ГЕОГРАФИЯ

УДК 550.424

А. Ю. Опекунов, М. Г. Опекунова

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЛАНДШАФТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА

Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

В статье изложен подход к интегральной оценке интегральной загрязнения ландшафта на основе функции желательности Харрингтона. В качестве обобщенного показателя желательности предлагается использовать интегральный показатель загрязнения ландшафта — L_{TP} (*Landscape Total Pollution*), который определяется на основе результатов оценки загрязнения отдельных компонентов природно-территориальных комплексов: атмосферного воздуха, природных вод, донных осадков, почвы, растений. Среди критериев оценивания могут рассматриваться значения ПДК (ОДК, ОБУВ), а также фоновые содержания химических веществ в компонентах окружающей среды. Предложены алгоритмы расчета показателей желательности через нормированные значения содержания загрязняющих веществ. Существенным элементом преобразований является выполнение двух сверток данных для получения величины L_{TP}. Использование предлагаемого метода оценки показано на примере локального экологического мониторинга лицензионных участков нефтегазовых месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Применение интегрального показателя загрязнения ландшафта эффективно при проведении геоэкологических исследований и мониторинга окружающей среды. Библиогр. 13 назв. Ил. 2. Табл. 2.

Ключевые слова: ландшафт, загрязняющие вещества, функция желательности Харрингтона, интегральный показатель загрязнения ландшафта.

TOTAL EVALUATION OF LANDSCAPE POLLUTION USING HARRINGTON'S DESIRABILITY FUNCTION

A. Yu. Opekunov, M. G. Opekunova

St. Petersburg State Univerity, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The paper describes an approach to the integral assessment of landscape pollution based on the E. C. Harrington's desirability function. As an overall desirability an integrated landscape pollution index — L_{TP} (Landscape Total Pollution) is used, which is determined based on an evaluation of the individual pollution of environmental components: air, natural waters, sediments, soil and plants. As evaluation criteria can be considered MAC (*Maximum Allowable Concentration*) or background chemicals characteristics in the environmental components. Calculation algorithm the individual desirability using normalized concentrations of pollutants is proposed. Performance of two integrations of data to obtain values of L_{TP} is an essential element of method transformation. Using the proposed evaluation method is shown in the example of industrial environmental monitoring of licensed areas in oil and gas fields at YaNAO. Implementation of a landscape integrated pollution index is effective in the environmental research and environmental monitoring. Refs 13. Figs 2. Table 2.

Keywords: landscape, pollutants, Harrington's desirability function, integrated landscape pollution index.

Введение. Ландшафтно-геохимические исследования направлены на изучение химического состава основных компонентов природно-территориальных комплексов (ПТК): природных вод, донных осадков, почвы, растительности, атмосферного воздуха. Каждый из компонентов характеризуется своими особенностями миграции и распределения химических элементов. Однако с системных позиций все элементы включены в единый геохимический круговорот.

Особое значение ландшафтно-геохимические исследования приобрели при выполнении геоэкологической оценки состояния территорий и локальном мониторинге окружающей среды [1]. При этом исследователь сталкивается с необходимостью получения интегральных характеристик состояния ПТК. Чаще для этого применяются индексы (показатели) загрязнения отдельных компонентов ландшафта (суммарный показатель загрязнения почв, индекс загрязнения атмосферы и т. д.). Предлагаются и другие подходы. Например, использование качественной шкалы экологической опасности (загрязнения), которая обобщает показатели загрязнения отдельных компонентов ландшафта [2].

Целью настоящих исследований стала разработка интегрального показателя загрязнения ландшафта на основе оптимизации процедуры сравнения содержания химических веществ в разных компонентах ПТК. Одна из причин такого подхода — необходимость унификации способов обработки результатов локального мониторинга, который в настоящее время, в определенной мере, интегрируется в сеть государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды [3].

Методика исследований. Для реализации сформулированной выше цели были использованы свойства функции желательности Харрингтона [4], которая успешно применяется в технике [5], химии [6], медицине и других отраслях знаний при решении оптимизационных задач. Детальный анализ возможностей применения функции в экологии выполнен в работе [7], где были отмечены достоинства и недостатки при использовании ее в экологическом нормировании. В числе достоинств указаны непрерывность, монотонность и гладкость, т. е. свойства, необходимые для свертки разнородной информации. К недостаткам отнесены субъективизм (при назначении шкалы, весовых коэффициентов и т. д.) и разнородность информации, подвергающейся свертке (по скорости и направлению изменений, значимости признаков и др.).

Необходимо признать, что практически все существующие в настоящее время подходы к экологической оценке состояния окружающей среды или ее компонентов грешат субъективизмом. Они вряд ли имеют большую перспективу в экологическом нормировании (в силу отсутствия привязки к здоровью человека), но эффективны в оценке результатов геоэкологических исследований и мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды. Следовательно, если перевести проблему в плоскость унификации получаемой разными исследователями эколого-геохимической информации, то обобщенная функция желательности вполне подходит для этой роли. Вопрос о разнородности информации здесь не столь принципиален, поскольку речь идет об обработке геохимических данных — концентрации химических элементов и их соединений, вовлеченных в единый биогеохимический круговорот. В природе существует тесная взаимосвязь и взаимозависимость миграции и аккумуляции вещества между отдельными компонентами ландшафта, а ведущая роль в геохимической организации и дифференциации ландшафта принадлежит литогенному фактору. Сказанное

в равной степени относится ко всем единицам дифференциации земной поверхности, к различным таксонам ПТК.

