

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Г. В. МИТЕНКО, доктор биологических наук В. В. СНАКИН  
(Институт фундаментальных проблем биологии РАН (ИФБ РАН),  
доктор технических наук Р. Г. МЕЛКОНЯН  
(Международный независимый эколого-политологический  
университет (Академия МНЭПУ))

Для рационализации природопользования важно определить факторы и условия естественного существования природных территориальных комплексов (ПТК) и оценить способность их адаптации (устойчивости) к антропогенному воздействию. Это можно осуществить на основе анализа энергетических потоков, обеспечивающих функционирование ПТК с применением ГИС-технологий<sup>1</sup>. Для разработки энергетического подхода к оценке устойчивости ПТК в качестве объекта исследования была выбрана территория Европы ввиду большого разнообразия природно-климатических условий, различной степени заселённости и освоенности регионов, особенностей природопользования.

**П**роблема анализа и формирования оценки устойчивости ПТК сложна и многоаспектна. Теоретическую основу предлагаемой работы представляют научные положения, изложенные в работе по вопросам исследования устойчивости природной среды доктора географических наук

А.Д. Арманда<sup>2</sup>. Вопросы энергетической составляющей устойчивости природных систем затрагивались в работах В.В. Снакина и В.Р. Хрисанова<sup>3</sup>.

Большинство исследователей определяют устойчивость как внутреннюю способность системы пребывать в состоянии, близком к равновесию, и возвращаться к нему после различных нарушений. Понятие устойчивость (*sustainability*) системы следует отличать от понятия стабильность (*stability*), которая предполагает сохранение системой относительно неизменного состояния под влиянием некатастрофических явлений. Это соответствует позиции известного эколога Р. Риклефса<sup>4</sup>, который определяет устойчивость как способность системы выдерживать изменения, вызванные влиянием извне, и возобновляться, а стабильность – как меру изменчивости системы. Таким образом, устойчивость

<sup>2</sup> Арманд А.Д. Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий. В сб. Устойчивость гео-систем. М.: Наука, 1983. С. 14–32.

<sup>3</sup> Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Мельченко В.Е. Устойчивость природных территориальных комплексов – базовая компонента устойчивого развития страны. В сб. Экологическая парадигма: выбор России в III тысячелетии. Научные труды МНЭПУ. Вып. 2. 1998. С. 78–91; Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В. Потенциальная устойчивость ландшафтов // Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: ПКО “Картография”, 2007. 419 с.

<sup>4</sup> Риклефс Р. Основы общей экологии. М.: Мир, 1979. 422 с.

<sup>1</sup> ГИС-технологии – это географическая информационная система, позволяющая картировать объекты окружающего мира, анализировать их по множеству параметров, визуализировать их и на основе этих данных оптимизировать решение прикладных задач и прогнозировать самые различные события и явления.

и стабильность природных систем – это принципиально разные понятия. Нестабильный ландшафт может быть очень устойчив (он при этом как бы устойчив в своей нестабильности), “закалён” в условиях постоянно меняющейся природной среды. Без существенных для себя последствий такой ландшафт способен перерабатывать поступающую дополнительную энергию в виде внешнего воздействия (возмущения). Напротив, очень стабильные, сформировавшиеся в условиях мало меняющейся среды, адаптированные к определённым условиям этой среды ПТК могут быть неустойчивы и разрушаться даже при незначительных антропогенных воздействиях.

**Устойчивость ПТК** следует воспринимать как особый природный ресурс, своеобразную экологическую ёмкость, поскольку от нагрузки, которую способны выдержать ландшафты, зависит степень допустимой хозяйственной деятельности на данной территории. Потенциал устойчивости напрямую зависит от количества поступающей в систему энергии. Определив степень устойчивости природной системы к антропогенному воздействию, можно сделать экологический прогноз развития территории при определённой антропогенной нагрузке.

Преобразование природных систем отличается глубокой их перестройкой и сопровождается появлением антропогенных, или техногенных элементов (пахотного горизонта почвы, искусственных насаждений, производственных конструкций и т.п.). Соответственно, функционирование преобразованного ПТК подчиняется другим закономерностям в сравнении с природным, его энергетика в существенной мере связана с вкладом человека, его отличает иная реакция на внешнее воздействие.

