соответствует максимальная устойчивость ландшафтов; 6 – устойчивость составных частей ландшафта (урочища разделены на активные, пассивные и детерминанты). Максимальная устойчивость закреплена за пассивными урочищами, минимальная за Н-Н детерминантами; 7 – контрастность урочищ в ландшафте (чем выше контрастность, тем выше устойчивость или необходимо обосновать другие подходы); 8 – защищенность грунтовых вод. Грунтовые воды (ГВ) в ландшафте считаются защищенными (максимальная устойчивость) при наличии слабопроницаемого, мощного слоя пород и глубоко залегании ГВ. ГВ в ландшафте не защищены при наличии трещиноватых пород и карстовых ландшафтов (минимальная устойчивость), особенно, при достаточно близком залегании ГВ; 9 – индекс биологической эффективности климата (ТК) – интегральный критерий тепло- и влагообеспеченности, от которого зависит устойчивость ландшафта. Высокие значения индекса ТК характерны для устойчивых ландшафтов, а низкие – для неустойчивых. Первые 8 характеристик использовались нами в оценочной классификации устойчивости «ОКУ» в [3]. Перечисленные 9 критериев составляли основу оценочной классификации устойчивости «ОКУ1» в [1]. Отметим небольшую разницу в оценочных шкалах «ОКУ» в работах [1] и [3], обусловленную ошибками округления.

В настоящей версии оценочной классификации устойчивости «ОКУ2» учтем

дополнительно еще два критерия. Это: 10 – индекс интенсивности биологического круговорота (ИБК) – величина отношения массы подстилки к той части опада, которая ее формирует. ИБК для заболоченных лесов >50, для кустарничковой тундры 20–50, для темнохвойных лесов, для 10–17, для широколиственных лесов 3–4, саванны не более 0,2, влажные тропические леса не более 0,1 [10]. Учтем также: 11 – устойчивость почв к эрозионному смыву (эрозионный смыв в т/га в год). Под устойчивостью ландшафтов к смыву почв дождевыми осадками понимается их способность противостоять процессам смыва. Чем меньше смыв почвы, тем устойчивее ландшафт. Шкала эрозионного смыва (т/га в год): 8 – 6 – минимальная устойчивость (I класс), 6 – 4 – устойчивость ниже средней (II класс), 4 – 2 – средняя устойчивость (III класс), 2 – 1 – выше средней (IV класс), 1 – 0 – максимальная устойчивость [11].

Внешний вид модели-классификации интегральной оценки устойчивости, построенной нами на основе выбранных 11 критериев, приведен в табл. 1. Там же содержатся разработанные нами оценочные шкалы интегральных показателей устойчивости для «ОКУ1» и «ОКУ2» в предположении равенства весов (приоритетов) оценивания. Подсветкой в таблице выделены дополнительные параметры, учитываемые в «ОКУ2».

Для нормирования исходных параметров использовались функции «мини-макса», традиционно применяемые нами в построении интегральных показателей [12].

В расчетах использованы нормирующие функции 1 и 2, отражающие на данном этапе линейный характер изменения характеристик по классам устойчивости ($l = 1, 0$). В (1) и (2) q_i – нормированное значение текущих показателей x_i . В качестве \min_i и \max_i использовались минимальное и максимальное значения характеристик в оценочных шкалах.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^l, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i, \end{cases} \quad (1)$$

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^l, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1

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 ² 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 штормами 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
10. Индекс интенсивности биологического круговорота	0-0,1 0-0,002	0,1-0,2 0,002-0,004	3-4 0,060-0,080	10-17 0,200-0,340	20-50 0,400-1
11. Эрозионный смылв почв (т/га в год)	8-6 0-0,250	6-4 0,250-0,500	4-2 0,500-0,750	2-1 0,750-0,875	1-0 0,850-1
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ) для оценочной классификации «ОКУ1» (9 параметров)	0-0,198	0,198-0,392	0,392-0,588	0,588-0,793	0,793-1,00
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ) для оценочной классификации «ОКУ2» (11 параметров)	0-0,185	0,185-0,367	0,372-0,556	0,567-0,759	0,762-1,00

