

А. Г. ОСИПОВ*, **В. В. ДМИТРИЕВ****, **С. А. МАСЛЕННИКОВ***,
Л. А. ПЛАСТИНИН***, **В. М. ПЛЮСНИН******

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия, osipov-g-k-2005@yandex.ru, sergei.maslennikoff2012@yandex.ru

**Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, 10-я линия В. О., 33-35, Санкт-Петербург, 199178, Россия, vasily-dmitriev@rambler.ru

***Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия, irkplast@mail.ru

****Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, Иркутск, 664033, Россия, plusnin@irigs.irk.ru

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ СИБИРИ

Изложены научно-методические подходы к картографическому моделированию в среде ГИС трасс трубопроводов с геоэкологическими ограничениями, суть которых заключается в пространственном многопараметрическом анализе природного потенциала исследуемой территории с целью определения ее возможностей устойчиво выполнять задаваемые социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства). Разработанная методика рассмотрена на примере выбора трассы для прокладки трубопроводной системы на модельной территории, расположенной в арктической зоне Сибири. Применены критические принципы к методике картографического моделирования трасс трубопроводов: принципы системности, экологической безопасности, приоритетности оцениваемых показателей, единства оценки, экономической целесообразности. При реализации методики использованы следующие математические методы исследования: ранжирование свойств природных ландшафтов по их влиянию на пригодность территории, квалитетические оценки классов пригодности земель природных систем, теория графов для нахождения оптимального маршрута трассы трубопровода на основе алгоритма Дейкстры. Составлена таблица ненормированных и нормированных весовых коэффициентов, которые учитываются для оценки пригодности природных компонентов ландшафта и их характерных свойств. Рассчитаны эталонные значения показателей, участвующих в интегральной оценке пригодности территории для прокладки трассы трубопровода, на основе фондовых и литературно-справочных материалов.

Ключевые слова: Арктика, картографическое моделирование, геоинформационная система, геоэкологические ограничения.

A. G. OSIPOV*, V. V. DMITRIEV, S. A. MASLENNIKOV*, L. A. PLASTININ***, V. M. PLYUSNIN******

*A. Mozhaysky Military Space Academy, ul. Zhdanovskaya, 13, Saint-Petersburg, 197198, Russia, osipov-g-k-2005@yandex.ru, sergei.maslennikoff2012@yandex.ru

**Institute of Earth Sciences of the Saint-Petersburg State University, Line 10 V. O., 33-35, Saint-Petersburg, 199178, Russia, vasily-dmitriev@rambler.ru

***Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, 664074, Russia, irkplast@mail.ru

****Sochava Institute of Geography SB RAS, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Irkutsk, 664033, Russia, plusnin@irigs.irk.ru

CARTOGRAPHIC MODELING OF PIPELINE ROUTES IN THE ARCTIC ZONE OF SIBERIA

This paper presents the scientific-methodological approaches to cartographic GIS-based modeling of pipelines with geoeological restrictions which essentially imply a spatial multiparametric analysis of the natural potential of the study territory in order to explore its possibilities of consistently performing the socioeconomic functions as pre-assigned without disturbing the life-support (environment and resource reproduction) functions. The suggested technique is illustrated by the example of selecting the route for the laying of the pipeline system on the model territory in the arctic zone of Siberia. Critical principles are applied to the technique of cartographic modeling of the pipeline route, i. e. the principles of systemacy, ecological security, priority of estimated indicators, unity of assessment and economic expediency. The following investigation methods were used in implement-

ing the technique: ranking of the properties of natural landscapes according to their influence on the suitability of the territory, qualimetric assessments for the suitability classes of lands of natural systems, and graph theory for determining the optimal pipeline route on the basis of Dijkstra's algorithm. The table of unnormalized and normalized weighting factors is compiled, which are taken in consideration for assessing the suitability of natural landscape components and their characteristic properties. Archival and published reference data are used to calculate the reference values of the indicators used in an integral assessment of the suitability of the territory for the laying of the pipeline route.

Keywords: *Arctic, cartographic modeling, geoinformation system, geoecological restrictions.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для информационного обеспечения задач по управлению природопользованием в арктической зоне Сибири разрабатывается система картографо-космического мониторинга, предназначенного для оперативного сбора геопространственной информации о природных и антропогенных процессах и явлениях, их оценки, прогноза, наглядного представления и доведения до потребителей. Этот вид мониторинга интегрирует в себе технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), цифровой картографии и геоинформационного обеспечения [1–3].