Известно, что функция Харрингтона в какой-то степени моделирует процессы поведения отдельных подсистем внутри системы, учитывает связи и воздействия при оценке качества объекта, т. е. свойства функции желательности позволяют использовать ее для комплексной оценки состояния ландшафта как в условиях техногенного загрязнения, так и под влиянием природных факторов. В зависимости от «качества» показателя устанавливаются односторонние или двусторонние ограничения. В случае химического загрязнения улучшение ситуации происходит при однонаправленном изменении показателя, и ограничение носит односторонний характер. При отсутствии техногенного воздействия в соответствии с законом толерантности Шелфорда целесообразно использовать двусторонние ограничения.

Обратимся к алгоритму интегральной оценки загрязнения ландшафта. Линия графика функции желательности (рис. 1) задается уравнением

$$d = \exp\left[-\exp\left(-y\right)\right]. \qquad (1)$$

Ось абсцисс называется шкалой частных показателей (y), ось ординат соответствует шкале желательности d. Промежуток эффективных значений по шкале частных показателей находится в диапазоне от –2 до +5. Назначение шкалы желательности — установление соответствия между полученными результатами и оценками желательности того или иного показателя для системы. При использовании функции принято [5] деление шкалы желательности на пять категорий: (0,8–1,0) — очень хорошо, (0,63–0,8) — хорошо, (0,37–0,63) — удовлетворительно, (0,2–0,37) — плохо, (< 0,2) — очень плохо.

Для построения обобщенной функции желательности D необходимо преобразовать измеренные значения критериев y' в безразмерную шкалу d. Для этого первоначально следует значения y' перевести в безразмерные критерии y по шкале абсцисс. Здесь могут быть использованы линейные и нелинейные преобразования [6].

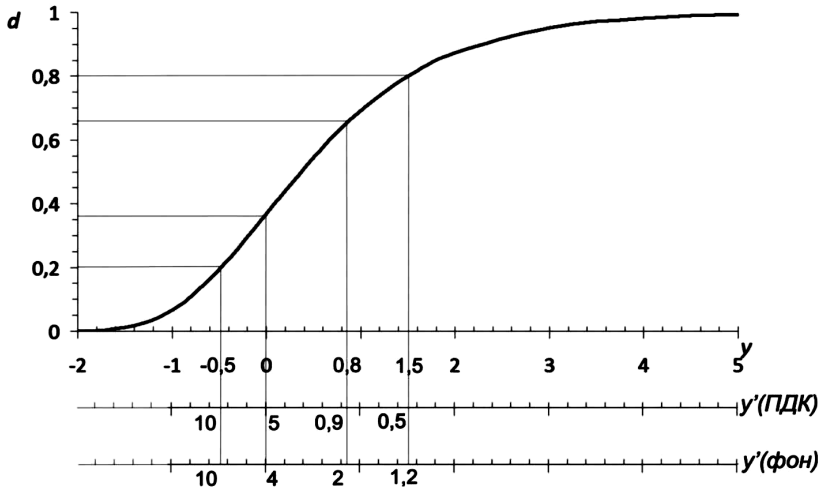

Рис. 1. График функции желательности в шкалах измеренных содержаний загрязняющих веществ, нормированных к ПДК или фону

Следующий шаг — определение обобщенной функции желательности (D), которая получается в результате свертки частных значений функции желательности d_i. Она может проводиться через среднюю геометрическую величину, которая сглаживает возникшие отклонения. В случае отсутствия весовых коэффициентов это будет:

$$D_G = \sqrt[q]{\prod_{i=1}^{q} d_i}. \qquad (2)$$

Если мы устанавливаем весовые коэффициенты по значению показателей, то тогда обобщенная функция желательности рассчитывается с помощью

$$D_G = \prod_{1 \le i \le q} d_i^{\alpha_i}, \qquad (3)$$

где α_i — весовые коэффициенты, учитывающие значимость частных критериев, при выполнении условия: $\sum_{i=1}^{q} \alpha_i = 1$ [6].

