УДК 504.54 DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-437-449

**Огурцов А.Н.[1], Дмитриев В.В.[2], Разживин В.Ю.[3]**

# УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОСТРОВА САХАЛИН К ЗАГРЯЗНЕНИЮ НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

## АННОТАЦИЯ

В статье приводятся результаты исследований по интегральной оценке потенциальной устойчивости почвенного покрова о. Сахалин к загрязнению нефтяными углеводородами (НУВ) с использованием ГИС-технологии. Для сравнения потенциальной устойчивости различных почв был использован АСПИД-метод интегральной оценки. Этот метод объединяет различные критерии и обеспечивает эффективный результат оценки устойчивости почв, который выражается в виде интегральных индексов. Полученные результаты сравнивались по интегральному индексу, который является мерой устойчивости почвы.

Определен основной перечень критериев, характеризующий различные аспекты потенциальной устойчивости почвенного покрова. Для оценки используются три группы показателей, отражающих процессы аккумуляции, деструкции и удаления нефтяных углеводородов.

Были разработаны два сценария оценки: равенство групп и приоритет деструкции и удаления над аккумуляцией. По двум оценочным сценариям для 103 почвенных полигонов рассчитаны интегральные индексы с учетом значимости (весомости) отдельных критериев устойчивости почвы к загрязнению НУВ.

Использование нечисловой и неточной информации, отражающей различные источники данных, позволило при расчете интегрального индекса создавать различные оценочные сценарии и выявлять «более чувствительные» или «инвариантные» районы по отношению к нефтяному загрязнению. Реализуется возможность ранжирования территории по устойчивости почвенного покрова с выявлением «чувствительных» и «инвариантных» состояний почвенных выделов, устойчивость которых не изменяется в различных информационных ситуациях. Апробация методики интегральной оценки, выполненная на примере о. Сахалин, показала, что свойства нефтяного углеводородного загрязнения существенным образом влияют на устойчивость почв.

Предлагаемый методический подход может быть полезен для лиц, принимающих решения по вопросам, связанным с охраной окружающей среды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** почва, нефтяные углеводороды, оценка устойчивости, АСПИД, ГИС.

---

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-линия 33–35, 199178, Санкт-Петербург ВО, Россия, *e-mail:* **aogurcov@yandex.ru**

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-линия 33–35, 199178, Санкт-Петербург ВО, Россия, *e-mail:* **vasiliy-dmitriev@rambler.ru**

[3] Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. Профессора Попова, д. 2, 197376, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* **volodyar@binran.ru**

**Alexander N. Ogurtsov[1], Vasiliy V. Dmitriev[2], Vladimir Yu. Razzhivin[3]**

# RESISTANCE OF THE SOIL COVER OF THE ISLAND OF SAKHALIN TO POLLUTION BY OIL HYDROCARBONS: INTEGRATED ASSESSMENT AND GEOINFORMATION ANALYSIS

## ABSTRACT

This article discusses results of researches on the integral estimation of potential resistance of a soil cover Sakhalin to pollution by petroleum hydrocarbons (PHc) with use of GIS-technology. To compare the potential resistance of different soils, the ASPID-method of integral estimation was utilized. This method integrates various criteria and provides an efficient result of estimating the resistance of soils, which is expressed in the form of integrated indices. The obtained results were compared by the integrated index which is a measure of the resistance of a soil.

A main list of indicators that reflect to different aspects of the potential resistance of the soil cover was defined. For the assessment three indicator groups, reflecting the processes of accumulation, destruction and removal of petroleum hydrocarbons are used. The integral assessment was designed with two different scenarios: equality of groups and priority of destruction and removal over accumulation. Integrated indices were obtained for two evaluation scenarios for 103 soil polygons taking into account the significance (weight) of separate criteria of soil resistance to PHc pollution.

The use of non-numerical and inaccurate information from different data sources has allowed the calculation of the integrated index to create different evaluation scenarios and to identify "more sensitive" or "invariant" areas in relation to PHc pollution. The possibility of ranking the territory according to the stability of the soil cover with the identification of "sensitive" and "invariant" states of soil secretions, the stability of which does not change in various information situations.

The testing of an integrated assessment performed on the example of Sakhalin Island revealed that the properties of the petroleum hydrocarbon contamination have a great impact on the resistance of the soils. This is confirmed by GIS visualization and identification on the map of differences in the assessment of the resistance of soil polygons located in different parts of the island under different assessment scenarios.

The suggested methodical approach can be useful for decision-makers on issues related to environmental protection.

**KEYWORDS:** soil, petroleum hydrocarbons, estimation of resistance, ASPID, GIS.

## ВВЕДЕНИЕ

Сахалинская область относится к числу важнейших районов добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья. Технологические процессы в нефтегазовом комплексе неизбежно сопровождаются трансформацией окружающей среды и поступлением загрязняющих веществ в компоненты ландшафтов, что обусловливает актуальность исследований по оценке загрязнения окружающей среды нефтяными углеводородами

[1] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, VO, Russia, *e-mail:* **aogurcov@yandex.ru**
[2] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, VO, Russia, *e-mail:* **vasiliy-dmitriev@rambler.ru**
[3] Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Professor Popov, 2, 197376, St. Petersburg str., Russia, *e-mail:* **volodyar@binran.ru**

(НУВ). Экологические последствия загрязнения затрагивают все компоненты ландшафта, но в первую очередь отражаются на почвенном покрове. В этой связи на первый план выносятся вопросы оценки потенциальной устойчивости почв, а также свойств и компонентного состава НУВ, которые определяют глубину и масштабы отрицательных эффектов воздействия НУВ. А поскольку покомпонентная оценка устойчивости почвы, как эмерджентного свойства «биокосной природной системы», не дает целостной картины геохимических трансформаций, то данная задача может быть решена в рамках интегрального подхода.