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

В последних строках табл. 1 приведены рассчитанные значения интегрального показателя устойчивости (ИПУЛ) по классам для «ОКУ1» и «ОКУ2». Правила построения оценочных шкал интегральных показателей опубликованы нами в большом количестве работ [1, 3 и др.]. Для расчетов использовались: метод сводных показателей (МСП); метод рандомизированных сводных показателей (МРСП); АСПИД-методология [12]. Реализация этапов проводилась либо для нескольких уровней свертки информации, либо, как в табл. 1, все параметры оценки сводились в единую исходную модель-классификацию. Наш опыт показывает, что для оценки экологического статуса (потенциала) геосистемы целесообразно ввести три группы параметров: 1 – группа, отражающая продукционный потенциал геосистемы (ландшафта); 2 – группа, отражающая качество и токсическое загрязнение сред (воздух, вода, почва); 3 – группа, отражающая потенциальную устойчивость геосистемы (ландшафта). В этом случае построение интегрального показателя экологического статуса (потенциала) геосистемы реализуется на основе 2–3-х-уровневой свертки показателей. При этом необходимо решать вопрос о приоритетах оценивания, как внутри групп, так и между ними. Отметим, что в данной работе, как и в большинстве публикаций, рассмотрено «линейное агрегирование» принятых для оценки характеристик и отсутствует обоснование «умных приоритетов» (весов) для свертки показателей [13]. Последняя проблема рассматривается подробно в других наших работах [3, 14 и др.].

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

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i, \quad (3)$$

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 нормированного показателя q_i .

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены исходные шкалы и нормированные значения параметров

этих шкал по классам устойчивости и шкалы интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость) для «ОКУ1» и «ОКУ2». Данные модели-классификации построены в предположении равенства весов (приоритетов) между признаками ($w_i = 1/9$ для «ОКУ1» и $w_i = 1/11$ для «ОКУ2»). 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 был рассмотрен ряд гипотетических ситуаций (сценариев) для условно заданных типов ландшафтов. Сценарии могут отражать минимально возможные для некоторой территории и максимально возможные значения характеристик или интервалы их изменения. По ним исследователь определяет, в каких пределах может изменяться интегральный показатель устойчивости для различных (характерных) типов ландшафтов или временных интервалов. Для этого можно использовать комбинации различных значений параметров, отражающих естественноисторическую фазу развития геосистем, а также средние, фоновые, экстремальные и т.п. значения параметров.

Рассмотрим примеры использования «ОКУ2» и сравним полученные результаты с результатами по «ОКУ1» для ландшафтов, перечень которых приведен в табл. 2. В табл. 3 заданы значения 11 территориальных детерминант для «ОКУ2» по ландшафтам.

Пример 1. Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) выполнялся для таежных ландшафтов Новгородской области (Приильменская низменность). Полученное на основе «ОКУ2» значение ИПУЛ равно 0,605, позволяет отнести данные ландшафты к IV классу устойчивости (устойчивость выше средней) при ширине интервала класса 0,545–0,747 (табл. 3). Расчеты показали, что изъятие (или добавление) двух параметров (10 и 11) незначительно сказалось на итоговом результате. В «ОКУ1» было получено ИПУЛ = 0,673, что позволило отнести ландшафт к середине IV класса при ширине интервала оценочной шкалы ИПУЛ 0,588–0,793. Сравнить между собой абсолютные значения ИПУЛ для «ОКУ1» и «ОКУ2» нельзя, поскольку

значения левой и правой границ классов у них разные. Поэтому сравним значения $ИПУЛ_9 / (\max_9 - \min_9)$ и $ИПУЛ_{11} / (\max_{11} - \min_{11})$. В качестве минимального и максимального значений использовались

соответствующие граничные значения характеристик для IV класса в «ОКУ1» и «ОКУ2». В этом случае получаем, что разница в полученных результатах составила 4,2%.