Итак, при использовании данного подхода к интегральной оценке загрязнения ландшафта необходимо установить зависимость значения измеренного y', т. е. концентрации поллютанта, и безразмерной величины y на шкале абсцисс. Так как определение содержания химических веществ проводится в разных средах, они имеют разные критерии сравнения. Поэтому применяются не абсолютные, а нормированные значения, т. е. отнесенные к норме. В качестве нормы (критерия сравнения) могут выступать как ПДК, ОДК, так и кларки или региональные фоновые содержания (что особенно важно в условиях естественных геохимических аномалий). При расчете интегрального показателя загрязнения ландшафта — L_{TP} (*Landscape Total Pollution*) — предлагается принять следующую оценку нормированных значений в предложенных выше качественных показателях. Для ПДК (ОДК): менее 0,5 ПДК (ОДК) — загрязнение отсутствует, 0,5–0,9 — низкий уровень, 0,9–5,0 — средний уровень, 5,0–10 — высокий, более 10 — чрезвычайно высокий уровень загрязнения. На оси абсцисс это будет соответствовать значениям: 1,5; 0,8; 0 и –0,5 (см. рис. 1). Для фона (кларка) оценка в этих категориях будет представлена другими градациями: менее 1,2; 1,2–2,0; 2,0–4,0; 4,0–10 и более 10 величины фона. Предложенные градации приняты в соответствии с общими подходами, используемыми при оценке экологической обстановки территорий [8].

Далее необходимо провести регрессионный анализ зависимости y и y'. Аппроксимировав ее, можно перевести все измеренные показатели в шкалу желательности. Через аппроксимацию устанавливаем зависимости между нормированными значениями содержания и величиной y. Согласно заданным параметрам, они подчиняются логарифмическому типу регрессии. Для ПДК (ОДК):

$$y = -0{,}617 \cdot \ln(y') + 0{,}93 \qquad (4)$$

с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}973$; для фона (кларка):

$$y = -0{,}94 \cdot \ln(y') + 1{,}523 \qquad (5)$$

с величиной $R^2 = 0{,}959$.

Теперь, определив по уравнению (4) или (5) безразмерную величину на оси

абсцисс (y) для соответствующего нормированного значения (y'), можно перейти к определению величины функции желательности по формуле (1). Таким образом, мы получаем ряд частных значений d_i химических веществ для каждого из рассматриваемых компонентов ландшафтной фации. Существенным элементом дальнейших преобразований является выполнение двух сверток данных. На первом этапе свертка частных значений (преобразованных концентраций поллютантов) в каждом из рассматриваемых компонентов проводится в соответствии с формулой (2), т. е. как для равнозначных показателей. Однако можно воспользоваться формулой (3), чтобы придать поллютантам в зависимости от их класса опасности соответствующее весовое значение. В результате получается ряд частных обобщенных показателей желательности (или частных показателей загрязнения) для каждого изучаемого компонента: вода ($d_в$), донные осадки ($d_д$), почвы ($d_п$), растения ($d_р$) и т. д.

На втором (заключительном) этапе получаем величину L_{TP} через свертку d_i в каждой фации. Она проводится по формуле (3) с учетом коэффициентов значимости. Весовые коэффициенты могут иметь разные значения в зависимости от геохимического статуса ПТК, в том числе положения в ряду элементарных геохимических ландшафтов. Для элювиальных фаций, не связанных с грунтовыми водами, величину коэффициента для всех компонентов ПТК можно принять равными. Исключением будут те случаи, когда четко выражена ведущая роль в загрязнении одного из компонентов ландшафта. Примером может служить перераспределение поллютантов под влиянием господствующих ветров или аэродинамических потоков, возникающих над вырубками в лесном массиве. В этом случае значения коэффициента загрязнения атмосферы будет выше. В трансэлювиальных фациях увеличивается значимость почвенного загрязнения за счет латеральной миграции вещества. В подчиненных ландшафтах к нему добавляется и становится ведущим загрязнение воды и донных осадков. В целом же значения весовых коэффициентов, общая сумма которых в соответствии с формулой (3) равна единице, определяются самим исследователем с учетом конкретных физико-географических условий ПТК.

Для адаптации шкалы желательности к оценке уровня химического загрязнения предлагается заменить принятые качественные характеристики (см. выше) следующими значениями L_{TP}: 0,8–1,0 — химическое загрязнение отсутствует, 0,63–0,8 — низкий уровень загрязнения, 0,37–0,63 — средний, 0,2–0,37 — высокий и $<0{,}2$ — чрезвычайно высокий уровни химического загрязнения.

Апробация метода и обсуждение результатов. Метод апробирован на материалах, полученных при выполнении локального (производственного) мониторинга на лицензионных участках нефтегазовых месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) в период 2003–2013 гг. Мониторинг охватывал природные воды, донные осадки, почвы, индикаторные виды растений. Оценка загрязнения ПТК проведена на уровне фаций и групп фаций в пределах элементарного геохимического ландшафта. Выбор станций мониторинга (СМ) выполнен по сети обследования при фоновой оценке территории с учетом ее ландшафтного строения, особенностей гидрографической сети и поверхностного стока, размещения нефтегазопромысловых объектов и инженерных сетей. Подробное изложение методики локального мониторинга лицензионных участков приведено в работах [1, 9, 10].

Поверхностные водные объекты являются нижним (аквальным) уровнем в элементарном геохимическом ландшафте и наиболее уязвимы к химическому

загрязнению. Качество поверхностных вод позволяет судить об общем уровне химического воздействия со стороны недропользователей. Однако динамика водной среды определяет высокую степень изменчивости содержания в ней загрязняющих веществ. В связи с этим в состав мониторинга включены донные отложения, которые, являясь консервативной системой, способны накапливать и хранить информацию о состоянии и изменении геохимических, динамических, микроклиматических условий внешней среды, в том числе техногенном воздействии на водную среду.