Антропогенное воздействие на природные системы можно рассматривать как аналог естественному изменению внешних условий, отличаясь лишь большей комплексностью. Так, сельскохозяйственная деятельность сопровождается, наряду с механическими, также и физическими, химическими

и биологическими воздействиями на ландшафт.

Важнейшей проблемой является возможность реализации количественного подхода к анализу устойчивости природных систем. Один из интегральных подходов к оценке устойчивости ПТК предложен В.В. Снакиным<sup>5</sup>. Он основан на анализе процессов, определяющих энергетiku ландшафта. Энергетика ландшафта – это совокупность потоков энергии в ландшафте, её преобразование и выход, а именно: поступление тепловой (прежде всего солнечной) энергии, выпадение атмосферных осадков, механическое перемещение косного вещества, активность живого вещества. Энергетика ПТК проявляется в интенсивности выветривания, скорости перемещения, накопления и рассеяния вещества.

При оценке устойчивости ПТК к антропогенному воздействию была принята их способность к преодолению этого воздействия (т.е. скорость восстановления), зависящая от энергетики ландшафта. Реакция восстановления всегда связана с рассеянием эффекта воздействия на окружающие природные системы или же с процессами ассимиляции энергии ландшафтом. Таким образом, воздействие всегда сопряжено с вкладом энергии в ПТК, а реакция восстановления – с рассеянием этой энергии. Можно утверждать, что более устойчивыми являются ПТК с бóльшей энергетикой.

### **Методические основы оценки устойчивости ПТК**

Различные проявления энергетики ПТК можно представить как совокупность энергетических процессов различной природы: потока тепловой

<sup>5</sup> Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Мельченко В.Е. Устойчивость природных территориальных комплексов – базовая компонента устойчивого развития страны. В сб.: Экологическая парадигма: выбор России в III тысячелетии. Научные труды МНЭПУ. Вып. 2. 1998; Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В. Потенциальная устойчивость ландшафтов // Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: ПКО “Картография”, 2007.

(преимущественно солнечной) энергии, энергии атмосферных осадков, механической энергии перемещения твёрдого вещества и активности живого.

Ввиду разнородности составляющих энергетики ПТК для интегральной её оценки наиболее рационален метод “взвешенных” баллов, позволяющий реализовать количественный подход даже там, где другие методы бессильны<sup>6</sup>. Для этих целей выделяются наиболее существенные параметры, определяющие функционирование ПТК, затем они анализируются с позиции полноты описания устойчивости ПТК к различным антропогенным воздействиям и из них выбираются наиболее важные, доступные для измерения или расчёта. После этого выявляется диапазон изменения каждого из этих параметров, который разбивается на определённое число градаций (баллов). В одних случаях используется равномерная шкала, в других – неравномерная в зависимости от функциональной связи параметров с устойчивостью и распределения значений параметра в географическом аспекте. Сумма баллов по установленным параметрам даёт итоговую оценку устойчивости данного ПТК к антропогенному воздействию<sup>7</sup>. Такой подход достаточно универсален и позволяет с количественных позиций подойти к проблеме оценки устойчивости. Кроме того, на основе данного метода возможно нормирование антропогенного воздействия, определение параметров рационального природопользования.

Существенным моментом балльной системы является наличие двух альтернативных вариантов построения оценочных шкал. В первом случае строится универсальная шкала, основанная на известных данных для всех типов ландшафтов. Во втором варианте в расчёт принимается только диапазон данных об оценочном параметре, характерном для конкретного региона (региональная шкала). Оба варианта

имеют свои достоинства и недостатки. Так, первый вариант, с одной стороны, позволяет проводить широкое сравнение различных типов природных систем, а с другой – существенно обедняет картину разнообразия территории при анализе конкретного, особенно небольшого региона.

Предлагаемая нами концепция устойчивости ПТК основана на анализе интенсивности различных процессов: радиальных, определяемых преимущественно климатом территории и латеральных, проявляющихся в интенсивности перемещения косного вещества, от которых зависят условия существования биоты. Биота же является индикатором оптимальности соотношения различных экологических факторов, и её состояние может использоваться как самостоятельный оценочный параметр состояния ПТК.