Таблица 2

Перечень ключевых ландшафтов, выбранных для оценки потенциальной устойчивости по «ОКУ2»

№ п/п	Название и особенности ландшафтов
1	Таежные ландшафты Новгородской области (Приильменная низменность)
2	Пологоволнистые междуречные равнины, покатые и пологие склоны долин, сложенные песчаниками, мергелями, конгломератами, известняками уфимского яруса с широколиственными лесами на серых и тёмно-серых лесных почвах Бирского, Мишкинского и Благовещенского районов Республики Башкортостан
3	Ландшафты хвойно-широколиственных лесов Уфимского плато
4	Равнинно-моренный ландшафт Лемболовской возвышенности Ленинградской области
5	Арктические ландшафты Земли Франца-Иосифа

Таблица 3

Примеры интегральной оценки устойчивости ландшафтов

Признак / ландшафт	Ландшафт 1	Ландшафт 2	Ландшафт 3	Ландшафт 4	Ландшафт 5
1. Радиационный баланс, ккал/см ² год	$\frac{30}{0,412}$	$\frac{37}{0,495}$	$\frac{37}{0,495}$	$\frac{25}{0,353}$	$\frac{2}{0,082}$
2. Радиационный индекс сухости	$\frac{0,05}{1}$	$\frac{1-1,15}{0,825}$	$\frac{0,85-1}{0,895}$	$\frac{0,5}{0,989}$	$\frac{0,5}{0,989}$
3. Ветровой режим: а) количество дней со штителями в году (баллы)	$\frac{5}{1}$	$\frac{4}{0,80}$	$\frac{4}{0,80}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{3}{0,60}$
4. Ветровой режим: б) количество дней с сильными ветрами (баллы)	$\frac{3}{0,40}$	$\frac{2}{0,60}$	$\frac{1}{0,80}$	$\frac{1}{0,80}$	$\frac{2}{0,60}$
5. Интенсивность геоматических процессов, баллы	$\frac{15}{0,75}$	$\frac{9}{0,45}$	$\frac{11}{0,55}$	$\frac{7}{0,35}$	$\frac{8}{0,40}$
6. Устойчивость составных частей ландшафта, баллы	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$	$\frac{4}{0,8}$	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$
7. Контрастность урочищ в ландшафте, баллы	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$	$\frac{4}{0,8}$	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$
8. Защищенность грунтовых вод, баллы	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$	$\frac{3}{0,60}$	$\frac{1}{0,20}$
9. Индекс биологической эффективности климата (индекс ТК)	$\frac{14}{0,70}$	$\frac{14}{0,70}$	$\frac{15}{0,75}$	$\frac{12}{0,60}$	$\frac{1,5}{0,075}$
10. Индекс интенсивности биологического круговорота	$\frac{11}{0,22}$	$\frac{3-4}{0,065}$	$\frac{7-8}{0,15}$	$\frac{13}{0,06}$	$\frac{0,08}{0,002}$
11. Эрозионный смыв почв (т/га в год)	$\frac{3}{0,375}$	$\frac{7}{0,125}$	$\frac{5}{0,375}$	$\frac{3}{0,375}$	$\frac{7}{0,125}$
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ) для оценочной классификации «ОКУ1» (9 параметров)	0,673 (IVc) границы класса 0,588–0,793	0,541 (IIIп) границы класса 0,392–0,588	0,677 (IVc) границы класса 0,588–0,793	0,655 (IVл) границы класса 0,588–0,793	0,372 (IIIп) границы класса 0,198–0,392
Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ) для оценочной классификации «ОКУ2» (11 параметров)	0,605 (IVл) границы класса 0,567–0,759	0,460 (IIIп) границы класса 0,372–0,556	0,601 (IVл) границы класса 0,567–0,759	0,575 (IVл) границы класса 0,567–0,759	0,316 (IIIп) границы класса 0,185–0,367

Примечание. В числителе – рекогносцировочное значение признака, в знаменателе – нормированное значение. В двух последних строках – результат свертки (ИПУ) с указанием близости к левой (л), правой (п) границам или к середине класса (с) и класс устойчивости с указанием границ класса. Подсветкой выделены дополнительно учтенные критерии.