Одна из наиболее сложных задач, которые призвана решать система картографо-космического мониторинга, — интегральная оценка пригодности территории к антропогенным воздействиям, реализуемая с использованием методологии картографического моделирования в среде ГИС. Под ней понимается пространственный многопараметрический анализ природного потенциала территории с целью определения ее возможности устойчиво выполнять задаваемые социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства). Сложность решения этой задачи обусловлена недостаточной развитостью алгоритмов преобразования геопространственной информации в соответствии с запросами потребителей, за исключением решения картометрических задач.

МЕТОДИКА КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основу картографического моделирования целесообразно закладывать геосистемную концепцию природопользования, реализуемую через бассейново-ландшафтный подход [4–6]. Его основные положения:

- географическая оболочка обладает бассейново-ландшафтной иерархией;
- бассейновые геосистемы характеризуются ландшафтной организованностью;
- в пределах бассейново-ландшафтных геосистем тесно взаимосвязаны природные условия и хозяйственная деятельность;
- бассейново-ландшафтные геосистемы — оптимальные территориальные единицы для контроля состояния природной среды;
- сопряженное использование картографического и имитационного моделирования бассейново-ландшафтных геосистем в среде ГИС — основа оптимизации природопользования.

Разработанная методика опирается на следующие принципы [7–11].

1. Принцип системности. Определение пригодности территории для антропогенного освоения должно базироваться на теории системного анализа. Реализация данного принципа обеспечивает рассмотрение каждой характеристики, участвующей в картографическом моделировании не изолированно, а в виде одного из элементов создаваемого природно-технического объекта.

2. Принцип экологической безопасности. При картографическом моделировании должны учитываться антропогенные нагрузки, возникающие в период строительства объекта антропогенного освоения и его эксплуатации.

3. Принцип приоритетности оцениваемых показателей. При определении пригодности территории для размещения объекта необходимо учитывать степень влияния каждой характеристики на устойчивость природной среды к антропогенному воздействию и внутренним возмущениям, т. е. должно быть выполнено ранжирование критериев оценивания по их влиянию на экологическую безопасность создаваемой природно-технической системы.

4. Принцип единства оценки. Картографическое моделирование в пределах всей изучаемой территории должно осуществляться по одним и тем же признакам (их виду и числу), имеющим единые оценочные (квалиметрические, аксиометрические) шкалы (оценочные градации), а также при одних и тех же приоритетах (весах), учитываемых при свертке показателей. При этом число классов и градаций выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась достоверность результатов моделирования.

5. Принцип экономической целесообразности. Создаваемый объект должен размещаться на модельной территории с учетом минимизации затрат на выполнение работ по его строительству и эксплуатации.

Разработанная методика состоит из одиннадцати основных блоков.

Блок 1. *Информационное обеспечение картографического моделирования пригодности территории для прокладки трассы трубопровода.* Данный этап включает в себя определение перечня свойств природных ландшафтов, влияющих на пригодность территории для прокладки трассы трубопровода. Для решения этой задачи необходимо формализовать на уровне обобщенного представления информационное содержание предметной области, которое будем называть концептуальной информационной моделью. Процесс построения концептуальной информационной модели сводится к обоснованной разбивке предметной области на ряд локальных участков, получению локальных моделей и объединению их путем абстрагирования в обобщенную модель.

Блок 2. *Построение дерева свойств, реализующего концептуальную информационную модель.* Дерево свойств представляет собой иерархическую структуру, в которой свойства вышестоящих уровней связаны со свойствами нижестоящих уровней, являющихся первичными [12]. Самый нижний, нулевой уровень дерева свойств является комплексным свойством, характеризующим степень пригодности территории для прокладки трассы трубопровода. Разбиение свойств производится до тех пор, пока не образуется уровень, содержащий либо элементарные свойства, которые нельзя делить дальше, либо квазиэлементарные свойства, которые делить уже нецелесообразно.

Построение дерева свойств опирается на следующие принципы:

- деление в пределах каждой отдельной группы выполняется по единственному признаку, т. е. по равному основанию;
- каждое комплексное свойство должно быть разделено на ближайшем вышестоящем уровне на такие свойства, число и характер которых соответствуют требованиям необходимости и достаточности;
- в пределах группы не могут одновременно находиться родовые и видовые свойства;
- количество уровней в дереве свойств должно быть таким, чтобы в каждой группе находилось минимальное количество свойств (в идеале два);
- разбиение свойств продолжается до тех пор, пока не будет достигнут самый высокий уровень, на котором находятся элементарные и квазиэлементарные свойства.