Особенности миграции вещества в ландшафте во многом определяются свойствами депонирующих сред — почвенным покровом и растительностью. Почва формируется в результате взаимодействия таких компонентов ландшафта как горные породы, атмосферный воздух, природные воды и биота. В ходе мониторинга загрязнение почвы оценивалось по двум горизонтам: органогенному (О) и минеральному (В).

Получение репрезентативных данных о состоянии атмосферного воздуха на севере Западной Сибири осложнено отсутствием постоянно действующих постов наблюдений. Для оценки загрязнения воздушной среды применялись растения, способные улавливать химические вещества при фолиарном поглощении. В этом качестве были использованы багульник *Ledum decumbens* (Ait.) Lodd.ex Steud. и лишайник *Cladonia alpestris* (L.) Rubh. как взаимодополняющие виды при отсутствии одного или другого в пределах ПТК.

Анализ проведен по трем нефтегазоконденсатным месторождениям ЯНАО: Юрхаровскому, Самбургскому и Береговому. На последнем мониторинговые исследования выполнялись дважды: в 2010 и 2013 гг. Лицензионные участки находятся в северной части Западно-Сибирской равнины, которая расчленена многочисленными речными долинами, крупнейшими из которых являются долины Оби, Пура, Таза и Надыма. Они характеризуются очень большой шириной от 30 до 60 км и мелкогривистым русловым рельефом. Глубина их вреза достигает 30–35 до 50 м и более. Почвогрунты, оттаивающие летом, почти всюду избыточно увлажнены, а заболоченность некоторых районов достигает 70%.

Юрхаровское газоконденсатное месторождение (ГКМ) расположено на западном берегу Тазовской губы. Согласно ландшафтно-географическому районированию, территория относится к Притазовскому району Верхнепоеловояхской подпровинции южных тундр Тазовской провинции тундровой зоны Западно-Сибирской равнинной страны [11]. Крупнейшие реки на территории лицензионного участка — Юрхарово и Мангаюрбей. Широко распространены озера термокарстового происхождения. Донные осадки представлены в основном пелитовыми и алевритовыми фракциями с примесью песка. Преобладают тундровые глеевые и тундровые слабоглеевые иллювиально-малогумусовые мерзлотные почвы в сочетании с торфяными и торфяно-глеевыми разностями. На Карте растительности Западной Сибири под ред. В. Б. Сочавы и И. С. Ильиной [12] данный район отнесен к подзоне тундр субарктических западносибирских формаций амфиатлантической фратрации формаций. Для него характерно распространение ивняковых (*Salix glauca* L., *S. pulchra* L.) травяно-моховых тундр (*Polytrichum alpestre* Hoppe, *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr, *Eryophorum angustifolium* Honck, *Nardosmia frigida* (L.) Fries) в сочетании с ивняково-ерниковыми лишайниково-моховыми тундрами и осоково-мохово-лишайниковыми плоскобугристыми болотами.

Юрхаровское ГКМ в период экологических исследований (2003 г.) находилось

на стадии пробной эксплуатации. На территории лицензионного участка было пробурено около 20 поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, построена установка комплексной подготовки газа (УКПГ), располагался полигон буровых отходов. Площадь нарушенных земель лицензионного участка составляла около 0,7% общей площади. Сеть станций мониторинга включала 37 площадок.

Территория Самбургского лицензионного участка располагается в подзоне редколесий на левом берегу р. Пур с абсолютными высотами, не превышающими 40 м. Согласно ландшафтно-географическому районированию, она относится к Хадуттэ-Пурскому району Надым-Пурской северной провинции Урало-Енисейской лесотундровой области лесотундровой зоны. Участок лежит в пределах заозеренной, болотистой равнины, дренируемой многочисленными левыми притоками р. Пур, основными из которых являются реки Есетаяха, Сягойхадуттэ, Пыринзьтояха. Современные донные осадки представлены преимущественно мелкозернистыми песками и илистыми песками. По площади преобладают зональные тундровые глеевые почвы, в автоморфных условиях лесотундровых ПТК формируются подзолы и подзолистые почвы. Они представлены иллювиально-железистыми, иллювиально-железистыми языковатыми глееватыми и иллювиально-железистыми глееватыми разностями. Зональными типами сообществ здесь выступают елово-лиственничные и лиственничные лишайниково-зеленомошные и зеленомошно-кустарничковые редколесья, которые повсеместно на плакорах и в неплакорных местообитаниях сочетаются с кустарниковыми тундрами — ерниковыми (*Betula nana* L.), ивняковыми (*Salix glauca, S. pulchra*), ольховниковыми (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Panzar).

Эксплуатация Самбургского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) была начата в 2000 г. На момент исследований на территории месторождения была проложена сеть промысловых трубопроводов, построены дороги и вахтовый жилой комплекс, завершено бурение 15 эксплуатационных скважин. Сеть экологического мониторинга состояла из 31 станции.