Следует отметить, что к настоящему времени накоплен достаточно большой объем информации, как практического, так и теоретического плана, отражающий различные аспекты устойчивости почвы к загрязнению НУВ. Как правило, совокупность факторов, способствующих сохранению относительного постоянства почвенных химических характеристик, разбивается на три смысловые группы.

К первой группе относят факторы, влияющие на процессы деструкции НУВ. Факторы, способствующие выносу НУВ за пределы почвенного контура, включены во вторую группу. В третью группу входят факторы, отражающие условия аккумуляции НУВ. Факторы второй и третьей группы могут быть сведены в одну группу, отвечающую за рассеяния НУВ. В дальнейшем по сочетанию качественных оценок групп факторов проводится сравнительное ранжирование территории по устойчивости почв к загрязнению НУВ. В частности, такие оценки и сравнительная характеристика почвенного покрова о. Сахалин по устойчивости к загрязнению НУВ приводятся в справочнике [Lodolo и др., 2003]. Согласно справочнику, почвы большей части севера Сахалина характеризуются низкой скоростью разложения углеводородов, умеренным и сильным их рассеянием, а горные и предгорные территории Южного Сахалина относят к районам с высокой скоростью разложения и сильным рассеянием углеводородов в почвенном покрове. В то же время трудно не согласиться с исследователями [Gennadiev, Pikovskii, 2007], которые отмечают качественный характер таких оценок, дающих лишь относительную характеристику устойчивости почвы в пределах рассматриваемой территории и выбранного масштаба. Несомненно, что при другом масштабе исследований внутри выбранных территорий оценки устойчивости почвы могут и будут отличаться как в качественном, так и в количественном отношении.

В настоящей статье приводятся результаты интегральной оценки потенциальной устойчивости почвенного покрова о. Сахалин к загрязнению нефтяными углеводородами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве территории исследования была выбрана Сахалинская область (в границах о. Сахалин). Почвенные полигоны электронной версии Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР) [Единый государственный реестр..., 2014] легли в основу выбора операционных территориальных единиц (ОТЕ) оценки и построения карт устойчивости почвенного покрова. В электронной базе ЕГРПР содержится описание типов почв и почвенных комплексов по 103 почвенным полигонам. Исходная картографическая информация для оценки устойчивости привязывалась и рассчитывалась по контурам почвенных полигонов. В качестве источника картографической информации были использованы материалы Национального атласа почв Российской Федерации [Национальный атлас…, 2011] и Атласа Сахалинской области [Атлас Сахалинской области, 1967]. Выбор объектов оценки и картографирования, как известно, зависит от масштаба исследования. Геометрическая часть ЕГРПР представляет собой оцифрованные контуры почвенной карты масштаба 1 : 2500 000. Этому же масштабу соответствует информация из Национального атласа почв РФ. Показанные на карте контуры почв (полигонов) могут

являться неоднородными и содержать от 1 до 4 типов почв. Контуры конкретных типов почв, их свойства и устойчивость могут быть уточнены и картированы по результатам исследований более крупного масштаба. В то же время, неоднородности почвенных полигонов и отдельные почвенные характеристики косвенно могут быть учтены через показатель почвенной композиции полигона, который выражен долей (%) конкретной почвы в отдельном полигоне. В частности, авторами [Дмитриев и др., 2017] при интегральной оценке аккумуляции НУВ глеевый барьер задавался через долю (%) глеевой почвы в отдельном полигоне. Источником климатических данных дополнительно к картам служил табличный материал справочника по климату СССР [Научно-прикладной справочник…, 1990].

Другая часть информации по почвенным полигонам связана с атрибутивной базой данных ЕГРПР, отражающей характеристики и параметры различных типов почв и физико-географические условия почвообразования.

Пространственные операции с исходными данными проводились на базе ГИС Mapinfo. Непосредственно в среде ГИС с использованием алгоритмов интерполяции двухмерных функций в узлах сеточной области дискретностью 1901 х 523 и шагом 500 м проведен расчет и построение тематических поверхностей. Полученные значения критериев в узлах сетки привязывались к контурам почвенных полигонов. В систему почвенных контуров пересчитывались: годовая сумма температур поверхности почвы, превышающих 10 °С, количество осадков за теплый период, продолжительность безморозного периода на поверхности почвы, годовое количество осадков, расчлененность рельефа и уклон поверхности. В последующем осуществлялся экспорт значений критериев из ГИС через обменный формат MS Excel в систему интегральной оценки GEO-expert (рис. 1).