Блок 3. *Ранжирование свойств природных ландшафтов по их влиянию на пригодность территории для прокладки трассы трубопровода.* Процесс ранжирования свойств включает в себя два этапа: 1) определение ненормированных коэффициентов весомости (важности) свойств природных ландшафтов по их влиянию на пригодность территории для прокладки трассы; 2) расчет нормированных коэффициентов весомости (важности, приоритетности).

Ненормированные коэффициенты определяются для всех свойств, участвующих в оценке. Для этого используется экспертный метод парных сравнений, подробно изложенный в работе [10]. Его выбор обусловлен простотой проведения экспертизы и достоверными результатами экспертного анализа. При реализации данного метода экспертам последовательно предъявляются пары альтернатив, в каждой из которых предлагается выбрать более предпочтительное решение. После проведения экспертизы рассчитывается относительная согласованность мнений экспертов, которая сравнивается со средними согласованностями, определенными для случайных матриц. Если расхождение между ними находится в интервале от 0 до 10 %, то результаты экспертного опроса считаются приемлемыми. В противном случае экспертам предлагается пересмотреть свои суждения.

Нормированные коэффициенты весомости (важности) свойств рассчитываются путем перемножения средних ненормированных коэффициентов весомости отдельных свойств, иерархически связанных друг с другом на дереве свойств. Для этого используется следующая зависимость:

$$P_j = \bar{P}_{j1} \times \dots \times \bar{P}_{jn}, \quad (1)$$

где P_j — нормированный коэффициент весомости (важности) j -го элементарного (квазиэлементарного) свойства; \bar{P}_{j1} , \bar{P}_{jn} — средние ненормированные коэффициенты весомости (важности) i -го и n -го уровней дерева свойств, иерархически связанных в пределах одной ветви с j -м элементарным (квазиэлементарным) свойством; n — количество уровней в дереве свойств.

Блок 4. *Определение эталонных значений показателей, характеризующих устойчивость земель для прокладки трассы трубопровода.* Для определения эталонных значений показателей используются фондовые, литературно-справочные материалы, топографические, почвенные, мерзлотные, ландшафтные карты и архивные аэро- и космические снимки.

Блок 5. Выбор классов оценивания с целью интегральной оценки устойчивости земель при прокладке трассы трубопровода и построение для каждого класса оценочных (квалиметрических) шкал. Определение пригодности земель целесообразно проводить по пяти классам: 1-й — очень непригодные, 2-й — непригодные, 3-й — средней пригодности, 4-й — пригодные, 5-й — очень пригодные. Названия классов достаточно условные, но шкалу, рассчитанную на пять классов, всегда можно разделить по принципу низкое—ниже среднего—среднее—выше среднего—высокое. В нашем случае класс «ниже среднего» отнесен к «непригодным», а класс «выше среднего» — к «пригодным». Для показателей, участвующих в оценке, между классами вводятся граничные значения. При формировании оценочных шкал учитывается вид (прямая, обратная) и характер (линейная, нелинейная) связей.

В процессе реализации данного блока разрабатываются четыре квалиметрические шкалы:

1) шкала абсолютных показателей границ классов пригодности земель, разрабатываемая на основе экспертных данных;

2) шкала относительных показателей границ классов пригодности земель, разрабатываемая с использованием следующих зависимостей:

$$R_{pj} = w_{pj} / w_{j\bar{a}} \text{ при } w_{pj} < w_{j\bar{a}}, \quad (2)$$

$$R_{pj} = w_{j\bar{a}} / w_{pj} \text{ при } w_{pj} > w_{j\bar{a}}, \quad (3)$$

где R_{pj} — относительное значение показателя, характеризующего j -е элементарное (квазиэлементарное) свойство p -го расчетного участка; w_{pj} — абсолютное значение показателя, характеризующего j -е элементарное (квазиэлементарное) свойство p -го расчетного участка; $w_{j\bar{a}}$ — эталонное абсолютное значение показателя, характеризующего j -е элементарное (квазиэлементарное) свойство, т. е. лучшее для проходимости техники в пределах изучаемой территории; R_{pj} — изменяется в пределах от 0 до 1 ($0 < R_{pj} < 1$);

3) шкала взвешенных показателей границ классов пригодности земель, разрабатываемая с использованием следующей зависимости:

$$K_p^0 = \sum_{j=1}^n R_{pj} \times P_j, \quad (4)$$

где K_p^0 — сводный показатель, характеризующий исследуемый потенциал p -го земельного выдела;