Методически вышесказанное можно представить как сумму интегральных показателей энергетики ПТК:

$$E = R + A + G + P,$$

где  $E$  – показатель суммарной энергетики,  $R$  – показатель тепловой энергии,  $A$  – показатель энергии атмосферных осадков,  $G$  – показатель энергии косного вещества ПТК,  $P$  – показатель энергии живого вещества.

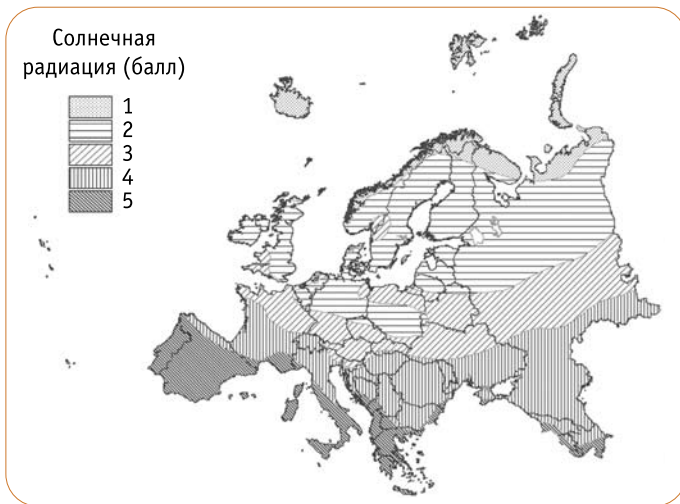
### Оценка устойчивости ПТК Европы

Из тепловых потоков солнечная энергия – важнейшая составляющая энергетики ПТК, определяющая основные внутренние процессы и характеризующая прежде всего величиной радиационного баланса. При рассмотрении территории в крупных масштабах (когда часто отсутствуют подробные данные о радиационном балансе) для её дифференциации по этому показателю могут быть использованы дополнительные параметры (альбедо, экспозиция склонов и т.п.). В некоторых ландшафтах следует учитывать иные тепловые потоки, прежде всего геотермальные.

В качестве основы дифференциации территории Европы по тепловому по-

<sup>6</sup> Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. С. 114–137.

<sup>7</sup> Снакин В.В., Мельченко В.Е., Бутовский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. М.: ВНИИПрирода, 1992. С. 102–107.



**Рис. 1.**  
**Карта балльной оценки солнечной радиации для территории Европы:**  
 1 балл – < 8 Дж/км<sup>2</sup> в день; 2 балла – 8–10; 3 балла – 10–12; 4 балла – 12–14; 5 баллов – >14 Дж/км<sup>2</sup> в день.

току были использованы данные о радиационном балансе, взятые из атласа “Природа и ресурсы Земли”<sup>8</sup>. При этом шкала была нами несколько видоизменена (рис. 1).

Поскольку тепловой поток из недр Земли в некоторых регионах Европы имеет существенное ландшафтообразующее значение (Исландия, ряд греческих островов), для уточнения этого показателя к суммарному балу оценки устойчивости добавляли один балл для территорий с тепловым потоком более 150 Вт/м<sup>2</sup>, или 0.013 Дж/км<sup>2</sup> в день (это максимальные значения тепловых потоков на суше, в соответствии с данными атласа “Природа и ресурсы Земли”).

**Атмосферные осадки** характеризуются прежде

<sup>8</sup> Природа и ресурсы Земли. Атлас and Environment World Atlas). В 2-х т. Вена: Институт географии РАН, 1996

всего количеством, определяющим интенсивность процессов механического и химического перемещения вещества вместе со стоком – главным интегрирующим ландшафтообразующим процессом<sup>9</sup>. В качестве исходных данных также использовали материалы атласа “Природа и ресурсы Земли”; при этом шкала была изменена на 5-балльную (рис. 2). Максимальные количества осадков приурочены к прибрежным территориям, увлажнённость суши

в целом уменьшается по мере удаления от океана и возрастания континентальности климата.