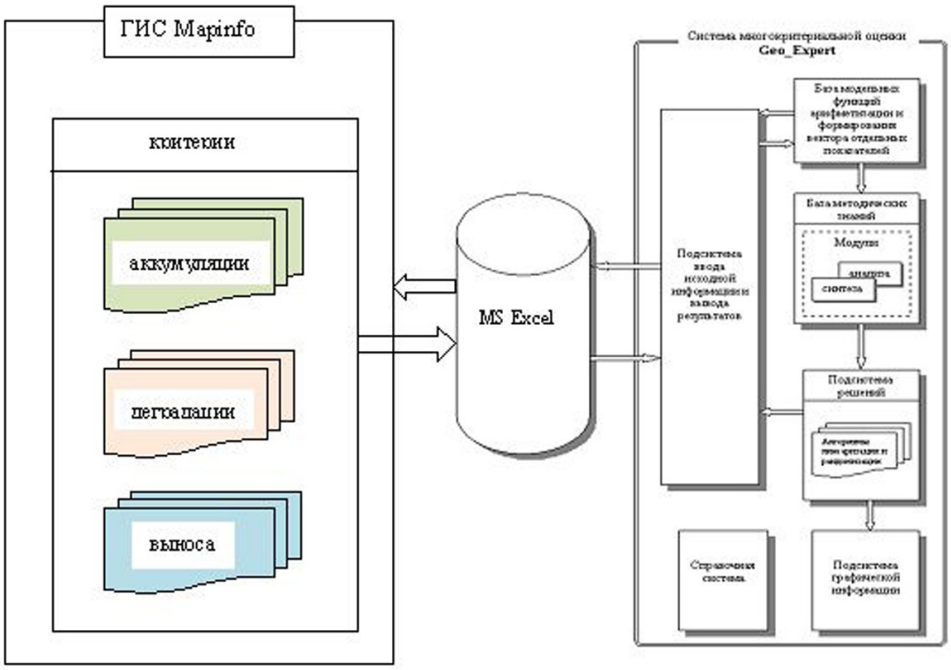


Рис. 1. Блок-схема методики построения карт интегральной оценки устойчивости почв
Fig. 1. Flowchart of the methodologyfor constructing maps of integral assessment of soil resistance

Анализ и систематизация исходной информации позволили на основании опыта прошлых лет [Огурцов и др., 2007; Машкин и др., 2013] и привлечения знаний и мнений других исследователей [Gennadiev, Pikovskii, 2007; Zamotaev et al., 2015] выделить три группы критериев, характеризующих различные аспекты устойчивости.

В первую группу были включены критерии, характеризующие способность почв закреплять нефтяные углеводороды, по которым нами ранее были рассчитаны индексы аккумуляции НУВ и проведена интегральная оценка [Дмитриев и др., 2017].

Во вторую группу отобраны критерии, способствующие физико-химической и биологической активности разложения НУВ:

– окислительно-восстановительный режим;
– годовая сумма температур поверхности почвы, превышающих 10 °С;
– количество осадков за теплый период;
– продолжительность безморозного периода на поверхности почвы.

В третью группу критериев вошли факторы, определяющие вынос и рассеивание НУВ в латеральном и радиальном направлениях:

– годовое количество осадков;
– тип водного режима;
– расчлененность рельефа;
– уклон поверхности;
– положение в ландшафте.

Расчеты интегрального показателя устойчивости осуществлялись в системе Geo_expertпо методике, предложенной и опубликованной ранее авторами [Огурцов и др., 2007; Машкин и др., 2013; Дмитриев и др., 2017].

Эта система представляет собой компьютерную реализацию Excel версии АСПИД-методики анализа и синтеза показателей [Хованов, 1996].

Функционал системы позволяет:

– проводить интегральную оценку потенциальной устойчивости почвы к загрязнению НУВ на основе аддитивной свертки отдельных показателей в интегральный критерий (индекс);
– решать задачи по формализации и числовому представлению нечисловой, неточной и неполной информации, отражающей наши знания по различным аспектам оценки устойчивости почвы и свойствам НУВ;
– проводить организацию иерархической системы оценивания устойчивости почвы.
– Модель расчета интегрального индекса для *j-го*почвенного полигона может быть представлена как:

$$Q^{(j)} = q_1^{(j)} \times w_1 + q_z^{(j)} \times w_z + \cdots + q_1^{(j)} \times w_i, \tag{1}$$

где: $Q^{(j)}$– интегральный индекс устойчивости *j-го* почвенного полигона; $q^{(j)}$– отдельный показатель, характеризующий устойчивость *j-го* почвенного полигона с точки зрения величины *i-го* критерия; $w_i$ – весовой коэффициент *i-го* критерия.

Отдельные показатели рассчитываются по нормирующим функциям вида:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0 \quad \text{при } x_i \le x_{\min} \\ ((x_i - x_{\min})/(x_{\max} - x_{\min}))^n \quad \text{при } x_{\min} \le x_i \le x_{\max}; \\ 1 \quad \text{при } x_i \ge x_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

и

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1 \quad \text{при } x_i \le x_{\min} \\ ((x_{\max} - x_i)/(x_{\max} - x_{\min}))^n \quad \text{при } x_{\min} \le x_i \le x_{\max}. \\ 0 \quad \text{при } x_i \ge x_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

Выбор того или иного вида функциональной связи зависит от поведения функции. В частности, если при возрастании характеристики $x_i$ от значения $x_{min}$ до значения $x_{max}$ оценка $q_i$ возрастала от 0 до 1, то использовалась функция (2). Если же оценка $q_i$ убывала от 1 до 0 при возрастании характеристики $x_i$ от значения $x_{min}$ до значения $x_{max}$, то использовалась функция (3). Необходимо отметить, что значения отдельных показателей, близкие к единице, свидетельствуют о высокой устойчивости, а близкие к нулю – о низкой.

Процесс построения интегральных показателей состоял из двух последовательных уровней обобщения имеющейся информации.

На первом иерархическом уровне по исходным критериям, указанным выше, рассчитывались интегральные индексы групп (индекс деградации, индекс выноса). Ранее в работе [Дмитриев и др., 2017] нами приведены расчеты и оценки индекса аккумуляции НУВ.

На втором иерархическом уровне рассчитывался интегральный индекс устойчивости почвы. В качестве исходной информации для расчета по формуле (1) на этом уровне служили индексы групп (первого уровня).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения вычислений интегральных индексов по группам на первом иерархическом уровне нами получены исходные значения для расчета интегрального индекса устойчивости по каждому из 103 почвенных полигонов.

На втором уровне, после проведения вычислений по формулам 2 и 3 на первом шаге, нами была сформирована система отдельных показателей (рис. 2, табл. 1), описывающих оценки устойчивости почвы с точки зрения трех отдельных критериев (индексов).