4) шкала сводных показателей границ классов пригодности земель, разрабатываемая с использованием зависимостей (5)–(7):

$$S_1 = \sum_{m=2}^n K_{2m}^0, \quad (5)$$

где S_1 — сводный показатель нижней границы 2-го класса пригодности земель; K^0 — значение взвешенного показателя; n — количество значений взвешенных показателей во 2-м классе; m — порядковый номер взвешенного показателя.

$$\Delta s = S_r - S_1 / r, \quad (6)$$

$$S_j = S_{j-1} + \Delta s, \quad (7)$$

где Δs — интервал между границами классов пригодности земель; S_r — сводный показатель нижней границы r -го класса пригодности земель; r — количество классов пригодности земель; S_j — сводный показатель нижней границы j -го класса пригодности земель.

Блок 6. Создание средствами ГИС электронных факторных карт для всех показателей, входящих в дерево свойств. В процессе реализации данного блока на территорию исследуемого речного бассейна средствами ГИС создаются аналитические (факторные) карты для каждого показателя, характеризующего оцениваемые факторы.

Блок 7. Деление территории средствами ГИС на расчетные участки, представляющие собой однородные элементарные ареалы. Деление территории природной системы на расчетные участки осуществляется в среде ГИС с использованием операции «топологический оверлей» (рис. 1), при этом происходит преобразование не только графической, но и семантической информации.

Блок 8. Интегральная оценка устойчивости земель для прокладки трассы трубопровода. На этом этапе работ для каждого расчетного участка определяются абсолютные значения характеризующих его показателей. Затем с использованием зависимостей (2) и (3) рассчитываются их относительные показатели, а с помощью зависимости (4) — взвешенные. После этого с использованием шкалы сводных показателей границ классов пригодности земель определяется класс пригодности расчетных участков для прокладки трассы трубопровода.

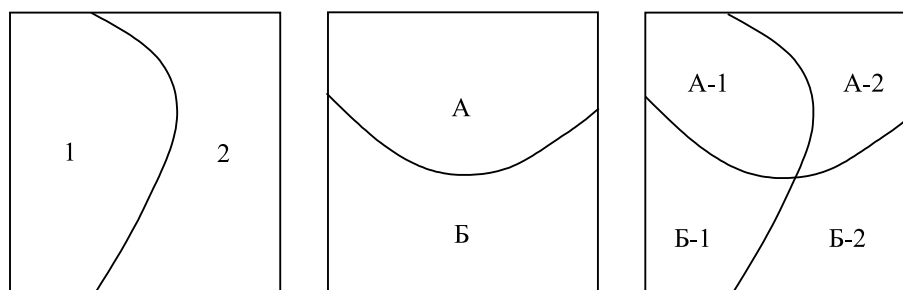


Рис. 1. Деление изучаемой территории на расчетные участки путем суммирования факторных карт.

1, 2 — ареалы, имеющие различные значения устойчивости грунтов к эрозионному смыву. А, Б — ареалы, имеющие различные значения устойчивости почв к загрязнению. А-1, А-2, Б-1, Б-2 — расчетные участки, представляющие собой однородные элементарные ареалы по значению устойчивости грунтов к эрозионному смыву и устойчивости почв к загрязнению.

Полученные для расчетных участков изучаемой природно-аграрной системы взвешенные показатели обобщаются на ландшафтном уровне с применением зависимости

$$L_m^0 = \sum_{d=1}^n K_d^0 \times Q_d, \quad (8)$$

где L_m^0 — исследуемый потенциал земель m -го ландшафта; Q_d — доля в ландшафте земель с d -м потенциалом; K_d^0 — балл, характеризующий d -й потенциал земель.

Блок 9. Составление электронной синтетической карты устойчивости земель для прокладки трассы трубопровода. При составлении электронной синтетической карты используется базовая картографическая основа с нанесенной сеткой расчетных участков. К каждому расчетному участку, показанному на основе, привязывают соответствующий класс его пригодности для прокладки трассы трубопровода. После этого участки, попадающие в один класс, объединяют и отображают принятым условным знаком.

Блок 10. Формирование в среде ГИС электронной матричной карты для автоматизированного выбора экологически безопасного маршрута трассы трубопровода. При выборе оптимального маршрута трассы необходимо электронную синтетическую карту пригодности территории для прокладки трассы линейно-протяженного объекта перевести из векторной в регулярно-ячеистую модель данных, которая представляет собой совокупность регулярных пространственных (территориальных) ячеек правильной геометрической формы. Она основана на способах квантования пространства с помощью регулярных сеток, каждый элемент которых может быть описан неограниченным набором атрибутов. Важное свойство регулярно-ячеистой модели данных — неразрывная связь между пространственной и атрибутивной информацией в единой прямоугольной матрице, положение элементов которой определяется номерами строки и столбца.