Пример 2. Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) выполнялся для пологоволнистых между-речных равнин, покатых и пологих склонов долин, сложенных песчаниками, мергелями, конгломератами, известняками уфимского яруса с широколиственными лесами на серых и тёмно-серых лесных почвах Бирского, Мишкинского и Благовещенского районов Республики Башкортостан. Полученное на основе «ОКУ2» значение ИПУЛ равно 0,460, позволяет отнести данные ландшафты к III классу устойчивости при ширине интервала класса 0,372–0,556 (табл. 3). Сравнение с значением ИПУЛ = 0,541 для «ОКУ1», III при ширине интервала оценочной шкалы ИПУЛ 0,392–0,588 показало, что разница в полученных результатах составила 10,4%. Как и в первом примере, получаем, что ИПУЛ₀ и ИПУЛ₁₁ попадают в один класс, но ИПУЛ₀ дает несколько более высокую устойчивость ландшафта внутри классов (на величину указанных %).

Пример 3. Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) выполнялся для ландшафтов хвойно-широколиственных лесов Уфимского плато. Для «ОКУ1» получено: 0,677 (IVс), границы класса 0,588–0,793. Для «ОКУ2» получено: 0,601 (IVл), границы класса 0,567–0,759. По расчету на основе «ОКУ2» выявлен сдвиг в сторону снижения устойчивости примерно на 5,5% по сравнению с «ОКУ1».

Пример 4. Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) выполнялся для равнинно-моренных ландшафтов Лемболовской возвышенности Ленинградской области. Для «ОКУ1» получено: 0,655 (IVл), границы класса 0,588–0,793. Для «ОКУ2» получено: 0,575 (IVл), границы класса 0,567–0,759. По расчету на основе «ОКУ2» выявлен сдвиг в сторону снижения устойчивости примерно на 6,7% по сравнению с «ОКУ1».

Пример 5. Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ) выполнялся для арктических ландшафтов Земли Франца-Иосифа. Для «ОКУ1» получено: 0,372 (III), устойчивость ниже средней, границы класса 0,198–0,392. Для «ОКУ2» получено: 0,316 (III), границы класса 0,185–0,367. По расчету на основе «ОКУ2» выявлен сдвиг в сторону снижения устойчивости примерно на 10,5% по сравнению с «ОКУ1».

В целом во всех случаях, при количестве исходных территориальных детерми-

нант близких к 10, выявлено, что ИПУЛ на основе «ОКУ2» давал, в зависимости от ландшафта, сдвиг в сторону меньшей устойчивости для II–IV классов в пределах 4,2–10,4%. На примере арктических ландшафтов Земли Франца-Иосифа показано, что их потенциальная устойчивость низкая (II класс, ниже средней). Ранее выполненное нами исследование [1] показало также, что добавление в «ОКУ» или изъятие из нее одного параметра (индекс ТК) при равновесном их учете практически не сказалось на итоговом результате. Например, изъятие из «ОКУ1» индекса ТК дало характерное значение ИПУЛ, равное 0,531 (III), что определило разницу с рассмотренным в «ОКУ1» результатом в пределах 5% при ширине интервала оценочной шкалы ИПУЛ, построенной для 8 параметров, для III класса 0,391–0,586. Выявлено также, что, приращение в 2 раза большего веса одному параметру по сравнению с другими (на примере ТК) по расчетам на основе «ОКУ1», дало значение ИПУЛ, равное 0,630, что свидетельствовало 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).

Заключение

Следующими шагами в работе с моделями-классификациями устойчивости будет сбор и уточнение исходных данных для патч-ориентированных моделей интегральной оценки устойчивости ландшафтов в среде ГИС с учетом неравновесного задания приоритетов (весов) для территориальных детерминант на основе ASPID-методологии учета неполной, неточной и нечисловой информации в оценочных исследованиях.

Для учета устойчивости к изменению параметров антропогенного режима будут выявлены возможные типы воздействия, критерии оценивания, решена проблема совместного учета потенциальной устойчивости ландшафтов и их устойчивости к антропогенному воздействию.

Исследования выполнялись при поддержке грантов РФФИ № 18-05-60291 и № 19-05-00683 а.