**Энергия перемещения космого (твёрдого) вещества** определяется

<sup>9</sup> Муравейский С.Д. Роль географических факторов в формировании географических комплексов // Вопросы географии. Сб. 9. М.: ОГИЗ, 1948. С. 95–110.

**Рис. 2.**  
**Карта балльной оценки атмосферных осадков для территории Европы, баллы:**  
 1 – <400 мм в год; 2 – 400–600; 3 – 600–1000; 4 – 1000–1400; 5 – >1400 мм в год

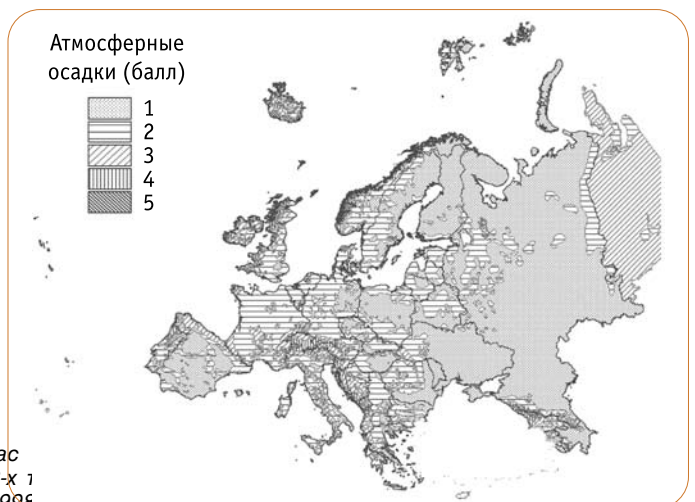


Таблица 1

**Балльная шкала подвижности косного вещества  
(по материалам атласа “Природа и ресурсы  
Земли” и Геологической службы США,  
<http://eros.usgs.gov>)**

Балл	Тип Рельефа	Типы морфо-структур	Крутизна склонов, в градусах
1	Аккумулятивные низменности и котловины	Аккумулятивные равнины	<2.5
2	Аккумулятивные и денудационные (выровненные) плоские равнины	Межплатформенные равнины	2.5–6
3	Денудационные равнины (в т.ч. пенеплен) и плато на рыхлых породах, подстилаемые древними кристаллическими породами	Платформенные равнины	6–12
4	Внутригорные аккумулятивные и денудационные равнины, невысокие горы, на аллювиальных песчаноглинистых отложениях	Межгорные депрессии и котловины	12–24
5	Вулканогенные, осадочные и интрузивные (изверженные) породы; слагающие горы и нагорья с грядами водораздельных хребтов и поверхностями выравнивания	Зоны активного орогенеза (поднятий и опусканий)	>24

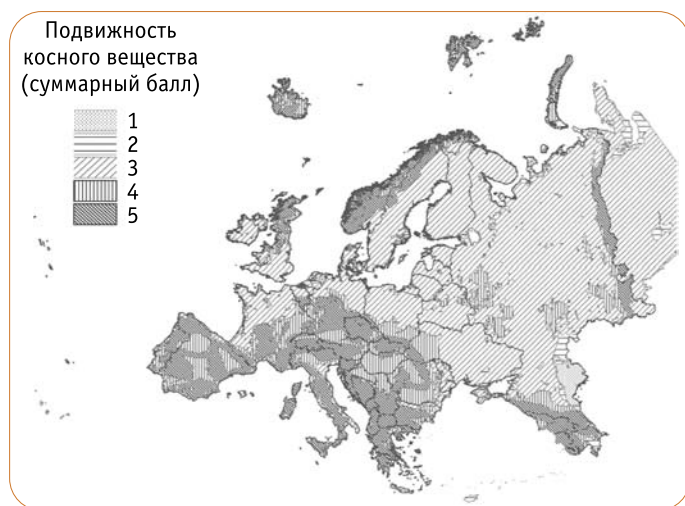
Для анализа механической активности косного вещества ПТК Европы (в том числе и потенциальной) учитывали: тип рельефа, тип морфоструктур и усреднённую крутизну склонов (табл. 1). При составлении балльных оценок подвижности косного вещества (рис.3) также учитывались данные цифрового атласа “Наша Земля”<sup>10</sup>. Кроме того, для территорий, находящихся ниже уровня моря, вычитали один балл устойчивости по рассматриваемому показателю.