Пространственным разрешением регулярно-ячеистой модели является величина принятой ячейки. В зависимости от решаемой задачи она может изменяться от одного до нескольких сотен метров. Преобразование векторной модели пространственных данных в растровую называется rasterization.

Блок 11. Автоматизированный выбор в среде ГИС экологически безопасного маршрута трассы трубопровода с учетом устойчивости земель. Для нахождения оптимального маршрута трассы применяется алгоритм Дейкстры, позволяющий определять кратчайшее расстояние от одной из вершин графа до всех остальных. Поскольку степень пригодности территории для прокладки трассы линейно-протяженного объекта представлена в дискретном виде, для использования этого алгоритма была определена связность ячеек сетки в виде шаблона «ферзя», что позволяет минимизировать целевую функцию. При этом основные правила построения графа связности ячеек сетки заключаются в следующем: 1) центры ячеек сетки служат узлами графа; 2) связь между соседними ячейками сетки дугами графа. Граф связности строится как соединение фиксированного количества соседних ячеек сетки его дугами. Присваивание степени пригодности территории для прокладки трассы линейно-протяженного объекта на каждой дуге осуществляется по изотропной модели, в которой все значения пригодности рассчитываются с учетом местоположения узла на сетке.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Особенности реализации разработанной методики рассмотрим на примере выбора трассы для прокладки трубопроводной системы на модельной территории, расположенной в арктической зоне Сибири.

При построении концептуальной информационной модели пригодности территории для прокладки трассы трубопровода были рассмотрены основные виды воздействий трубопроводных систем на природную среду, к которым относятся: 1) механическое повреждение и сведение растительного покрова в полосе строительства, в том числе вырубка ценных пород деревьев; 2) нарушение режима обитания диких животных и традиционных путей их миграции; 3) сокращение пастбищных площадей; 4) загрязнение поверхностных и грунтовых вод и т. д.

Например, в арктической зоне Сибири при сведении растительного покрова увеличивается протаивание грунта и, как следствие, активизируются эрозийные процессы. Так, в тундре и лесотундре на трассах трубопроводов, проложенных по песчаным и супесчаным грунтам, скорость роста оврагов достигает 15–20 м/год, что приводит к деградации почвенного и растительного покрова.

Исходя из особенностей воздействия трубопроводов на природные ландшафты арктической зоны Сибири для картографического моделирования были выбраны три фактора и десять признаков, их характеризующих. Основные факторы, учитывающиеся при картографическом моделировании: 1) рельеф; 2) почвенный покров; 3) растительный покров.

Пригодность *рельефа* для прокладки трассы трубопровода определяется крутизной его склонов и проявлением негативных процессов рельефообразования (эрозийных, мерзлотных, оползневых, карстовых и суффозионных).

Пригодность *почвенного покрова* для прокладки трассы трубопровода связана с его устойчивостью к загрязнению тяжелыми металлами, закислению, эрозийному смыву и подтоплению.

До тех пор пока тяжелые металлы прочно связаны с составными частями почвы и труднодоступны, их отрицательное влияние на почву и растения незначительно. Однако если почвенные условия способствуют переходу тяжелых металлов в почвенный раствор, появляется прямая опасность их попадания в растения, а затем в организм человека и животных. К почвенным условиям, значительно влияющим на доступность тяжелых металлов, относятся: механический состав почв, их кислотность, содержание органического вещества, катионно-анионная обменная способность и водно-воздушные свойства почв. Тяжелые металлы значительно ограничивают биологическую деятельность, ингибируют процессы нитрификации, которые влияют на плодородие почв.

Кислотность почв — одна из основных почвенных характеристик — обусловлена ходом почвообразовательного процесса, в котором важную роль играют почвообразующие породы, переувлажненность почвы, микроорганизмы, растения и ряд других факторов. Главная причина кислой реакции почв — выщелачивание оснований из верхних горизонтов почвы под воздействием промывного режима, характерного для исследуемого региона, и замещение их водородом молекул воды или водородом органических и минеральных кислот. На повышение кислотности почв влияют выпадения из атмосферы, поглощение почвой из воздуха кислотообразующих компонентов в ходе микробиологических, химических и физических процессов. Кислотность создает неблагоприятные условия для роста и развития растений. Одним из основных негативных воздействий является повышение подвижности алюминия, который обладает свойствами фитотоксиканта.