Береговое НГКМ расположено на правом берегу р. Пур, в западной части обширного Пур-Тазовского междуречья. Оно входит в Часельский район Пур-Тазовской провинции Обь-Тазовской подобласти Урало-Енисейской таежной области северотаежной подзоны тайги Западной Сибири. Гидрографическая сеть данной территории представлена правыми притоками р. Пур — реками Большая и Малая Ходырь-Яха и их притоками — Лангъ-Яха, Вэнтокой-Яха, Нелакмой-Яха, Нгарка-Салова-Яха, Нюдя-Салова-Яха, Тэлдэ-Яха, Салю-Яха, пойменными озерами и небольшими болотными ручьями. Донные осадки имеют разнообразный гранулометрический состав: песчаный, алевритовый и пелитовый. В озерах встречаются торфянистые осадки. Преобладающими автоморфными почвами являются иллювиально-железистые, иллювиально-железистые языковатые глееватые и иллювиально-железистые глееватые подзолы и подзолистые почвы. На территории участка представлены практически все типы лесной растительности, характерные для северотаежных и предлесотундровых полос: редины, редколесья, редкостойные и типичные северотаежные леса (*Larix sibirica* Ledeb., *Betula pubescens Ehrh., B. pendula* Roth., *Picea obovata Ledeb.*). Встречаются несколько типов олиготрофных, мезотрофных и эвтрофных болот. Преобладают ерниково-сфагново-лишайниковые (*Cetraria cucullata* (Bellardi) Ach., *Sphagnum apiculatum* H. Lindb., *Betula nana, Ledum palustre*) плоскобугристые болота, развитые в понижениях и котловинах на водораздельных равнинах, надпойменных речных террасах и по берегам озер.

Береговое НГКМ открыто в 1982 г. В пределах месторождения известно 32 газовых, газоконденсатных, нефтегазоконденсатных и нефтяных залежей. На территории закончено строительство дорог, УКПГ, вахтового жилого комплекса, проложен газопровод-подключение. В 2007 г. начата промышленная эксплуатация сеноманской газовой залежи, а в 2009 г. завершено ее обустройство. Одновременно осваиваются нижележащие продуктивные горизонты, пуск в промышленную эксплуатацию которых намечен на 2014 г. Экологический мониторинг состояния ПТК на территории месторождения проведен на 36 и 39 СМ.

Исходя из относительной однородности геолого-геохимических и геоморфологических условий на территории лицензионных участков Уренгойской тундры и лесотундры, одна станция локального экологического мониторинга охватывала одновременно и элювиальные, и подчиненные фации, превышение между которыми составляло первые метры (чаще не более 1–2 м). Весовые коэффициенты α_i получили следующие значения: вода $\alpha_в$ — 0,25; донные осадки $\alpha_д$ — 0,25; почвы горизонт О $\alpha_{пО}$ — 0,125; почвы горизонт В $\alpha_{пВ}$ — 0,125; растения $\alpha_р$ — 0,25. В качестве критериев загрязнения были приняты: в воде — ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения; в почве, растениях и донных осадках (с учетом их гранулометрического состава) — фоновые содержания химических веществ (табл. 1).

Результаты интегральной оценки загрязнения ландшафтов представлены в табл. 2. Из трех рассматриваемых месторождений максимальная степень загрязнения установлена на Юрхаровском лицензионном участке. В его пределах два ПТК по величине L_{TP} имеют средний уровень химического загрязнения (0,37–0,63), что обусловлено, в первую очередь, загрязнением поверхностных вод и почвы. В 28 ПТК отмечается низкий уровень загрязнения, а на 7 пробных площадках химическое загрязнение отсутствует (рис. 2а). Основным источником химического воздействия выступает полигон буровых отходов, расположенный в центральной части лицен-

Таблица 1. **Фоновые содержания (мг/кг) химических веществ в компонентах ландшафтов севера Западной Сибири [10]**

Вещество	Донные осадки			Почвы		Растения	
	ил	илистый песок	песок	горизонт О	горизонт В	*Ledum decumbens*	*Cladonia alpestris*
Zn	27	14	6,5	30	26	28	17
V	37,2	18	8,6	15,7	46,6	0,4	0,9
Cr	41,0	19	6,4	22,3	35,7	1	1,8
Mn	293	132	44	215	202	1183	88
Co	7,4	3,0	1,1	3,7	6,1	0,2	0,2
Cu	8,07	3,38	1,74	7,6	6,8	7	5
Ni	13,92	4,34	1,99	13,2	8,0	2,1	1,9
Pb	7,72	5,55	2,61	11,1	7,9	1,2	2
Cd	0,14	0,06	0,05	0,28	0,07	0,08	0,1
Ba	374	308	125	171	369	104	15
Fe	15400	5600	1820	13556	26259	—	—
НУ*	71,3	111	18,1	65	21	—	—

Примечание: * — нефтяные углеводороды; прочерк — данные отсутствуют.