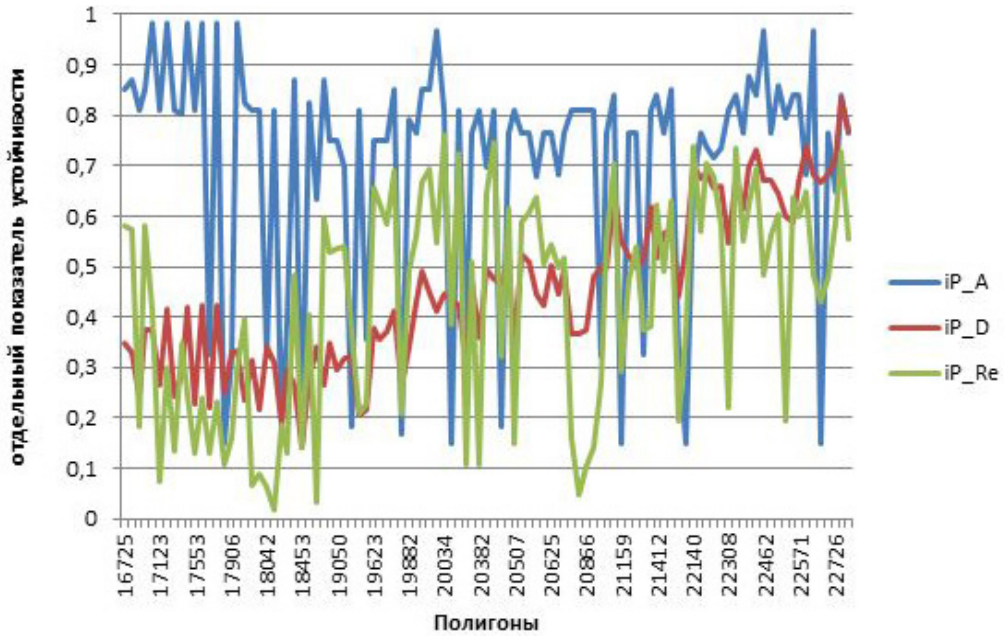


Рис. 2. Система отдельных показателей устойчивости почвы к загрязнению НУВ второго уровня
Fig. 2. System of individual indicators of soil resistance to pollution of the second level

Система отдельных показателей устойчивости почвы к загрязнению НУВ второго уровня включает индекс аккумуляции (iP_A), индекс деградации (iP_D) и миграционный индекс (iP_Re).

Таблица 1. Отдельные показатели устойчивости почвы к загрязнению второго уровня
Table 1. Individual indicators of soil resistance to pollution of the second level