Эрозийный смыв вызывает ухудшение физических свойств почв, развитие или усиление процессов оглеения и тиксотропности, замедление окислительно-восстановительных ферментативных реакций, ухудшение количественных показателей водного стока, его стабильности, снижение качества грунтовых вод и т. д. Нарушения почвенного покрова также способствуют активизации плоскостной и линейной эрозии. Если почвы маломощные, то под воздействием оказывается весь почвенный профиль. Когда площадные и линейные сооружения образуют барьеры на пути миграции внутрисочвенного стока, он начинает осуществляться по поверхности, вызывая развитие линейной эрозии и подтопление территории.

Пригодность *растительного покрова* для прокладки трассы трубопровода определяется его устойчивостью к вырубке леса, механическому повреждению лесных биоценозов и пирогенным воздействиям. Оценка устойчивости лесных биоценозов к механическим повреждениям осуществляется по количеству преобладающей породы в составе древостоя и по его полноте. При максимальной густоте древостоя (в более сложных условиях для перемещения техники) степень механических повреждений оставляемых семенных куртин, подроста и возобновления самая высокая. Другим важным фактором, влияющим на устойчивость к механическим повреждениям, является наличие в составе древостоя

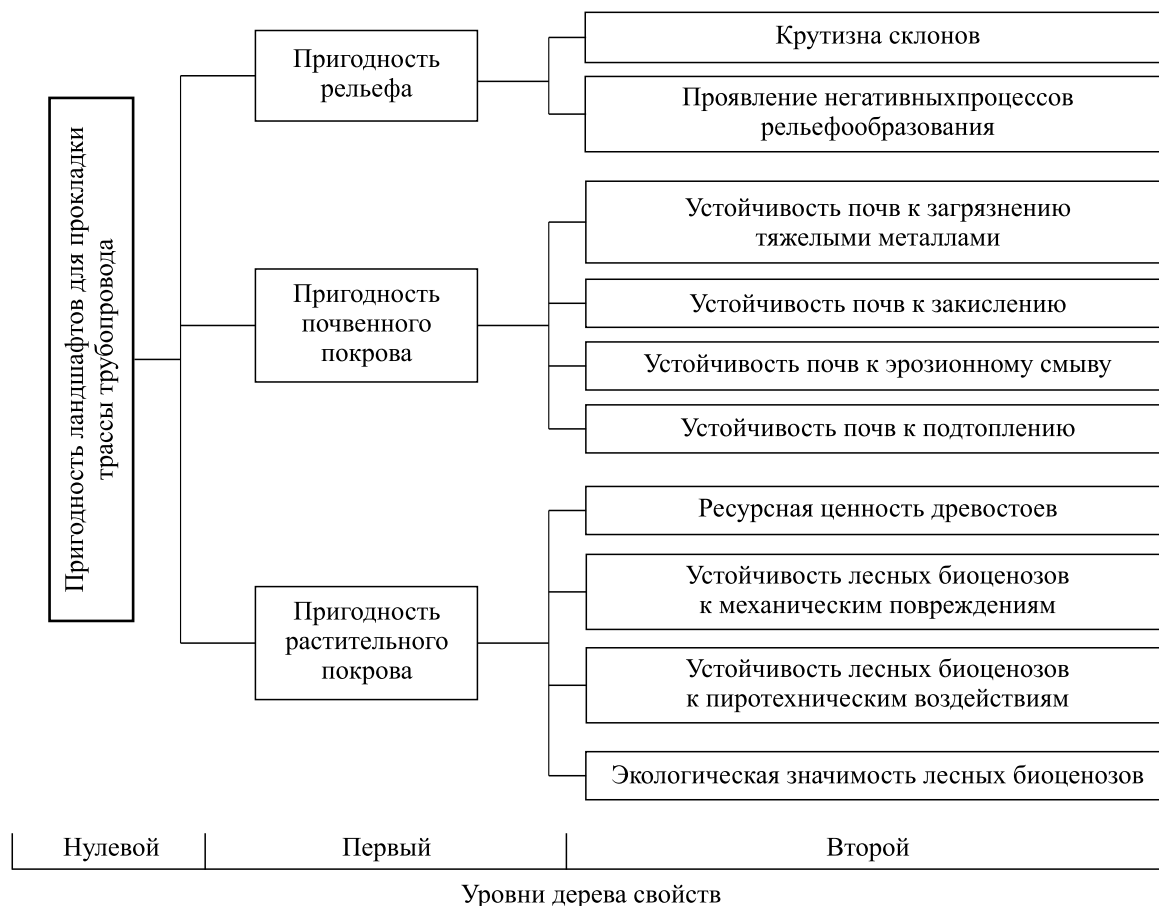


Рис. 2. Дерево свойств пригодности территории для прокладки трассы трубопровода, построенное для картографического моделирования в среде ГИС.