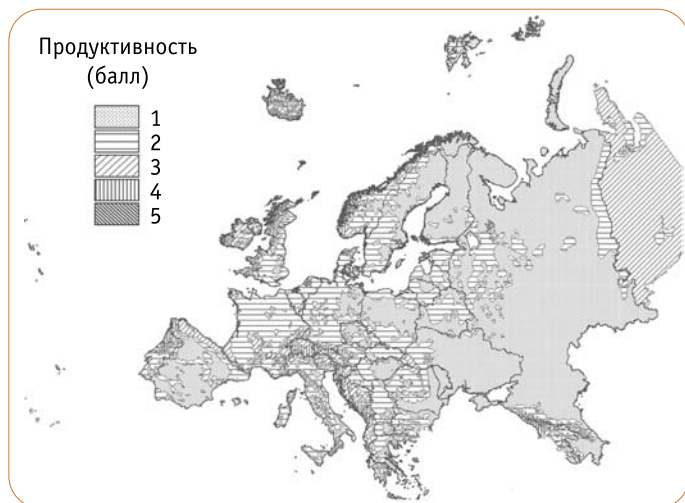
Итоговая оценка устойчивости ПТК Европы по активности косного вещества литогенной основы определялась по сумме трёх составляющих и приведена на рис. 3. При этом была использована трансформированная шкала баллов: 1 – суммарный балл <3; 2 – от

<sup>10</sup> *Наша Земля: Атлас мира (ArcAtlas: Our Earth). CD-ROM. Институт исследования окружающей среды (ESRI, USA). 1996 [http://dataplus.ru/Soft/DigMAP/AtlasOur.htm].*

прежде всего рельефом, свойствами пород, тектоникой и выражается в интенсивности денудации (эрозионного сноса) или аккумуляции вещества.

**Рис. 3.  
Карта балльной оценки подвижности косного вещества для территории Европы: баллы от 1 – наименьшая подвижность, до 5 – наибольшая способность к перемещению.**





**Рис. 4.**  
**Карта балльной оценки потенциальной биологической продуктивности растительных сообществ для территории Европы, баллы: 1 – менее 0.1 кг/м<sup>2</sup> в год; 2 – от 0.1 до 0.25; 3 – от 0.25 до 0.5; 4 – от 0.5 до 1; 5 – более 1 кг/м<sup>2</sup> в год**

3 до 6; 3 – от 6 до 9; 4 – от 9 до 12; 5 – от 12 до 15 баллов. Вполне естественно, что по подвижности косного вещества максимальные оценки приурочены к горным областям.

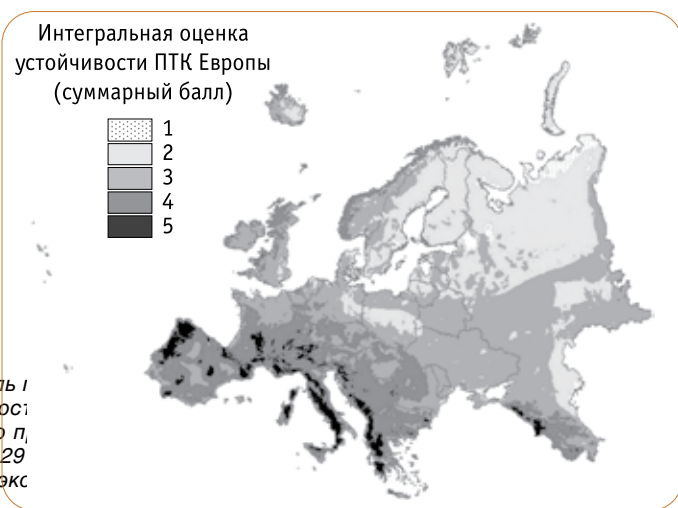
**Активность живого вещества** ландшафта связана с процессами био-генного перемещения и трансформации вещества, которая достаточно полно характеризуется величиной первичной биологической продукции. Для подготовки соответствующей карты использованы данные Г.З. Бегельмана и А.М. Тарко, а также Национального атласа<sup>11</sup> в соответствии с трансформированной 5-балльной шкалой (рис. 4).