| Номер полигона | Индексы устойчивости | | | Номер полигона | Индексы устойчивости | | | Номер полигона | Индексы устойчивости | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | iP_A | iP_D | iP_Re | | iP_A | iP_D | iP_Re | | iP_A | iP_D | iP_Re |
| **16725** | 0,852 | 0,349 | 0,582 | **19623** | 0,749 | 0,379 | 0,656 | **21159** | 0,149 | 0,549 | 0,292 |
| **16801** | 0,871 | 0,329 | 0,574 | **19627** | 0,749 | 0,355 | 0,624 | **21163** | 0,765 | 0,521 | 0,473 |
| **16951** | 0,809 | 0,243 | 0,183 | **19636** | 0,749 | 0,372 | 0,584 | **21181** | 0,765 | 0,500 | 0,539 |
| **16972** | 0,852 | 0,375 | 0,581 | **19714** | 0,852 | 0,412 | 0,690 | **21318** | 0,325 | 0,514 | 0,374 |
| **17112** | 0,982 | 0,374 | 0,410 | **19848** | 0,169 | 0,263 | 0,210 | **21338** | 0,809 | 0,619 | 0,382 |
| **17123** | 0,809 | 0,267 | 0,075 | **19882** | 0,792 | 0,341 | 0,492 | **21412** | 0,839 | 0,518 | 0,623 |
| **17254** | 0,982 | 0,414 | 0,298 | **19908** | 0,765 | 0,430 | 0,563 | **21647** | 0,765 | 0,564 | 0,489 |
| **17425** | 0,809 | 0,242 | 0,135 | **19946** | 0,852 | 0,490 | 0,668 | **21649** | 0,852 | 0,572 | 0,629 |
| **17447** | 0,801 | 0,288 | 0,347 | **19953** | 0,852 | 0,449 | 0,693 | **21798** | 0,324 | 0,442 | 0,195 |
| **17470** | 0,982 | 0,419 | 0,245 | **20005** | 0,967 | 0,412 | 0,548 | **21920** | 0,150 | 0,538 | 0,377 |
| **17553** | 0,809 | 0,229 | 0,129 | **20034** | 0,808 | 0,446 | 0,761 | **22140** | 0,664 | 0,702 | 0,740 |
| **17648** | 0,982 | 0,424 | 0,238 | **20114** | 0,150 | 0,435 | 0,385 | **22177** | 0,765 | 0,675 | 0,569 |
| **17696** | 0,324 | 0,220 | 0,130 | **20306** | 0,808 | 0,422 | 0,725 | **22204** | 0,739 | 0,685 | 0,704 |
| **17776** | 0,982 | 0,423 | 0,233 | **20331** | 0,341 | 0,309 | 0,109 | **22209** | 0,716 | 0,656 | 0,677 |
| **17862** | 0,149 | 0,250 | 0,107 | **20358** | 0,765 | 0,471 | 0,510 | **22301** | 0,735 | 0,660 | 0,581 |
| **17906** | 0,321 | 0,328 | 0,161 | **20382** | 0,809 | 0,360 | 0,108 | **22308** | 0,809 | 0,546 | 0,222 |
| **17913** | 0,982 | 0,333 | 0,295 | **20398** | 0,696 | 0,496 | 0,646 | **22319** | 0,839 | 0,673 | 0,734 |
| **17948** | 0,826 | 0,236 | 0,398 | **20419** | 0,808 | 0,475 | 0,745 | **22380** | 0,765 | 0,615 | 0,550 |
| **17998** | 0,809 | 0,314 | 0,068 | **20425** | 0,181 | 0,466 | 0,321 | **22431** | 0,876 | 0,696 | 0,621 |
| **18038** | 0,809 | 0,215 | 0,088 | **20468** | 0,765 | 0,518 | 0,615 | **22432** | 0,839 | 0,732 | 0,693 |
| **18042** | 0,321 | 0,340 | 0,064 | **20507** | 0,809 | 0,337 | 0,150 | **22462** | 0,967 | 0,670 | 0,482 |
| **18119** | 0,809 | 0,310 | 0,018 | **20520** | 0,765 | 0,523 | 0,587 | **22502** | 0,765 | 0,669 | 0,561 |
| **18215** | 0,184 | 0,187 | 0,187 | **20535** | 0,765 | 0,508 | 0,608 | **22513** | 0,857 | 0,643 | 0,603 |
| **18288** | 0,392 | 0,294 | 0,132 | **20537** | 0,677 | 0,447 | 0,637 | **22526** | 0,794 | 0,598 | 0,194 |
| **18439** | 0,871 | 0,264 | 0,483 | **20563** | 0,765 | 0,423 | 0,506 | **22557** | 0,839 | 0,589 | 0,637 |
| **18453** | 0,149 | 0,142 | 0,142 | **20625** | 0,765 | 0,503 | 0,544 | **22571** | 0,839 | 0,666 | 0,598 |
| **18460** | 0,826 | 0,280 | 0,405 | **20708** | 0,682 | 0,446 | 0,499 | **22594** | 0,682 | 0,740 | 0,649 |
| **18622** | 0,634 | 0,342 | 0,032 | **20718** | 0,765 | 0,494 | 0,518 | **22595** | 0,967 | 0,683 | 0,484 |
| **18981** | 0,871 | 0,267 | 0,594 | **20751** | 0,809 | 0,368 | 0,162 | **22601** | 0,150 | 0,666 | 0,430 |
| **19014** | 0,749 | 0,348 | 0,529 | **20800** | 0,809 | 0,367 | 0,048 | **22713** | 0,765 | 0,681 | 0,479 |
| **19050** | 0,749 | 0,297 | 0,536 | **20866** | 0,809 | 0,373 | 0,105 | **22726** | 0,648 | 0,717 | 0,587 |
| **19106** | 0,696 | 0,318 | 0,538 | **20959** | 0,809 | 0,481 | 0,141 | **22772** | 0,839 | 0,831 | 0,727 |
| **19125** | 0,181 | 0,321 | 0,372 | **20963** | 0,322 | 0,498 | 0,269 | **22834** | 0,765 | 0,769 | 0,554 |
| **19154** | 0,809 | 0,206 | 0,210 | **21028** | 0,765 | 0,499 | 0,551 | | | | |
| **19285** | 0,357 | 0,216 | 0,227 | **21040** | 0,839 | 0,643 | 0,703 | | | | |

Анализ данных рис. 2 и табл. 1 показывает, что при оценке почв уже по трем критериям мы сталкиваемся с проблемой их несравнимости в целом, когда по одним показателям один почвенный полигон более устойчив, чем другой, а по другим менее устойчив. Еще одним проявлением такой несравнимости является то, что по разным критериям «более устойчивыми» и «менее устойчивыми» с точки зрения устойчивости к загрязнению НУВ являются почвы разных полигонов. В частности, по индексу аккумуляции (iP_A) наибольшая устойчивость свойственна подзолам иллювиально-железистых полигонов 17112, 17254, 17470, 17648, 17776, 17913, по индексу деградации НУВ (iP_D) – буро-таежным (буроземы грубогумусовые) почвам полигона 22772, а по миграционному индексу (iP_Re) – подбурам сухоторфянистым полигона 20034. Более того, имеет место ситуация, когда почвы одного и того же полигона могут быть «наилучшими» по одним критериям и «наихудшими» – по другим. Например, дерново-глеевые и перегнойно-глеевые почвы полигона 22601 имеют большую устойчивость по индексу деградации, чем по аккумуляционному и миграционному индексам.

Такое проявление несравнимости в целом характерно для сложных систем. Ситуация с несравнимостью почвенных полигонов по степени устойчивости разрешается на следующем шаге путем расчета интегрального индекса устойчивости по формуле (1). При расчете интегрального индекса значимость (весомость) отдельных критериев считалась равной, т. е. iP_A = iP_D = iP_Re.

На следующем шаге для визуализации и пространственного анализа массив интегрального индекса, по которому составляется тематическая карта, в виде файлов Excel импортируется в ГИС Mapinfo с последующим объединением табличной и пространственной информации по номеру почвенного полигона.

В ходе составления тематической карты (рис. 3, а) была построена оценочная шкала. В нашем случае разбиение оценочной шкалы на градации осуществлялось методом естественных групп с выделением границ диапазонов значений интегрального индекса устойчивости. Количество градаций шкалы (классов устойчивости) задавалось равным 5:

наиболее неустойчивые (0,00–0,35);
неустойчивые (0,35–0,47);
относительно устойчивые (0,47–0,56);
устойчивые (0,56–0,64);
наиболее устойчивые (0,64–1,00).