Таблица 2. **Средние значения частных (покомпонентных) и интегрального (L_{TP}) показателей загрязнения ландшафта по результатам локального мониторинга лицензионных участков ЯНАО (в скобках — диапазон значений)**

Показатели	Месторождения			
	Береговое		Самбургское (2011 г.)	Юрхаровское (2003 г.)
	2010 г.	2013 г.		
Количество СМ	39	36	31	37
Вода ($PP_в$)	0,73 (0,50–0,81)	0,80 (0,61–0,89)	0,75 (0,54–0,82)	0,70 (0,44–0,80)
Донные осадки ($PP_д$)	0,83 (0,73–0,91)	0,79 (0,66–0,91)	0,82 (0,45–0,95)	0,86 (0,76–0,92)
Почвы: горизонт О ($PP_{п1}$) горизонт В ($PP_{п2}$)	0,75 (0,37–0,93) 0,77 (0,57–0,90)	0,81 (0,46–0,92) 0,78 (0,60–0,91)	0,78 (0,46–0,86) 0,85 (0,69–0,93)	0,75 (0,48–0,88) 0,72 (0,16–0,88)
Растения ($PP_р$)	0,78 (0,65–0,86)	0,89 (0,78–0,94)	0,78 (0,64–0,85)	0,76 (0,71–0,80)
L_{TP}	0,77 (0,65–0,87)	0,83 (0,73–0,90)	0,79 (0,68–0,86)	0,76 (0,59–0,89)

зионного участка. Вблизи разведочных скважин, пробуренных в 80-годы XX в., повышенный уровень загрязнения наблюдается только в иллювиальном (В) горизонте почв, что обусловлено процессами самоочищения ландшафтов — внутрипочвенной миграцией и аккумуляцией поллютантов на глеевом барьере [13]. Величина L_{TP} отвечает низкому уровню загрязнения (0,63–0,8). Химический состав индикаторных видов растений на всей изученной территории относительно стабилен, о чем свидетельствуют частные показатели загрязнения растительности (P_{LP}, P_{CP}). В пробах багульника (P_{LP}) и лишайника (P_{CP}) во всех обследованных ПТК значения изменяются в пределах 0,71–0,80 и соответствуют низкому уровню загрязнения.

На Самбургском месторождении изученные ПТК по величине L_{TP} представлены двумя группами: фоновыми показателями химического состава компонентов (13 ПТК с $L_{TP} > 0,8$) и низким уровнем загрязнения (17 ПТК с $L_{TP} = 0,63–0,8$) (рис. 2б). В пределах последних или в непосредственной близости находятся объекты производственной инфраструктуры промысла: УКПГ, карьеры, скважины, которые служат основными источниками воздействия. Максимальное загрязнение испытывают субаквальные геохимические ландшафты — водные объекты, частный показатель загрязнения которых соответствует среднему и низкому уровням. Наибольшее суммарное загрязнение ПТК отмечается вблизи разведочных скважин Р-217, Р-206, Р-719, Р-20 и Р-24. Самое значительное снижение величины L_{TP} (до 0,68) зафиксировано вблизи скважины Р-206 в заозеренном торфянике мелкокочковатом лишайниково-осоково-моховом. Существенное загрязнение этого ПТК произошло в середине 1990-х годов при проведении буровых работ. В настоящее время в результате естественного самоочищения наблюдается вторичное перераспределение поллютантов вглубь торфяной залежи, а также закрепление их в составе донных осадков. О современном аэротехногенном загрязнении свидетельствует снижение частного показателя загрязнения растительности (P_{LP}, P_{CP}) вблизи куста промысловых скважин К-6, где к моменту проведения мониторинга было завершено его обустройство, и началась промышленная эксплуатация. Но и в этом случае можно говорить в основном о низком уровне загрязнения ПТК.