<sup>11</sup> Бегельман Г.З., Тарко А.М. Модель 1 го цикла углерода с высоким пространственным разрешением. Сообщения по математике. М.: ВЦ РАН, 1999, 29 национальный атлас, т. 2. Природа и эко ПКО "Картография" 2007, 495 с.

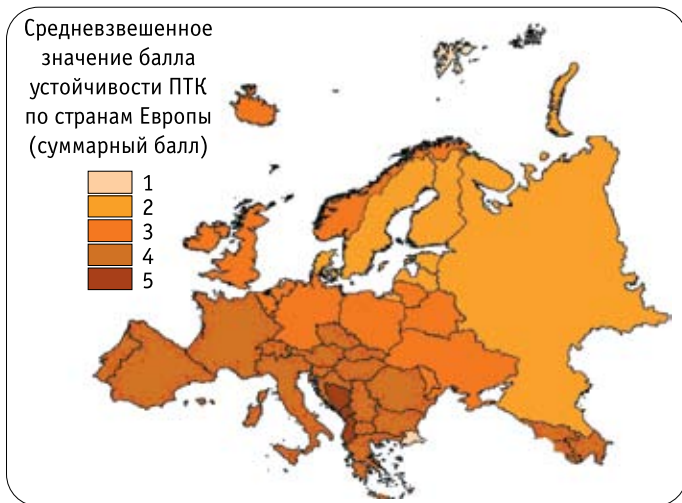
**Интегральная оценка устойчивости ПТК Европы к внешнему воздействию** получена суммированием балльных оценок основных проанализированных параметров (солнечная энергия, энергия атмосферных осадков, механического перемещения косного вещества и энергия живого вещества). Анализ проводился по 5-балльной шкале (рис. 5, баллы от 4 до 20).

Территории с низким показателем интегральной устойчивости ПТК (слабоустойчивые) занимают 44% территории Европы (север и северо-запад России, Финляндии). Среднеустойчивые ПТК занимают около 45% территории Европы (Северный Кавказ и Черноземье в России, основная часть Украины, Белоруссии, Германии, Австрии, Велико-

**Рис. 5.**  
**Карта интегральной балльной оценки устойчивости ПТК на территории Европы, суммарный балл (неустойчивые – 4–5; слабоустойчивые – 6–8; среднеустойчивые – 9–11; устойчивые – 12–14; высокоустойчивые – 15–20).**







**Рис. 6.**  
**Распределение стран Европы по степени устойчивости их ПТК (средневзвешенные показатели).**

британии). Высокая устойчивость (около 10%) характерна для ПТК Италии, юго-востока Франции, Португалии, Балканских государств, значительной части Испании. Незначительные (около 1%) по площади ПТК с максимальными значениями устойчивости находятся в Португалии, Италии, Греции, Албании, Черногории, Грузии и на Черноморском побережье России. Устойчивость ПТК Европы имеет ярко выраженное зональное распределение с возрастанием к югу, что во многом обусловлено распределением солнечной энергии. Расположение областей с максимальными оценками устойчивости на юго-западном побережье Атлантического океана, побережьях Средиземного и Чёрного морей обусловлено сочетанием наилучших климатических характеристик (достаточных количеств тепла и влаги для активного развития растительности).

С использованием разработанного нами специализированного программного приложения рассчитано средневзвешенное значение устойчивости ПТК в административных границах стран Европы и проанализировано рас-

пределение показателя устойчивости по странам Европы (рис. 6, табл. 2). Ранжирование устойчивости ПТК стран Европы проведено по пяти группам: низкий (средневзвешенный балл устойчивости ПТК составляет менее 7), ниже среднего (7.0–9.5), средний (9.6–12.0), выше среднего (12.1–14.9) и высокий (более 14.9). Страны, находящиеся на севере Атлантического побережья океана (Дания, Голландия, Фарерские острова и другие островные государства) имеют низкий потенциал устойчивости ПТК. Страны Балтии, Скандинавии, Великобритания, Ирландия, Исландия обладают потенциалом устойчивости ниже среднего. Страны, находящиеся в глубине материка (Австрия, Польша, Венгрия, Беларусь, Европейская часть России, Украина, Молдавия и другие) имеют среднюю устойчивость ПТК. Страны, располагающиеся на Средиземноморском побережье (Франция, Испания), а также страны Черноморского побережья (Грузия, Румыния, Болгария) имеют потенциал устойчивости выше среднего. Наибольшими значениями устойчивости обладают Италия, Греция, Португалия, Андорра и страны западного побережья Балкан (Черногория, Хорватия, Словения, Албания).