Необходимость учета множества факторов обусловливает многовариантность возможных сценариев оценки потенциальной устойчивости почв к загрязнению НУВ, отражающих не только природные особенности территории, но и свойства углеводородного загрязнения. Согласно [Полезные ископаемые…, 2001] на сахалинских месторождениях НУВ преобладают запасы легких, маловязких, малосернистых и малопарафинистых нефтей. Как известно, легкие фракции нефтепродуктов разлагаются, испаряются и рассеиваются уже в первые недели и месяцы пребывания в почве [Капелькина, 2014; Околелова и др., 2015]. Эта информация дала авторам статьи основание при расчете весовых коэффициентов для групп (второй уровень свертки) отнести факторы деградации и выноса НУВ к числу более значимых критериев, чем факторы аккумуляции. Поэтому весовые коэффициенты для групп рассчитывались на основе нечисловой информации согласно условию: iP_D>iP_Re>iP_A.

Оценки весовых коэффициентов групп критериев приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка весовых коэффициентов
Table 2. The values of the weight coefficients

| Группы критериев оценки | Весовые коэффициенты |
|---|---|
| iP_A | 0,08 ± 0,08 |
| iP_D | 0,64 ± 0,14 |
| iP_Re | 0,28 ± 0,10 |

Результаты расчетов интегрального индекса по этому сценарию и оценка устойчивости почвы представлены на рис. 3, б.

Пространственный анализ карт (рис. 3, а, б) и сопоставление двух расчетных сценариев оценки устойчивости свидетельствует о существенном их различии. Согласно представленным на рис. 3, а результатам, на территории о. Сахалин преобладают «относительно устойчивые» – «устойчивые» – «наиболее устойчивые» почвы. Среди них последние занимают 30 % полигонов (от числа полигонов). Лишь почвы 34 % полигонов можно отнести к категории «неустойчивых» – «наиболее неустойчивых».

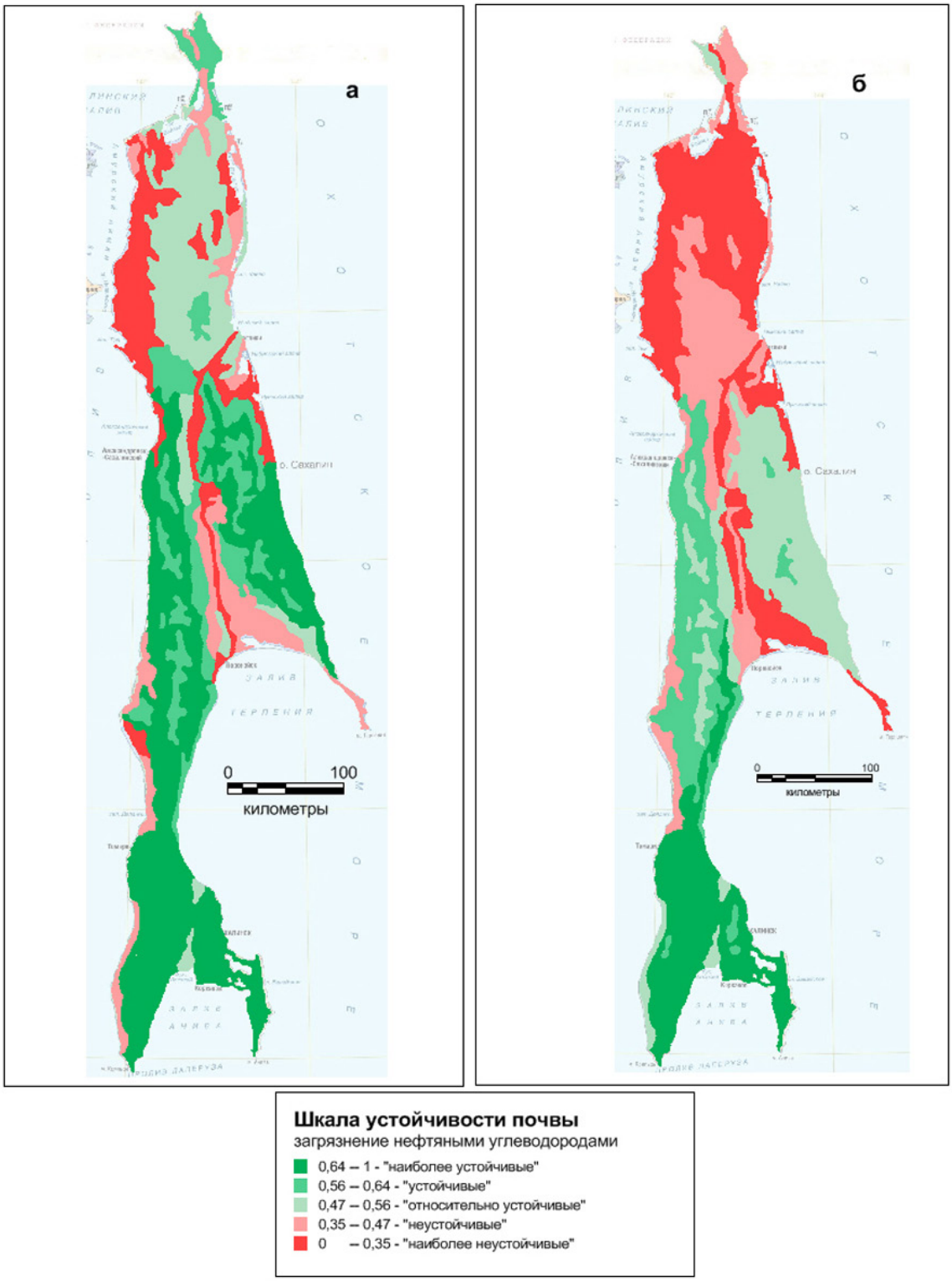


Рис. 3. Районирование почвенного покрова о. Сахалин
по устойчивости к загрязнению нефтяными углеводородами:
а – равенство «весов» учета групп факторов (сценарий 1); б – сценарий 2, учитывающий свойства НУВ