того или иного вида доминирующей породы и ее способности к интенсивному восстановлению. Так, по данным Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С. М. Кирова и Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства, наиболее часто страдает ель, которая очень чувствительна к повреждениям, поскольку они приводят к заражению ее гнилями, причем скорость распространения их по стволу выше, чем у других пород.

При оценке устойчивости лесных биоценозов к пирогенным воздействиям предлагается использовать шкалу распределения типов леса и лесных участков по классам пожарной опасности.

На основе концептуальной информационной модели при реализации процедуры картографического моделирования пригодности территории для прокладки трассы трубопровода в арктической зоне Сибири было построено дерево свойств (рис. 2).

Затем для каждого показателя, входящего в дерево свойств, путем экспертного опроса были определены нормированные весовые коэффициенты (табл. 1). В экспертном опросе участвовали восемь специалистов, имеющих необходимые теоретические знания и опыт работы в области проектирования и строительства трубопроводов. В качестве экспертов были привлечены сотрудники компаний «Спецгазремстрой», «Стройнефтегаз», «Газстройпроект», «Газэнергосервис», «Стройгазмонтаж» и др.

Для определения эталонных значений показателей (табл. 2) использовались фондовые и литературно-справочные материалы.

Пригодность территории для прокладки трассы трубопровода оценивалась по пяти классам: 1-й — очень непригодные, 2-й — непригодные, 3-й — средней пригодности, 4-й — пригодные, 5-й — очень пригодные. Для показателей, участвующих в оценке, между классами были введены левое и правое граничные значения (табл. 3).

Затем были разработаны четыре квалиметрические шкалы: 1) абсолютных показателей; 2) относительных показателей; 3) взвешенных показателей; 4) сводных показателей.

Таблица 1

Ненормированные и нормированные весовые коэффициенты

Свойства первого уровня	\bar{P}	Свойства второго уровня	\bar{P}	P
Пригодность рельефа	0,467	Крутизна склонов	0,528	0,247
		Проявление негативных процессов рельефообразования	0,472	0,220
Пригодность почвенного покрова	0,216	Устойчивость почв к загрязнению тяжелыми металлами	0,178	0,038
		Устойчивость почв к закислению	0,213	0,046
		Устойчивость почв к эрозионному смыву	0,321	0,069
		Устойчивость почв к подтоплению	0,288	0,062
Пригодность растительного покрова	0,317	Ресурсная ценность древостоев	0,282	0,089
		Устойчивость лесных биоценозов к механическим повреждениям	0,125	0,040
		Устойчивость лесных биоценозов к пиротехническим воздействиям	0,239	0,076
		Экологическая значимость лесных биоценозов	0,354	0,113

Таблица 2

Эталонные значения показателей, участвующих в интегральной оценке пригодности территории для прокладки трассы трубопровода

Свойства первого уровня	Свойства второго уровня	Эталонные значения показателей (w_{β})
Пригодность рельефа	Крутизна склонов, град.	0
	Проявление негативных процессов рельефообразования, балл	10
Пригодность почвенного покрова	Устойчивость почв к загрязнению тяжелыми металлами, балл	10
	Устойчивость почв к закислению, балл	10
	Устойчивость почв к эрозионному смыву, т/га в год	1
	Устойчивость почв к подтоплению, балл	10
Пригодность растительного покрова	Ресурсная ценность древостоев, балл	10
	Устойчивость лесных биоценозов к механическим повреждениям, балл	10
	Устойчивость лесных биоценозов к пиротехническим воздействиям, балл	10
	Экологическая значимость лесных биоценозов, балл	10

После разработки квалиметрических шкал с использованием ГИС MapInfo на исследуемую территорию было создано 10 факторных (аналитических) карт для каждого показателя, характеризующего оцениваемые факторы. Факторные карты создавались с использованием оцифрованных слоев базовой картографической основы, почвенной и ландшафтной карт.