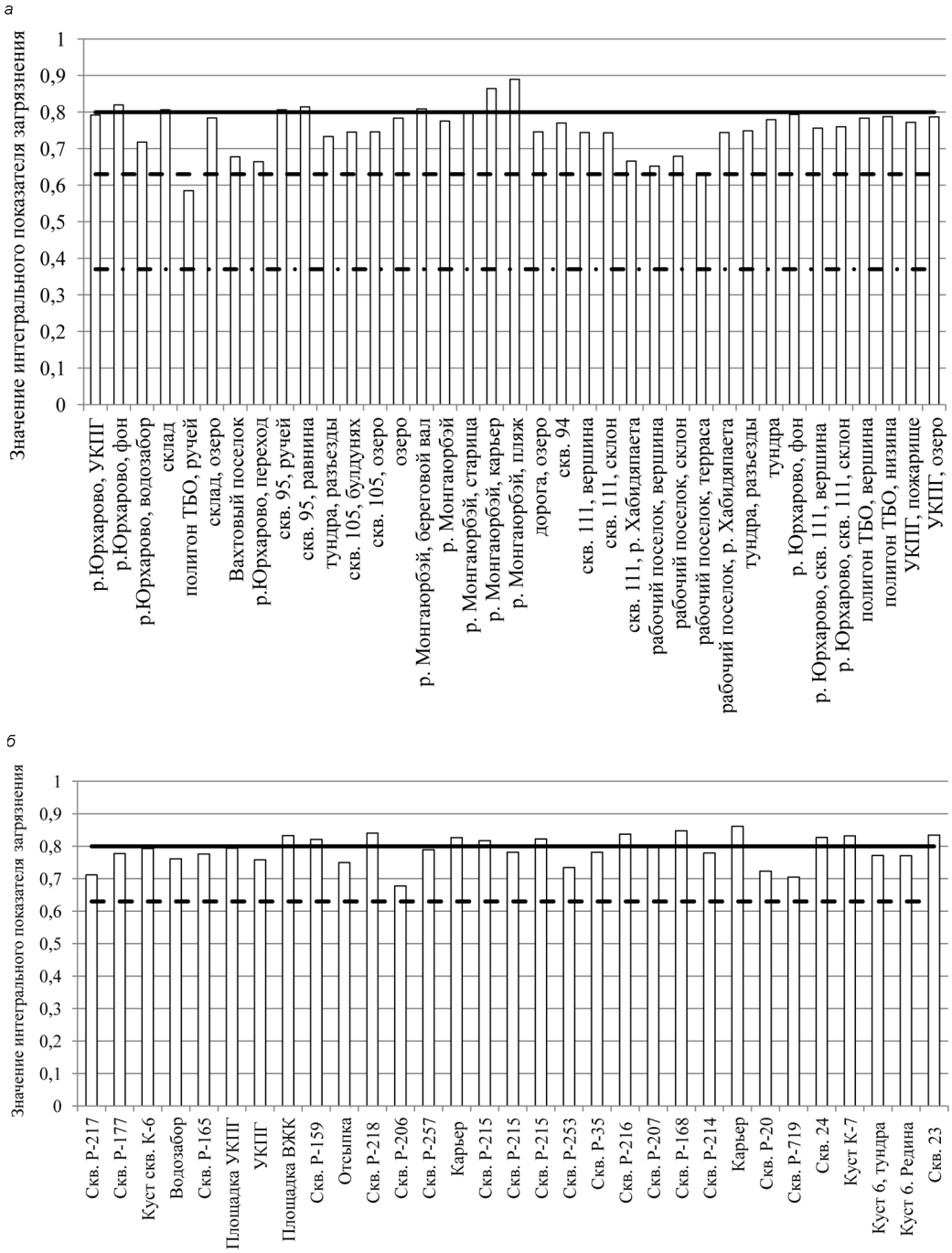

Рис. 2а, б. Значения интегрального показателя загрязнения ландшафта (Ltp) на станциях локального мониторинга лицензионных участков ЯНАО: *а* — Юрхаровское ГКМ, *б* — Самбургское НГКМ

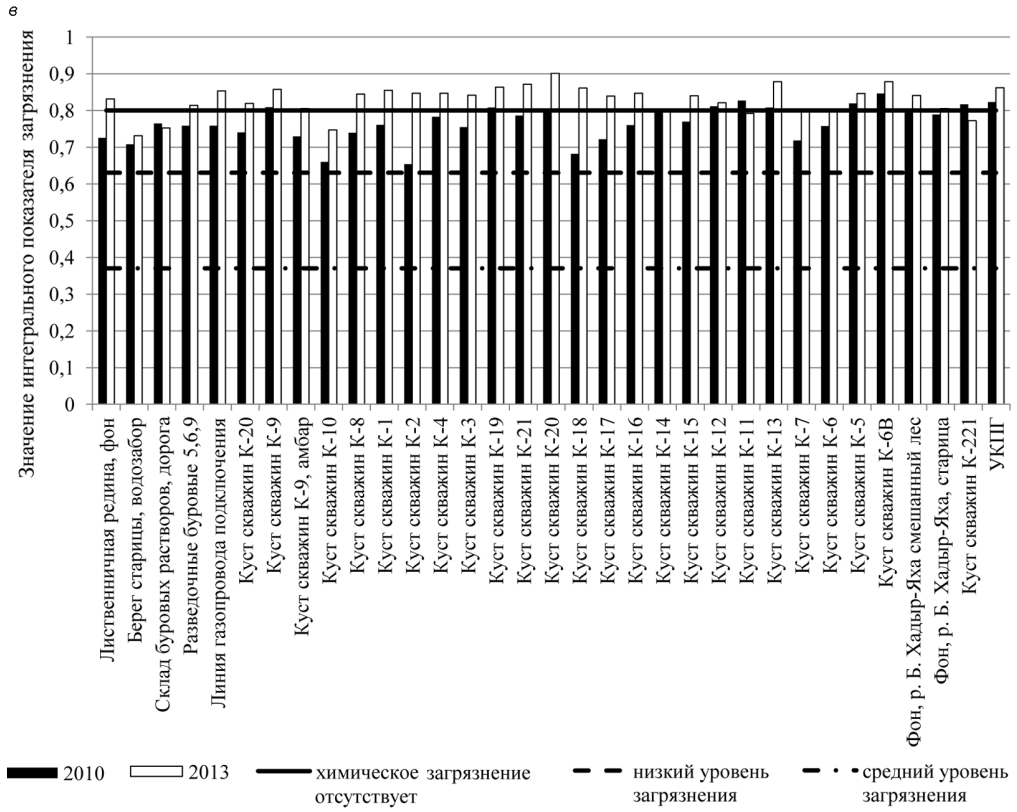

Рис. 2в. Значения интегрального показателя загрязнения ландшафта (Ltp) на станциях локального мониторинга лицензионных участков ЯНАО: *в* — Береговое НГКМ (2010 и 2013 г.)