Fig. 3. Zoning of the Sakhalin Island soil cover for resistance
to petroleum hydrocarbon contamination:
a – equality of groups of factors (scenario 1); b – Scenario 2 that takes into account the properties of PHc

Иная ситуация складывается, когда в расчете учитываются свойства НУВ (рис. 3, б). Здесь уже процент почв ниже среднего, относительно устойчивого уровня, с оценкой «неустойчивые» – «наиболее неустойчивые» достигает 50 %. В наибольшей степени свойства НУВ отразились на «устойчивых» и «наиболее устойчивых» почвенных полигонах. Их количество уменьшилось на 44 %. Менее всего свойства НУВ затронули полигоны «относительно устойчивых» почв. Однако, если по первому сценарию к этой категории устойчивости в основном относятся подзолы северо-сахалинской низменности, то по второму сценарию область «относительно устойчивых» почв сместилась к юго-востоку в район распространения буроземов. Необходимо отметить, что в разных частях острова существуют обширные зоны, где превалируют низкие или высокие оценки устойчивости. В частности, в северной части острова почвенные полигоны с наиболее низким уровнем устойчивости к загрязнению НУВ отмечаются на северо-сахалинской низменности. Если в первом варианте расчета (рис. 3, а) они лишь прилегают к западному побережью острова – это в основном торфяные болотные верховые, торфяно- и торфянисто-подзолисто-глеевые почвы, а также подзолы глеевые торфянистые и торфяные, преимущественно иллювиально-гумусовые и торфянисто- и торфяно-глеевые болотные. Кроме того, наиболее низкий уровень устойчивости отмечен на отдельных участках распространения торфянисто- и торфяно-глеевых болотных, торфяно- и торфянисто-подзолисто-глеевых почв и торфянисто- и торфяно-глеевых болотных почв в центральной и восточной частях низменности. По второму сценарию (рис. 3, б) наиболее низкие значения устойчивости захватывают область распространения подзолов (полигоны 17447 и 19948) и торфяных болотных верховых почв по их периферии. Полигоны с наиболее устойчивыми к загрязнению почвами в основном расположены в южной части острова в районе распространения буроземов.

Наряду с отмеченными изменениями наблюдается инвариантное состояние ряда почвенных полигонов, у которых остается неизменным уровень устойчивости к загрязнению НУВ в обоих расчетных сценариях. Действительно, согласно представленным картам видно, что торфяные болотные верховые, торфяно- и торфянисто-подзолисто-глеевые почвы полигонов 18622 и 18288 остаются в состоянии наибольшей неустойчивости, как при первом, так и при втором сценарии. Также в целом мы сталкиваемся с инвариантной ситуацией в южной части острова, в которой буроземы большей части полигонов сохраняют состояние наибольшей устойчивости при учете свойств углеводородного загрязнения по разным сценариям.

## ВЫВОДЫ

Проведенные на базе АСПИД-метода и ГИС-технологии оценочные исследования по интегральной оценке позволили оценить устойчивость почвы к загрязнению НУВ и провести пространственный анализ устойчивости с учетом региональных особенностей территории острова Сахалин и свойств нефтяных углеводородов. По результатам интегральной оценки и пространственного анализа можно сделать следующие выводы:

– интегральный индекс, рассчитанный по АСПИД-методике с учетом значимости (весомости) отдельных критериев, можно использовать в качестве критерия устойчивости почвы к загрязнению НУВ;

– система отдельных критериев формируется с учетом почвенных свойств и почвообразующих факторов, а также свойств и состава углеводородного загрязнения;

– использование нечисловой и неточной информации, отражающей различные источники данных, позволяет при расчете интегрального индекса создавать различные оценочные сценарии и выявлять «более чувствительные» или «инвариантные» районы по отношению к воздействию;

– интеграция АСПИД-методики, с одной стороны, и геоинформационных систем, с другой, позволяет получать разноаспектную информацию по устойчивости, привязанную к почвенным контурам;

– реализуется возможность проводить ранжирование территории по устойчивости почвенного покрова с выявлением инвариантных состояний почвенных выделов, устойчивость которых не изменяется в различных информационных ситуациях;

– апробация методики интегральной оценки, выполненная на примере о. Сахалин, показала, что свойства нефтяного углеводородного загрязнения существенным образом влияют на устойчивость почв. Это подтверждается визуализацией и выявлением на карте значительных отличий в оценке устойчивости почвенных полигонов, расположенных в разных районах острова.

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Авторы выражают признательность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за поддержку исследований по оценке устойчивости в рамках выполнения гранта РФФИ № 16-05-00715-а, а также Институту наук о Земле СПбГУ за помощь в организации работ.