Затем путем суммирования созданных факторных (аналитических) карт в среде ГИС с использованием операции «топологический оверлей» было осуществлено деление исследуемой территории на расчетные участки, представляющие собой элементарные ареалы. Для каждого расчетного участка были определены абсолютные значения показателей и с использованием зависимостей (2), (3) и (4) в среде ГИС рассчитаны взвешенные (сводные) показатели. Полученные значения взвешенных показателей автоматизированно распределялись по классам пригодности расчетных участков для прокладки трубопроводов в соответствии с квалиметрической шкалой (см. табл. 3).

Взвешенные показатели были обобщены на ландшафтном уровне с использованием зависимости (8). Созданная электронная синтетическая карта была переведена из векторного в регулярно-ячеистый вид.

Нахождение оптимального маршрута трассы трубопровода осуществлялось с использованием алгоритма Дейкстры, позволяющего определять кратчайшее расстояние от одной из вершин графа до всех остальных с принятыми геоэкологическими ограничениями.

Таблица 3

Квалиметрическая шкала сводных показателей границ классов пригодности территории для прокладки трассы трубопровода

Номер класса	Наименование класса	Сводные показатели границ класса
1	Очень непригодные	0,4544–0,5635
2	Непригодные	0,5636–0,6726
3	Средней пригодности	0,6727–0,7818
4	Пригодные	0,7819–0,8909
5	Очень пригодные	0,8910–1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше методические подходы к картографическому моделированию в среде ГИС трасс трубопроводов с геоэкологическими ограничениями позволят обеспечить экологически безопасное природопользование в арктической зоне Сибири [13]. Их отличительной особенностью является новый взгляд на интегральную оценку пригодности природных ландшафтов для прокладки трасс трубопроводов, основанный на методологии квалиметрического анализа. Суть данной методологии заключается в том, что пригодность природного ландшафта для различных видов использования рассматривается как совокупность его наиболее важных свойств, представленных в виде иерархической структуры, в которой свойства вышестоящих уровней связаны со свойствами нижестоящих уровней, являющихся первичными. Самый нижний, нулевой уровень представляет собой комплексное свойство, характеризующее пригодность природного ландшафта для его антропогенного освоения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16–05–00715–а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пластинин Л. А., Батуев А. Р., Клевцов Е. В., Котельникова Н. В., Ступин В. П. Картографо-космическая система комплексного мониторинга природных ресурсов в геосистемах Байкальского региона // Дистанционные исследования и картографирование структуры и динамики геосистем. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. — С. 51–54.
2. Пластинин Л. А., Ступин В. П., Олзоев Б. Н. Космический мониторинг окружающей среды каскада ангарских водохранилищ (Иркутская область) // Материалы VIII Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2012». — Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. геодез. академии, 2013. — Т. 2. — С. 107–113.
3. Пластинин Л. А., Осипов Г. К., Плюснин В. М., Ступин В. П., Хиленко В. В. Геоинформационное обеспечение картографо-космического мониторинга Арктической зоны Сибири // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 4. — С. 15–21.
4. Фёдоров В. Н. Оценка гидрологических функций ландшафтов на основе индикационных многопараметрических моделей водосбора // Ландшафтно-гидрологический анализ территорий. — Новосибирск: Наука, 1972. — С. 145–157.
5. Корытный Л. М. Бассейновый подход в географии // География и природ. ресурсы. — 1991. — № 1. — С. 161–166.
6. Антипов А. Н., Фёдоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 254 с.
7. Дмитриев В. В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. — 2010. — Т. 2, № 3. — С. 507–520.
8. Дмитриев В. В., Огурцов А. Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 7. — 2014. — Вып. 4. — С. 114–129.
9. Осипов А. Г., Дмитриев В. В. Методика эколого-географического обоснования аграрного освоения территории // Региональная экология. — 2004. — № 1–2 (22). — С. 107–114.
10. Осипов А. Г. Многокритериальная оценка земельных ресурсов на основе квалиметрического анализа // Региональная экология. — 2003. — № 1–2. — С. 31–39.
11. Осипов А. Г. Теория и практика интегральной оценки состояния и устойчивости земель природно-аграрных систем: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — СПб., 2016. — 40 с.
12. Арефьев Н. В., Бреусов В. П., Осипов Г. К. Основы формирования природно-аграрных систем: Теория и практика. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 533 с.
13. Plyusnin V. M. Ecological Safety of Siberia // Contemporary problems of Ecology. — 2014. — Vol. 7, N 6. — P. 597–603.

Поступила в редакцию 27 сентября 2016 г.