В настоящее время химического загрязнения компонентов ПТК на большей части территории Берегового месторождения не отмечается (рис. 2в). Как показал расчет интегрального показателя загрязнения ландшафта, в 2013 г. только на 6 из 35 СМ был обнаружен низкий уровень химического загрязнения. К их числу относятся ПТК вблизи водозаборной станции, разведочных буровых 5, 6 и 9, кустов скважин К-10, К-11, К-221, а также в районе вантового перехода газопровода через р. Большая Хадырьяха. Сравнительный анализ результатов экологического мониторинга в 2010 и 2013 гг. на месторождении выявил снижение уровня загрязнения ландшафтов после окончания обустройства и начала промышленной эксплуатации месторождения, главным образом, за счет процессов самоочищения (см. табл. 2). Эта тенденция выражена для всех изученных компонентов, за исключением донных осадков — одной из наиболее консервативных по химическому загрязнению сред. Следует также отметить, что вблизи разведочных буровых 5, 6 и 9 сохраняется средний уровень загрязнения поверхностного горизонта почв, что обусловлено не только загрязнением ПТК при проведении буровых работ, но и расположением здесь несанкционированных свалок.

Выводы. Предлагаемый интегральный показатель загрязнения ландшафта (L_{TP}) может быть использован при проведении локального мониторинга,

в ландшафтно-геохимических и геоэкологических исследованиях, которые базируются на изучении двух и более компонентов ПТК. Анализ изменения показателя позволяет выявлять пространственно-временной тренд состояния ландшафта под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Наиболее эффективным представляется оценка динамики уровня загрязнения при экологическом мониторинге и сравнительном анализе состояния ПТК, что нивелирует возможную субъективность предлагаемого подхода. Систему весовых коэффициентов следует рассматривать как «настраиваемый» элемент расчета, позволяющий учитывать значимость компонентов среды, природные условия района работ и целевые задачи, стоящие перед исследователем. Важнейшими условиями проведения сравнительного анализа являются тождественность выбранных показателей для каждого компонента при расчете L_{TP} и, по возможности, выполнение химических анализов одной лабораторией.

Литература

1. *Арестова И. Ю., Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Кукушкин С. Ю.* Эколого-геохимическая оценка состояния природной среды в районах нефтегазодобычи // Доклады межд. научной конф. «Геохимия биосферы», Москва 15–18 ноября 2006 г. Смоленск: Ойкумена, 2006. С. 41–42.

2. *Кошелева Н. Е., Касимов Н. С., Сорокина О. И., Власов Д. В.* Оценка загрязнения городских ландшафтов с использованием интегральных показателей // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М. А. Глазовской). Доклады Всеросс. научн. конфер. Москва, 2012. М.: Географ. фак-т МГУ, 2012. С. 174–176.

3. Постановление Правительства РФ от 06.06.2013 № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды» (вместе с «Положением о государственном мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды»).

4. *Harington J.* The Desirability Function. Industrial Quality Control. 1965. Vol. 21, N 10. P. 494–498.

5. *Пичкалев А. В.* Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. № 1 (1). 2012. С. 25–28.

6. *Ахназарова С. Л., Гордеев Л. С.* Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии: учеб.-мет. пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. 76 с.

7. *Воробейчик Е. П., Садыков О. Ф., Фарафонтов М. Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.

8. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Утв. Министром охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ 30.11.1992 г. М., 1992.

9. *Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Арестова И. Ю., Кукушкин С. Ю.* Особенности проведения фоновой оценки и экологического мониторинга нефтегазопромысловых работ в Арктике. Сергеевские чтения. Инженерно-экологические изыскания в строительстве: теоретические основы, методика, методы и практика // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23 марта 2006 г.) М.: ГЕОС, 2006. Вып. 8. С. 49–57.

10. *Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г., Кукушкин С. Ю., Ганул А. Г.* Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в Ямало-Ненецком автономном округе // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2012. Вып. 4. С. 87–101.

11. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2004. 303 с.

12. Карта растительности Западной Сибири / ред. И. С. Ильина, под общим рук. В. Б. Сочавы, 1976.

13. *Водяницкий Ю. Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2014 г.

Контактная информрмация

Опекунов Анатолий Юрьевич — доктор геолого-минералогических наук, профессор; a_opekunov@mail.ru

Опекунова Марина Германовна — доктор геолого-минералогических наук, доцент; m.opekunova@mail.ru

Opekunov Anatoly Yu. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor; a_opekunov@mail.ru

Opekunova Marina G. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Assosiate Professor; m.opekunova@mail.ru