**ACKNOWLEDGMENTS**

The authors are grateful to the Russian Foundation of Basic Research for supporting the studies on sustainability assessment within the framework of the RFBR grant No 16-05-00715-a, as well as to the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for assistance in organizing the works.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Сахалинской области / Под ред. Г.В. Комсомольского, И.М. Сирык. Изд. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. М., 1967. 135 с.
2. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н., Разживин В.Ю.* Интегральная оценка и геопространственный анализ аккумуляции нефтяных углеводородов в почвенном покрове острова Сахалин. Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2017. V. 3(23). P. 143–154. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-143-154.
3. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
4. *Капелькина Л.П.* Особенности установления региональных нормативов допустимого остаточного содержания нефти в почвах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 3 (15). С. 102–107.
5. *Машкин Ю.Л., Орлов С.В., Разживин В.Ю., Огурцов А.Н.* Интегральная оценка и пространственный анализ потенциальной устойчивости почвенного покрова большеземельской тундры к загрязнению нефтяными углеводородами // Инженерные изыскания. 2013. № 13. С. 60–67.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 34. Сахалинская область / Под ред. Е.П. Борисенкова. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 351 с.
7. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. чл.-корр. РАН С.А. Шобы. М.: АСТРЕЛЬ, 2011. 632 с.
8. *Огурцов А.Н., Разживин В.Ю., Пигольцина Г.Б., Хованов Н.В.* Геоинформационный анализ и синтез показателей устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами при информационном дефиците // ИнтерКарто/ИнтерГИС-13: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы Междунар. конф.

Ханты-Мансийск – Йеллоунайф, 12–24 августа 2007 г. Ханты-Мансийск: Изд-во Полиграфист, 2007. Т. 1. С. 189–196.
9. Особенности накопления и трансформации нефтепродуктов в почвах: монография / А.А. Околелова, В.Ф. Желтобрюхов, Г.С. Егорова, Н.Г. Кастерина. Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2015. 104 с.
10. Полезные ископаемые Сахалинской области / Под ред. А.М. Меренкова. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное изд-во, 2001. 155 с.
11. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 204 с.
12. *Lodolo A., Гречищева Н.Ю., Мещеряков С.В., Рыбальский Н.Г., Снакин В.В., Барсов А.Р., Кулындышев В.А.* Технологии восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Справочник. М.: РЭФИА, НИА-Природа, 2003. 258 с.
13. *Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I.* The maps of soil tolerance toward pollution with oil products and polycyclic aromatic hydrocarbons: methodological aspects // Eurasian Soil Science. 2007. T. 40, No 1. P. 70–81.
14. *Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V., Nikonova A.N.* Chemical Contamination and Transformation of Soils in Hydrocarbon Production Regions, Eurasian Soil Science. 2015. V. 48, No 12. P. 1370–1382.

## REFERENCES

1. *Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N., Razzhivin V.Y.* Integrated assessment and geospatial analysis of accumulation of petroleum hydrocarbons in the soil cover of Sakhalin island. *Proceedings of the International conference* "*InterCarto/InterGIS*". 2017. V. 23 (3). P. 143–154 (in Russian). DOI:10.24057/2414-9179-2017-3-23-143-154.
2. *Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I.* The maps of soil tolerance toward pollution with oil products and polycyclic aromatic hydrocarbons: methodological aspects. Eurasian Soil Science. 2007. T. 40, No 1. P. 70–81.
3. *Hovanov N.V.* Analysis and synthesis of indicators at information deficiency SPb. 1996. 196 p. (in Russian).
4. *Kapelkina L.P.* Specific features of establishing regional standards for the permissible residual oil content in soils. Naukaitehnologii truboprovodnogo transporta nefti I nefteproduktov. 2014. No 3 (15). P. 102–107 (in Russian).
5. *Lodolo A., Grechischeva N.Yu., Meshcheryakov S.V., Rybalsky N.G., Snakin V.V., Barsov A.R., Kulyndyshev V.A.* Technologies for the restoration of soils contaminated with oil and oil products. Spravochnik. M.: RJeFIA, NIA-Priroda, 2003. 258 p. (in Russian).
6. *Mashkin Ju.L., Orlov S.V., Razzhivin V.Ju., Ogurtsov A.N.* Integrated assessment and spatial analysis of potential resistance of a soil cover of Bolshezemelskaya Tundra to pollution by oil hydrocarbons. Inzhenernye izyskanija. 2013. No 13. P. 60–67 (in Russian).
7. Minerals of the Sakhalin region / Pod red. A.M. Merenkova. Juzhno-Sahalinsk: Sahalinskoe knizhnoe izdatel'stvo, 2001. 155 p. (in Russian).
8. *Ogurtsov A.N., Razzhivin V.Ju., Pigol'cina G.B., Hovanov N.V.* Geoinformation analysis and synthesis of indicators of soil cover resistance to pollution by petroleum hydrocarbons with information deficit. InterCarto-InterGIS 13: ustojchivoe razvitie territorij: teorija GIS I prakticheskij opyt. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii Hanty-Mansijsk – Jellounajf, 12–24 august 2007. Hanty-Mansijsk: Izd-vo Poligrafist, 2007. T. 1. P. 189–196 (in Russian).
9. *Okolelova A.A., Zheltobryukhov V.F., Egorova G.S., Kasterina N.G.* Features of accumulation and transformation of petroleum products in soils: monograph. Volgograd: FGBOU VPO Volgogradskij GAU, 2015. 104 p. (in Russian).

10. Scientific-applied climate guide of the USSR. Series 3. Multi-year data. Part of the 1–6. Issue 34. Sakhalin Oblast. Pod red. E.P. Borisenkova. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 351 p. (in Russian).
11. The atlas of the Sakhalin region / Edited by G.V. Komsomol'skiy, I.M. Siryk. Izd. Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR. M., 1967. 135 p.
12. The Soil Atlas of the Russian Federation / Pod red. chl.-korr. RAN S.A. Shoby. M.: ASTREL', 2011. 632 p. (in Russian).
13. Unified state register of soil resources of Russia. Version 1.0. Kollektivnaja monografija. M.: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva Rossel'hozakademii, 2014. 768 p. (in Russian).
14. *Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V., Nikonova A.N.* Chemical Contamination and Transformation of Soils in Hydrocarbon Production Regions, Eurasian Soil Science. 2015. V. 48, No 12. P. 1370–1382.