Список литературы / References

1. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н., Морозова А.С., Пилюгина А.А., Свердлов О.А., Сиротина П.М., Федорова М.Е., Черепанов С.В., Шакуров В.А. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов: модели, результаты, перспективы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 9. С. 110–114.

- Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N., Morozova A.S., Pilyugina A.A., Sverdlova O.A., Sirotina P.M., Fedorova M.E., Cherepanov S.V., Shakurov V.A. Integral assessment of landscape stability: models, results, prospects // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017. № 9. P. 110–114 (in Russian).
2. Delphine Brousmichea, Florent Occellia, Michaël Geninb, Damien Cunya, Annabelle Derama, Caroline Lanier Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 111 (2020) 106023. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106023.
3. 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. Серия 7. Геология. География. № 4. С. 114–130.
- Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N. Approaches to the assessment and GIS mapping of the sustainability and environmental well-being of geosystems. III. Integral assessment of soil stability and terrestrial geosystems // *Vestnik SPbGU*. 2014. Seriya 7. Geologiya. Geografiya. № 4. P. 114–130 (in Russian).
4. Lausch A., Blaschke T., Haase D., Herzog F., Syrbe R.-U., Tischendorf L., et al. Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics *Ecological Modelling*. Vol. 295. 10 January 2015. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018.
5. Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu Rev Ecol Syst*. 1989. Vol. 20. P. 171–197.
6. McGarigal K., Tagil S., Cushman S.A. Surface metric: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landsc Ecol*. 2009. Vol. 24. P. 433–450.
7. Erős, T., Lowe W.H. The Landscape Ecology of Rivers: from Patch-Based to Spatial Network Analyses. *Curr Landscape Ecol Rep* 4. 2019. P. 103–112. DOI: 10.1007/s40823-019-00044-6.
8. Снакин В.В., Алябина И.О., Кречетов П.П. Экологическая оценка устойчивости почв к антропогенному воздействию // *Известия РАН. Серия географическая*. 1995. № 5. С. 50–57.
- Snakin V.V., Alyabin I.O., Krechetov P.P. Ecological assessment of soil resistance to anthropogenic effects // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 1995. № 5. P. 50–57 (in Russian).
9. He, Y.X., Jiao, Z., Yang, J. Comprehensive evaluation of global clean energy development index based on the improved entropy method. *Ecol. Indic.* 2018. Vol. 88. P. 305–321. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.12.013.
10. Степановских А.С. Общая экология. Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. 420 с.
- Stepanovsky A.S. General ecology. Textbook for high schools. М.: UNITY-DANA, 2000. 420 p. (in Russian).
11. Осипов А.Г. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-аграрных систем // *Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География*. 2016. № 3. С. 150–162. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.312.
- Osipov A.G. Integral assessment of landscape stability when creating agricultural land of natural-agrarian systems // *Vestnik SPbGU. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2016. № 3. P. 150–162 (in Russian).
12. Hovanov N., Hovanov K., Yudaeva M. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert nonnumeric, non-exact and non-complete knowledge. *European Journal of Operational Research*. 2009. V. 195 (3). P. 857–863.
13. Шмелева И.А., Шмелев С.Э. Глобальные города: многокритериальная оценка устойчивого развития // *Биосфера*. 2019. Т. 11. № 1. С. 1–18. DOI: 10.24855/biosfera.v11i1.470.
- Shmeleva I.A., Shmelev S.E. Global cities: a multi-criteria assessment of sustainable development // *Biosphere*. 2019. V. 11. № 1. P. 1–18 (in Russian).
14. Огурцов А.Н., Дмитриев В.В. Интегральная оценка и геоинформационный анализ социальных детерминант здоровья населения Крайнего севера Европейской части Российской Федерации // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2019. Т. 25. № 1. С. 23–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-23-34.
- Ogurtsov A.N., Dmitriev V.V. Integrated Assessment and Geoinformational Analysis of Social Determinants of Population Health of the Extreme North of the European Part of the Russian Federation // *InterCarto. InterGIS* 2019. V. 25. № 1. P. 23–34 (in Russian).