## Заключение

Наиболее устойчивы к антропогенному воздействию ПТК с максимальной энергетикой: они способны к скорому преодолению этого воздействия (ассимиляции или сбрасыванию излишней энергии). Для техногенно-изменённых ландшафтов оптимальны ПТК со средней энергетикой (относительно устойчивая основа и относительно низкие затраты на поддержание их функционирования).

**Таблица 2**  
**Средневзвешенные показатели**  
**устойчивости ПТК стран Европы**  
**(в порядке убывания устойчивости)**

Страна	Устойчивость (средневзвешенное значение)
Андорра	16.5
Лихтенштейн	15.8
Черногория	15.7
Албания	15.6
Босния и Герцеговина	14.9
Словения	14.9
Швейцария	14.7
Грузия	14.4
Португалия	14.4
Италия	14.3
Македония	14.2
Хорватия	14.0
Испания	13.7
Сербия	13.7
Болгария	13.4
Монако	13.4
Греция	13.4
Армения	13.3
Франция	13.2
Сан-Марино	13.1
Австрия	13.0
Венгрия	12.8
Словакия	12.6
Чехия	12.3
Люксембург	12.3
Азербайджан	12.2
Бельгия	11.8
Гибралтар	11.6
Германия	11.3
Великобритания	11.2
Молдова	11.1
Ирландия	10.7
Украина	10.5
Беларусь	10.4
Польша	10.1
Нидерланды	10.1
Литва	9.7
Норвегия	9.6
Исландия	9.5
Латвия	9.4
Эстония	9.1
Швеция	8.8
Россия (Европейская часть)	8.8
Дания	8.7
Финляндия	8.2
Мальта	8.1
Ян-Мейен	7.1
Шпицберген	6.8
Турция	6.2
Острова Джерси	5.8
Остров Мэн	5.3

Разработанная методика оценки устойчивости ПТК проиллюстрирована на территории Европы, для которой характерна тенденция возрастания степени устойчивости ПТК в направлении с севера на юг и с высотой над уровнем моря (естественно, в границах условий обитания живых организмов).

Наиболее благоприятными для использования человеком (размещение техногенных элементов, создание искусственных ПТК) являются территории со средними баллами устойчивости, которые в Европе занимают около 45% площади Европы (Северный Кавказ и Черноземье в России, основная часть Украины, Беларуси, Германии, Австрии, Великобритании). Минимально устойчивые и слабоустойчивые (44% площади) ПТК находятся на территории севера и северо-запада России, Финляндии, Турции. Высокая устойчивость ПТК (около 10% территории Европы) характерна для Италии, юго-востока Франции, Португалии, Балканских государств, значительной части Испании. Незначительные (около 1%) по площади ПТК с максимальными значениями устойчивости находятся в Португалии, Италии, Греции, Албании, Черногории, Грузии и на Черноморском побережье России.

Возможно, высокая устойчивость ПТК стала одним из факторов, обусловивших независимость многих небольших государств континентальной части Европы (Андорра, Албания, Швейцария, Грузия, Португалия, Монако). Среди других причин их непокороженности – труднодоступность, как в случае многих островных государств с невысокой устойчивостью их природных систем.

Наиболее удобными для народного хозяйства являются территории со средними показателями устойчивости. Именно среди таких крупнейших страны Европы – Германия, Англия, Россия, Украина. С другой стороны, страны с высокоустойчивыми ПТК даже при интенсивном антропогенном воздействии весьма привлекательны для туризма (Черногория, Швейцария, Италия, Хорватия, Испания, Греция, Франция и др.).